

تکامل هیدروشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانرود

مجتبی قره محمودلو^(۱)، نادر جندقی^(۲) و مریم صیادی^(۲)

۱. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۸

چکیده

در این پژوهش، تکامل هیدروشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانرود در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری از حاشیه شمالی ارتفاعات البرز تا دریای خزر بررسی شد. بدین منظور از نتایج آنالیز ۱۱ پارامتر فیزیکوشیمیایی مربوط به چهار ایستگاه هیدرومتری در طی یک دوره آماری ده ساله استفاده شد. برای بررسی تکامل هیدروشیمیایی رودخانه از نمودارهای گیبس، استیف، پایپر، دوروف و همچنین پنج شاخص اشباع مربوط به کانی‌های کربناته، سولفات و کلروره استفاده شد. همچنین تغییرات کیفی آب در بخش‌های شرب (با استفاده از نمودار شولر)، کشاورزی (با استفاده از نمودار ویلکوکس) و صنعت (با استفاده از شاخص‌های خوردگی) در طول مسیر رودخانه گرگانرود بررسی شد. برای تجزیه واریانس داده‌ها از آزمون F و در نهایت از آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی برای تعیین تعداد عوامل تأثیرگذار بر هیدروشیمی آب استفاده شد. نتایج نشان داد که واکنش آب-سنگ، تبخیر و نفوذ آب شور دریای خزر از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده شیمی آب رودخانه هستند. همچنین تیپ غالب آب رودخانه گرگانرود در حاشیه ارتفاعات بیکربناته می‌باشد و با ورود به دشت، تمایل به رسیدن به بلوغ کامل یعنی تیپ کلروره سدیک دارد. در تمامی ایستگاه‌ها آب رودخانه نسبت به کلسیت و دولومیت فوق اشباع، اما نسبت به انیدریت، ژپس و هالیت تحت اشباع می‌باشند. اگرچه در جهت جریان بر میزان اشباعیت کانی‌های تخیری افزوده می‌شود، کیفیت آب برای شرب و کشاورزی در حاشیه ارتفاعات مناسب و با ورود به دشت و در ادامه مسیر به سمت دریای خزر بشدت کاهش می‌یابد. نتایج تمامی شاخص‌های کیفی در بخش صنعت نشان از افزایش خاصیت رسوب‌گذاری آب در طول مسیر رودخانه دارد. براساس نتایج آنالیز آماری، بیشترین تغییرات مربوط به پارامترهای فیزیکوشیمیایی بین ایستگاه لزوره در حاشیه ارتفاعات و ایستگاه قزاقلی واقع در قسمت میانی دشت دیده می‌شود و بعد از آن تا خروجی گرگانرود تغییرات فاحش و معنیداری بین پارامترهای کیفی آب مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: تکامل هیدروشیمیایی، کیفیت آب، اندیس اشباع، طبقه‌بندی کیفی آب، رودخانه گرگانرود.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل دستیابی به توسعه پایدار می‌باشد. بهره‌برداری از آب رودخانه‌ها مستلزم شناخت کمی و به‌ویژه کیفی آب رودخانه‌ها می‌باشد (Shen et al., 2014). اگرچه آب‌های سطحی از دیرباز توسط بشر قابل

رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین منابع آبی هر کشور در زمینه‌های کشاورزی، صنعتی، اقتصادی، آشامیدنی، ترابری و تفریحی هستند. همچنین سلامت و کیفیت آب آن‌ها

* نویسنده مرتبط: m.g.mahmoodlu@gmail.com

(2018) در پژوهشی به ارزیابی هیدروشمیایی آب ناشی از یخچال‌ها، دریاچه‌ها و آبراهه‌های منطقه داگو در شرق فلات تبت پرداختند. براساس این پژوهش، کلسیم و بی‌کربنات به‌ترتیب بیشترین کاتیون و آنیون در نمونه‌های آبی بودند. نمودار پایپر رسم شده برای منابع آبی نشان از تیپ غالب بی‌کربنات کلسیک در کل نمونه‌های منطقه دارد. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که میزان کل مواد جامد محلول در آب یخچال‌ها کمترین ولی در نهرها و رودخانه‌ها به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در پژوهشی Wu et al., (2018) با اندازه‌گیری ۱۵ پارامتر فیزیکوشیمیایی و میکروبی در چهار فصل متفاوت به ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌های تغذیه‌کننده دریاچه تایو^۱ (در چین) پرداختند. بدین منظور شاخص WQI^۲ برای تمام رودخانه‌ها در یک دوره یک ساله محاسبه کردند. میانگین شاخص محاسبه شده در دوره مورد مطالعه برابر ۵۵/۳۹ به دست آمد که این مقدار نشان از کیفیت متوسط آب دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که بالاترین میانگین شاخص WQI در فصل پاییز و کمترین مقدار آن مربوط به فصل زمستان می‌باشد. Laxmankumar et al., (2019) در پژوهشی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی ناحیه‌ای را در ایالت تلانگانا^۳ هند با تاکید به آلودگی فلوراید مطالعه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد واکنش آب-سنگ و تبخیر از مهم‌ترین فرآیندهای کنترل‌کننده شیمی آب زیرزمینی می‌باشند اگرچه فرآیندهای ژئوشیمیایی نظیر هوازدگی، تبادل یونی و فعالیت‌های انسانی نیز در تغییر شیمی آب زیرزمینی نقش دارند. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که میزان غلظت فلوراید در آب زیرزمینی در فصول قبل موسمی بیش از میزان استاندارد بهداشت جهانی است. حوضه‌ی آبریز گرگانرود با جهت شرقی-غربی در جنوب شرقی دریاچه‌ی خزر قرار دارد. این حوضه در دامنه‌های شمالی البرز واقع شده و آب حاصل از بارش‌ها و سامانه‌ی زهکشی خود را به دریای خزر می‌ریزد. آب رودخانه گرگانرود با توجه به مسیر طولانی‌اش تا رسیدن به دریای خزر، در بخش‌هایی از مسیر خود در معرض شدید انواع آلودگی‌ها

بهره‌برداری مستقیم بوده اما این منابع به‌راحتی توسط عوامل انسانی (نظیر فاضلاب‌های خانگی و صنعتی و زه‌آب‌های کشاورزی) و طبیعی (نظیر بارش، سازندهای زمین‌شناسی، نفوذ آب‌شور و ...) آلوده می‌شوند. کاهش کیفیت آب‌های جاری مانند رودخانه‌ها و نهرها یکی از نگرانی‌های حال حاضر جامعه بشری می‌باشد (Nwankwoala and Udom., 2017; Mishra et al., 2016; Xu et al., 2011). بنابراین انجام یکسری مطالعات جامع مبنی بر تعیین عوامل مؤثر در تغییر ترکیبات هیدروشمیایی و همچنین پایش کیفی آب آنها در طول مسیر حرکت‌شان می‌تواند کمک شایانی به شناسایی منابع آلاینده و در ادامه مدیریت ورود آلاینده‌ها به داخل رودخانه‌ها کند.

بررسی تکامل هیدروشمیایی منابع آبی می‌تواند اطلاعات مفیدی در زمینه تأثیر سازندهای تغذیه‌کننده و دربرگیرنده منابع آبی، مسیر جریان آب و نواحی تبخیر در اختیار قرار دهد. علاوه براین، توجه به کیفیت مطلوب فیزیکوشیمیایی و میکروبی آب در راستای نوع استفاده در بخش شرب، کشاورزی، صنعت و رهاسازی در محیط‌زیست ضروری به نظر می‌رسد. در برخی از مناطق، کنترل غلظت برخی آلاینده‌ها جهت تأمین سلامتی مردم لازم است که این‌گونه اقدامات شامل انجام آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی و میکروبی بر روی منابع تأمین آب می‌باشند (Arpine and Gayane, 2016). تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه بررسی هیدروشمیایی و کیفی آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام شده است که ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود. Batsaikhan et al., (2017) در پژوهشی به بررسی تأثیر فعالیت‌های معدنی بر روی کیفیت آب رودخانه‌ای در شمال مغولستان پرداختند. نتایج آنها نشان داد که، کیفیت آب رودخانه متأثر از انحلال مواد معدنی کربناته، فرآیندهای مختلف فرسایشی و فعالیت‌های انسانی مانند دامداری، کشاورزی و معدن‌کاوی می‌باشد. در تحقیقی (Islam et al., 2017) کیفیت آب زیرزمینی منطقه‌ای را در بنگلادش بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تیپ کلی آب منطقه مورد مطالعه شور بوده همچنین براساس نمودار گیبس، بارش عامل اصلی کنترل‌کننده شیمی آب می‌باشد. Zhao et al.,

1. Taiho

2. Water Quality Index

3. Telangana

تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای تعیین عوامل تاثیر گذار در ترکیب شیمیایی آب رودخانه گرگانود در هر ایستگاه می‌باشد.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز گرگانود با مساحت تقریبی آن 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 با نام گرگانود بیش از ۲۵۰ کیلومتر است که در امتداد عمومی شرقی-غربی جریان دارد و از جنوب شرق دریای خزر به این دریا می‌پیوندد. مهم‌ترین سرشاخه‌های آن دوغ، زاو، اوغان، چهل‌چای، زرین‌گل، رامیان، نوده، رودبار و محمدآباد است. براساس روش دومارتن، این حوضه به دلیل گستردگی دارای اقلیم متنوعی شامل خشک، نیمه‌خشک، معتدل مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب و مرطوب است و میانگین بارندگی در این حوضه از ۲۸۷ میلی‌متر در تیل‌آباد تا ۹۵۳ میلی‌متر در پس پشته متغیر (زیر حوضه چهل‌چای) می‌باشد (روحانی و همکاران، ۱۳۹۴).

در این پژوهش، گستره مورد مطالعه بخشی از رودخانه گرگانود بطول تقریبی ۱۰۰ کیلومتر از ایستگاه هیدرومتری لزوره در زیرحوضه چهل‌چای شروع و تا ایستگاه هیدرومتری بصیرآباد در نزدیکی دریای خزر امتداد دارد (شکل ۱).

