

شناسایی منابع شور کننده رودخانه شکستیان و امکان سنجی راههای مختلف برای کاهش میزان نمک خروجی از آن

پژوهشگران: جهانشیر محمدزاده هابیلی^۱، داور خلیلی^۲ و عبدالرضا سبوکی^۳

کد پروژه: FAW-97002

چکیده:

رودخانه شاپور یکی از مهمترین سیستم‌های رودخانه‌ای در جنوب ایران می‌باشد. آب شیرین این رودخانه پس از اتصال رودخانه شکستیان شور می‌شود. بر اساس نتایج پژوهش حاضر، مهمترین عامل شور کننده رودخانه شکستیان، چشمه شور بستر شکستیان می‌باشد. برای تعیین منشأ تغذیه آب و نمک چشمه شور بستر شکستیان، یک مطالعه جامع با استفاده از روش‌های ردیابی هیدروشیمیایی، حرارتی، ایزوتوپی و دبی انجام شده است. نتایج ردیابی هیدروشیمیایی نشان داد که منشأ تغذیه نمک چشمه شور شکستیان، انحلال سنگ نمک می‌باشد. تشدید شوری آب خروجی از این چشمه به وسیله تبخیر در فصل خشک نشاندهنده تغذیه آب این چشمه از آب‌های سطحی می‌باشد. نوسانات دمایی هم-فاز با محیط آب خروجی از چشمه شور شکستیان نشاندهنده تغذیه آب این چشمه از جریان‌ات زیرسطحی کم‌عمق می‌باشد. همانند آب‌های سطحی حوزه آبریز رودخانه شکستیان، غلظت بالای ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن-۱۸ و دوتریم در آب خروجی از چشمه شور شکستیان در طی فصل خشک و مقادیر کمتر این ایزوتوپ‌ها در طی فصل تر تأییدکننده تغذیه آب این چشمه از آب‌های سطحی می‌باشد. در دو زمان دبی پایین رودخانه در دو سال متوالی، نتایج اندازه‌گیری دقیق دبی در بالادست و پایین‌دست چشمه شور بستر شکستیان یا ردیابی دبی نشان داد که فرار آب از لایه‌های آهکی سازند میشان در بستر رودخانه سلیز، منشأ تغذیه آب چشمه شور بستر شکستیان می‌باشد که به وسیله نتایج ردیابی نیز مورد تأیید قرار می‌گیرد. نتایج ردیابی هیدروشیمیایی به همراه شواهد زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی نیز نشان داد که منشأ تغذیه نمک چشمه شور بستر شکستیان، سنگ نمک موجود در سازند گچساران می‌باشد که در اثر تماس مستقیم با آب فرار کرده از بستر رودخانه سلیز حل شده و باعث شور شدن آب چشمه شور بستر شکستیان می‌شود. برای خشکاندن چشمه شور بستر شکستیان، زهکشی آب فرار کرده از بستر رودخانه سلیز به وسیله چند حلقه چاه زهکشی یا یک زهکش حائل زیرزمینی پیشنهاد می‌شود. ولی قبل از آن مطالعات تکمیلی شامل احداث چند حلقه چاه اکتشافی در حدفواصل بین محل تغذیه چشمه تا محل خود چشمه پیشنهاد می‌شود.

کلید واژه‌ها: رودخانه شکستیان، چشمه شور شکستیان، ردیابی هیدرو-شیمیایی، ردیابی حرارتی، ردیابی ایزوتوپی، ردیابی دبی

^۱ دانشیار بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز

^۲ استاد بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز

^۳ مربی موسسه آموزش عالی علمی کاربردی صنعت آب و برق

در کنار کمبود منابع آب، شور شدن آب رودخانه‌های شیرین یکی از مهمترین مشکلات بخش آب می‌باشد. منابع شورکننده آب رودخانه‌ها را می‌توان به دو دسته منابع طبیعی و منابع انسانی تقسیم نمود. منابع طبیعی شامل چشمه‌های شور، فرسایش زمین‌های شور حوضه آبریز رودخانه و عبور رودخانه از روی سازندهای تبخیری می‌باشد. منابع انسانی نیز شامل رواناب سطحی زمین‌های کشاورزی، زهاب زمین‌های کشاورزی و زهاب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی و خانگی می‌باشد (Morford, 2019). علاوه بر منابع طبیعی و انسانی، در طول دوره‌های خشکسالی، شوری آب رودخانه‌ها نسبت به دوره‌های ترسالی نیز بیشتر می‌شود (Jones and van Vliet, 2018). شور شدن آب رودخانه‌ها باعث کاهش عملکرد محصولات زراعی و باغی، محدودیت در تنوع کشت محصولات زراعی و باغی، افزایش هزینه‌های تصفیه آب برای مصارف شرب، خوردگی و کاهش عمر مفید تاسیسات توزیع و انتقال آب و کاهش تنوع گونه‌های زیستی رودخانه‌ها می‌شود (Morford, 2019; Cañedo-Argüelles et al., 2013; Cañedo-Argüelles et al., 2016).

