فصلنامه علوم محیطی، دوره نوزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

۷۱-۹۰

بررسی عامل‌های مؤثر بر تغییرات خورندگی و ترسیب در طول رودخانه گرگانرود، استان گلستان

مجتبی قره محمودلو[۱*]، نادر جندقی[۱] و مریم صیادی[۲]

[۱] گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

[۲] گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت۱۳۹۹/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۰۴/۲۱

قره محمودلو، م.، ن. جندقی و م. صیادی. ۱۴۰۰. بررسی عامل‌های مؤثر بر تغییرات خورندگی و ترسیب در طول رودخانه گرگانرود، استان گلستان. فصلنامه علوم محیطی. ۱۹(۲): ۷۱-۹۰.

سابقه و هدف: خورندگی و رسوب‌گذاری آب فرآیندهای فیزیکوشیمیایی هستند که سبب کاهش مقدار جریان آب در لوله‌های انتقال آب، کاهش عمر مفید تأسیسات آبرسانی، افزایش مصرف انرژی برای انتقال آب و بروز برخی بیماری‌ها در مصرف‌کنندگان می‌گردد. پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تمایل خوردگی و ترسیب در طول مسیر رودخانه گرگانرود یکی از مهمترین رودخانه‌های دشت گرگان از ارتفاعات البرز تا خلیج گرگان انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از نتایج آنالیز ۱۱ پارامتر فیزیکوشیمیایی (شامل: کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، کلراید، سولفات، کل جامدات محلول، هدایت الکتریکی، دما و pH) رودخانه گرگانرود مربوط به چهار ایستگاه هیدرومتری (لزوره، ارازکوسه، قزاقلی و بصیرآباد) در یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۳ - ۱۳۸۳) استفاده شد. ابتدا تغییرات میانگین سالانه پارامترهای کیفی نمونه‌های آب در طول دوره آماری مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه بررسی شد. سپس به‌منظور بررسی هیدروشیمیایی رودخانه گرگانرود در ایستگاه‌های مورد مطالعه از دیاگرام‌های مثلثی استفاده شد. در مرحله بعد تغییرات میزان سختی آب به‌عنوان یک پارامتر کیفی مهم در بخش‌های صنعت، کشاورزی و شرب در طول رودخانه گرگانرود بررسی شد. برای پیش‌بینی و احتمال رسوب و یا انحلال برخی از کانی‌های کربناته (نظیر کلسیت، دولومیت) و تبخیری (نظیر انیدریت، ژیپس و هالیت) در طول مسیر حرکت رودخانه گرگانرود از سنجه‌های اشباع کانی‌های بیان شده استفاده شد. سپس روند تغییرات سنجه‌های خورندگی لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و لارسون - اسکلد، نسبت خوردگی و همچنین پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم آب رودخانه گرگانرود در چهار ایستگاه بررسی شد. در مرحله بعد با استفاده از آزمون آماری واریانس یکطرفه به بررسی سطح معناداری سنجه‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شد. در نهایت ارتباط بین اندیس‌های اشباع کانی‌ها با سنجه‌های خورندگی، نسبت خوردگی و همچنین پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم بررسی شد.

نتایج و بحث: براساس تجمع و الگوی پراکندگی نمونه‌ها در دیاگرام مثلثی، تیپ غالب آب در رودخانه گرگانرود در حاشیه ارتفاعات بیکربناته می‌باشد و با ورود به دشت و افزایش غلظت یون کلراید تمایل به رسیدن به بلوغ کامل یعنی تیپ کلروره سدیک دارد. نتایج حاصل از سختی

* Corresponding Author: *Email Address*. mmahmoodlu@gonbad.ac.ir
http://dx.doi.org/10.52547/envs.33366

در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد که در طول مسیر حرکت آب میزان این پارامتر افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از برخی سنجه‌های اشباع مربوط به کانی‌های کربناته و تبخیری نشان داد که آب رودخانه در کل مسیر نسبت به کانی‌های کربناته بالا اشباع و نسبت به کانی‌های تبخیری تحت اشباع می‌باشد. براساس سنجه‌های رایزنر، پوکوریوس و لارسون - اسکولد آب تمایل به خورندگی دارد. اگرچه از حاشیه ارتفاعات تا خلیج گرگان میزان خاصیت رسوب‌گذاری آب رودخانه گرگانرود افزایش می‌یابد. نتایج میزان پتاسیل ترسیب کربنات کلسیم و سنجه لانژلیه نشان داد که آب رودخانه گرگانرود در کل طول مسیر تمایل به رسوب‌گذاری دارد. بررسی ارتباط بین اندیس‌های اشباع با سنجه‌های خوردگی و پتانسیل ترسیب، نشان از رابطه خطی بین سنجه‌ها کیفی و اندیس‌های اشباع دارد. نتایج حاصل از آزمون آماری نشان از وجود اختلاف معنادار سنجه‌های محاسبه شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد.

نتیجه‌گیری: اگرچه براساس نتایج هیدروشیمیایی، عامل اصلی کنترل کننده شیمی آب رودخانه گرگانرود واکنش آب - سنگ می‌باشد اما عامل‌هایی همچون نفوذ آب شور خلیج گرگان در قسمت‌های انتهایی رودخانه و ورود پساب‌های تصفیه نشده به آن در کل دشت گرگان سبب تکامل سریع هیدروشیمیایی رودخانه و رسیدن به تیپ کلروره سدیک شده است. افزایش میزان پارامترهای فیزیکوشیمیایی در مسیر رودخانه افزون بر افزایش میزان سختی آب، موجب کاهش میزان خورندگی و افزایش میزان رسوب‌گذاری آب شده است. نتایج آماری نشان از ارتباط خطی واضح بین اندیس‌های اشباع و سنجه‌های خورندگی و ترسیب در آب دارد.

واژه‌های کلیدی: آب‌های سطحی، پارامترهای فیزیکوشیمیایی، خوردگی، رسوب‌گذاری، سنجه‌های کیفی و کمی.

مقدمه

خوردگی آب پدیده‌ای است که در اثر تماس مواد با محیط اطراف به‌وجود می‌آید. فرآیند خوردگی در دوشاخه مهم بررسی می‌شود که شامل خوردگی حاصل از فرسایش و خوردگی الکتروشیمیایی است. نوع اول شامل تخریب مواد توسط عامل‌های فیزیکی مانند برخورد مواد جامد معلق موجود در لوله های انتقال آب یا فاضلاب است. نوع دوم شامل ایجاد پیل الکتریکی و انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی بین محیط اطراف و ماده موجود در آن است (Dargahi *et al*., 2017). فرآیند خورندگی سبب ایجاد مشکل‌هایی همچون ایجاد حفره در لوله‌ها، کاهش طول عمر تأسیسات و هدررفت آب می‌شود که هزینه‌های زیادی را به‌دنبال خواهد داشت (Reyes *et al*., 2008).

براساس تحقیق‌های انجام شده در سال ۲۰۰۲ مشخص شد خسارت‌های وارد شده توسط فرآیند خورندگی در کشورهایی نظیر ژاپن، آمریکا، بریتانیا، استرالیا و چند کشور دیگر چند برابر تولید ناخالص داخلی بوده است (Mirzabeygi *et al*., 2016). افزون بر خسارت‌های مالی ناشی از خورندگی، مهمترین مسئله بهداشتی مربوط به خورندگی، حضور فلزهای سنگین می‌باشد. تحقیق‌ها نشان داده که سرب و کادمیوم دو فلز بالقوه سمی بوده که درنتیجه خوردگی لوله‌های شبکه توزیع می‌توانـد وارد بدنه آب شبکه توزیع شوند. به‌طوریکه آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده سرب را در گـروه B_2 سرطان‌زا در انسان طبقه‌بندی کرده است. چون این ماده خاصیت تجمعی داشته و مانع فعالیت آنزیم‌های مولد هموگلوبین شده و سبب کم‌خونی و ناراحتی‌های عصبی می‌شود. سایر محصول‌های جانبی خورندگی ازجمله مس، روی، آهن و منگنز جزء استانداردهای ثانویه آب هستند و بیشـتر از جنبـه زیباشناختی اهمیت دارند (Tabandeh *et al*., 2016). به‌طوریکه ایـن فلزها موجب لکه‌دار شدن ظرف‌ها و مزه فلزی در آب می‌شوند. عامل‌های زیادی در فرآیند خورندگی تأثیرگذارند که از مهمترین آن‌ها می‌توان به pH، درجه حرارت، سختی، اسیدیته، کلر باقیمانده، کل جامدات محلول، نمک‌های محلول و میکروارگانیسم‌ها در آب اشاره کرد (Refait *et al*., 2015).

تمایل آب به خورندگی و رسوب‌گذاری با بررسی پایداری آب مشخص می‌شود. آب پایدار تمایل بـه خورندگی و رسوب‌گذاری کمی دارد و مقادیر آن برای نوع استفاده متفاوت است (Świetlik *et al*., 2012). کاربرد سنجه‌های خورندگی روشی غیرمستقیم در اندازه‌گیری و تشخیص

ساده تمایل آب بـه خورندگی و رسوب‌گذاری می‌باشد. سنجه‌های متداول عبارتند از: سنجه‌های اشباع لانژلیه[1]، سنجه پایداری رایزنر[2]، سنجه تهاجمی[3]، سنجه پوکوریوس[4] و سنجه لارسون - اسکلد[5] (Shams *et al*., 2012). سنجه کمی مهم دیگری با عنوان پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم[6] (CCPP) وجود دارد که توسط لانژلیه به‌منظور پیش‌بینی خورنده و یا رسوب‌گذار بودن آب ارائه شد. این سنجه نیازمند استفاده از روش‌های حل عددی کامپیوتری می‌باشد که این مسئله سبب شده تا در بیشتر مطالعات انجام شده به ندرت مورد استفاده قرار گیرد. این سنجه بر حسب میلی‌گرم بر لیتر بیان می‌شود.