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

در حوضه آبخیز گرگانود، به لحاظ زمانی، گستره وسیعی از سازندهای زمین‌شناسی از پالئوزوئیک تا عهد رخنمون دارد. به‌طور کلی مجموعه شیست‌ها و سنگ آهک‌های ژوراسیک و سنگ آهک‌های کرتاسه پایانی از مهم‌ترین واحدهای سنگ چینه‌ای در منطقه مورد مطالعه هستند (شکل ۱-ب). در این میان سازندهای لار و مزدوران با سن ژوراسیک بالایی بیشترین رخنمون را در منطقه مورد مطالعه دارند. واحدهای سنگ چینه‌ای سنوزویک دارای گسترش محدودی در این منطقه است که در این میان نهشته‌های نئوژن شامل: شیل، مارن، ماسه سنگ و کنگلومرا دارای

قرار دارد. این آلودگی‌ها در اثر دو عامل مهم طبیعی (زمین‌شناسی) و انسانی می‌باشد. در اثر فرسایش خاک توسط آب، با هر بارندگی مقدار بسیار زیادی از خاک زمین‌های اطراف شسته شده و به همراه جریانات آبی وارد رودخانه می‌شود. به طوری که رودخانه در فصول سیلابی و پرآب، بشدت گل‌آلود و دارای کدورت بالاست. همچنین وجود سازندهای تبخیری به همراه رسوبات مارنی در زیرحوضه دوغ و برخی دیگر از زیرحوضه‌ها بشدت شوری آب را بالا برده و در نتیجه کیفیت آب این رودخانه کاهش می‌دهد. در حدود ۳۹ درصد از کل مساحت حوضه آبخیز گرگانود را اراضی زراعی تشکیل می‌دهند که همه ساله انواع محصولات زراعی در آن کشت و برداشت می‌شوند. فعالیت‌های کشاورزی به همراه، مصرف انواع سموم دفع آفات نباتی و کودهای شیمیایی و آلی، باعث شده تا سالانه مقادیر زیادی از این مواد آبخوبی شده و وارد رودخانه گرگانود شوند. علاوه بر این، ظهور شهرها و آبادی‌های فراوان در مجاورت این رودخانه و ورود فاضلاب‌های شهری و روستایی بدون هیچ نوع تصفیه‌ای به داخل آن باعث کاهش شدید کیفیت آب از سرچشمه تا به دریای خزر شده است. در نتیجه ورود حجم بالایی از آلاینده‌های فیزیکی شیمیایی و میکروبی به رودخانه گرگانود به یکی از بزرگ‌ترین مسائل مهم زیست محیطی این رودخانه مهم شمالی کشور تبدیل شده است. از این رو بررسی روند تغییرات هیدروشیمیایی و کیفی آب رودخانه گرگانود (به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های استان گلستان) در طول مسیرش قبل از رسیدن به دریای خزر می‌تواند اطلاعات مفیدی به تحقیق سازمان‌های ذینفع ارائه دهد.

اهداف کلی این پژوهش به ترتیب: (۱) بررسی هیدروشیمیایی آب رودخانه گرگانود با استفاده از نمودارهای استیف، پایپر، دوروف و گیس، شاخص رول^۱ و همچنین برخی از شاخص‌های اشباع مربوط به کانی‌ها در طول مسیر رودخانه از حاشیه شمالی ارتفاعات خزر تا دریای خزر، (۲) بررسی تغییرات کیفی آب رودخانه گرگانود به لحاظ شرب، کشاورزی و صنعت در طول مسیر آن، (۳) استفاده از آزمون F جهت تجزیه واریانس و آزمون گیمز-هاول جهت بررسی اختلاف آماری بین تیمارها، (۴) استفاده از آنالیز

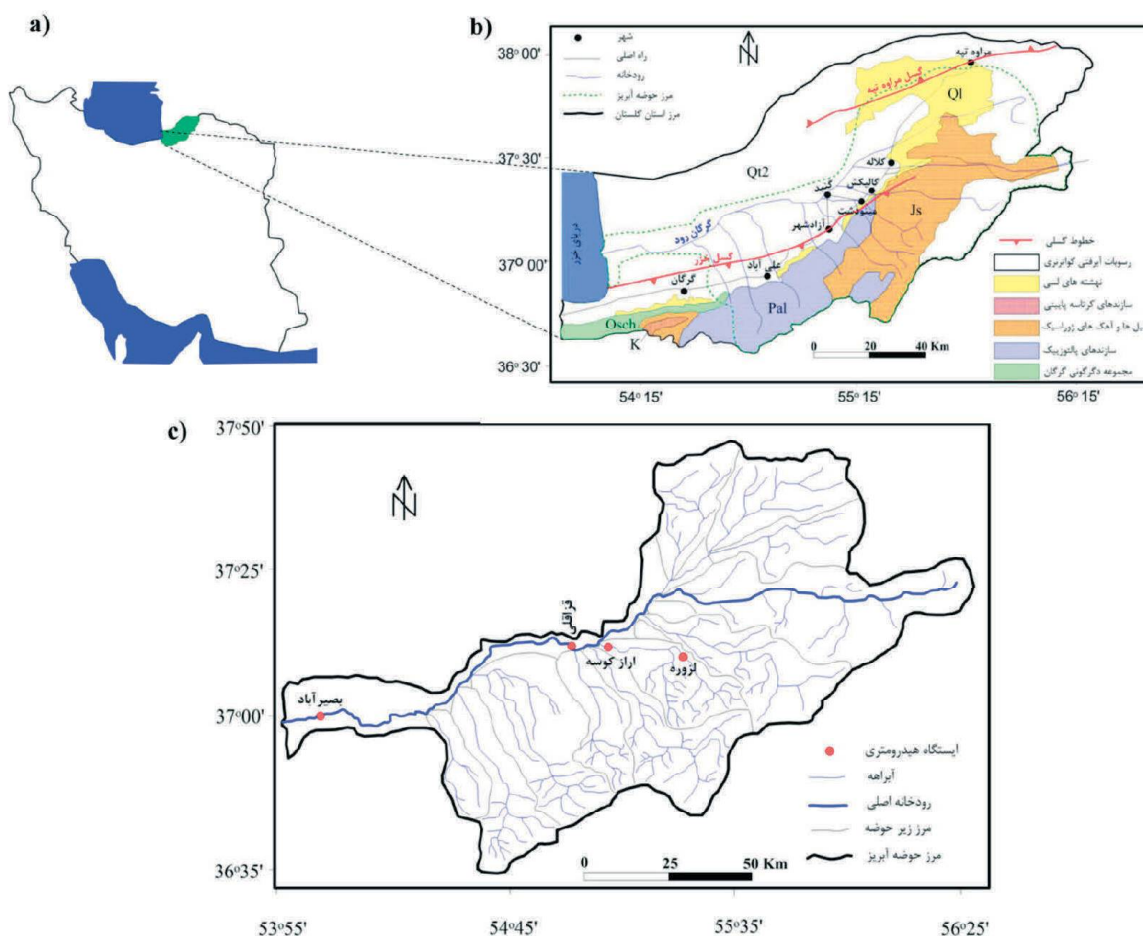
1. Revelle index

تقریبی ۱۰۰ کیلومتر استفاده شد. بدین منظور از آنالیز نتایج پارامترهای فیزیکوشیمیایی (شامل: Ca، Mg، Na، K، HCO₃، Cl، SO₄، TDS، pH، EC و دما) مربوط به دو ایستگاه هیدرومتری لزوره، ارازکوسه (واقع در زیرحوضه چهل چای) و دو ایستگاه هیدرومتری قزاقلی و بصیرآباد بر روی شاخه اصلی گرگانرود در طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ استفاده شد. زیرحوضه چهل چای یکی از زیرحوضه‌های اصلی گرگانرود است که کم‌وبیش در تمامی فصول سال پرآب بوده و در نتیجه دارای داده‌های کیفی کاملی نسبت به سایر زیرحوضه‌ها می‌باشد. اگرچه بررسی‌های اولیه نشان داد که کم‌وبیش در تمامی زیرحوضه‌های گرگانرود قبل از رسیدن به رودخانه اصلی به لحاظ پارامترهای کیفی وضعیت مشابهی دارند.

بیشترین گسترش سطحی است. به‌طورکلی این حوضه بیشتر از رسوبات آبرفتی ماسه‌ای، سیلتی غیرمترکم 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 می‌شوند (روستایی و همکاران، ۱۳۹۳). به لحاظ ساختاری مهم‌ترین گسل‌های فعال منطقه که دارای پیشینه لرزه‌خیزی هستند، گسل‌های کاسپین، شمال البرز، آشخانه، تکل کوه، کپه‌داغ و مراوه‌تپه می‌باشند. در این میان گسل‌های لرزه‌ای کاسپین و شمال البرز نهشته‌های کواترنری را قطع کرده‌اند (Jackson, 2001).

روش مطالعه

به‌منظور بررسی تغییرات کیفی آب در طول رودخانه گرگانرود از اطلاعات مربوط به چهار ایستگاه هیدرومتری (لزوره، ارازکوسه، قزاقلی و بصیرآباد) در یک فاصله مکانی



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

آزمون‌های آماری

تجزیه واریانس داده‌ها: تجزیه واریانس داده‌ها یکی از ابزارهای پرکاربرد در آزمون فرض و تحقیقات آماری است. در این روش سعی بر این است که اختلاف بین چند جامعه آماری ارزیابی و مورد بررسی قرار گیرد. جهت تجزیه واریانس داده‌ها از آزمون F در محیط نرم‌افزار مینی‌تب استفاده و تجزیه واریانس داده‌ها در قالب طرح به‌طور کامل تصادفی انجام شد. قبل از انجام آزمون F فرض نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون اندرسون-دارلینگ و فرض یکسان بودن واریانس‌ها با استفاده از آزمون بارتلت^۲ بررسی شد.

تحلیل خوشه‌ای: تحلیل خوشه‌ای یک عنوان کلی برای گروهی از روش‌های ریاضی است که برای تعیین شباهت نسبی بین افراد در یک مجموعه و همچنین به‌منظور نشان دادن همگنی در ویژگی‌های اندازه‌گیری شده آنها بکار می‌رود. در این تکنیک مجموعه‌ای از متغیرها در داخل خوشه‌های همگن قرار می‌گیرند. خوشه‌بندی مترکم سلسله مراتبی، رایج‌ترین روش تحلیل خوشه‌ای است که ارتباطات همسان ذاتی را بین هر کدام از نمونه‌ها و نیز بین همه داده‌ها فراهم می‌کند و به‌طور معمول با یک نمودار درختی نشان داده می‌شود. نمودار درختی خلاصه‌ای از فرآیندهای خوشه‌بندی، تصویر خوشه‌ها و مجاورت آن‌ها را به همراه کاهش قابل توجه ابعاد داده‌های اولیه ارائه می‌دهد (Liu et al., 2018). در این پژوهش، از تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی و روش نزدیک‌ترین همسایه استفاده شد.