بخش زیادی از ذخایر زیرسطحی نمک جهان در مناطق خشک و نیمه خشک رشته کوه زاگرس در جنوب و جنوب غرب ایران قرار دارند (Kent, 1979; Bosak et al., 1998). منشأ عمده این نمک‌ها، واحدهای نمکی سازند تبخیری گچساران و سازند هرمز می‌باشند که باعث شور شدن بخش قابل توجهی از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی جنوب و جنوب غرب ایران شده است. رودخانه شاپور یکی از مهمترین رودخانه‌های جنوب ایران می‌باشد که تحت تاثیر واحدهای نمکی سازندهای گچساران و هرمز قرار دارد. در طی سال‌های اخیر، شور شدن آب این رودخانه به یک معضل تبدیل شده است. رودخانه شاپور مهمترین منبع تامین آب کشاورزی دشت‌های کازرون، خشت و شبانکاره می‌باشد. همچنین این رودخانه منبع تامین آب شرب تعداد زیادی از شهرها و روستاهای جنوبی ایران می‌باشد. از سرچشمه تا قبل از اتصال رودخانه شور شکستیان، آب رودخانه شاپور از کیفیت مناسبی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت برخوردار می‌باشد. پس از اتصال رودخانه شور شکستیان، کیفیت آب رودخانه شاپور به شدت افت نموده و شوری آن تا چند برابر افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج مطالعات شرکت مهندسین مشاور یکم (۱۳۷۳)، رودخانه شکستیان مهمترین منبع ورود نمک به رودخانه شاپور بوده و سالانه حدود ۳۸۰ هزار تن نمک وارد رودخانه شاپور می‌کند. در صورتیکه بتوان منابع شورکننده رودخانه شکستیان و منشأ شوری آنها را به خوبی شناسایی نمود، می‌توان به یافتن یک راه‌حل مناسب برای علاج بخشی و کاهش شوری آب رودخانه شور شکستیان و در نتیجه کاهش میزان نمک ورودی از رودخانه شور شکستیان به رودخانه شاپور دست یافت.

هدف‌های مطالعه حاضر به طور خلاصه عبارتند از: ۱- شناسایی منابع شورکننده آب رودخانه شور شکستیان ۲- شناسایی منشأ تغذیه آب و نمک چشمه‌های شور حوضه آبریز رودخانه شور شکستیان با ترکیب نتایج عملیات ردیابی هیدرو-شیمیایی، حرارتی، ایزوتوپی و دبی ۳- بررسی تاثیرات بلندمدت رودخانه شور شکستیان بر روی شوری آب رودخانه شاپور ۴- برآورد میانگین سالانه حجم آب و جرم نمک خروجی از رودخانه شور شکستیان به رودخانه شاپور ۵- بررسی و امکان‌سنجی راه‌های مختلف برای کنترل و کاهش شوری آب رودخانه شور شکستیان و ۶- ارائه پیشنهادات برای فاز بعدی مطالعات.

مواد و روش‌ها

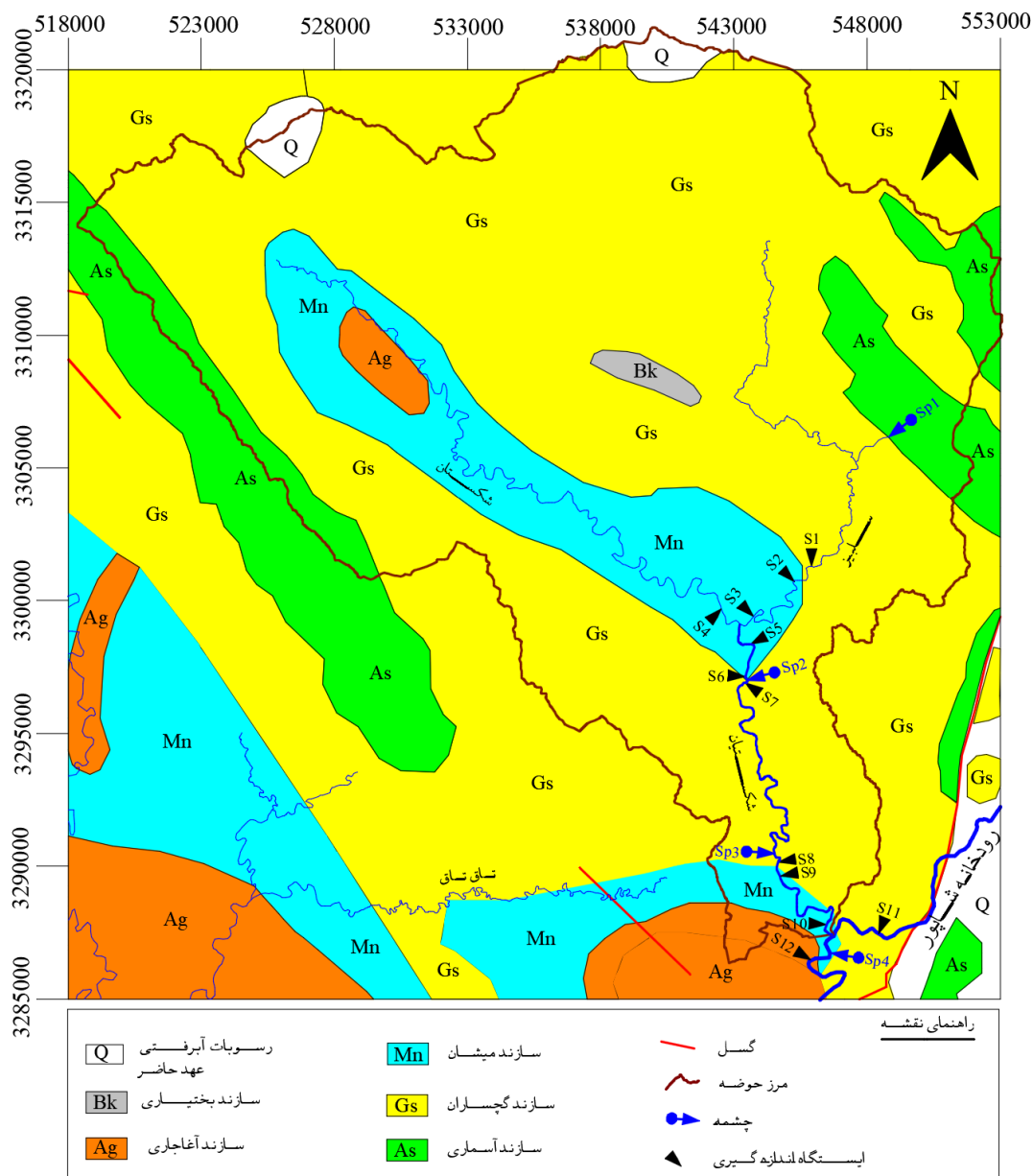
محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه شور شکستیان با مساحتی در حدود ۶۲۵ کیلومتر مربع، بزرگترین زیر حوضه رودخانه شاپور می‌باشد که در جنوب غربی شهرستان کازرون و در غرب رودخانه شاپور واقع شده است. رودخانه شور شکستیان از اتصال دو رودخانه سلبیز و شکستان شکل می‌گیرد و پس از طی یک مسیر کوهستانی با جهت جریان شمال به جنوب، در غرب روستای بوشیگان به رودخانه شاپور می‌ریزد. مساحت حوضه‌های آبریز سلبیز و شکستان در محل اتصال به یکدیگر به ترتیب در حدود ۲۲۳ و ۳۲۸ کیلومتر مربع می‌باشد. در محدوده مورد مطالعه، ۲ ایستگاه هیدرومتری بوشیگان و شکستیان وجود دارد که کمیت و کیفیت آب رودخانه‌های شاپور و شکستیان در آنها اندازه‌گیری شده و آمار آنها در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایستگاه هیدرومتری بوشیگان بر روی رودخانه شاپور و قبل از اتصال رودخانه شور شکستیان به آن قرار دارد. ایستگاه هیدرومتری شکستیان نیز بر روی رودخانه شور شکستیان و در محل اتصال این رودخانه به رودخانه شاپور قرار دارد. بر اساس آمار بلندمدت اندازه‌گیری شده دبی و شوری در ایستگاه هیدرومتری شکستیان، رودخانه شور شکستیان با متوسط آبدهی سالانه ۴۸/۵ میلیون متر مکعب، سالانه در حدود ۲۵۸۰۰۰ تن نمک به داخل رودخانه شاپور تخلیه می‌نماید.

زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و اندازه‌گیری‌ها

کیفیت و کمیت آب رودخانه شور شکستیان به شدت متأثر از موقعیت مکانی و مساحت سطح سازندهای تشکیل دهنده حوضه آبریز این رودخانه می‌باشد. بنابراین شناخت دقیق زمین‌شناسی حوضه آبریز این رودخانه می‌تواند در منشایابی دقیق‌تر منابع شورکننده رودخانه و همچنین ارائه راه‌حل مناسب به منظور مدیریت و یا حذف منابع شور کننده رودخانه مفید باشد. از نظر زمین‌شناسی، حوضه آبریز رودخانه شور شکستیان از سازند آهکی آسماری با مساحت ۴۷/۷ کیلومتر مربع (۷/۶ درصد از مساحت حوضه)، سازند تبخیری گچساران با مساحت ۴۵۸/۵ کیلومتر مربع (۷۳/۴ درصد)، سازند میشان با مساحت ۹۰/۸ کیلومتر مربع (۱۴/۵ درصد)، سازند آغاچاری با مساحت ۱۷/۲ کیلومتر مربع (۲/۸ درصد)، سازند کنگلوامرای بختیاری با مساحت ۳/۸ کیلومتر مربع (۰/۶ درصد) و آبرفت‌های عصر حاضر با مساحت ۷ کیلومتر مربع (۱/۱ درصد) تشکیل شده است.

در پژوهش حاضر، برای تعیین منشأ تغذیه آب و شوری منابع شورکننده حوضه آبریز رودخانه شکستیان از چهار روش ردیابی هیدرو-شیمیایی، حرارتی، ایزوتوپی و دبی استفاده شده است. به منظور انجام روش‌های ردیابی ذکر شده، در مجموع چهار چشمه و ۱۱ ایستگاه رودخانه‌ای در محدوده مورد مطالعه برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری انتخاب شده است و از آنها در فصل خشک در تاریخ ۱۳۹۹/۵/۲۹ و در فصل تر در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۵ نمونه‌برداری انجام شده است. موقعیت چشمه‌ها و ایستگاه‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری بر روی نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است. ایستگاه‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری و علائم نشاندهنده آنها شامل ۱- چشمه سلبیز (Sp1)، ۲- چشمه شور بستر شکستیان (Sp2)، ۳- چشمه نمکی دره گیجک (Sp3)، ۴- یک چشمه شور در ساحل جنوبی رودخانه شاپور در پایین‌دست اتصال شکستیان (Sp4)، ۵- ایستگاه‌های S1 تا S3 بر روی رودخانه سلبیز، ۶- ایستگاه S4 در بر روی خروجی رودخانه شکستان، ۷- ایستگاه‌های S5 تا S10 بر روی رودخانه شکستیان و ۸- ایستگاه‌های S11 و S12 بر روی رودخانه شاپور در بالادست و پایین‌دست محل اتصال رودخانه شکستیان می‌باشند.