بهره‌گیری همزمان از چند سنجه خورندگی می‌تواند با اطمینان بیشتری وضعیت تعادلی آب را برای انجام اقدام‌های کنترلی ارائه دهد. رسوب‌گذاری فرآیندی است که در آن کاتیون‌های دوظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم با سایر مواد محلول در آب واکنش داده و به شکل لایه‌ای در جداره داخلی لوله ته‌نشین می‌شوند (Mudali and Rai, 2008). متداول‌ترین لایه رسوبی ایجاد شده از جنس کربنات کلسیم می‌باشد. فرآیند رسوب‌گذاری می‌تواند سبب مشکل‌هایی مانند مسدود شدن لوله‌ها، کاهش دبی عبوری و افزایش افت فشار در شبکه شود که این امر نیز موجب افزایش هزینه بهره‌برداری تأسیسات آبی خواهد شد (Liang *et al*., 2013).

تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با وضعیت خورندگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی صورت گرفته است که در ادامه به این مطالعات اشاره می‌گردد. Gheshlaghi *et al*. (2014) در بررسی محیط زیستی رودخانه گرگانرود شهر گنبدکاووس به این نتیجه رسیدند که، تیپ نمونه‌های آب در نمونه‌های محدوده شهر کلروه‌سدیک و در نمونه‌های خارج از محدوده شهر سولفاته‌سدیک می‌باشد. همچنین غلظت عناصر بالقوه سمی در تمامی نمونه‌های آب، بالاتر از مقادیر استاندارد در رودخانه‌های جهان است. در تحقیقی Malakootian *et al*. (2014) در رفسنجان با استفاده از چهار سنجه لانژلیه، رایزنز، پوکوریوس و تهاجمی به این نتیجه رسیدند که آب منطقه مورد مطالعه در محدوده رسوب‌گذار است. Nazarian and Faridgigloo (2015) به بررسی کیفیت شیمیایی آب رودخانه گرگانرود در ایستگاه نوده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که، با توجه به نمودار پایپر، آب رودخانه گرگان رود در محل این ایستگاه از تیپ آب‌های شورمزه بوده وبراساس سختی کل، از نوع سخت می‌باشند. بیشتر پارامترهای مورد بررسی در ایستگاه نوده روند صعودی و معنی‌دار در بلندمدت داشته‌اند. به‌طور کلی روند نزولی دبی جریان در فصل‌های مختلف سال و روند افزایشی میزان املاح موجود در آب، کاهش کیفیت شیمیایی آب را جهت استفاده‌های گوناگون سبب خواهد شد. Mirzabeygi *et al*., (2016) در بررسی سنجه‌های خورندگی و رسوب‌گذاری آب شرب روستاهای استان خراسان رضوی به این نتایج دست یافتند که، وضعیت آب در بخش‌های مورد مطالعه در محدوده خورنده می‌باشد. اما براساس سنجه لانژلیه، آب در تمامی منطقه‌های رسوب‌گذار می‌باشد. در پژوهشی Shahmohammadi *et al*. (2018) به بررسی خوردگی منابع آب شرب روستای سروآباد پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که، براساس سنجه لانژلیه در برخی منطقه‌ها منابع آبی تمایل به حل کربنات کلسیم را دارند در حالیکه در برخی منطقه‌های دیگر تمایل به رسوب کربنات کلسیم وجود دارد. براساس سنجه‌های پوکوریوس و رایزنر نیز آب خورنده می‌باشد.

راهکارهای زیادی توسط دانشمندان و محققان بـه‌منظور جلوگیری از پدیده‌های خوردگی و رسوب‌گذاری در تأسیسات بیان شده است. با این وجود بهره‌گیری از روش‌های پیش‌بینی کننده، توأم با استفاده از هر روش کنترل، می‌تواند بـه نحو مطلوب‌تری اثرها و خسارت‌های ناشی از این پدیده‌ها را در صنعت تصفیه آب کاهش دهد. بـا ایـن دیدگاه توجه به کیفیت آب تحویلی به مصرف‌کننده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد شد. بنابراین با توجه به

موارد بیان شده، پژوهش حاضر در راستای بررسی روند خوردگی آب رودخانه گرگانرود انجام شد.

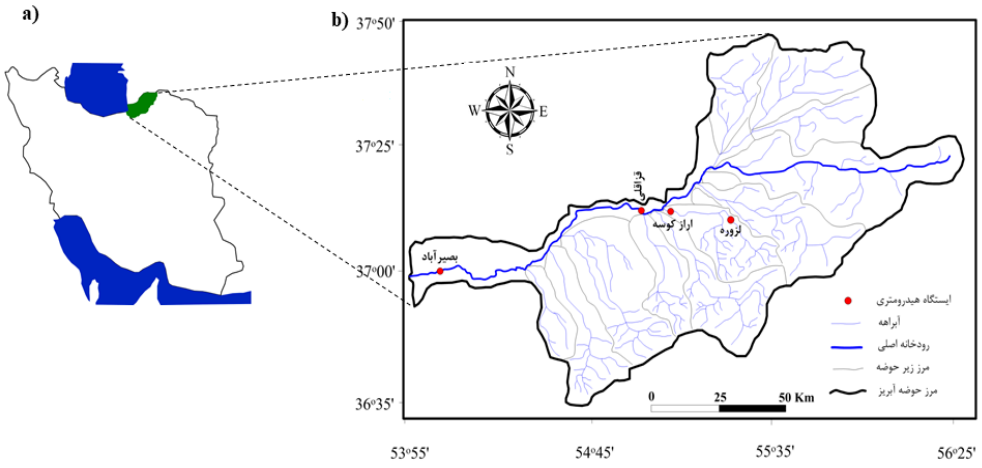
مواد و روش‌ها

- موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز گرگانرود با مساحت تقریبی ۱۰۶۰۰ کیلومتر مربع از جنوب مشرف به رشته کوه البرز شرقی، از شرق به کوه‌های آلاداغ و گلی داغ، از شمال به حوضه آبخیز اترک و از غرب به دریای خزر و حوضه آبخیز قره‌سو محدود می‌شود. طول رودخانه اصلی آن به نام گرگانرود بالغ بر ۲۵۰ کیلومتر است که در امتداد عمومی شرقی - غربی جریان دارد و از جنوب شرق دریای خزر (خلیج گرگان) به این دریا می‌پیوندد. مهمترین سرشاخه‌های آن دوغ، زاو، اوغان، چهل‌چای، زرین‌گل، رامیان، نوده، رودبار و محمدآباد است. براساس روش دومارتن، این حوضه به‌دلیل گستردگی دارای اقلیم متنوعی شامل خشک، نیمه خشک، معتدل مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب و مرطوب بوده و میانگین بارندگی در این حوضه از ۲۸۷ میلی‌متر در تیل آباد تا ۹۵۳ میلی‌متر در پس پشته، متغیر است. در این پژوهش، محدوده مورد مطالعه قسمتی از رودخانه گرگانرود به‌طول تقریبی ۱۰۰ کیلومتر از ایستگاه هیدرومتری لزوره در زیرحوضه چهل‌چای شروع و تا ایستگاه هیدرومتری بصیرآباد در نزدیکی خلیج گرگان امتداد دارد (شکل ۱).

-زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

در حوضه آبخیز گرگانرود، به لحاظ زمانی رنج وسیعی از سازندهای زمین‌شناسی از پالئوزوئیک تا عهد رخنمون دارد. به‌طورکلی مجموعه شیست‌ها و سنگ آهک‌های ژوراسیک و سنگ آهک‌های کرتاسه پایانی از مهمترین واحدهای سنگ چینه‌ای در منطقه مورد مطالعه هستند (شکل۱). در این میان سازندهای لار و مزدوران با سن ژوراسیک بالایی بیشترین رخنمون را در منطقه مورد مطالعه دارند. واحدهای سنگ چینه‌ای سنوزوئیک دارای گسترش محدودی در این منطقه است که در این میان نهشته‌های نئوژن شامل: شیل، مارن، ماسه سنگ و سنگ جوش دارای بیشترین گسترش سطحی است. به‌طور کلی این حوضه به‌طور عمده از رسوبات آبرفتی ماسه‌ای و سیلتی غیرمتراکم و سخت نشده کواترنری تشکیل شده است که از دامنه ارتفاعات تا نواحی پست دشت‌ها گسترش یافته‌اند و با دور شدن از ارتفاعات، دانه ریزتر می‌شود. به لحاظ ساختاری مهمترین گسل‌های فعال منطقه که دارای پیشینه لرزه‌خیزی هستند، گسل‌های کاسپین، شمال البرز، آشخانه، تکل‌کوه، کپه‌داغ و مراوه‌تپه می‌باشند. در این میان گسل‌های لرزه‌ای کاسپین و شمال البرز نهشته‌های کوارترنری را بریده‌اند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان گلستان و کشور (a) به‌همراه نقشه حوضه آبریز گرگانرود (b)

Fig. 1- Location of the study area in Golestan Province and country (a) together with Gorganroud Watershed map (b)

روش کار

ابتدا به بررسی هیدروشیمیایی آب در چهار ایستگاه مورد مطالعه روی رودخانه گرگانرود پرداخته شد. بدین منظور از اطلاعات آنالیز نتایج پارامترهای فیزیکوشیمیایی (شامل: کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، بی‌کربنات، کلراید، سولفات، کل جامدات محلول، هدایت الکتریکی، دما و pH) در طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ مربوط به چهار ایستگاه هیدرومتری (لزوره، ارازکوسه، قزاقلی و بصیرآباد) در یک فاصله مکانی تقریبی ۱۰۰ کیلومتر استفاده شد (جدول ۱). یکی از محدودیت‌های این پژوهش در دسترس نبودن اطلاعات آماری تمامی ایستگاه‌های واقع روی رودخانه گرگانرود به‌منظور آنالیز دقیق‌تر روند تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی و درنتیجه تغییرات خورندگی و ترسیب در طول مسیر آن بود. از چهار ایستگاه هیدرومتری انتخاب شده در این پژوهش دو ایستگاه هیدرومتری لزوره و ارازکوسه روی زیرحوضه چهل‌چای و دو ایستگاه هیدرومتری قزاقلی و بصیرآباد روی شاخه اصلی گرگانرود واقع شده‌اند. زیرحوضه چهل‌چای یکی از زیرحوضه‌های اصلی گرگانرود است که کمابیش در تمامی فصل‌های سال پرآب بوده و در نتیجه دارای داده‌های کیفی کاملی نسبت به سایر زیر حوضه‌ها می‌باشد. اگرچه بررسی‌های اولیه نشان داد که کمابیش تمامی زیر حوضه‌های گرگانرود قبل از رسیدن به رودخانه اصلی به لحاظ پارامترهای کیفی وضعیت مشابهی دارند.