بحث

تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی

املاح موجود در منابع آبی نقش اصلی را در تعیین کیفیت آب ایفا می‌کنند. از این رو با بررسی مقدار و تغییرات غلظت این املاح و با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌ها (نظیر تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی، شرایط اقلیمی، پیشروی، نفوذ و اختلاط آب‌های مختلف، واکنش بین آب-محیط (سنگ یا خاک) و فرآیندهای ژئوشیمیایی) مشخص کرد. در جدول ۲ مقادیر آماری مربوط به پارامترهای

نمونه‌های آب از تمامی ایستگاه‌ها به‌صورت ماهانه توسط شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان جمع‌آوری و پارامترهای فیزیکوشیمیایی در آزمایشگاه شیمی آب این شرکت اندازه‌گیری شده‌است. تمامی نتایج آنالیز پارامترهای مذکور استفاده شده در این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان جمع‌آوری شد. سپس متوسط سالیانه پارامترها محاسبه شده‌است.

در این پژوهش، جهت بررسی وجود اختلاف آماری بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی ایستگاه‌ها از آزمون تجزیه واریانس داده‌ها استفاده شد. ابتدا دو فرض نرمال بودن داده‌ها و یکسان بودن واریانس‌ها بررسی شد. سپس تجزیه واریانس داده‌ها در قالب طرح به‌طور کامل تصادفی و با استفاده از آزمون F انجام شد. جهت بررسی اختلاف آماری بین تیمارهای مورد بررسی از آزمون گیمز-هاول استفاده شد. در این تحقیق برای بررسی تکامل هیدروشیمیایی رودخانه گرگانرود در ایستگاه‌های مورد مطالعه ابتدا تیپ و رخساره هیدروشیمیایی آب با استفاده از نمودارهای استیف، پایپر و دوروف توسط نرم‌افزار AqQa تعیین شد. برای تعیین عوامل مؤثر در کنترل ترکیب شیمیایی آب از نمودار گیبس و برخی از نسبت‌های یونی در طول مسیر جریان استفاده شد. سپس به‌منظور پیش‌بینی و احتمال رسوب و یا انحلال برخی از کانی‌ها در مسیر حرکت رودخانه شاخص‌های اشباع شش کانی مهم کلسیت، دولومیت، هالیت و ژپس با استفاده از نرم‌افزار AquaChem محاسبه شد. در نهایت برای تعیین تعداد عوامل تأثیرگذار بر هیدروشیمی آب ایستگاه‌های مورد مطالعه از آنالیز تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی استفاده شدند. برای رسم نقشه و آنالیزهای آماری از نرم‌افزارهای Surfer و SPSS استفاده شد.

برای تعیین تغییرات کیفیت آب رودخانه گرگانرود در طول مسیر تا دریای خزر به‌ترتیب از نمودارهای شولر و ویلکوکس برای طبقه‌بندی آب در بخش‌های شرب و کشاورزی استفاده شد. همچنین از شاخص‌های کیفی لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و لارسون اسکلد نیز برای بررسی آب رودخانه گرگانرود در بخش صنعت استفاده شد. شاخص‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزار AquaChem محاسبه شدند (جدول ۱).

1. Anderson-Darling test

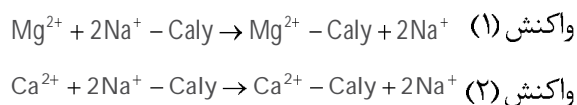
2. Bartlett test

جدول ۱. شاخص‌های کیفی استفاده شده جهت طبقه‌بندی آب رودخانه گرگانرود در بخش‌های کشاورزی و صنعت

منبع	طبقه‌بندی کیفی	رابطه	شاخص	کاربری
(Wilcox, L. V. 1955), (Kumar et al., 2007), (Subramani et al., 2005)	S1= SAR<10 (عالی) SAR <18 =S2 >10 (خوب) SAR< 26= S2> 18 (متوسط) SAR>26=S2 (نامناسب)	$SAR = Na^+ / (\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2})^{\frac{1}{2}}$	نسبت جذب سدیم (SAR)	کشاورزی
(Wilcox, L. V. 1955), (Kumar et al., 2007), (Subramani et al., 2005)	C1= EC<250 (عالی) EC>250 C2<750 (خوب) EC>750 C3 <2250 (متوسط) C4= EC >2250 (نامناسب)	$EC (\mu_s / Cm) = \frac{TDS_{PFM}}{(0.63 \sim 0.7)}$	هدایت الکتریکی (EC)	
(نی‌زاده نودهی و همکاران، ۱۳۹۵)، (You et al., 2001) (Clesceri, 2005)	LSI> 0 (تمایل به ترسیب CaCO ₃) LSI = 0 (عدم خوردگی و رسوب‌گذاری) LSI < 0 (تمایل به انحلال CaCO ₃)	LSI = pH - pH _s	لانزلیه (LSI)	کشاورزی
(آذری و همکاران، ۱۳۹۴) (نی‌زاده نودهی و همکاران، ۱۳۹۵) (Shelden and Pukorius, 1984).	RSI<6 (رسوب‌گذار) RSI<7>6 (خنثی) RSI>7 (خورنده)	RSI = 2(pH _s) - pH	رایزنر (RSI)	
(آذری و همکاران، ۱۳۹۴) (بدیعی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۴) (Shelden and Pukorius, 1984)	PSI<6 (رسوب‌گذار) PSI>6 (خورنده)	PSI = 2(pH _s) - pH _{eq}	پوسته‌گذاری پوکوریوس (°PSI)	کشاورزی
(بدیعی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۴) (Larson and Skold, 1958)	LSI<0.8 (تشکیل فیلم محافظ بدون دخالت یون‌های Cl ⁻ و SO ₄ ²⁻) LSI<1.2>0.8 (تشکیل فیلم محافظ با دخالت یون‌های Cl ⁻ و SO ₄ ²⁻) LSI>1.2 (بروز خوردگی ناحیه‌ای)	$LSI = \frac{Cl^- + SO_4^{2-}}{HCO_3^- + CO_3^{2-}}$	لارسون-اسکولد (LSI)	

pHs، همان pH اشباع آب از کلسیت یا کربنات کلسیم می‌باشد، pH_{eq} مقدار pH در نقطه تعادل کربنات کلسیم می‌باشد

نهایی فاضلاب‌های شهری و زه‌آب‌های کشاورزی هستند. از آنجایی که میزان کاتیون سدیم از آنیون کلراید بیشتر می‌باشد منشأ سدیم می‌تواند، غیر از انحلال هالیت، شاید از تبادل یونی طبیعی کانی آلبیت^۱ 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 دارند، سبب آزاد شدن این یون در آب شده است (قره‌محمودلو و همکاران، ۱۳۹۷).



1. Sodium adsorption ratio
2. Electrical conductivity
3. Langelier saturation index
4. Ryzner saturation index
5. Puckorius scaling index
6. Larson-skold index
7. Albite (NaAlSi₃O₈)

کیفی نمونه‌های آب مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در جدول ۲، میانگین کل دوره آماری برای هر یک از پارامترها می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۲ میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی اصلی آب در ایستگاه لزوره واقع در بالادست حوضه به نسبت کم و به سمت ایستگاه بصیرآباد در نزدیکی دریای خزر در حال افزایش می‌باشد. به طوری که غلظت کاتیون سدیم و آنیون کلراید به عنوان یون‌های شاخص شوری در ایستگاه پایین دست حوضه (بصیرآباد) به مراتب بیشتر از غلظت این دو یون در ایستگاه بالادست حوضه (لزوره) می‌باشد. علت آن می‌تواند به دلیل ورود فاضلاب‌های شهری، زه‌آب‌های کشاورزی، پیشروی آب شور دریای خزر به داخل رودخانه به دلیل شیب کم توپوگرافی و فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم در حوضه آبریز باشد. با توجه به نبود سیستم تصفیه فاضلاب در دشت گرگان، رودخانه‌ها مقصد

جدول ۲. نتایج پارامترهای فیزیکوشیمیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال‌ها از ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ (غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها برحسب TDS، meq/l، EC برحسب mg/l، $\mu\text{mho/cm}$ و دما برحسب $^{\circ}\text{C}$)