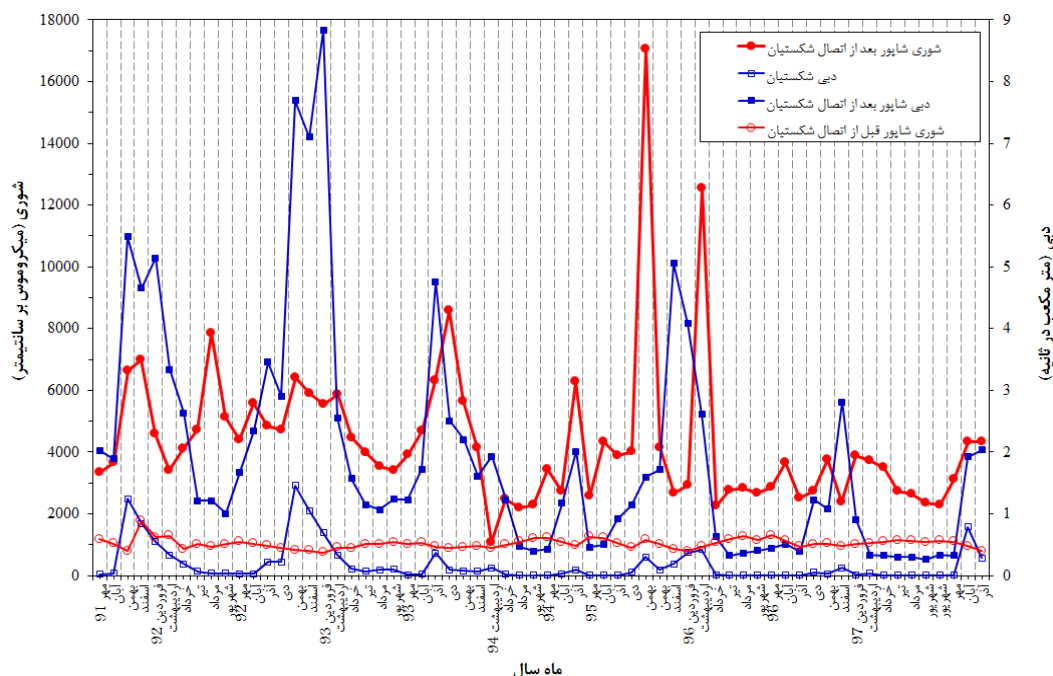


شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و موقعیت مکانی ایستگاه‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری

نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر شوری آب رودخانه شور شکستیان بر روی شوری آب رودخانه شاپور، داده‌های دبی و شوری آب رودخانه شاپور در قبل و بعد از اتصال رودخانه شور شکستیان (ایستگاه‌های S11 و S12) مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از این داده‌ها، تغییرات زمانی شوری و دبی آب رودخانه شاپور در ایستگاه هیدرومتری بوشیگان با شوری و دبی آن پس از اتصال رودخانه شور شکستیان در شکل (۲) مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، رودخانه شور شکستیان باعث افزایش شوری رودخانه شاپور از حدود ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتیمتر در ایستگاه هیدرومتری بوشیگان به بیش از پنج برابر می‌-

شود. در حادثه‌ترین مورد، رودخانه شور شکستیان در تاریخ ۵ بهمن ماه ۱۳۹۵ باعث افزایش شوری رودخانه شاپور از ۱۱۶۲ میکروموس بر سانتیمتر در محل ایستگاه هیدرومتری پوشیگان به ۱۷۰۵۰ میکروموس بر سانتیمتر در پایین‌دست محل اتصال رودخانه شور شکستیان شده است.



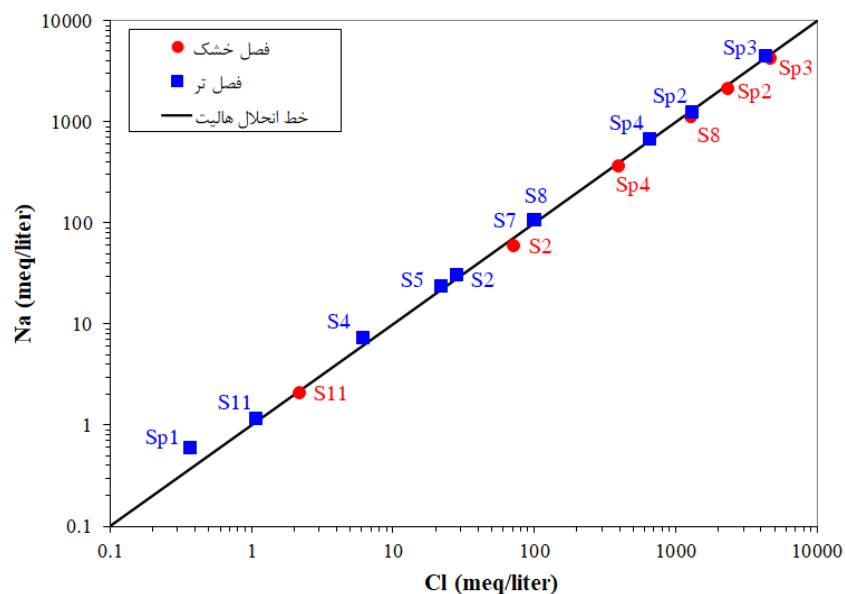
شکل ۲. تاثیر دبی و شوری رودخانه شور شکستیان بر روی شوری آب رودخانه شاپور (مقایسه تغییرات زمانی شوری آب رودخانه شاپور قبل و بعد از اتصال رودخانه شور شکستیان)

به منظور شناسایی منابع شورکننده رودخانه شور شکستیان و تعیین نقش هر کدام از آنها در شوری رودخانه، شوری آب رودخانه شکستیان از سرشاخه‌ها تا محل اتصال آن به رودخانه شاپور و همچنین شوری آب رودخانه شاپور در مجاورت محل اتصال رودخانه شکستیان به رودخانه شاپور در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری و ثبت شده است. با توجه به نتایج این اندازه‌گیری‌ها، مهمترین منابع دائمی شورکننده آب رودخانه شکستیان عبارتند از: ۱- بستر شور رودخانه سلبیز: طول این قسمت از رودخانه سلبیز در حدود ۱۰ کیلومتر بوده و در حدفاصل بین محل اتصال آب چشمه‌های گردنبه و سلبیز به رودخانه سلبیز قرار دارد، ۲- چشمه شور بستر شکستیان: این چشمه در ورودی دره شکستیان و در مرز بین سازندهای میشان و گچساران از بستر رودخانه شکستیان و از سطحی به مساحت حدود ۱۰۰۰ متر مربع خارج می‌شود. شوری آب خروجی از چشمه شور بستر در حدود ۱۵۰۰۰ میکروموس بر سانتیمتر می‌باشد، ۳- چشمه نمکی دره گیجک: این چشمه با دبی ثابتی در حدود ۰/۴ لیتر در ثانیه و شوری حدود ۳۷۰۰۰ میکروموس بر سانتیمتر از خروجی دره شکستیان و در مرز بین سازندهای گچساران و میشان از ساحل راست رودخانه شور شکستیان خارج می‌شود و ۴- نشی‌های شور بستر رودخانه شاپور: این نشی‌های شور در مرز بین سازندهای میشان و گچساران در حدفاصل بین ایستگاه هیدرومتری پوشیگان تا یک کیلومتری پایین‌دست محل اتصال رودخانه شور شکستیان به رودخانه شاپور قرار دارند. به دلیل قرار گرفتن اکثر نشی‌های شور بر روی بستر رودخانه شاپور، بیشتر آنها به خصوص در زمان‌های پرآبی قابل مشاهده نمی‌باشند. اما با اندازه‌گیری تغییرات مکانی شوری رودخانه شاپور در پایین‌دست