جدول۱- نتایج پارامترهای فیزیکوشیمیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۹۳ - ۱۳۸۳ (غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها برحسب meq/l، TDS برحسب mg/l، EC برحسب µmho/cm و دما بر حسب°C)

Table 1. Physicochemical parameters of the study area stations within 2004 to 2014 (anions and cations in meq/l, TDS in mg/l, EC in µmho/cm, and temperature in °C)

ایستگاه Station	آماری Statistical	کلسیم Ca	منیزیم Mg	سدیم Na	پتاسیم K	بیکربنات HCO_3	سولفات SO_4	کلراید Cl	کل جامدات محلول TDS	هدایت الکتریکی EC	پی اچ pH	دما Temperature
لزوره Lazoreh	Average	2.6	2.3	2.1	0.05	3.7	1.3	2.1	436.7	681.2	7.8	17.3
	Min	2.1	1.8	1.6	0.04	3.2	0.85	1.7	374.4	593.2	7.6	10.9
	Max	3	2.9	2.9	0.07	4.2	1.8	2.8	507.9	800	8.1	23.8
ارازکوسه Arazkoseh	Average	4	4.4	8.02	0.08	5.05	4.5	6.9	974.9	1574.8	7.8	17.88
	Min	2.5	3.2	5.2	0.07	4.1	2.4	4.4	705.8	1103	7.6	10.75
	Max	5.9	6.7	11.5	0.11	6.9	7	9.9	1381.3	2170.3	8	25.03
قزاقلی Ghazaghli	Average	6	7.9	16.9	0.13	5	10.5	15.3	1799.1	2940.5	7.8	17.62
	Min	3.4	3.9	5.8	0.08	4.1	3.8	5.2	813.3	1315.7	7.7	10.55
	Max	9.4	13.4	34.7	0.29	6.3	22.8	28.9	3305.5	5355	7.9	24.69
بصیرآباد Basirabad	Average	9.8	18.3	34.8	0.1	4.8	25.3	33	3682	5848.5	7.8	16.25
	Min	5.7	8.1	10.8	0.1	4.3	10.7	9.6	1337.7	2355.1	7.6	9.69
	Max	19.6	39.1	70.4	0.2	5.9	58.3	65.8	6971.1	1174.6	8	22.81

نمونه‌های آب از تمامی ایستگاه‌ها به‌صورت ماهانه توسط شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان جمع‌آوری و پارامترهای بیان شده در آزمایشگاه شیمی آب این شرکت اندازه‌گیری شده است. تمامی نتایج آنالیز پارامترهای فیزیکوشیمیایی استفاده شده در این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان جمع‌آوری شد. سپس متوسط سالیانه پارامترهای بیان شده، محاسبه شده است. در این پژوهش ابتدا هیدروشیمی رودخانه گرگانرود در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از نمودارهای زمانی و دیاگرام مثلثی انجام شد. سپس تغییرات سختی آب به‌عنوان یک پارامتر کیفی آب در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی در طول رودخانه مسیر رودخانه بررسی شد. جهت تعیین تغییرات کیفیت آب رودخانه گرگانرود در بخش صنعت در طول مسیرش از جبهه ارتفاعات تا خلیج گرگان

از سنجه‌های کیفی لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس، لارسون اسکلد و نسبت خوردگی و سنجه کمی پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم برای بررسی آب در بخش صنعت به‌کار گرفته شدند. به‌منظور بررسی وجود اختلاف بین ایستگاه‌ها و سنجه‌های کیفی محاسبه شده از آزمون آنالیز واریانس یکطرفه استفاده شد. همچنین از سنجه‌های اشباع انیدریت، کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت جهت پیش‌بینی و احتمال رسوب و یا انحلال برخی از کانی‌ها در مسیر حرکت رودخانه استفاده و در نهایت ارتباط بین اندیس‌های اشباع کانی‌ها با سنجه‌های خورندگی بررسی شد. برای محاسبه سنجه‌های کیفی، رسم نقشه و آنالیزهای آماری از نرم‌افزارهای آکواچم[۷]، سورفر[۸] و اس‌پی‌اس‌اس[۹] استفاده شد.

- سختی آب

سختی آب یک سنجه بسیار مهم برای ارزیابی کیفیت آب برای استفاده در بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت می‌باشد (Sheikhy Narany *et al*., 2014). به لحاظ پزشکی، آب سخت سبب بروز سنگ کلیه، اختلالات قلبی و عروقی و شیوع برخی از انواع سرطان‌ها می‌شود (Durvey *et al*., 1991). آب‌های سخت همچنین می‌توانند سبب تشکیل رسوب و پوسته در آبگرمکن‌ها، لوله‌های انتقال آب، پمپ‌های چاه‌ها، دیگ‌های بخار و همچنین وسایل پخت و پز شوند. از آنجاییکه غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم در آب‌های طبیعی بیش از یون‌های دیگر است سختی آب براساس غلظت این دو یون محاسبه می‌شود. این دو کاتیون ممکن است با تشکیل ترکیبات کربناته و غیرکربناته سبب ایجاد سختی در آب شوند. سختی کل (برحسب $CaCO_3$) نمونه‌های آب را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد (Bhat *et al*., 2018):

$$[CaCO_3] = 2.5[Ca^{2+}] + 4.1[Mg^{2+}] \quad (۱)$$

غلظت یون‌ها در رابطه ۱ برحسب میلی اکی والان بر لیتر می‌باشد. در این تحقیق، طبقه‌بندی آب رودخانه گرگانرود براساس میزان سختی براساس جدول ۲ انجام شد.

- سنجه‌های کیفیت آب در بخش صنعت

در اصل بـرای بررسـی وضعیت کیفیت آب در بخش صنعت، دو خاصیت خورندگی و رسوب‌گـذاری مـورد ارزیـابی قرار می‌گیرد.

جدول ۲ - طبقه‌بندی سختی آب براساس میزان کربنات کلسیم و غلظت یون کلسیم (Aksever *et al*., 2015)

Table 2. Water hardness classification based on $CaCO_3$ values and calcium ion concentration (Aksever *et al*., 2015)

سختی (Hardness)	کربنات کلسیم (mg/l) Calcium carbonate		کلسیم (mg/l) Calcium
	طبقه بندی ۱ Classification 1	طبقه بندی ۲ Classification 2	
سبک (Soft)	0-50	0-75	0-20
نسبتا سبک (Moderately soft)	51-100	-	21-40
کمی سخت (Slightly hard)	101-150	-	41-60
نسبتا سخت (Moderately hard)	151-200	76-150	61-80
سخت (Hard)	201-300	151-300	81-120
خیلی سخت (Very hard)	>300	>300	>120

به‌طور کلی همه مواد معدنی تـشکیل دهنـده اجـزا یـک رسوب، از آن گروه نمک‌هایی هستند که در اثر شرایط مختلف از قبیل افـت فـشار، تغییـر دمـا، تغییر جریان، تغییر pH و .... می‌توانند ته‌نشین شـوند. به‌عنوان نمونه آب بـا درجـه سختی بسیار (شامل کلسیم و منیزیم بالا) در اثر گـرم شـدن و جـدا شـدن مقداری از گازکربنیک وابسته به آن‌ها، در جدار لوله ایجاد رسوب می‌کند و سبب کاهش ظرفیت انتقال آب می‌گردد.

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی کیفیت آب رودخانه گرگانرود در بخش صنعت از سنجه‌های کیفی لانژلیه، رایزنر،

پوکوریوس، لارسون اسکلد، نسبت خوردگی و سنجه کمی پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم استفاده شد (جدول ۳).

جدول۳- طبقه‌بندی آب در بخش صنعت براساس سنجه‌های خورندگی و ترسیب

Table 3. Classification of water used in industry section based on corrosion and precipitation indices

سنجه Index	مقدار سنجه Index value	طبقه بندی Classification	رابطه Equation	رفرنس References
سنجه اشباع لانژلیه (LSI)	LSI>0	آب فوق اشباع بوده و تمایل به رسوب $CaCO_3$ دارد. Water is supersaturated with respect to $CaCO_3$	$LSI = pH - pH_s$	You *et al*. (2001); Clesceri (2005)
	LSI=0	آب خنثی می‌باشد. Water is considered to be neutral		
	LSI<0	آب تحت اشباع بوده و پتانسیل تجزیه $CaCO_3$ را دارد. Water is undersaturated with respect to $CaCO_3$		
سنجه اشباع رایزنر (RSI)	RSI<6	آب فوق اشباع بوده و تمایل به رسوب $CaCO_3$ دارد. Water is supersaturated with respect to $CaCO_3$	$RSI = 2(pH_s) - pH$	Strauss and Pukorious (1984)
	6<RSI<7	آب خنثی می‌باشد. Water is considered to be neutral		
	RSI>7	آب زیر اشباع بوده و پتانسیل تجزیه $CaCO_3$ را دارد. Water is undersaturated with respect to $CaCO_3$		
سنجه پوکوریوس (PSI)	PSI<4.5	آب تمایل به رسوب‌گذاری دارد. Water has a tendency to encrust	$PSI = 2(pH_s) - pH_{eq}$	Strauss and Pukorious (1984)
	$4.5 \leq PSI \leq 6.5$	آب خنثی می‌باشد. Water is considered to be neutral		
	PSI>6.5	آب تمایل به خورندگی دارد. Water has a tendency to corrosion		
نسبت خوردگی (CR)	CR<1	انتقال آب با هر نوع لوله بدون مانع است. Water transfer is permitted by any type of pipe	$CR = \frac{\left[\frac{Cl}{35.5} + 2(\frac{SO_4^{2-}}{96})\right]}{\left[2(\frac{HCO_3^- + CO_3^{2-}}{100})\right]}$	Clesceri (2005)
	CR>1	انتقال آب با لوله فلزی مجاز نیست. Water transfer by metal pipe is not allowed		
سنجه لارسون - اسکلد (LS)	LSI<0.8	آب خاصیت خوردگی ندارد. Water does not have a corrosive character	$LSI = \frac{epmCl^- + epmSO_4^{2-}}{epmHCO_3^- + epmCO_3^{2-}}$	Larson and Skold (1958)
	0.8<LSI<1.2	آب خورنده است. Water has a tendency to corrosion		
	LSI>1.2	آب خاصیت خورندگی بالایی دارد. Water is highly corrosive		