Station	Statistical	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	TDS	EC	pH	Temp
لزوره	Average	۲/۶	۲/۳	۲/۱	+۰/۵	۳/۷	۷/۳	۲/۱	۴۳۶/۷	۶۸۱/۲	۷/۸	۱۷/۳
	Min	۲/۱	۷/۸	۷/۶	+۰/۴	۳/۲	+۰/۸۵	۷/۷	۳۷۴/۴	۵۹۳/۲	۷/۶	۱۰/۹
	Max	۳	۲/۹	۲/۹	+۰/۷	۴/۲	۷/۸	۲/۸	۵۰۷/۹	۸۰۰	۸/۱	۲۳/۸
	STDEV	+۰/۲۴	+۰/۳۲	+۰/۴۵	+۰/۱	+۰/۳۰	+۰/۲۷	+۰/۴۵	۴۶/۷	۷۴/۴	+۰/۱۸	+۰/۷
	VAR	+۰/۰۶	+۰/۱۰	+۰/۲۰	۰	+۰/۰۹	+۰/۰۷	+۰/۲۰	۲۱۸۴/۱	۵۵۳۸/۶	+۰/۰۳	+۰/۰۴
	Average	۴	۴/۴	۸/۰۲	+۰/۰۸	۵/۰۵	۴/۵	۶/۹	۹۷۴/۹	۱۵۷۴/۸	۷/۸	۱۷/۸۸
ارازکوسه	Min	۲/۵	۳/۲	۵/۲	+۰/۰۷	۴/۱	۲/۴	۴/۴	۷۰۵/۸	۱۱۰۳	۷/۶	۱۰/۷۵
	Max	۵/۹	۶/۷	۱۷/۵	+۰/۱۱	۶/۹	۷	۹/۹	۱۳۸۱/۳	۲۱۷۰/۳	۸	۲۵/۰۳
	STDEV	+۰/۹۱	+۰/۹۲	۲	+۰/۰۱	+۰/۷۱	۷/۳	۷/۶	۱۹۵	۳۱۰/۸	+۰/۱۳	+۰/۷۵
	VAR	+۰/۸	+۰/۸	۳/۸	۰	+۰/۵	۷/۷	۲/۷	۳۸۰۳۶/۱	۹۶۶۱۵	+۰/۰۲	+۰/۰۴۲
	Average	۶	۷/۹	۱۶/۹	+۰/۱۳	۵	۱۰/۵	۱۵/۳	۱۷۹۹/۱	۲۹۴/۵	۷/۸	۱۷/۶۲
	Min	۳/۴	۳/۹	۵/۸	+۰/۰۸	۴/۱	۳/۸	۵/۲	۸۱۳/۷	۱۳۱۵/۷	۷/۷	۱۰/۵۵
قزاقلی	Max	۹/۴	۱۳/۴	۳۴/۷	+۰/۲۹	۶/۳	۲۲/۷	۲۸/۹	۳۳۰۵/۵	۵۳۵۵	۷/۹	۲۴/۶۹
	STDEV	۲/۲	۳۳	۸/۴	+۰/۰۶	+۰/۷	۵/۶	۷/۲	۷۴۶/۲	۱۲۳۲/۴	+۰/۰۶	+۰/۷۱
	VAR	۴/۶	۸/۹	۷۰/۱	۰	+۰/۵	۳۷/۶	۵۲/۵	۵۵۶۸۶۴	۱۵۱۸۸۳۱	۰	+۰/۰۳۸
	Average	۹/۸	۱۸/۳	۳۴/۸	+۰/۱	۴/۸	۲۵/۳	۳۳	۳۶۸۲	۵۸۴۸/۵	۷/۸	۱۶/۲۵
	Min	۵/۷	۸/۱	۱۰/۸	+۰/۱	۴/۳	۱۰/۷	۹/۶	۱۳۳۷/۷	۲۳۵۵/۱	۷/۶	۹/۶۹
	Max	۱۹/۶	۳۹/۱	۷۰/۴	+۰/۲	۵/۹	۵۸/۳	۶۵/۸	۶۹۷/۱	۱۱۷۴۷/۵	۸	۲۲/۸۱
بصیرآباد	STDEV	۴/۴	۱۰/۳	۲۰/۸	۰	+۰/۵	۱۴/۵	۲۱	۲۰۰/۱۹	۳۱۲۰/۳	+۰/۱	۲/۲
	VAR	۱۹/۳	۱۰۵/۹	۴۳۳	۰	+۰/۲	۲۰۹/۷	۴۳۹	۴۰۰۷۶۵۷	۹۷۳۶۰۵۰	۰	+۰/۱۳

آب به سمت دریای خزر میزان EC بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است که این مورد نیز نشان‌دهنده افزایش غلظت یون‌های محلول در آب می‌باشد. پارامتر pH در تمام نمونه‌های آب نیز در محدوده قلیایی می‌باشد.

مکانیسم کنترل‌کننده شیمی آب ایستگاه‌های مورد مطالعه

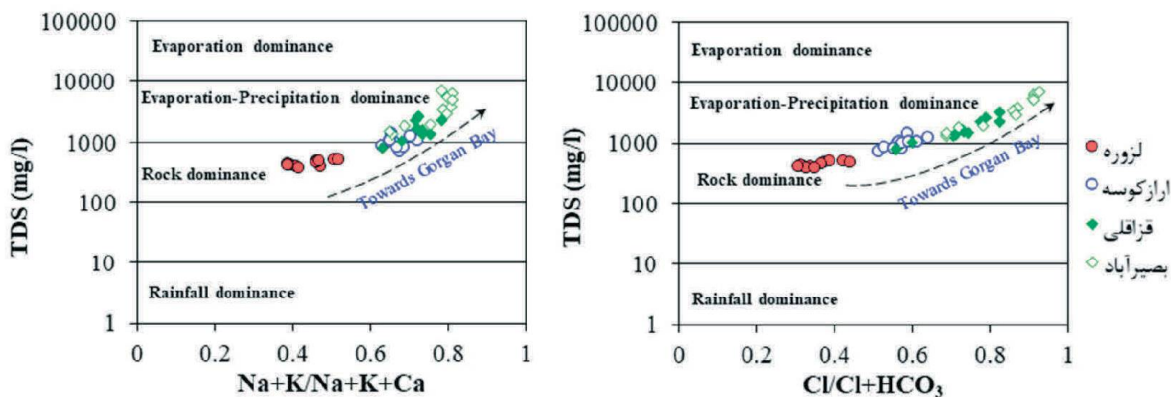
گیبس مدلی را برای بررسی مکانیسم‌های کنترل‌کننده شیمی آب‌های سطحی و شناخت تکامل آنها، بر مبنای پارامترهای TDS، $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ و $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ با استفاده از جمع‌آوری و آنالیز نمونه‌های نقاط مختلف دنیا ارائه کرد. نمودارهای گیبس در بسیاری از موارد جهت تعیین تأثیر فرآیندهای مؤثر نظیر بارش، تبخیر و هوازدگی سنگ بستر بر ترکیب شیمیایی آب‌های سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gibbs, 1970).

بر اساس تجمع، توزیع و جهت یافتگی نمونه‌ها بر روی نمودار گیبس (شکل ۲)، با توجه به نمودار هوازدگی شیمیایی کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها، تبخیر و تا حدودی هجوم

کاهش میزان کلسیم در نمونه‌های آبی می‌تواند به دلیل تبادل یونی مذکور یا رسوب کلسیت باشد که احتمال مورد دوم را می‌توان در بخش مربوط به اندیس‌های اشباع بررسی کرد. بررسی میزان سولفات نسبت به بی‌کربنات در آب ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌تواند نشان‌دهنده نوع آب در ایستگاه‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه میزان بی‌کربنات نسبت به سولفات در آب ایستگاه‌های لزوره و ارازکوسه بیشتر باشد نشان‌دهنده نوع بی‌کربنات آب می‌باشد. در حالی که با نزدیک شدن به دریای خزر، به دلیل پیشروی آب‌شور، آبشویی کودها و سموم کشاورزی و ورود فاضلاب‌های خانگی به منابع آبی میزان سولفات نسبت به بی‌کربنات افزایش یافته و نوع آب از بی‌کربنات به سولفات تغییر می‌یابد. کمترین میزان TDS نمونه‌ها در ایستگاه لزوره در حدود ۳۷۴ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که این پارامتر در ایستگاه بصیرآباد به بیشترین مقدار خود (۶۹۷۱ میلی‌گرم بر لیتر) می‌رسد. با توجه به میزان غلظت بالای منیزیم نسبت به کلسیم می‌توان دریافت که سختی نمونه‌های آب بیشتر تحت تأثیر کاتیون منیزیم می‌باشد. همچنین با توجه به نزدیک شدن جریان

تبخیر و رسوب گذاری برخی از املاح غالب می شوند. البته با توجه به عبور این رودخانه از زمین های کشاورزی و حاشیه برخی از شهرها و آبادی های مهم استان گلستان، نباید نقش پساب های شهری و کشاورزی را در افزایش میزان پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب رودخانه نادیده گرفت.

آب شور دریای خزر به داخل رودخانه گرگانرود، عوامل اصلی کنترل کننده شیمی آب رودخانه می باشند. به طور کلی در ایستگاه لزوره عامل اصلی کنترل کننده شیمی آب، واکنش آب-سنگ می باشد. در حالی که در راستای حرکت آب رودخانه گرگانرود به سمت دریای خزر و احتمال پیشروی آب شور در ایستگاه بصیرآباد، عواملی نظیر نفوذ آب شور،



شکل ۲. نمودار گیبس رودخانه گرگانرود در ایستگاه های مورد مطالعه

تیپ و رخساره آب ایستگاه های مورد مطالعه

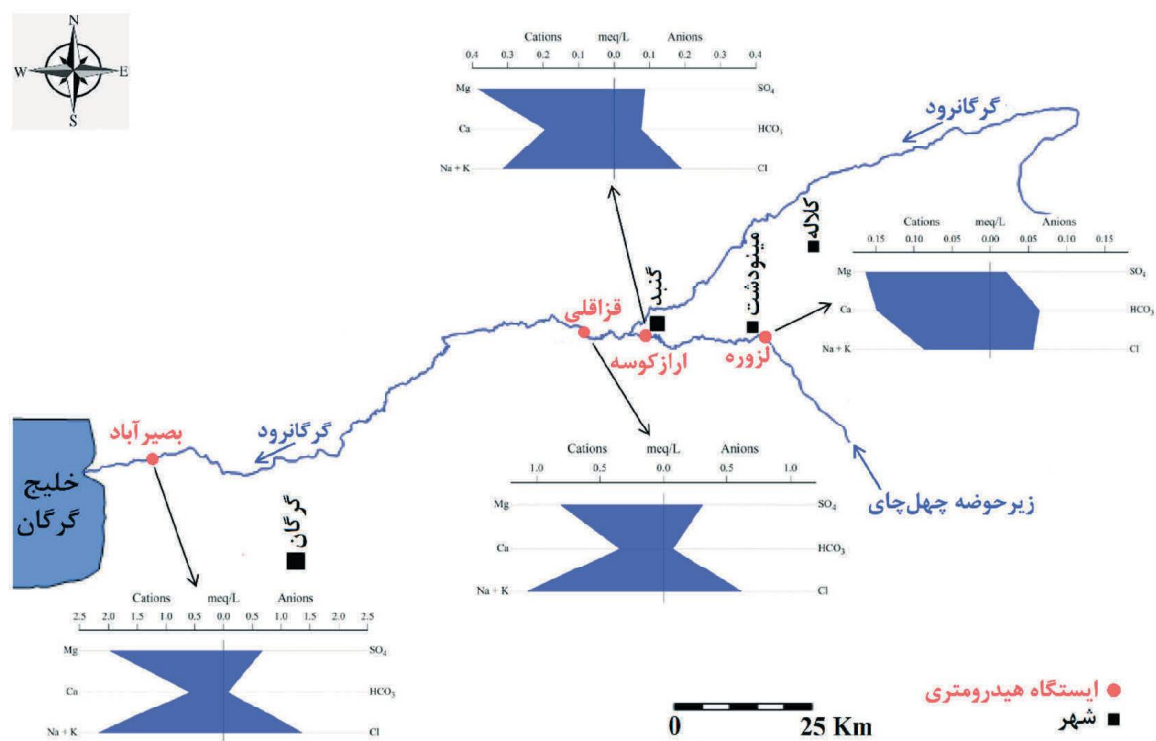
(Mays, 2005). در اصل کیفیت آب در رخساره ترکیبی، نسبت به رخساره شیرین پایین تر است و از نظر سختی جزو آب های سخت و مقدار بی کربنات آن مشابه با آب های شیرین می باشد. در این آب ها غلظت کلرید نسبت به آب های شیرین افزایش می یابد. در آب های شور مرزه مقدار کلرید افزایش قابل توجهی دارد. همچنین از سختی بالایی (بیش از ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر برحسب بی کربنات کلسیم) برخوردار هستند. به طور کلی روند تغییرات نمونه ها در نمودار پایپر نشان از تکامل سریع هیدروژئوشیمیایی نمونه های آب رودخانه گرگانرود دارد.