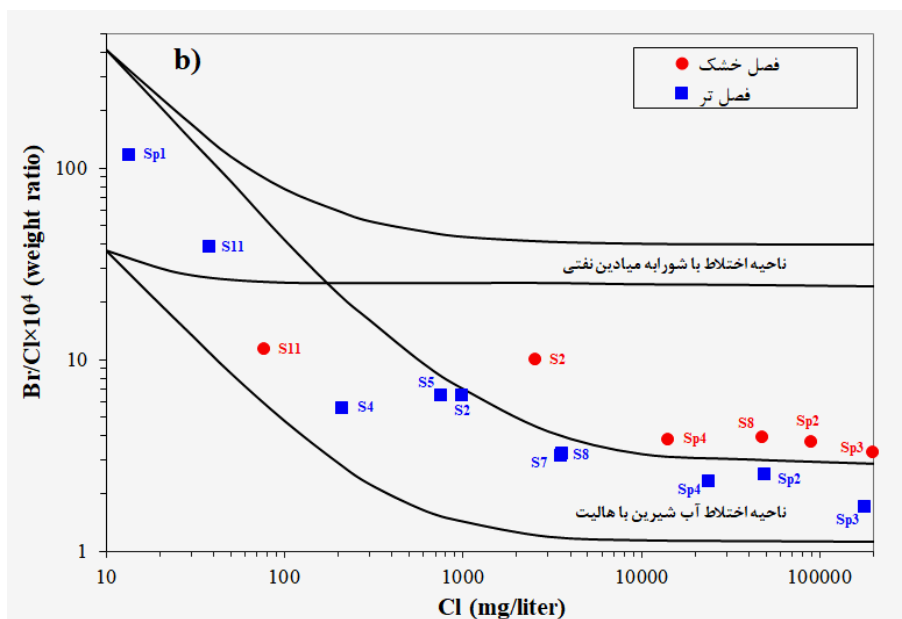
ایستگاه هیدرومتری بوشیگان و بررسی دقیق سواحل رودخانه شاپور در زمان‌های کم‌آبی می‌توان به وجود آنها پی برد. در بین منابع ذکر شده، چشمه شور بستر شکستیان مهمترین عامل شورکننده رودخانه شکستیان می‌باشد.

برای ارائه راه‌حل مناسب برای کاهش شوری رودخانه شور شکستیان و در نتیجه کاهش میزان تخلیه نمک از رودخانه شکستیان به رودخانه شاپور، ابتدا بایستی منشأ تغذیه آب و شوری منابع شورکننده حوضه آبریز رودخانه شکستیان، به خصوص منشأ چشمه‌های شور حوضه آبریز رودخانه شور شکستیان، مشخص شود. همانطور که قبلاً گفته شد، بیش از ۷۰ درصد مساحت حوضه آبریز رودخانه شور شکستیان از سازند گچساران تشکیل شده است. با توجه به اینکه سازند گچساران، سنگ پوش مخازن نفتی در جنوب کشور بوده و این سازند دارای واحد نمکی می‌باشد، بنابراین شورابه میادین نفتی و انحلال سنگ نمک (هالیت) محتمل‌ترین منابع ممکن برای شورکنندگی آبهای حوضه آبریز رودخانه شور شکستیان می‌توانند باشند. همچنین به دلیل گرم و خشک بودن اقلیم حوضه آبریز رودخانه شکستیان و کم بودن دبی آبهای سطحی این حوضه در طی فصول خشک، پدیده تبخیر از سطح آبهای سطحی این حوضه نیز می‌تواند باعث تشدید شوری در طی فصل خشک شود. به منظور تعیین منشأ شوری می‌توان از نمودارهای غلظت مولی یون سدیم (Na) بر حسب یون کلر (Cl) و همچنین نسبت جرمی برم به کلر (Br/Cl) بر حسب غلظت جرمی یون Cl استفاده نمود. در انحلال هالیت، یون‌های Na و Cl معمولاً دارای غلظت مولی یکسان می‌باشند در حالیکه در شورابه میادین نفتی، غلظت مولی Na به مراتب کمتر از Cl می‌باشد (Leonard and Ward, 1962). همچنین یون برم (Br) یکی از مهمترین عناصر ردیاب در هالیت می‌باشد. از آنجا که هالیت دارای مقادیر بسیار کم یون Br در ساختار معدنی خود می‌باشد، در نتیجه نسبت Br/Cl در هالیت به مراتب کمتر از مقدار آن در شورابه میادین نفتی می‌باشد (Whittemore, 1995; Sun et al., 2019; Jalali et al., 2019). همچنین پدیده تبخیر باعث افزایش نسبت Br/Cl در آب می‌شود (Richter and Kreitler, 1987). در شکل (۳)، غلظت مولی یون سدیم موجود در نمونه‌های آب برداشت شده بر حسب غلظت مولی یون کلر موجود در آنها نشان داده شده است. به منظور تعیین منشأ شوری، خط انحلال هالیت (سنگ نمک) که خطی با شیب ۱ به ۱ می‌باشد نیز ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تمامی داده‌ها در امتداد خط انحلال هالیت قرار گرفته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که منشأ شوری نمونه‌ها، انحلال هالیت یا سنگ نمک می‌باشد.