نتایج و بحث

- هیدروشیمی

املاح موجود در منابع آب‌های سطحی نقش اصلی را در تعیین کیفیت آب در بخش‌های مختلف ایفا می‌کنند. از این‌رو با بررسی مقدار و تغییرات غلظت این املاح با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان عامل‌های مؤثر بر کیفیت منابع آبی، مانند تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی، شرایط اقلیمی، پیشروی، نفوذ و اختلاط آب‌های مختلف را مشخص نمود. نتایج اولیه هیدروشیمیایی نشان داد که میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی اصلی آب در ایستگاه لزوره واقع در بالادست حوضه نسبتاً کم و به سمت ایستگاه بصیرآباد در نزدیکی خلیج گرگان در حال افزایش می‌باشد (شکل۲). کاهش میزان کلسیم در نمونه‌های آبی می‌تواند به‌دلیل تبادل یونی بیان شده یا رسوب کلسیت باشد که احتمال مورد دوم را می‌توان در بخش مربوط به اندیس‌های اشباع بررسی نمود. با توجه به اینکه میزان بی‌کربنات نسبت به سولفات در آب ایستگاه‌های لزوره و ارازکوسه بیشتر می‌باشد، نشان دهنده نوع بی‌کربناته آب می‌باشد. غلظت کاتیون سدیم و آنیون کلراید به‌عنوان یون‌های سنجه شوری در ایستگاه پایین‌دست حوضه (بصیرآباد) به مراتب بیشتر از غلظت این دو یون در ایستگاه بالادست حوضه (لزوره) می‌باشند.

در کل، دشت گرگان باتوجه به نبود سیستم تصفیه فاضلاب، رودخانه‌ها مقصد نهایی فاضلاب‌های شهری و زه‌آب‌های کشاورزی هستند. از آنجاییکه یون‌های سدیم و کلر از ترکیبات اصلی فاضلاب‌های شهری هستند، بنابراین افزایش

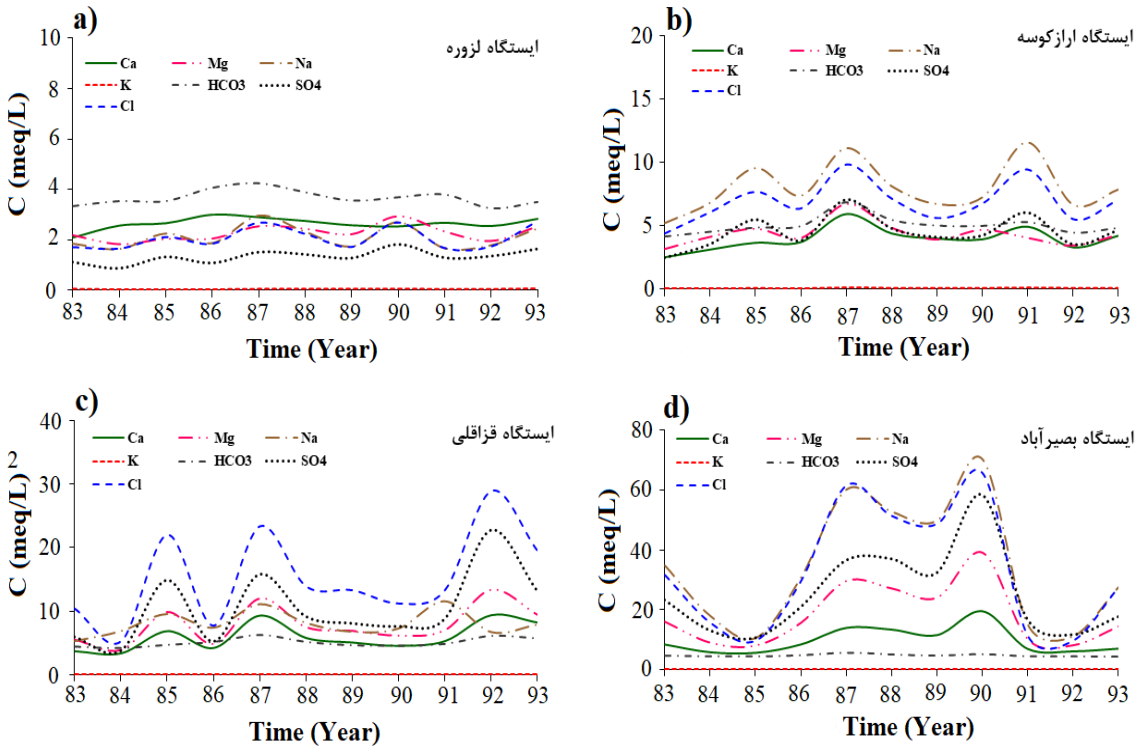
آن‌ها در طول مسیر رودخانه بدیهی به نظر می‌رسد. افزون براین شیب سطح توپوگرافی در پهنه وسیعی از دشت بسیار پایین و در برخی نقاط دشت منفی می‌باشد. این امر مانع از زهکشی آب‌های سطحی و رواناب‌ها به سمت خلیج گرگان می‌شود. بنابراین شرایط توپوگرافی منطقه، امکان نفوذ آب از خلیج گرگان به داخل رودخانه گرگانرود را می‌دهد. این امر سبب افزایش غلظت یون‌های سدیم و کلر در بخش انتهایی رودخانه گرگانرود می‌شود. باتوجه به شیب بسیار کم دشت و در پی آن سرعت کم آب در قسمت‌های انتهایی رودخانه، منشأ سدیم می‌تواند غیر از موارد بیان شده، چه‌بسا از کانی آلبیت[۱۰] و تبادل یونی طبیعی باشد. به بیان دیگر، فرآیند تبادل کاتیونی و جانشینی یون‌های دو ظرفیتی مانند منیزیم و کلسیم موجود در منابع آبی با سدیم موجود در رس‌ها که گسترش خوبی در پهنه دشت گرگان دارند، می‌تواند سبب آزاد شدن این یون در آب شود (Mahmoodlu *et al.*, 2018):

(۲)

$$Mg^{2+} + 2Na^{+} - Caly \rightarrow Mg^{2+} - Caly + 2Na^{+}$$

(۳)

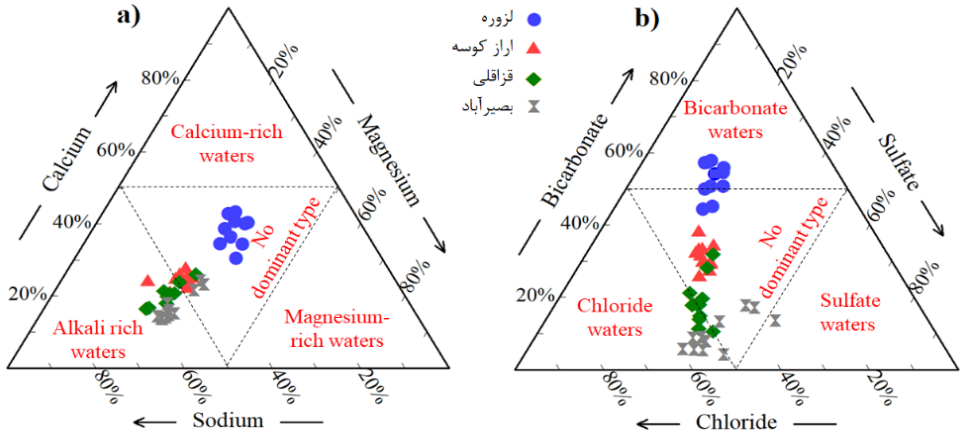
$$Ca^{2+} + 2Na^{+} - Caly \rightarrow Ca^{2+} - Caly + 2Na^{+}$$



شکل ۲- تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در رودخانه گرگانرود

Fig. 2- Changes of physicochemical parameters in studied stations in Gorganroud River

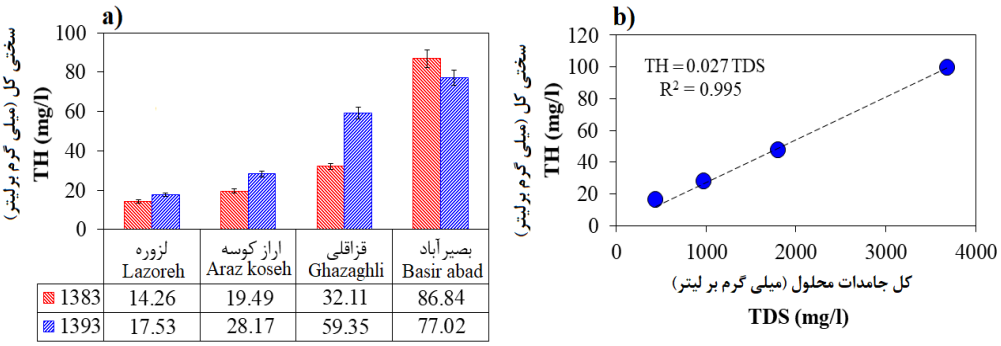
در این پژوهش به‌منظور بررسی شیمی کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی نمونه‌های آبی مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه از دیاگرام‌های مثلثی استفاده شد. براساس این دیاگرام (مثلث کاتیون‌ها)، منیزیم کاتیون غالب آب در بالاست رودخانه گرگانرود (ایستگاه لزوره) می‌باشد. این آنیون در طول مسیر رودخانه، جای خود را به سدیم می‌دهد به‌طوریکه در بقیه ایستگاه‌ها بویژه دو ایستگاه آخر (قزاقلی و بصیرآباد) این کاتیون به بیشترین مقدار خود می‌رسد (شکل ۳-a). برخلاف مثلث کاتیونی، مثلث آنیونی تبعیت بیشتری از تکامل سکانس آنیونی دارد. به‌طوریکه در بالادست جریان بیکربنات آنیون غالب رودخانه است. در میانه‌های مسیر (ایستگاه اراز کوسه) یون سولفات غالب می‌شود و در انتهای مسیر (ایستگاه بصیرآباد) آنیون کلراید غالب می‌شود (شکل۳-b).