برای تفسیر بهتر تیپ و تکامل هیدروژئوشیمیایی آب ایستگاه های مورد مطالعه از نمودار دوروف استفاده شده است (شکل ۴-ب). با توجه به بخش مربع شکل نمودار دروو، آب پس از گذر از تیپ بی کربناته تمایل به رسیدن به بلوغ کامل یعنی تیپ کلروره سدیک دارد. بخش های مثلثی شکل این نمودار نیز این نکته را تایید می کنند. میزان TDS

بررسی تیپ و رخساره نمونه های آبی از متداول ترین روش های مطالعه هیدروشیمیایی منابع آبی است. نمودار استیف یکی از روش های سریع تعیین تیپ آب می باشد. با رسم نمودار استیف علاوه بر تشخیص سریع تیپ آب، با توجه به اندازه و شباهت نواحی رسم شده در نمودار، می توان به منشأ نمونه های آبی پی برد. نمودارهای استیف ایستگاه های واقع در طول رودخانه گرگانرود در شکل ۳ نشان داده شده است. براین اساس تیپ غالب آب رودخانه گرگانرود در ایستگاه بالادست (لزوره) بی کربنات منیزیک می باشد، که در جهت جریان با غالب شدن آنیون کلرید و کاتیون سدیم به کلرید سدیک تغییر می کند.

به طور کلی رخساره های هیدروشیمیایی منابع آبی، تعیین کننده توده های آبی با ماهیت ژئوشیمی متفاوت اند (Laxmankumar et al., 2019). براساس تجمع نمونه ها در نمودار پایپر (شکل ۴-ا)، رخساره آب رودخانه گرگانرود در بالادست از رخساره ترکیبی^۱ در ایستگاه لزوره تا رخساره لب شور^۲ در نزدیکی دریای خزر متغیر می باشد (Todd and

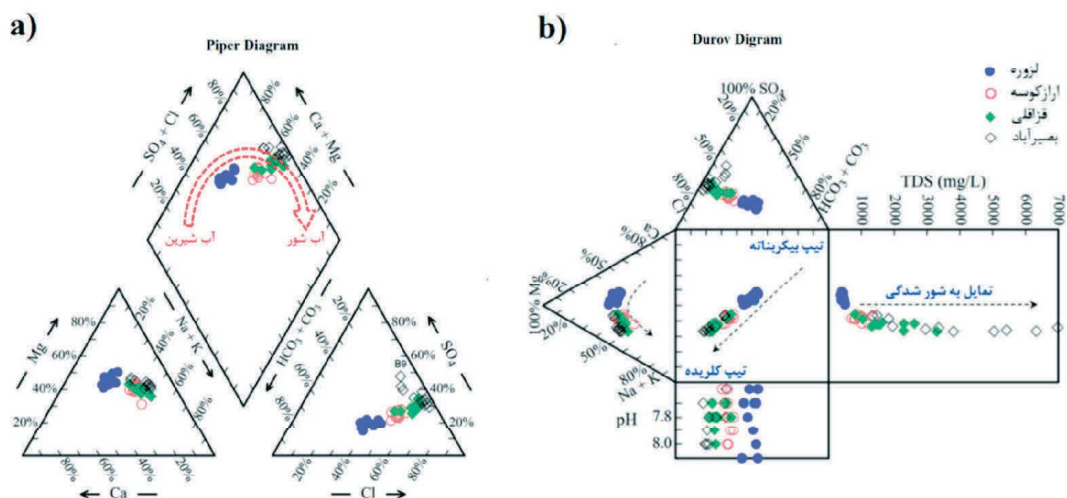
1. Blended
2. Brackish



شکل ۳. روند تغییرات تیپ آب (نمودار استیف) در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر روی رودخانه گرگانود

به قلیایی شدن را از خودشان نشان می‌دهد. که این نتایج با توجه به افزایش میزان املاح و شور شدن آب رودخانه در مسیر حرکت به سمت دریای خزر بدیهی است. به‌طورکلی در این نمودار دو جهت مجزا برای تکامل هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های آب وجود دارد. اگرچه چرخه تکامل کاتیونی نسبت به چرخه تکامل آنیونی تبعیت بیشتری از سیکل کلی تکامل هیدروژئوشیمیایی در طول مسیر حرکت جریان آب رودخانه گرگانود از خود نشان می‌دهد.

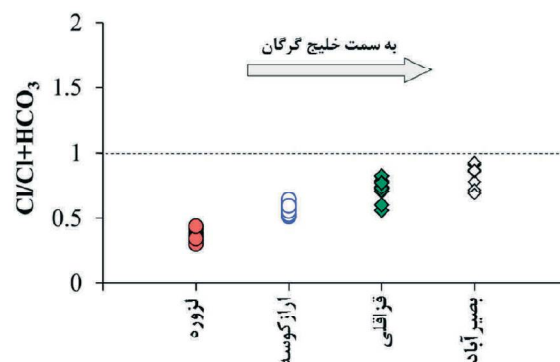
نمونه‌های آبی در جهت حرکت جریان آب از ایستگاه لزوره به سمت ایستگاه بصیرآباد روند افزایشی از خود نشان می‌دهند. این نکته نشان‌دهنده افزایش غلظت یون‌های موجود در آب و در نهایت شورشدگی آب رودخانه در مسیر جریان آب می‌باشد. به‌طوری‌که میزان TDS از حدود ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (رخساره شیرین) تا در حدود ۷۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (رخساره شور مزه) تغییر می‌کند. میزان pH نمونه‌های آب ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز روند صعودی داشته و تمایل



شکل ۴. نمودارهای (a) پایپر، (b) دوروف رودخانه گرگانود در ایستگاه‌های مورد مطالعه

تعیین منشأ املاح و رسوبات با استفاده از روش شاخص رول

شاخص رول بر پایه نسبت غلظت یون کلر به مجموع یون‌های بی‌کربنات و کربنات استوار است. یون‌های بی‌کربنات و کربنات به‌طور معمول فراوان‌ترین یون‌های موجود در آب‌های سطحی و زیرزمینی هستند و در آب دریا به مقدار جزئی وجود دارند، در مقابل یون کلر در آب‌های شور و یا آب دریا بیش از یون‌های دیگر می‌باشد. این اندیس معیار مناسبی برای ارزیابی و تشخیص آلودگی آب به‌وسیله آب دریا یا آب‌های شور فسیلی است (Hounslow, 1995; Faryabi et al., 2010). با توجه به شکل ۵، مقدار این شاخص در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه کمتر از یک می‌باشد. چرا که کلیتاً به‌علاوه با بودن یون کلر در آب رودخانه، هنوز غلظت یون بی‌کربنات در آب قابل ملاحظه می‌باشد. با توجه به حرکت جریان آب به سمت دریای خزر میزان این اندیس رو به افزایش و نزدیک به یک می‌باشد. از جمله عوامل مهم در افزایش میزان شاخص رول می‌تواند به نفوذ آب‌ها شور دریا در رودخانه گرگانود، فاضلاب‌های شهری و زه‌آب‌های کشاورزی به داخل آب رودخانه گرگانود اشاره کرد.



شکل ۵. نمودار شاخص رول رودخانه گرگانود در ایستگاه‌های مورد مطالعه

شاخص اشباع (SI)

محاسبه شاخص اشباع کانی‌های مختلف به‌منظور توصیف تکامل شیمیایی آب صورت می‌گیرد (Hounslow, 1995). شاخص اشباع‌شدگی به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$SI = \log \frac{IAP}{K_t} \quad \text{معادله ۱}$$

در رابطه بالا IAP میزان فعالیت کانی مورد نظر و K_t ثابت انحلال‌پذیری است.

اگر مقدار SI برابر صفر باشد، آب به‌طور دقیق فوق اشباع خواهد بود. در صورت مثبت بودن SI، آب نسبت به کانی مورد نظر فوق اشباع خواهد و تمایل به ته‌نشینی آن کانی را دارد. در صورتی که مقدار SI منفی باشد آب نسبت به کانی مورد نظر تحت اشباع بوده و تمایل به انحلال آن کانی را دارد (Parkhursts and Appelo, 1999).

با توجه به شکل ۶ میزان شاخص‌های اشباع دولومیت و کلسیت در نمونه‌ها مثبت می‌باشد. از این رو امکان پدیده رسوب‌گذاری کانی‌های مذکور در آب رودخانه گرگانود وجود دارد. به‌طور کلی میزان شاخص اشباع دولومیت نسبت به دو کانی کربناته دیگر بیشتر می‌باشد که علت آن وجود کانی‌های دولومیتی در تشکیلات منطقه می‌باشد. در مقابل مقادیر شاخص‌های اشباع ژپیس، هالیت و انیدریت نسبت به آب رودخانه گرگانود در کل مسیر تحت اشباع است (شکل ۶). علت این اثر فراوانی به نسبت پایین کانی‌های سولفات و کلروره در سازندهای منطقه می‌باشد. با توجه به شکل ۶ میزان شاخص‌های اشباع ژپیس، هالیت و انیدریت از ایستگاه لزره به سمت دریای خزر افزایش پیدا کرده و به میزان تعادل نزدیک‌تر می‌شود. این اثر با افزایش میزان غلظت برخی از یون‌ها نظیر کلراید، سولفات، سدیم که در بالا بحث شد همخوانی دارد. افزایش یون‌های مذکور می‌تواند به دلیل فعالیت‌های کشاورزی، فاضلاب‌های خانگی و نزدیک شدن جریان آب به آب شور دریا (مصوب رودخانه گرگانود) باشد.