در شکل (۴)، نسبت وزنی یا جرمی Br/Cl موجود در نمونه‌های آب برداشت شده بر حسب غلظت جرمی یون کلر (Cl) موجود در آنها نشان داده شده است. محدوده‌های نواحی اختلاط آب شیرین با شورابه میادین نفتی و هالیت نیز از Whittemore (1984) استخراج شده و در شکل (۵-۲۲) ترسیم شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، تمامی داده‌های برداشت شده در طی فصل تر و همچنین رودخانه شاپور در بالادست اتصال شکستیان (ایستگاه S11) در محدوده اختلاط آب شیرین با هالیت قرار گرفته‌اند. این موضوع نیز نشان می‌دهد که منشأ شوری این آب‌ها، انحلال سنگ نمک می‌باشد و شورابه میادین نفتی عامل و منشأ شوری نمی‌باشد. همچنین، غلظت Br/Cl در نمونه‌هایی که در طی فصل خشک از چشمه‌های شور مورد مطالعه و همچنین آبهای سطحی حوضه آبریز رودخانه شکستیان برداشت شده‌اند نسبت به مقادیر متناظر آنها در طی فصل تر تا حدود قابل توجهی بیشتر می‌باشد. دلیل این افزایش تأثیر پدیده تبخیر می‌باشد و نتیجه بسیار مهمی که می‌توان از آن گرفت این است که منشأ تغذیه آب چشمه شور بستر شکستیان (Sp2)، چشمه نمکی دره گیجک (Sp3) و چشمه شور بستر شاپور (Sp4)، آبهای سطحی می‌باشند که قبل از فرآیند تغذیه در فصل خشک به شدت تحت تأثیر پدیده تبخیر قرار گرفته‌اند.



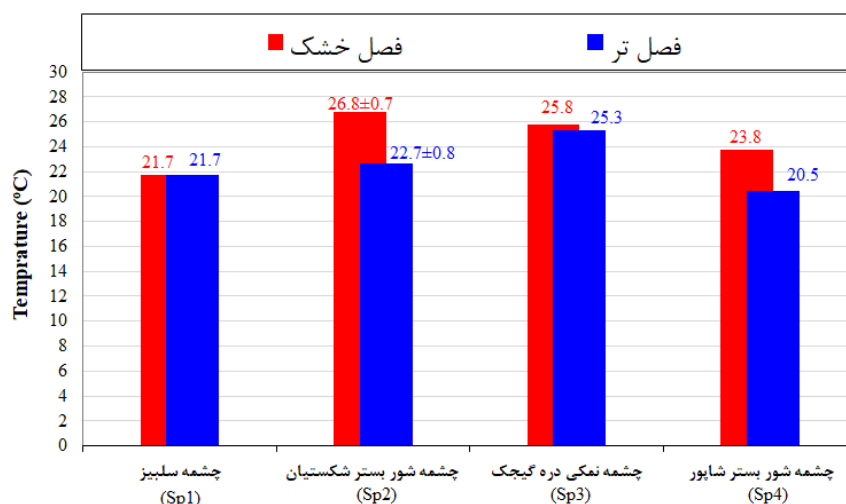
شکل ۳. غلظت یون سدیم (Na) موجود در نمونه‌های آب برداشت شده از رودخانه شکستیان و چشمه‌های حوضه آبریز آن بر حسب غلظت یون کلر (Cl) موجود در نمونه‌ها



شکل ۴. نسبت وزنی یا جرمی Br/Cl موجود در نمونه‌های آب برداشت شده بر حسب غلظت جرمی یون کلر (Cl) موجود در آنها

با توجه به اینکه واحد نمکی سازند گچساران تنها منبع نمک موجود در حوضه آبریز رودخانه شور شکستیان می‌باشد، بنابراین با استفاده از نتایج شکل‌های (۳) و (۴) می‌توان نتیجه گرفت که انحلال نمک موجود در سازند گچساران منشا شوری آب چشمه‌ها و رودخانه‌های حوضه آبریز رودخانه شور شکستیان می‌باشد. همچنین در طی فصل خشک، پدیده تبخیر عامل تشدید شوری می‌باشد.

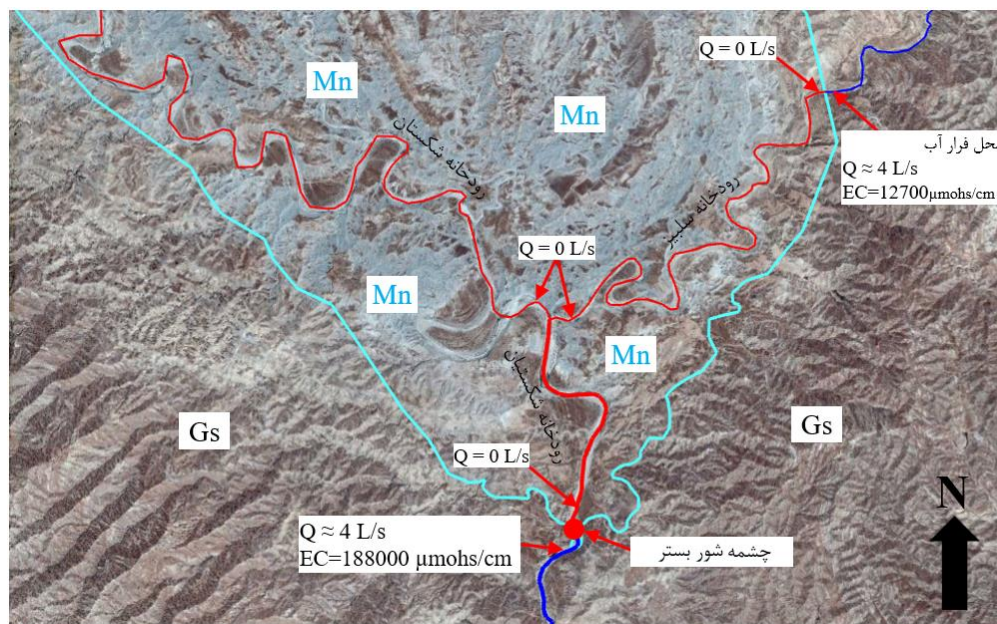
ردیابی حرارتی یک روش ساده و کم هزینه به منظور تعیین منشأ آب چشمه‌ها از نقطه نظر جریان‌های سطحی و یا زیرزمینی می‌باشد که در این پژوهش برای تعیین منشأ آب چشمه‌های شور حوضه آبریز رودخانه شکستیان مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور، تغییرات دمای لحظه‌ای آب چشمه سلبیز (Sp1)، چشمه شور بستر شکستیان (Sp2)، چشمه نمکی دره گیجک (Sp3) و چشمه شور بستر شاپور (Sp4) در دو بازه زمانی ۲۴ ساعته و در دو فصل خشک (۱۳۹۹/۵/۲۹) و تر (۱۳۹۹/۱۱/۵) اندازه‌گیری شده است. نتایج اندازه‌گیری دمای آب این چشمه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۵) ملاحظه می‌شود، در بین چشمه‌های مورد مطالعه فقط چشمه شور بستر شکستیان دارای نوسانات لحظه‌ای دما و آن هم به مقدار 1.5°C در طول شبانه‌روز می‌باشد. همچنین این چشمه دارای بیشترین نوسانات فصلی دما به مقدار 4.1°C در طول سال می‌باشد. نوسانات زیاد ساعتی و فصلی دمای آب چشمه شور بستر شکستیان نشان می‌دهد که به احتمال زیاد منشأ آب آن جریان‌های سطحی می‌باشد که در فاصله نسبتاً نزدیکی از محل چشمه قرار گرفته و مسیر زیرزمینی حرکت آنها نیز عمیق نمی‌باشد.