شکل۳- دیاگرام سه‌گانه $Ca^{2+}-Mg^{2+}-Na^{+}$ برای تعیین کاتیون غالب(a) و $HCO_3^- - SO_4^{2-} - Cl^-$ برای تعیین آنیون غالب (b)

Fig. 3- the triangle diagram of $Ca^{2+}-Mg^{2+}-Na^{+}$ for determining the dominant cation (a) and $HCO_3^- - SO_4^{2-} - Cl^-$ for determining the dominant anion

همانطور که انتظار می‌رفت میزان سختی محاسبه شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه در طول مسیر حرکت آب افزایش می‌یابد (شکل ۴-a). به‌طوریکه آب رودخانه گرگانرود در بالادست به لحاظ سختی سبک و بتدریج با نزدیک شدن به خلیج گرگان در رده نسبتا سخت (جدول۲، طبقه‌بندی۲) قرار می‌گیرد. این مورد با افزایش میزان غلظت یون‌ها در جهت آب مطابقت دارد. با توجه به میزان غلظت بالای منیزیم نسبت به کلسیم می‌توان دریافت که سختی نمونه‌های آب بیشتر تحت تأثیر کاتیون منیزیم می‌باشد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات پارامتر بیان شده رابطه کاملا خطی با کل جامدات محلول در آب رودخانه گرگانرود دارد (شکل۴-b). از این‌رو با داشتن کل جامدات محلول در رودخانه گرگانرود می‌توان سختی کل را در طول مسیر آن محاسبه نمود.



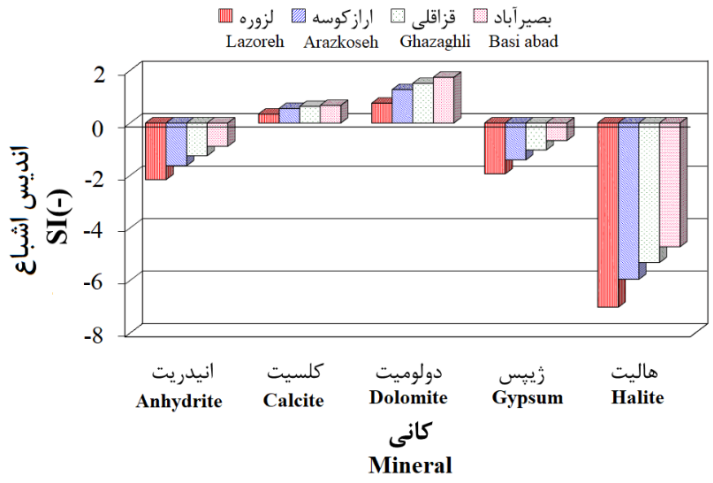
شکل ۴- تغییرات سختی (a) و رابطه بین سختی و کل جامدات محلول (b) در ایستگاه‌های مورد مطالعه (TH: سختی کل، TDS: کل جامدات محلول در آب)

Fig. 4- Hardness changes (a) and relation between total dissolve solids (b) in studied stations (TH: total hardness, TDS: total dissolved solids in water)

- سنجه‌های اشباع

از جمله سنجه‌های مهمی که جهت بررسی و تکامل هیدروشیمیایی منابع آبی مورد استفاده قرار می‌گردد. سنجه اشباع کانی‌های مختلف است. درصورتیکه سنجه اشباع نسبت به یک کانی مثبت باشد این امر نشان دهنده فوق اشباع بودن آن کانی در آب بوده و احتمال ته‌نشینی کانی در آب وجود دارد. ولی اگر سنجه اشباع کمتر از صفر باشد، آب نسبت به این کانی تحت اشباع بوده و می‌تواند بیشتر از آن نیز انحلال یابد (Rajmohan and Elango, 2004). با استفاده تخمین سنجه کانی‌های مختلف برای نمونه‌های آب رودخانه گرگانرود در سطح منطقه مورد مطالعه و ترسیم تغییرات مکانی آن‌ها می‌توان میزان

واکنش‌های بین آب و سازندهای مختلف اطراف دشت، سنگ کف و نفوذ آب شور را بررسی نمود و درجه اشباع شدگی آب را از نظر هرکدام از کانی‌های اصلی تحلیل نمود. نتایج سنجه اشباع نشان داد که مقادیر سنجه اشباع کانی‌های آب رودخانه گرگانرود در مسیر حرکت آب روند افزایشی نشان می‌دهـد (شکل۵). این امر می‌تواند دلیلی بر تکامـل هیدروشیمیایی آب رودخانه گرگانرود باشد. سنجه‌های اشباع دولومیت و کلسیت در طول رودخانه گرگانرود مثبت می‌باشد، از این‌رو امکان رسوب کانی‌های بیان شده در آب وجود دارد. در مقابل مقادیر سنجه‌های اشباع ژیپس، هالیت و انیدریت در آب رودخانه گرگانرود در طول کل مسیر تحت اشباع هستند. این امر نشان از فراوانی کم کانی‌های سولفاته و کلروره در سازندهای منطقه دارد. با توجه به شکل۵، میزان سنجه‌های اشباع ژیپس، هالیت و انیدریت از ایستگاه لزوره به سمت خلیج گرگان افزایش پیدا کرده است. این امر با افزایش میزان غلظت برخی از یون‌ها نظیر کلراید، سولفات، سدیم و... همخوانی دارد. از مهمترین عامل‌های افزایش غلظت یون‌ها، افزون بر واکنش آب - سنگ می‌توان به ورود آب شور دریا به داخلی رودخانه به‌دلیل شیب کم و گاهی اوقات منفی دشت در قسمت‌های انتهایی دشت و همچنین ورود فاضلاب‌های خانگی (با توجه به فراوانی این یون‌ها سدیم، کلر، سولفات و...) و زه آب‌های کشاورزی به‌دلیل نبود سیستم جمع‌آوری فاضلاب در این استان اشاره کرد.



شکل۵- نمودار تغییرات سنجه‌های اشباع رودخانه گرگانرود در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Fig. 5- Plot of changes in saturated indices at the studied stations in Gorganroud River

- سنجه‌های خوردگی

در این پژوهش مقادیر سنجه‌های کیفیت آب در بخش صنعت (لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس، لارسون - اسکلد، نسبت خوردگی و پتانسیل ترسیب کربنات) برای رودخانه گرگانرود محاسبه شده و نتایج آن‌ها در جدول (۴) بیان شده است. با توجه به نتایج سنجه لانژلیه، آب در بالادست (ایستگاه لزوره) تا حدودی خورنده بوده و با حرکت جریان آب از سمت بالادست به سمت خلیج گرگان از خاصیت خورندگی آب کاسته شده و به سمت رسوب‌گذاری میل می‌کند. نتایج سنجه رایزنر بیانگر این است که، آب در ایستگاه لزوره خورنده بوده و قابلیت انحلال کربنات کلسیم را دارد و با حرکت جریان آب رودخانه گرگانرود به سمت پایین دست (ایستگاه بصیرآباد) کیفیت آب به سمت رسوب‌گذاری میل می‌کند. در سنجه پوکوریوس این امکان فراهم شده‌است که رابطه بین وضعیت فوق‌اشباع آب و رسوب‌گذاری با لحاظ شدن دو پارامتر ظرفیت بافری آب و حداکثر مقدار ته‌نشینی ناشی از آب طبیعی در شرایط تعادل بررسی شود.

براساس نتایج جدول۴، میانگین سنجه پوکوریوس در طول دوره آماری مورد مطالعه نیز همانند سنجه‌های رایزنر و لانژلیه، در بالادست (ایستگاه لزوره) خورنده بوده و با توجه

به مسیر حرکت آب به سمت خلیج گرگان (آب شور) از خاصیت خورندگی آن کاسته می‌شود.

جدول ۴- نتایج سنجه‌های کیفی لانژلیه(LSI)، رایزنر(RSI)، پوکوریوس(PSI)، لارسون - اسکلد(LS)، نسبت خوردگی (CR) و سنجه کمی پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم (CCPP) (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 4. Results of Langelier Saturation Index (LSI), Ryzner Saturation Index (RSI), Puckorius Scaling Index (PSI), Larson-Skold Index (LS) qualitative indices, corrosion ratio, and Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP) at the studied stations

ایستگاه Station	آماری Statistic	لانژلیه LSI	رایزنر RSI	پوکوریوس PSI	لارسون - اسکلد LS	نسبت خوردگی CR	سنجه کمی پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم CCPP
لزوره Lazoreh	میانگین Mean	-1.46	10.71	13.10	1.18	29.08	18.84
	کمترین Minimum	-1.71	10.35	12.69	0.73	23.39	11.36
	بیشترین Maximum	-1.16	11.11	13.51	3.73	37.25	27.83
	انحراف معیار Standard deviation	0.20	0.26	0.24	0.86	3.76	5.71
	واریانس variance	0.04	0.07	0.06	0.75	14.10	32.62
اراز کوسه Arazkoseh	میانگین Mean	-1.20	10.21	12.45	2.26	21.39	36.54
	کمترین Minimum	-1.45	9.68	11.61	1.64	13.76	23.90
	بیشترین Maximum	-0.97	10.70	13.05	2.92	29.31	70.29
	انحراف معیار Standard deviation	0.17	0.28	0.36	0.36	4.13	12.55
	واریانس variance	0.03	0.08	0.13	0.13	17.07	157.62
قزاقلی Ghazaghli	میانگین Mean	-1.05	9.91	12.15	4.97	۶/۲۵	31.74
	کمترین Minimum	-1.32	9.42	11.41	2.14	۲/۷۳	23.08
	بیشترین Maximum	-0.83	10.45	12.79	8.49	۱۰/۵۳	46.52
	انحراف معیار Standard deviation	0.19	0.36	0.46	1.98	۲/۴۸	7.99
	واریانس variance	0.03	0.13	0.21	3.94	۶/۱۴	63.83
بصیرآباد Basirabad	میانگین Mean	-0.88	9.58	11.87	11.79	17.56	21.58
	کمترین Minimum	-1.22	8.91	11.11	4.64	10.20	14.97
	بیشترین Maximum	-0.55	10.10	12.32	23.42	24.74	28.62
	انحراف معیار Standard deviation	0.25	0.43	0.44	6.18	4.29	4.08
	واریانس variance	0.06	0.19	0.19	38.20	18.41	16.66