شکل ۶. نمودار میزان شاخص‌های اشباع رودخانه گرگانود در ایستگاه‌های مورد مطالعه

1. Saturation index

(Kumar et al., 2007). یک روش سریع برای ارزیابی هم‌زمان هر دو شاخص استفاده از نمودار ویلکوکس می‌باشد. با توجه به نمودار ویلکوکس (شکل ۷-ب)، تمام نمونه‌های آب در ایستگاه لزوره و نیمی از نمونه‌های آب در ایستگاه‌های قزاقلی و اراز کوسه در گروه S1 قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده وضعیت مناسب آب از نظر جذب سدیم و کیفیت مناسب آب برای کشاورزی می‌باشد. همچنین نیمی دیگر از نمونه‌های آب در ایستگاه‌های قزاقلی و اراز کوسه در گروه S2 قرار می‌گیرد که دارای خطر قلیابیت متوسط بوده و جهت کشاورزی مناسب است. در حالی که تمام نمونه‌های آب ایستگاه بصیرآباد در گروه S3 قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده خطر قلیابیت زیاد بوده و قلیابیت خاک را به حد زیان‌آوری می‌رساند. براساس شکل ۷-ب، آب ایستگاه لزوره در رده C_2S_1 ، ایستگاه‌های قزاقلی و اراز کوسه در رده‌های C_4S_2 ، C_3S_2 ، C_3S_1 و ایستگاه بصیرآباد در رده C_4S_3 قرار می‌گیرد. با توجه به دلایل ذکر شده در بخش هیدروشمی مبنی بر تکامل سریع هیدروشمیابی آب، بدتر شدن کیفیت آب در بخش کشاورزی در ایستگاه پایین دست (بصیرآباد)، بدیهی به نظر می‌رسد.

کیفیت آب صنعت

در اصل برای بررسی کیفیت آب در بخش صنعت، دو ویژگی خوردگی و رسوب‌گذاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این دو ویژگی را می‌توان توسط شاخص‌های فراوانی نظیر لائزلیه (LSI)، رایزنر (RSI)، پوکوریوس (PSI) و لارسون-اسکلد (L-SI) محاسبه کرد. در این پژوهش مقادیر شاخص‌های مذکور آب در بخش صنعت برای رودخانه گرگانود محاسبه شده و نتایج آنها در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج شاخص لائزلیه، آب در بالادست (ایستگاه لزوره) خورنده بوده و با حرکت جریان آب به سمت دریای خزر از خاصیت خوردگی آن کاسته و تمایل به رسوب‌گذاری دارد. نتایج شاخص رایزنر بیانگر این است که، آب در ایستگاه لزوره خورنده بوده و قابلیت انحلال کربنات کلسیم را دارد و با حرکت جریان آب رودخانه گرگانود به سمت پایین دست (ایستگاه بصیرآباد) کیفیت آب به سمت رسوب‌گذاری میل می‌کند. میانگین شاخص پوکوریوس

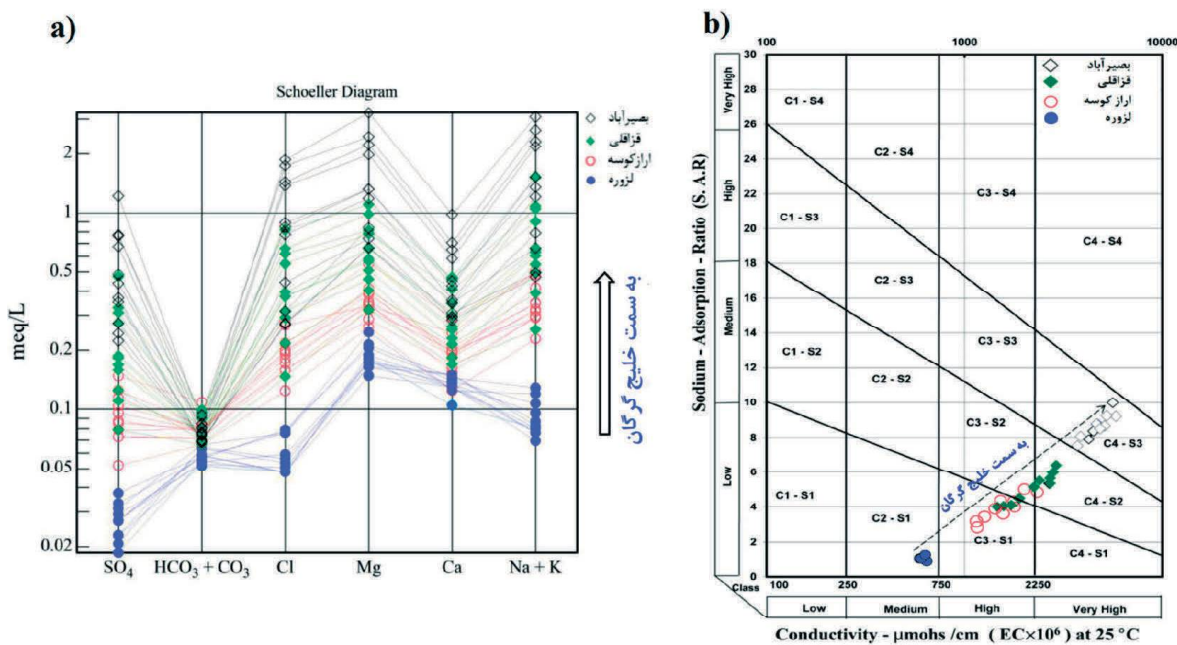
کیفیت آب

کیفیت آب شرب

نمودار شولر یکی از مهم‌ترین طبقه‌بندی‌ها برای بررسی کیفیت آب از نظر شرب می‌باشد. این نمودار بر پایه غلظت یون‌های اصلی سدیم، کلر، سولفات، کلسیم، منیزیم استوار است و برای نمایش اختلاف شیمیایی نمونه‌ها در یک نمودار به کار می‌رود. براساس نمودار شولر کیفیت آب‌ها از نظر شرب به شش گروه شامل خوب، قابل قبول، متوسط، نامناسب، بطور کامل نامناسب و غیرقابل شرب تقسیم می‌شوند (Furkansener and Baba, 2019). با توجه به نمودار شولر، کیفیت آب ایستگاه‌های مورد مطالعه در گروه خوب (ایستگاه لزوره)، قابل قبول (ایستگاه اراز کوسه) و نامناسب (ایستگاه قزاقلی و بصیرآباد) قرار می‌گیرد (شکل ۷-ا). این در حالی است که میزان غلظت یون‌های موجود در آب بخصوص منیزیم و سدیم با توجه به حرکت جریان آب از ایستگاه لزوره به سمت ایستگاه بصیرآباد افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده پیشروی آب‌شور دریا و افزایش فعالیت‌های کشاورزی می‌باشد. اما برای قضاوت بهتر در مورد قابل شرب بودن آب ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌بایست پارامترهای شیمیایی بیشتری (نظیر نیترات، فلورید) به همراه پارامترهای میکروبی بررسی شود. زیرا نمی‌توان تنها با داشتن غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی یک منبع آبی، در مورد قابلیت شرب آن تصمیم‌گیری کرد.

کیفیت آب آبیاری

به‌طور کلی کیفیت آب برای آبیاری به نسبت یون سدیم به یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و منیزیم (نسبت جذب سدیم) و همچنین مقدار کل نمک محلول یا هدایت الکتریکی در آب بستگی دارد (Pazand et al., 2018). نسبت جذب سدیم (SAR) به‌عنوان یک شاخص موثر در ارزیابی خطر بالقوه سدیم در محلول در حال تعادل با فاز جامد خاک و همچنین خطر قلیابیت شدن خاک است (Subramani et al., 2005). هدایت الکتریکی (EC) یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین کیفیت آب برای کشاورزی است که می‌تواند بر رشد گیاه، عملکرد و کیفیت محصولات زراعی تاثیر گذار باشد



شکل ۷. نمودارهای (a) شولر، (b) ویلکوکس رودخانه گرگانود در ایستگاه‌های مورد مطالعه

کلسیم، سرعت خوردگی را کاهش دهند. در این بین تأثیر میزان TDS در رسوب‌گذاری از دیگر عوامل ایجاد رسوب بیشتر می‌باشد. با توجه به افزایش میزان TDS از ایستگاه لزوره به سمت دریای خزر احتمال رسوب‌گذاری بدیبهی به نظر 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 گرگانود از خاصیت خوردگی آن کاسته می‌شود.

در طول دوره آماری مورد مطالعه نیز همانند شاخص‌های رایزنر و لانزلیه، در بالادست (ایستگاه لزوره) خورنده بوده و با توجه به مسیر حرکت آب به سمت دریای خزر (آب‌شور) از خاصیت خوردگی آن کاسته می‌شود. با توجه به نتایج شاخص لارسون-اسکلد، کلراید و سولفات موجود در آب ایستگاه لزوره ممکن است با تشکیل لایه‌های طبیعی مواجه شوند. اما میزان این شاخص در سایر ایستگاه‌ها نشان‌دهنده خوردگی می‌باشد. یون‌هایی مثل کربنات، قادرند با تشکیل رسوب کربنات

جدول ۳. نتایج شاخص‌های لانزلیه، رایزنر، پوکوریوس و لارسون-اسکلد در آب ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	L-SI	PSI	RSI	LSI
لزوره	۰/۹۳	۱۳/۱۵	۱۰/۷۵	-۱/۴۹
ارازکوسه	۲/۲۷	۱۲/۳۹	۱۰/۱۸	-۱/۲
قزاقلی	۵/۱۵	۱۲/۰۹	۹/۸۷	-۱/۰۴
بصیرآباد	۱۲/۲۴	۱۱/۸۱	۹/۵۷	-۰/۸۹

دارای نوسانات جزئی بوده و اختلاف آماری در ایستگاه‌های مختلف مشاهده نشد. در سایر پارامترهای مورد بررسی با توجه به اینکه مقدار P-value آزمون F کوچک‌تر از ۰/۰۵ محاسبه شده، نشان می‌دهد که اختلاف آماری بین حداقل دو ایستگاه از چهار ایستگاه مورد بررسی وجود دارد.