شکل ۵. تغییرات دمای آب چشمه سلبیز (Sp1)، چشمه شور بستر شکستیان (Sp2)، چشمه نمکی دره گیجک (Sp3) و چشمه شور بستر شاپور (Sp4) در دو بازه زمانی ۲۴ ساعته در دو فصل خشک و تر

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، چشمه شور بستر رودخانه شکستیان مهمترین عامل شورکننده رودخانه شکستیان می‌باشد. این چشمه در مرز بین سازندهای میشان و گچساران قرار گرفته است. با توجه به اینکه سازندهای میشان و گچساران قابلیت تشکیل آبخوان و در نتیجه چشمه‌هایی با دبی زیاد را ندارند، بنابراین منشأ آب چشمه شور بستر شکستیان می‌تواند فرار آب از لایه‌های آهکی سازند میشان در بستر رودخانه سلبیز در بالادست محل چشمه باشد که با ردیابی دبی می‌توان صحت این فرضیه را بررسی نمود. در شکل (۶)، نقشه زمین‌شناسی و نتایج اندازه‌گیری دبی و شوری در بالادست و پایین‌دست چشمه شور بستر رودخانه شکستیان در تاریخ تاریخ ۲۸ تیر ماه ۱۳۹۷ بر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه آورده شده است. در این شکل، مسیر رودخانه‌ها در محل‌هایی که خشک شده بودند با رنگ قرمز و در محل‌هایی که آب در بستر رودخانه‌ها جریان داشته است، با رنگ آبی مشخص شده‌اند. در تاریخ ردیابی دبی، دبی رودخانه سلبیز در حدود ۴ لیتر در ثانیه بود که قبل از رسیدن به مرز سازندهای میشان و گچساران، در بستر رودخانه نفوذ و یا به عبارت دیگر از بستر رودخانه سلبیز فرار می‌کرد. همچنین دبی

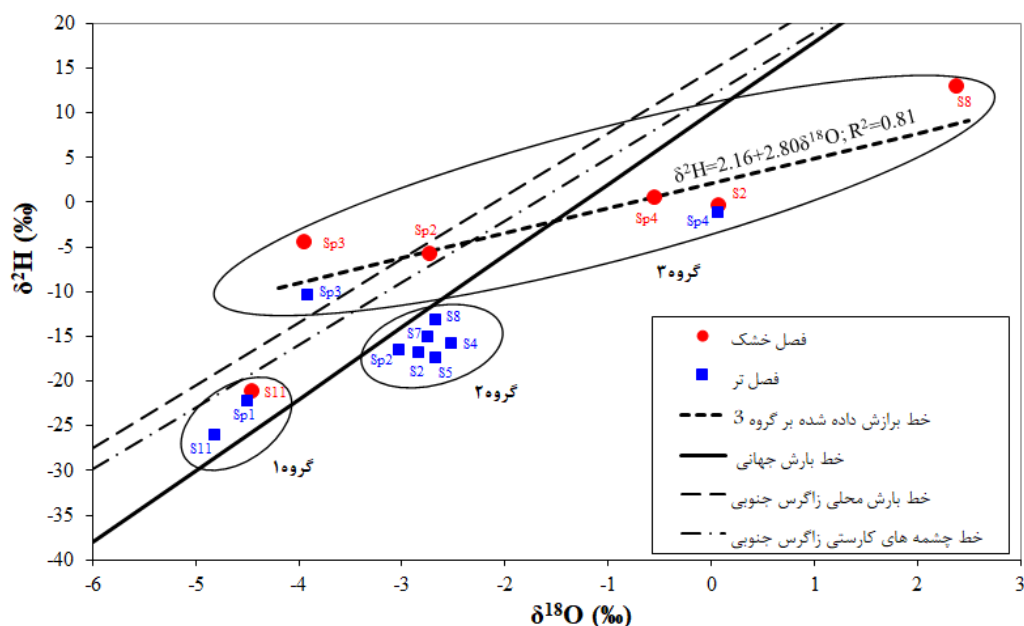
چشمه شور بستر شکستیان با دبی رودخانه سلبیز در نقطه فرار آب یکسان بود. در نتیجه از شکل (۶) می توان نتیجه گرفت که تمامی دبی رودخانه سلبیز در مرز بین سازندهای میشان و گچساران از بستر رودخانه سلبیز و از طریق لایه های آهکی بخش تحتانی سازند میشان فرار نموده و پس از طی مسیری کمتر از ۵ کیلومتر در زیر سطح زمین و تماس مستقیم با لایه های نمک سازند گچساران، به صورت چشمه شور در بستر رودخانه شکستیان ظاهر شده است.