در سنجه خورندگی لارسون - اسکولد نقش آنیون‌های سولفات، کلراید، کربناته و بی‌کربناته بر تمایل آب به

خورندگی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج سنجه لارسون - اسکلد، کلراید و سولفات موجود در آب ایستگاه لزوره ممکن است با تشکیل لایه‌های طبیعی مواجه شوند. اما میزان این سنجه در سایر ایستگاه‌ها نشان دهنده نرخ بالای خوردگی می‌باشد. بنابراین یون‌های سولفات و کلراید موجود در آب ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌توانند سیستم تعادل کربناته را مختل کرده و از تشکیل لایه رسوب محافظ جلوگیری کند. با توجه به نسبت خوردگی محاسبه شده برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول۴، انتقال آب با لوله‌هایی با استحکام و مقاومت بالا امکان‌پذیر می‌باشد و انتقال به‌وسیله لوله‌های فلزی امکان‌پذیر نمی‌باشد. سنجه دیگری که مورد ارزیابی قرار گرفت سنجه پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم (CCPP) می‌باشد که به‌دلیل کمی بودن نسبت به سنجه‌های دیگر وضعیت دقیق‌تری را از آب منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. این سنجه تخمینی از غلظت کربنات کلسیم می‌باشد که به‌منظور قرار گرفتن آب در وضعیت تعادل بایستی رسوب کند و یا حل شود. مقدار منفی این سنجه به مفهوم پتانسیل آب برای حل کردن رسوب کربنات کلسیم و مقدار مثبت آن نشان دهنده پتانسیل آب برای تشکیل رسوب است. میزان پتاسیل ترسیب کربنات کلسیم در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه از ۱۸/۸۴ تا ۳۶/۵۴ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. این میزان بیانگر رسوب‌گذار بودن آب منطقه می‌باشد.

یون‌هایی مانند کربنات، قادرند با تشکیل رسوب کربنات کلسیم، سرعت خوردگی را کاهش دهند. در این بین تأثیر میزان کل جامدات محلول در رسوب‌گذاری از دیگر عامل‌های ایجاد رسوب بیشتر می‌باشد. با توجه به افزایش میزان کل جامدات محلول از ایستگاه لزوره به سمت خلیج گرگان احتمال رسوب‌گذاری بدیهی به‌نظر می‌رسد. رسوب‌گذاری در بستر لوله‌های انتقال آب به‌عنوان عامل منفی در کاهش سطح مقطع عمل می‌کند. به‌طور کلی خاصیت آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه خورنده می‌باشد اما با توجه به مسیر حرکت آب رودخانه گرگانرود از خاصیت خورندگی آن کاسته می‌شود. Malakootian *et al*. (2014) در مطالعه‌ای در رفسنجان با استفاده از چهار سنجه لانژلیه، رایزنز، پوکوریوس و تهاجمی به این نتیجه رسیدند که آب منطقه مورد مطالعه در محدوده رسوب‌گذار است. Mirzabeygi *et al*. (2016) و Dargahi *et al*. (2017) در بررسی سنجه‌های خورندگی و رسوب‌گذاری آب شرب منطقه‌های مورد مطالعه‌شان این نتایج دست یافتند که، وضعیت آب در بخش‌های مورد مطالعه در محدوده خورنده می‌باشد. Shahmohammadi *et al*. (2018) به بررسی خوردگی منابع آب شرب روستای سروآباد پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که، براساس سنجه لانژلیه در برخی منطقه‌ها، منابع آبی تمایل به حل کربنات کلسیم را دارند در حالیکه در برخی مناطق دیگر تمایل به رسوب کربنات کلسیم وجود دارد. براساس سنجه‌های پوکوریوس و رایزنر نیز آب خورنده می‌باشد (Malakootian *et al*., 2014; Mirzabeygi *et al*., 2016; Dargahi *et al*., 2017; Shahmohammadi *et al*., 2018). نتایج این مطالعات با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.

به‌منظور بررسی ارتباط بین سنجه‌های اشباع با سنجه‌های کیفی خوردگی، این دو سنجه در مقابل هم رسم شده سپس نتایج ضریب همبستگی و معادلات بین آن‌ها در جدول ۵ نشان داده شد. براین اساس سنجه‌های اشباع لانژلیه، رایزنر و پوکوریوس، همبستگی بالایی با سنجه‌های اشباع دارند که این میزان همبستگی، نزدیک به یک می‌باشد. این موضوع تأییدی بر نتایج سنجه‌های اشباع و سنجه‌های کیفی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. سنجه لارسون - اسکلد به نسبت سه سنجه کیفی دیگر، همبستگی کمتری با سنجه‌های اشباع دارد. ضریب همبستگی این سنجه با سنجه‌های اشباع بین ۰/۶۰۹ تا ۰/۸۲۸ می‌باشد که بیشترین میزان همبستگی آن با سنجه اشباع انیدریت می‌باشد.

جدول ۵- نتایج ارتباط بین سنجه‌های اشباع و سنجه‌های خوردگی در منطقه مورد مطالعه [y :سنجه‌های کیفی (لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و لارسون – اسکلد)؛ x: سنجه‌های اشباع]

Table 5. Results of the relationship between saturation indices and corrosion indices in the study area [y: qualitative indices (LSI, RSI, PSI and LS); x: saturation indices]

سنجه‌اشباع Saturation indices		لانژلیه LSI	رایزنر RSI	پوکوریوس PSI	لارسون – اسکلد LS
انیدریت Anhydrite	معادله	$y = 0.4711x - 0.4566$	$y = -0.9253x + 8.7208$	$y = -1.0479x + 10.807$	$y = 8.4489x + 17.673$
	R^2	0.995	0.995	0.972	0.828
کلسیت Calcite	معادله	$y = 1.7164x - 2.0947$	$y = -3.3692x + 11.937$	$y = -3.9075x + 14.499$	$y = 26.774x - 9.5114$
	R^2	0.967	0.966	0.990	0.609
دولومیت Dolomite	معادله	$y = 0.6045x - 1.9514$	$y = -1.1871x + 11.656$	$y = -1.3598x + 14.151$	$y = 10.238x - 8.3409$
	R^2	0.998	0.998	0.998	0.7409
ژیپس Gypsum	معادله	$y = 0.4711x - 0.5602$	$y = -0.9253x + 8.9243$	$y = -1.0479x + 11.037$	$y = 8.4489x + 15.814$
	R^2	0.9945	0.995	0.972	0.828
هالیت Halite	معادله	$y = 0.2609x + 0.3465$	$y = -0.5124x + 7.1438$	$y = -0.583x + 9.005$	$y = 4.5705x + 31.451$
	R^2	0.999	0.999	0.986	0.794

- آنالیز آماری

در این پژوهش از آزمون پارامتریک آنالیز واریانس یک‌طرفه[11] استفاده شد. نتایج آنالیز واریانس یکطرفه در جدول ۶ نشان داده شده است. در این آزمون در صورتیکه اگر سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ باشد، بین گروه‌ها و یا متغیرها تفاوت معناداری وجود دارد. میانگین اختلاف در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به نتایج جدول۶، سنجه لانژلیه محاسبه شده برای ایستگاه لزوره با ایستگاه‌های قزاقلی و بصیر آباد دارای تفاوت معناداری می‌باشد. بدین معنی که سطح معناداری این سنجه بین ایستگاه‌ها کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. همچنین سنجه لانژلیه بین ایستگاه‌های قزاقلی و ارازکوسه نیز دارای سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. در رابطه با سنجه‌های رایزنر و پوکوریوس بین ایستگاه لزوره با سایر ایستگاه‌ها اختلاف معنادار وجود دارد. این در حالی است که سنجه‌های رایزنر و پوکوریوس محاسبه شده در ایستگاه ارازکوسه تنها با ایستگاه بصیرآباد دارای اختلاف معنادار می‌باشد. سنجه دیگری که در ایستگاه‌ها دارای تفاوت معنادار می‌باشد، سنجه لارسون - اسکولد است. این سنجه در ایستگاه بصیرآباد با ایستگاه‌های لزوره، ارازکوسه و قزاقلی دارای سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم در ایستگاه لزوره با ایستگاه‌های ارازکوسه و قزاقلی دارای اختلاف معنادار می‌باشد. همچنین بین ایستگاه‌های ارازکوسه و بصیرآباد نیز اختلاف معنادار وجود دارد. دلیل اختلاف بین سنجه‌های محاسبه شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه میزان فاصله آن‌ها از خلیج گرگان می‌باشد. هرچقدر که ایستگاه‌های نمونه‌برداری به خلیج گرگان نزدیکتر می‌شوند، میزان پارامترهای فیزیکوشیمیایی، نفوذ آب شور دریا، ورود پساب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های خانگی به رودخانه افزایش می‌یابد.