آنالیزی آماری

تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای فیزیکوشیمیایی

مطابق با جدول ۴ مقدار P-value آزمون F برای پارامتر pH کمتر از ۰/۹۸۹ محاسبه شده که نشان می‌دهد تغییرات این پارامتر در طول مسیر گرگانود از سرشاخه تا مصب

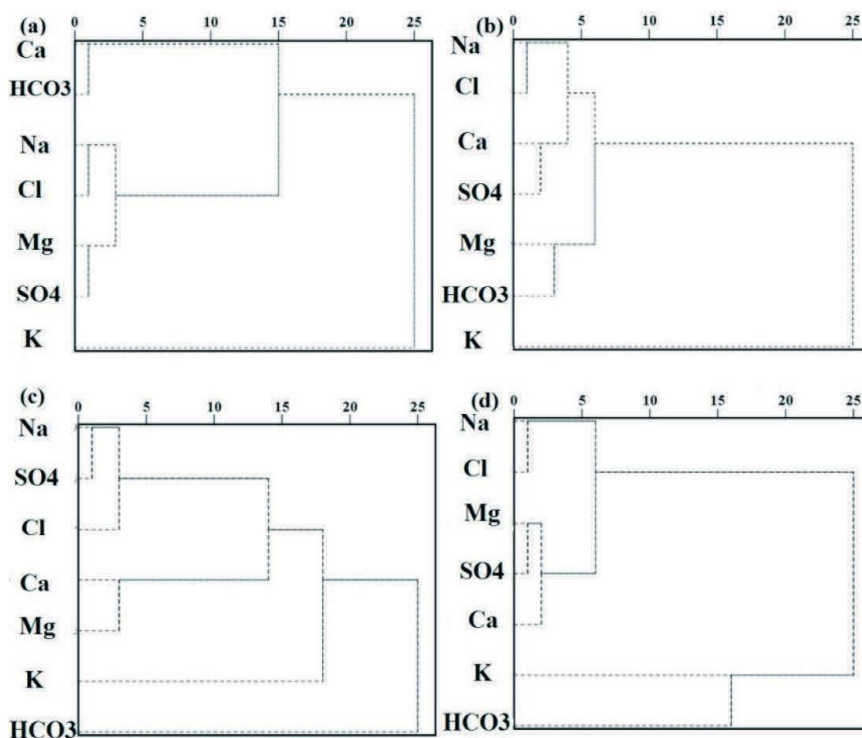
ایجاد اختلاف آماری بین اکثر پارامترهای مورد بررسی شده است در حالی که کمترین تغییرات در بخش انتهایی حوزه آبریز گرگانود مابین ایستگاه‌های بصیرآباد و قزاقلی مشاهده شد. از ایستگاه قزاقلی که در بخش میانی حوزه آبریز گرگانود واقع شده تا خروجی گرگانود در نزدیکی ایستگاه بصیرآباد تغییرات فاحش و معنی داری بین پارامترهای کیفی مورد بررسی مشاهده نشد.

پارامترهای Mg و SO₄ بیشترین تغییرات را از سرشاخه تا مصب دارا بوده به طوری که بین مقادیر آنها در تمام ایستگاه‌ها اختلاف آماری مشاهده شد. پارامترهای Na، Cl، TDS و EC نیز دارای تغییرات زیاد بوده و بین مقادیر آنها در تمام ایستگاه‌ها (به جز بصیرآباد-قزاقلی) اختلاف آماری مشاهده شد. همچنین نتایج این بررسی نشان داد بیشترین تغییرات کیفی آب در دو ایستگاه متوالی در بخش سرشاخه گرگانود مابین ایستگاه‌های لزوره و آرازکوسه به وقوع پیوسته و باعث

جدول ۴. نتایج آزمون F و گیمز-هاول پارامترهای کیفی آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه

پارامتر	P-value آزمون F	نتایج آزمون گیمز-هاول					
		آرازکوسه-بصیرآباد	آرازکوسه-لزوره	بصیرآباد-قزاقلی	بصیرآباد-لزوره	بصیرآباد-قزاقلی	لزوره-قزاقلی
Ca	./000	*	*	---	*	---	*
Mg	./000	*	*	*	*	*	*
Na	./000	*	*	*	*	---	*
K	./000	*	*	---	*	---	*
HCO ₃	./000	---	*	---	*	---	*
SO ₄	./000	*	*	*	*	*	*
Cl	./000	*	*	*	*	---	*
TDS	./000	*	*	*	*	---	*
EC	./000	*	*	*	*	---	*
pH	./989	---	---	---	---	---	---

* وجود اختلاف معنی دار بین دو تیمار مورد بررسی --- نبود اختلاف معنی دار بین دو تیمار مورد بررسی



شکل ۸. دندوگرام آنالیز خوشه‌ای عناصر اصلی در ایستگاه‌های (a) لزوره، (b) آرازکوسه، (c) قزاقلی، (d) بصیرآباد

تحلیل خوشه‌های

برای خوشه‌بندی عوامل مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب ایستگاه‌های مورد مطالعه از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی استفاده شد، تعداد داده‌های آماری مورد استفاده برای رسم این دندوگرام ۱۰ مورد می‌باشد که هر یک از این نمونه‌ها برابر با میانگین سالانه پارامترهای مورد مطالعه می‌باشد. نتایج این بررسی به صورت گرافیکی در شکل ۸ نشان داده شده است. براساس دندوگرام رسم شده در ایستگاه لزوره (شکل ۸-a) و شباهت پارامترها به دو خوشه کلی تقسیم می‌شوند. خوشه اول شامل کلسیم و بی‌کربنات است که این دو یون بیشترین شباهت را در بین پارامترها دارند. خوشه دوم شامل یون‌های سدیم، کلراید، منیزیم و سولفات می‌باشد که همه از یون‌های مربوط به کانی‌های تبخیری تشکیل شده‌است. با توجه به غالب بودن سازندهای کربناته در حوضه مورد مطالعه، خوشه اول را می‌توان به انحلال تشکیلات آهکی موجود در منطقه مربوط دانست. درحالی‌که یون‌های موجود در خوشه دوم را می‌توان به انحلال سازندهای تبخیری، مارن و رسی مربوط دانست.

به‌طورکلی، براساس شباهت بین پارامترهای شیمیایی اصلی، دو خوشه در ایستگاه آرازکوسه قابل تشخیص می‌باشد (شکل ۸-b). خوشه اول به دلیل ماهیت یون‌های آن، ناشی از انحلال سازندهای گچی-نمکی و رسی و شاید ورود پساب‌های تصفیه نشده شهری، روستایی و کشاورزی به داخل رودخانه گرگانرود می‌باشد. این خوشه را می‌توان به دلیل شباهت بالای یون‌های سدیم-کلراید و سولفات-کلسیم می‌توان به دو زیر خوشه تقسیم نمود. اما خوشه دوم با توجه به همبستگی بالای بین یون‌های بیکربنات و منیزیم ناشی از انحلال سنگ‌های آهکی-دولومیتی است که از پراکندگی به نسبت بالایی در بخش‌های بالادست حوضه مورد مطالعه برخوردار هستند.

با توجه به میزان شباهت بین عناصر اصلی در ایستگاه قزاقلی و شکل دندوگرام این ایستگاه، ترکیبی بودن رخساره آب به درستی مشهود است (شکل ۸-c). اگرچه با توجه به شباهت بالای بین یون‌های تبخیری در این دندوگرام و فراوانی به نسبت کم یون بیکربنات، شور

شدن آب رودخانه گرگانرود به دلیل نفوذ آب شور دریا و ورود پساب‌های تصفیه نشده شهری، روستایی و کشاورزی به داخل آن محتمل به نظر می‌رسد. براساس دندوگرام ایستگاه بصیرآباد، عوامل مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب در این ایستگاه مشابه ایستگاه قزاقلی است و به دو خوشه تقسیم‌بندی می‌شود. در خوشه اول همبستگی بالایی بین سدیم-کلراید و کلسیم-سولفات دیده می‌شود که بیانگر انحلال کانی‌های هالیت و ژپس در آب است (شکل ۸-d). منشأ خوشه اول را می‌توان به پیشروی آب شور دریا مربوط دانست. در خوشه دوم پتاسیم و بی‌کربنات شباهت به نسبت بالایی از خود نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر جهت بررسی تکامل هیدروشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانرود به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های استان گلستان انجام شد. تغییرات میانگین غلظت یون‌های اصلی آب رودخانه گرگانرود نشان از افزایش مقادیر آنها به‌خصوص غالب شدن آنیون کلراید و کاتیون سدیم در طول مسیر جریان به سمت دریای خزر دارد. در کل دشت گرگان با توجه 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. علاوه بر این شیب سطح توپوگرافی در پهنه وسیعی از دشت بسیار پایین و در برخی نقاط دشت منفی می‌باشد. این مورد در سیل فرودین ۱۳۹۸ بسیار مشهود بود به طوری‌که مانع از زهکشی آب‌های سطحی و رواناب‌ها به سمت دریای خزر شد. بنابراین شرایط توپوگرافی منطقه امکان نفوذ آب از دریای خزر گرگان به داخل رودخانه گرگانرود را می‌دهد. از دیگر دلایل افزایش غلظت یون‌های سدیم و کلر نفوذ آب شور دریای خزر به داخل رودخانه گرگانرود می‌باشد. وجود برخی از ماهیان و موجودات کف زی (نظیر بنتوزها) شورپسند در بخش‌های انتهایی رودخانه دلیلی بر این ادعا می‌باشد.

همچنین بیشترین تغییرات هیدروشیمیایی آب در بخش سرشاخه گرگانرود مابین ایستگاه‌های لزوره (ایستگاه خروجی

سمت دریای خزر از خاصیت خورندگی آن کاسته می‌شود. با توجه به نتایج این پژوهش، عبور رودخانه گرگانود از زمین‌های کشاورزی و حاشیه برخی از شهرها و آبادی‌های مهم استان گلستان و در پی آن ورود فاضلاب‌های شهری، زه آب‌های کشاورزی به رودخانه، رسوبات سیلتی-رسی غیر متراکم در دشت و همچنین پیشروی آب شور دریای خزر به داخل رودخانه به دلیل شیب کم توپوگرافی از عوامل مهم تکامل هیدروشمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانود می‌باشد. اگرچه بیشترین تغییرات در هر دو بخش هیدروشمیایی و کیفی را می‌توان زمانی مشاهده کرد که رودخانه گرگانود جبهه کوهستان را ترک می‌کند و وارد دشت گرگان می‌شود.

منابع

- آذری، ع.، ناظمی، س.، کاکاوندی، ب. و رستگار، ا. ۱۳۹۴. بررسی پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری منابع آب شرب شهر شاهرود با استفاده از شاخص‌های پایداری در سال ۱۳۹۲، مجله دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، ۲۲، ۶، ۹۴۴-۹۵۴.
- بدیعی‌نژاد، ا.، حیدری، م. و فرزادکیا، م. ۱۳۹۴. بررسی پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری شبکه توزیع آب آشامیدنی جنوب شهر شیراز. مجله راه‌آورد سلامت دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران. ۱۰۱، ۵۱-۶۰.
- روحانی، ح.، زکی، ا.، کاشانی، م. و فتح‌آبادی، ا. ۱۳۹۴. ارزیابی پایداری تغییرات کیفیت شیمیایی آب سطحی در رودخانه گرگانود. مجله اکوهیدرولوژی، ۲، ۲، ۱۲۹-۱۴۰.
- روستائی، م.، آقاناتابی، م.، رقیمی، م.، نعمتی، م. و رحیمی‌چاکدل، ع. ۱۳۹۳. بررسی زمین‌ساخت فعال دامنه شمالی البرز خاوری با استفاده از نشانه‌های زمین ریختی در حوضه آبریز گرگان رود. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. ۲۹، ۴، ۴۳-۵۶.
- قره محمودلو، م.، حشمت‌پور، ع.، جندقی، ن.، زارع، ع. و مهرابی، ح. ۱۳۹۷. بررسی هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی آبخوان دشت سیدان-فاروق، استان فارس. مجله اکوهیدرولوژی، ۵، ۴، ۱۲۴۱-۱۲۵۳.
- نبی‌زاده نودهی، ر.، مصداقی‌نیا، ع.، ناصری، س.، هادی، م.، سلیمانی، ح. و بهمنی، پ. ۱۳۹۵. تحلیل تمایل

کوهستان) و آرازکوسه (اولین ایستگاه واقع در دشت) به وقوع پیوسته است. در مقابل از ایستگاه قزاقلی که در بخش میانی حوزه آبریز گرگانود واقع شده تا خروجی گرگانود در نزدیکی ایستگاه بصیرآباد تغییرات فاحش و معنی‌داری بین پارامترهای کیفی مورد بررسی مشاهده نشد.

براساس نتایج هیدروشمیایی و اکنش آب-سنگ عامل اصلی کنترل‌کننده شیمی آب در بخش بالادست حوضه (ایستگاه لزوره) می‌باشد. درحالی‌که در جهت حرکت آب رودخانه گرگانود به سمت دریای خزر عواملی نظیر تبخیر، رسوب‌گذاری و نفوذ آب‌شور نیز نقش دارند. از این رو تیپ غالب آب این رودخانه در ایستگاه بالادست (لزوره) بی‌کربنات منیزیک می‌باشد. با توجه به نزدیکی ایستگاه لزوره به سرچشمه و همچنین فراوانی سنگ‌های کربناته به‌خصوص دولومیتی بدیهی به نظر می‌رسد. اما به تدریج با غالب شدن آنیون کلرید و کاتیون سدیم در جهت جریان به کلروره سدیک تغییر می‌کند.

تجمع نمونه‌ها در دو نمودار پایپر و دروو نیز نشان از تمایل آب رودخانه گرگانود برای رسیدن به بلوغ کامل یعنی تیپ کلروره سدیک دارد. به‌طور کلی روند تغییرات نمونه‌ها در نمودارهای پایپر و دروو نشان از تکامل سریع هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های آب رودخانه گرگانود در مسیر حرکت به سمت دریای خزر دارد.

تاثیر تکامل هیدروشمیایی را به راحتی می‌توان در بخش تغییر کیفیت آب رودخانه گرگانود از بالادست حوضه تا دریای خزر مشاهده نمود. به طوری که کیفیت آب برای شرب براساس نمودار شولر، از خوب تا نامناسب تغییر می‌کند. این نتایج با تغییرات میزان غلظت یون‌های اصلی آب همخوانی کامل دارد. همچنین براساس نمودار ویلکوکس آب ایستگاه لزوره برای استفاده در بخش کشاورزی کم‌وبیش مناسب می‌باشد، اما در طول جریان با افزایش غلظت یون سدیم و پارامتر شوری به تدریج غیرقابل استفاده در بخش کشاورزی می‌شود. براساس نتایج حاصل از شاخص‌های استفاده شده در بخش صنعت (لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و لارسون-اسکلد) آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای خاصیت خورنده می‌باشد اما در طول مسیر حرکت آب رودخانه گرگانود به

posure and Health, 9,1, 27-41.

- Jackson, J., 2001. Living with earthquakes: know your faults. *Journal of Earthquake Engineering*, 5, 1, 5-123

- Kumar, M., Kumari, K., Ramanathan, A.L. and Saxena, R., 2007. A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India. *Journal of Environmental Geology*, 53, 553-574.

- Larson, T.E. and Skold, R.V., 1958. Laboratory Studies Relating Mineral Quality of Water to Corrosion of Steel and Cast Iron, Illinois State Water Survey, Champaign, IL. ill. ISWS C-71, 43-46

- Laxmankumar, D., Satyanarayana, E., Dhakate, R. and Saxena, P.R., 2019. Hydrogeochemical characteristics with respect to fluoride contamination in groundwater of Maheshwarm mandal, RR district, Telangana state, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 474-483.

- Liu, S., Ryu, D., Webb, J.A., Lintern, A., Waters, D., Guo, D. and Western, A.W., 2018. Characterisation of spatial variability in water quality in the Great Barrier Reef catchments using multivariate statistical analysis. *Marine Pollution Bulletin*, 137, 137-151.

- Mishra, B.K., Regmi, R.K., Masago, Y., Fukushi, K., Kumar, P. and Saraswat, C., 2017. Assessment of Bagmati river pollution in Kathmandu Valley: Scenario-based modeling and analysis for sustainable urban development. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 9, 67-77.

- Nwankwoala, H.O. and Udom, G.J., 2011. Hydrochemical facies and ionic ratios of groundwater in Port Harcourt, Southern Nigeria. *Research Journal of Chemical Sciences*, 1, 3, 87-

خورندگی در سیستم تامین آب با استفاده از شاخص‌های کیفی و شاخص کمی پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم. فصلنامه سلامت و محیط زیست، ۹، ۴، ۴۷۰-۴۵۷.

- Arpine, H. and Gayane, S., 2016. Determination of background concentrations of hydrochemical parameters and water quality assessment in the Akhuryan River Basin (Armenia). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 94, 2-9.

- Batsaikhan, B., Kwon, J.S., Kim, K.H., Lee, Y.J., Lee, J.H., Badarch, M. and Yun, S.T., 2017. Hydrochemical evaluation of the influences of mining activities on river water chemistry in central northern Mongolia. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 2, 2019-2034.

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

- Faryabi, M., Kalantari, N. and Negarestani, A., 2010. Evaluation of factors influencing groundwater chemical quality using statistical and hydrochemical methods in Jiroft Plain. *Scientific Quaternary Journal, Geosciences*, 20, 77, 115-120.

- Furkansener, M. and Baba, A., 2019. Geochemical and hydrogeochemical characteristics and evolution of Kozaklı geothermal fluids, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Geothermics*, 80, 69-77.

- Gibbs, R. J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry, *Science* 17, 1088-1090.

- Hounslow, A., 1995. *Water Quality Data: analysis and interpretation*. 1st Edition. CRC Press. 146.

- Islam, M.A., Zahid, A., Rahman, M.M., Rahman, M.S., Islam, M.J., Akter, Y., Shammi, M., Bodrud-Doza, M. and Roy, B., 2017. Investigation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in the south central part of the coastal region in Bangladesh. Ex-

101.

- Parkhurst, D. and Appelo, C., 1999. PHREEQC for Windows version 1.4.07, A hydrogeochemical transport model. U.S, Geological Survey Software.
- Pazand, K., Khosravi, D., Ghaderi, M.R. and Rezvanianzadeh, M.R., 2018. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater in a semi-arid region using major ion chemistry: A case study of Ardestan basin in central Iran. *Journal of Groundwater for Sustainable Development*, 6, 245-254.
- Strauss, S.D. and Puckorius, P.R., 1984. Cooling-water treatment for control of scaling, fouling, corrosion. *Power*, 128, 6, S1-S24.
- Shen, Y., Oki, T., Kanae, S., Hanasaki, N., Utsumi, N. and Kiguchi, M., 2014. Projection of future world water resources under SRES scenarios: an integrated assessment. *Hydrological Sciences Journal*, 59, 1775-1793.
- Subbarao, C., Subbarao N.V. and Chandu S. N., 1996. Characterization of groundwater contamination using factor analysis. *Environmental Geology*, 28, 4, 175-180.
- Subramani, T., Elango, L. and Damodarasamy, S.R., 2005. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India. *Journal of Environmental Geology*, 47, 1099-1110.
- Todd, D. and Mays, L., 2005. *Ground Water Hydrology*. Wiley, USA. 652.
- Wilcox, L.V. 1955. *Classification and Use of Irrigation Waters*. U.S. Department of Agriculture. Circ, Washington, DC, US, 969.
- Wu, Z., Wang, X., Chen, Y., Cai, Y. and Deng, J., 2018. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612, 914-922.
- Xu, H., Zheng, H., Chen, X., Ren, Y. and Ouyang, Z., 2016. Relationships between river water quality and landscape factors in Haihe River Basin, China: Implications for environmental management. *Chinese Geographical Science*, 26, 197-207.
- 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 Journal*, 32, 1, 73-81.
- Zhao, G., Li, W., Li, F., Zhang, F. and Liu, G., 2018. Hydrochemistry of waters in snowpacks, lakes and streams of Mt. Dagu, eastern of Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 610, 641-650.