جدول۶- نتایج آنالیز واریانس یکطرفه برای سنجه‌های کیفی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 6. One-way ANOVA results for qualitative indices in the studied stations

متغیر وابسته (Dependent variable)	ایستگاه (I) Station (I)	ایستگاه (J) Station (J)	اختلاف متوسط(I-J) Mean difference (I-J)	خطای استاندارد Standard error	سطح معناداری Significance level
لانژلیه (LSI)	لزوره Lazoreh	ارازکوسه	-0.251	0.087	0.052
		قزاقلی	-0.413	0.087	0.001
		بصیرآباد	-0.585	0.087	0.000
	ارازکوسه Arazkoseh	لزوره	0.250	0.087	0.052
		قزاقلی	-0.151	0.087	0.390
		بصیرآباد	-0.333	0.087	0.006

ادامه جدول۶- نتایج آنالیز واریانس یکطرفه برای سنجه‌های کیفی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 6. One-way ANOVA results for qualitative indices in the studied stations

متغیر وابسته (Dependent variable)	ایستگاه (I) Station (I)	ایستگاه (J) Station (J)	اختلاف متوسط(I-J) Mean difference (I-J)	خطای استاندارد Standard error	سطح معناداری Significance level
لانژلیه (LSI)	قزاقلی Ghazaghli	لزوره	0.412	0.087	0.001
		ارازکوسه	0.150	0.087	0.390
		بصیرآباد	-0.170	0.087	0.267
	بصیرآباد Basirabad	لزوره	0.582	0.087	0.000
		ارازکوسه	0.333	0.087	0.006
		قزاقلی	0.170	0.087	0.267
رایزنر (RSI)	لزوره Lazoreh	ارازکوسه	0.500	0.145	0.014
		قزاقلی	0.800	0.145	0.000
		بصیرآباد	1.131	0.145	0.000
	ارازکوسه Arazkoseh	لزوره	-0.500	0.145	0.014
		قزاقلی	0.291	0.145	0.257
		بصیرآباد	0.623	0.145	0.001
	قزاقلی Ghazaghli	لزوره	-0.800	0.145	0.000
		ارازکوسه	-0.291	0.145	0.257
		بصیرآباد	0.333	0.145	0.174
	بصیرآباد Basirabad	لزوره	-1.130	0.145	0.000
		ارازکوسه	-0.631	0.145	0.001
		قزاقلی	-0.330	0.145	0.174
پوکوریوس (PSI)	لزوره Lazoreh	ارازکوسه	0.650	0.165	0.004
		قزاقلی	0.951	0.165	0.000
		بصیرآباد	1.231	0.165	0.000
	ارازکوسه Arazkoseh	لزوره	-0.650	0.165	0.004
		قزاقلی	0.300	0.165	0.344
		بصیرآباد	0.571	0.165	0.013
	قزاقلی Ghazaghli	لزوره	-0.951	0.165	0.000
		ارازکوسه	-0.300	0.165	0.344
		بصیرآباد	0.271	0.165	0.451
	بصیرآباد Basirabad	لزوره	-1.231	0.165	0.000
		ارازکوسه	-0.570	0.165	0.013
		قزاقلی	-0.271	0.165	0.451
لارسون - اسکلد (LS)	لزوره Lazoreh	ارازکوسه	-1.070	1.398	0.899
		قزاقلی	-3.781	1.398	0.078
		بصیرآباد	-10.612	1.398	0.000
	ارازکوسه Arazkoseh	لزوره	1.070	1.398	0.899
		قزاقلی	-2.712	1.398	0.302
		بصیرآباد	-9.534	1.398	0.000
	قزاقلی Ghazaghli	لزوره	3.781	1.398	0.078
		ارازکوسه	2.712	1.398	0.302
		بصیرآباد	-6.823	1.398	0.000
	بصیرآباد Basirabad	لزوره	10.612	1.398	0.000
		ارازکوسه	9.533	1.398	0.000
		قزاقلی	6.820	1.398	0.000
پتانسیل‌ترسیب کربنات‌کلسیم (CCPP)	لزوره Lazoreh	ارازکوسه	-17.962	3.508	0.000
		قزاقلی	-12.901	3.508	0.008
		بصیرآباد	-2.744	3.508	0.893

ادامه جدول۶- نتایج آنالیز واریانس یکطرفه برای سنجه‌های کیفی در ایستگاه‌های مورد مطالعه
Table 6. One-way ANOVA results for qualitative indices in the studied stations

متغیر وابسته (Dependent variable)	ایستگاه (I) Station (I)	ایستگاه (J) Station (J)	اختلاف متوسط(I-J) Mean difference (I-J)	خطای استاندارد Standard error	سطح معناداری Significance level
پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم (CCPP)	ارازکوسه Arazkoseh	لزوره	17.691	3.508	0.000
		قزاقلی	4.792	3.508	0.605
		بصیرآباد	14.950	3.508	0.002
	قزاقلی Ghazaghli	لزوره	12.904	3.508	0.008
		ارازکوسه	-4.793	3.508	0.605
		بصیرآباد	10.160	3.508	0.052
	بصیرآباد Basirabad	لزوره	2.741	3.508	0.893
		ارازکوسه	-14.952	3.508	0.002
		قزاقلی	-10.163	3.508	0.052

نتیجه‌گیری

خورندگی و رسوب‌گذاری از پیچیده‌ترین و پرهزینه‌ترین مشکل‌های مربوط به تولید آب جهت مصرف‌های مختلف است. فرآیند خورندگی سبب ایجاد مشکل‌هایی نظیر ایجاد حفره در لوله‌ها، کاهش طول عمر تأسیسات و هدررفت آب می‌شود که هزینه‌های زیادی را به‌دنبال خواهد داشت، از این‌رو پژوهش حاضر با هدف تعیین سنجه‌های خورندگی و رسوب‌گذاری و تغییرات آن‌ها در طول مسیر رودخانه گرگانرود انجام شد.

بررسی هیدروشیمیایی آب رودخانه گرگانرود نشان داد که، افزون بر فعال بودن واکنش بین آب - سنگ (فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی نظیر تبادل یونی)، نفوذ آب از خلیج گرگان به داخل رودخانه گرگانرود به‌دلیل شیب بسیار کم توپوگرافی در پهنه وسیعی از دشت و همچنین ورود زه‌آب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و روستایی به داخل آب به‌دلیل نبود سیستم جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه فاضلاب در دشت گرگان از عامل‌های اصلی در کنترل شیمی آب رودخانه گرگانرود از جبهه ارتفاعات تا خلیج گرگان می‌باشند.

براساس دیاگرام هیدروشیمیایی سه‌گانه، مثلث آنیونی تبعیت بیشتری از تکامل سکانس آنیونی دارد. به‌طوریکه در بالادست جریان تیپ غالب آب رودخانه، بیکربناته است. در میانه‌های مسیر و در انتهای مسیر (ایستگاه بصیرآباد) با غالب شدن آنیون کلراید، تیپ آب کلریده می‌شود. با افزایش یون‌های محلول در طول مسیر حرکت آب، میزان سختی محاسبه شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه در طول مسیر حرکت آب افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از محاسبه سنجه‌های اشباع برخی از کانی‌ها نشان داد که آب رودخانه گرگانرود در محدوده مورد مطالعه نسبت به سنجه‌های اشباع کلسیت و دولومیت فوق اشباع و نسبت به سنجه‌های اشباع انیدریت، ژیپس و هالیت تحت اشباع می‌باشند. البته این امر باتوجه به حلالیت بالای این سه کانی تبخیری در آب بدیهی به‌نظر می‌رسد. اگرچه در طول مسیر حرکت رودخانه گرگانرود به‌تدریج بر میزان اشباعیت این سه کانی تبخیری افزوده می‌شود.

براساس سنجه کیفی لانژلیه و کمی پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم، آب رودخانه گرگانرود از بالادست حوضه به سمت خلیج گرگان (خروجی حوضه) تمایل به رسوب‌گذاری دارد. اگرچه این تمایل از قسمت‌های میانی به بعد به شدت افزایش می‌یابد. درحالیکه نتایج حاصل از سنجه‌های کیفی رایزنر، پوکوریوس و لارسون - اسکولد نشان از خورنده بودن آب در کل مسیر حرکت آب رودخانه گرگانرود از جبهه ارتفاعات تا خلیج گرگان دارد که در طول مسیر حرکت آب به سمت خلیج گرگان از میزان خورندگی آب کاسته و بر میزان رسوب‌گذار بودن آن افزوده می‌شود. عامل‌هایی مانند بالا بودن میزان کلراید، کل جامدات

محلول و سولفات در برخی از منطقه‌ها سبب تشدید فرآیند خورندگی شده است.

براساس نتایج آزمون آماری آنالیز واریانس یکطرفه، سنجه‌های کیفی محاسبه شده در چهار ایستگاه‌های هیدرومتری واقع روی رودخانه گرگانرود دارای اختلاف معناداری می‌باشند. این موضوع به‌دلیل افزایش پارامترهای موجود در طول مسیر رودخانه و تأثیرگذاری آن بر میزان سنجه‌های کیفی می‌باشد. بررسی ارتباط بین سنجه‌های اشباع کانی‌ها مورد مطالعه با سنجه‌های کیفی خوردگی نشان از ارتباط خطی بین آن‌ها دارد. از این‌رو با داشتن یکی از این سنجه‌ها می‌توان سنجه دیگری را تخمین زد.

براساس مطالعات انجام شده بهترین و متداول‌ترین روش مورد استفاده برای کنترل فرآیند خورندگی (در قسمت‌های بالادست رودخانه)، تنظیم pH آب به‌وسیله آهک می‌باشد. به‌منظور کنترل این فرآیند مشکل‌ساز و پرهزینه باید از روش‌هایی نظیر رنگ زدن لوله‌ها، استفاده از لوله‌های مقاوم پلی‌اتیلنی به جای لوله‌های فلزی و آزبست - سیمان، پوشش دادن لوله‌ها، نگهداری مناسب، اجرای حفاظت کاتدی برای لوله‌های فلزی، تنظیم pH و تزریق مواد بازدارنده به سیستم توزیع استفاده شود.

تخلیه فاضلاب‌های شهری، روستایی و زه‌آب‌های کشاورزی تصفیه نشده به داخل رودخانه گرگانرود نقش مهمی در افزایش میزان املاح آب و در پی آن افزایش توان رسوب-گذاری آب رودخانه در طول مسیر حرکت آن دارد. از این‌رو پیشنهاد می‌شود در شهرهای مجاور رودخانه با احداث تصفیه خانه از ورود فاضلاب‌های شهری و خانگی قبل از تصفیه به داخل رودخانه گرگانرود خودداری شود. افزون بر این، شیب سطح توپوگرافی در پهنه وسیعی از دشت گرگان بسیار کم و در برخی منطقه‌ها منفی می‌باشد. این امر سبب نفوذ آب شور خلیج گرگان به داخل رودخانه گرگانرود و درپی آن افزایش میزان پارامترهای فیزیکوشیمیایی رودخانه گرگانرود در قسمت‌های انتهایی آن می‌شود. در اصل پیشروی جبهه آب شور در داخل رودخانه در انتهای فصل بهار و در طول فصل تابستان به‌دلیل برداشت بی‌رویه از آب رودخانه گرگانرود جهت استفاده در بخش کشاورزی بیشتر می‌باشد. از این‌رو اجرای یک برنامه مدیریتی برای استفاده از آب این رودخانه از سوی اداره جهاد کشاورزی استان گلستان و شرکت آب منطقه‌ای استان می‌تواند نقش مهمی در کاهش نفوذ آب شور و در پی آن کاهش خاصیت رسوب‌گذاری در قسمت‌های انتهایی رودخانه گرگانرود شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از شرکت آب منطقه‌ای گلستان به‌منظور در اختیار گذاشتن آمار کیفی رودخانه گرگانرود تشکر و قدردانی می‌شود. این مقاله حاصل قسمتی از نتایج طرح تحقیقاتی تحت عنوان "بررسی تکامل هیدروشیمیایی و مرگ کیفی آب رودخانه گرگانرود، استان گلستان" با شماره پرونده ۶/۱۹۰ و حمایت مالی دانشگاه گنبدکاووس می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

[1] Langelier Saturation Index (LSI)
[2] Ryzner Saturation Index (RSI)
[3] Aggressive Index (AI)
[4] Puckorius Scaling Index (PSI)
[5] Larson-Skold (LS)
[6] Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP)
[7] AquaChem
[8] Surfer
[9] SPSS
[10] Albite ($NaAlSi_3O_8$)
[11] One Way Anova

منابع

Aksever, F., Karagüzel, R. and Mutlutürk, M., 2015. Evaluation of groundwater quality and contamination in drinking water basins: a case study of the Senirkent-Uluborlu basin (Isparta-Turkey). Journal of Environmental Earth Sciences. 73(3), 1281-1293.

Dargahi, A., Amirian, F., Naderi, M., Shokri, R.

and Jamshidi, A., 2017. Assessment of scale formation and corrosion of drinking water supplies in dehloran (Iran) in 2014. Journal of Environmental Health Engineering. 4, 93-103.(in Persian with English abstract)

Clesceri, L.S., 2005. Standard method for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. 15: 3635-42.

Ghshlaghi, A., Teimori, A., Forghani Tehrani, G. and Jafari, H., 2014. Environmental contamination of Gorganrood water and sediment in district of Gonbad-Kavoos City. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches. 30(3), 81-94. (in Persian with English abstract)

Nazaryan, S. and Farid gigloo, B., 2015. Chemical quality survey and trends of water quality parameters at Nodeh Station of Gorganroud River, Golestan Province of Iran. Journal of Irrigation and Water Engineering. 5(3), 80-91.

Mahmoodlu, M.G., Heshmatpour, A., Jandaghi, N., Zare, A. and Mehrabi, H., 2018. Hydrogeochemical assessment of groundwater quality: Seyedan-Farooq Aquifer, Fars Province. Iranian journal of Ecohydrology. 5, 1241-1253.(in Persian with English abstract)

Larson, T.E. and Skold, R.V., 1958. Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron. Corrosion. 14, 43-46.

Liang, J., Deng, A., Xie, R., Gomez, M., Hu, J., Zhang, J., Ong, C.N. and Adin, A., 2013. Impact of elevated Ca^{2+}/Mg^{2+} concentrations of reverse osmosis membrane desalinated seawater on the stability of water pipe materials. Journal of Water and Health. 12, 24-33.

Malakootian, M., Mobini, M., Sharife, I. and Haghighifrad, A., 2014. Evaluation of corrosion and scaling potential of wells drinking water and aqueducts in rural areas adjacent to Rafsanjan Fault in during October to December 2013. Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences. 13, 293-304.(in Persian with English abstract)

Mirzabeygi, M., Mahvi, A., Naji, M. and Aaabasnia, A., 2016. Evaluation of corrosion and scaling indices of drinking water in the villages of Khorasan Razavi province. Journal of Research in Environmental Health. 2, 60-70.(in Persian with Engish abstract)

Mudali, U.K. and Rai, B., 2008. Corrosion Science and Technology: Mechanism, Mitigation and Monitoring. Narosa Publishing House. Pp. 586.

Rajmohan, N. and Elango, L., 2004. Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. Environmental Geology. 46, 47-61.

Refait, P., Jeannin, M., Sabot, R., Antony, H. and Pineau, S., 2015. Corrosion and cathodic protection of carbon steel in the tidal zone: Products, mechanisms and kinetics. Corrosion Science. 90, 375-382.

Reyes, A., Letelier, M., Delaiglesia, R., Gonzalez, B. and Lagos, G., 2008. Microbiologically induced corrosion of copper pipes in low-pH water. International Biodeterioration and Biodegradation. 61, 135-141.

Shahmohammadi, S., Noori, A., Amini, A., Shahmoradi, B., Sobhan Ardakani, S., Lee, S.M. and Pawar, R., 2018. A study on corrosion and scaling potential of drinking water supply resources in rural areas of Sarvabad, West of Iran. Journal of Advances in Environmental Health Research. 6, 52-60.

Shams, M., Mohamadi, A. and Sajadi, S.A., 2012. Evaluation of corrosion and scaling potential of

water in rural water supply distribution networks of Tabas, Iran. World Applied Sciences Journal. 17, 1484-89.

Strauss, S.D. and Puckorius, P.R. 1984. Cooling-water treatment for control of scaling, fouling, corrosion. Power. 128, S1-S24.

Świetlik, J., Raczyk-Stanislawiak, U., Piszora, P. and Nawrocki, J., 2012. Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts. Water Research. 46, 1-10.

Tabandeh, L., Khorramabadi, G., Karami, A., Atafar, Z., Sharafi, H., Dargahi, A. and Amirian, F., 2016. Evaluation of heavy metal contamination and scaling and corrosion potential in drinking water resources in Nurabad city of Lorestan, Iran. International Journal of Pharmacy and Technology. 8, 13137-13154.

You, S.H., Tseng, D.H. and Guo, G.L., 2001. A case study on the wastewater reclamation and reuse in the semiconductor industry. Resources, Conservation and Recycling. 32, 73-81.

Environmental Sciences Vol.19 / No.2 / Summer 2021

71-90

Investigating the factors affecting corrosion and precipitation changes along Gorganroud River, Golestan Province

Mojtaba G. Mahmoodlu[1*], Nader Jandaghi[1] and Maryam Sayadi[2]

[1] Department of Rangeland and Watershed Management, Agriculture and Natural Resources Faculty, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran
[2] Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 2020.04.14 Accepted: 202.07.11

G. Mahmoodlu, M., Jandaghi, N. and Sayadi, M., 2021. Investigating the factors affecting corrosion and precipitation changes along Gorganroud River, Golestan Province. Environmental Sciences. 19(2):71-90.

Introduction: Corrosion and precipitation are physicochemical processes that reduce the amount of water flow in water transfer pipes and the effective life of water supply facilities, increase the energy consumption for water transfer, and cause some diseases among consumers. The present study was conducted to investigate the corrosion tendency and precipitation along the Gorganroud River from highlands to the Gorgan Gulf.

Material and methods: In this study, the results of the analysis of 11 physicochemical parameters (Calcium, Magnesium, Sodium, Potassium, Bicarbonate, Sulfate, Chloride, total dissolved solids, electrical conductivity, temperature, and pH) of the Gorganroud River during a period of 10 years were used (2004-2014). First, the annual mean changes in the qualitative parameters of water samples during the statistical period of the studied stations were investigated. Then, triangular diagrams were used for hydrochemical assessment the Gorganroud River at the studied stations. Next, changes in water hardness as an important qualitative parameter in the industrial, agricultural, and drinking sectors were investigated along the Gorganroud River. Saturation indices were used to predict and the probability of precipitation or dissolution of some carbonate minerals (such as calcite and dolomite) and evaporites (such as anhydrite, gypsum, and halite) along the Gorganrood River. Then, the trend of changes in Langelier, Ryznar, Puckorius, Larson-Skold corrosion indices, corrosion ratio, and the calcium carbonate precipitation potential of Gorganroud River at four stations was investigated. Next, a one-way ANOVA test was used to investigate the significance level of indices in the studied stations. Finally, the relationship between mineral saturation indices and corrosion indices was investigated.

[*] Corresponding Author: *Email Address*. mmahmoodlu@gonbad.ac.ir
http://dx.doi.org/10.52547/envs.33366

Results and discussion: Based on the accumulation and distribution pattern of the samples in the triangular diagram, the dominant water type in the Gorganroud River was bicarbonate on the margin of heights, and as it enters the plain and the chloride ion concentration increases, it tends to reach full maturity, the sodium chloride type. Hardness increased along the water movement path. The results of saturation indices showed that the river's water was supersaturated with carbonate minerals and undersaturated with evaporite minerals. Based on Ryznar, Puckorius and Larson-Skold indices, Gorganroud River water tends to cause corrosion. However, the precipitation rate increased from the margin of highlands to Gorgan Gulf. The results of the calcium carbonate precipitation potential and Langelier Index indicated that Gorganroud River tends to precipitate over the study area. Investigation of the relationship between saturation indices and corrosion indices and calcium carbonate precipitation potential showed linear relationships between qualitative indices and saturation indices. The results of the statistical test showed a significant difference between the calculated indices in the studied stations.

Conclusion: Although based on the hydrochemical results the main factor controlling water chemistry of the Gorganroud River was the water-rock reaction, factors such as saline water intrusion of Gorgan Gulf in the lower part of the river and inflow of untreated effluents into the river caused rapid hydrochemical evolution of the river and reached the sodium chloride type. Increasing the number of physicochemical parameters along the river path in addition to increasing the water hardness, has reduced corrosion and increased precipitation rate. Statistical results showed a clear linear relationship between saturation indices and corrosion and sequestration indices in water.

Keywords: Surface waters, Physicochemical parameters, Corrosion, Qualitative and quantitative indices