شکل ۶. نقشه زمین شناسی و نتایج اندازه گیری دبی و شوری در بالادست و پایین دست چشمه شور بستر رودخانه شکستیان در تاریخ ۲۸ تیر ماه ۱۳۹۷

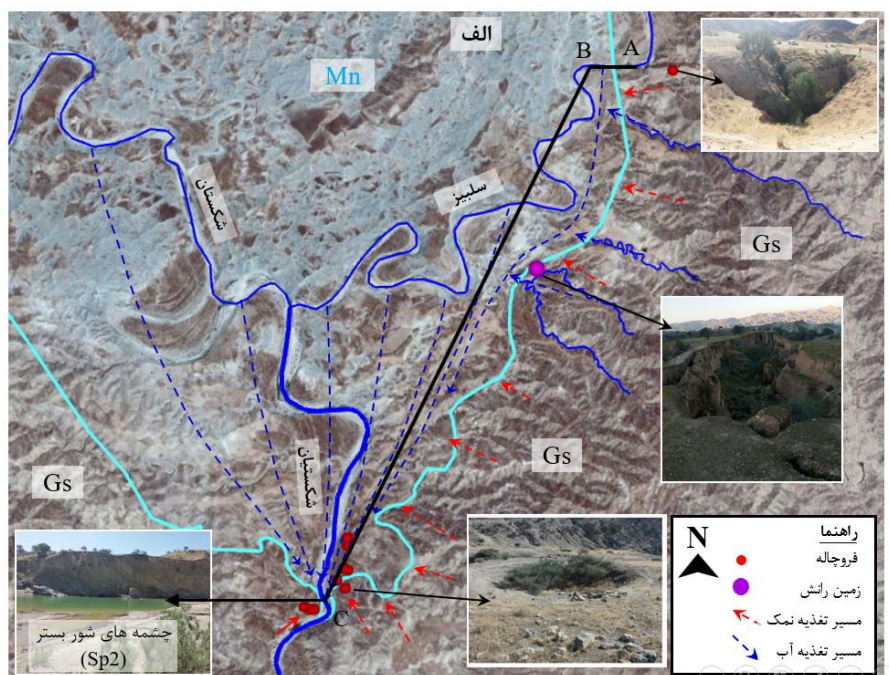
به منظور تعیین نوع منبع تغذیه چشمه های مورد مطالعه با استفاده از ردیابی ایزوتوپی، مقادیر $\delta^2\text{H}$ موجود در منابع آب محدوده مورد مطالعه بر حسب $\delta^{18}\text{O}$ موجود در آنها در شکل (۷) نشان داده شده است. به منظور تحلیل و تفسیر نتایج، خط جهانی بارش جوی از Craig (1961) و خطوط بارش محلی و چشمه های کارستی زاگرس جنوبی از Heidarizad et al., (2019) در شکل (۷) ترسیم شده اند. با توجه به شکل (۷)، منابع آب موجود در محدوده مورد مطالعه را از نظر نوع منبع تغذیه می توان به سه گروه مجزا تقسیم بندی نمود. گروه اول شامل چشمه سلبیز و رودخانه شاپور در قبل از اتصال شکستیان می باشد که منشأ تغذیه آب آنها مخازن آب زیرزمینی سازند آسماری بوده و همانطور که در مطالعات مرکز تحقیقات آب (۱۳۷۱) نیز به آن اشاره شده است، این آب ها به طور مستقیم از ریزش های جوی و بدون اثرپذیری از تبخیر تغذیه شده اند. به همین دلیل غلظت ایزوتوپ های اکسیژن-۱۸ و دوتریم در آب آنها کمتر از سایر گروه ها بوده و در مجاورت خط ایزوتوپی چشمه های کارستی زاگرس جنوبی قرار گرفته اند. گروه دوم شامل چشمه شور بستر شکستیان و آب رودخانه های سلبیز، شکستان و شکستیان در فصل تر است که غلظت ایزوتوپی آنها تقریباً یکسان بوده و از مقادیر متناظر آنها در فصل خشک کمتر ولی از آب های گروه ۱ بیشتر می باشد. دلیل آن تاثیرپذیری کمتر این آب ها در فصل تر از تبخیر به دلیل دبی زیاد، مرطوب تر بودن هوا و پایین تر بودن دمای هوای منطقه می باشد. گروه سوم شامل چشمه شور بستر شکستیان و آب رودخانه های سلبیز و شکستیان در فصل خشک به همراه چشمه نمکی دره گیجک و چشمه شور بستر شاپور در هر دو فصل خشک و تر می باشد که تحت تاثیر پدیده تبخیر

غلظت ایزوتوپی آنها زیاد می‌باشد. به دلیل زیاد بودن زمان ماند آب چشمه‌های نمکی دره گیجک و چشمه شور بستر شاپور در زیرزمین، تبادل ایزوتوپی بین آب و محیط پیرامونی آن به خوبی اتفاق افتاده و باعث تعادل ایزوتوپی در آب این چشمه‌ها در طول فصول خشک و تر شده است. این موضوع باعث شده است که غلظت ایزوتوپی آب چشمه‌های نمکی دره گیجک و چشمه شور بستر شاپور کمتر تحت تاثیر نوسانات فصلی قرار بگیرد. در مجموع، متفاوت بودن رفتار ایزوتوپی چشمه شور بستر شکستیان همانند آبهای سطحی در دو فصل تر و خشک و تبعیت رفتار ایزوتوپی آن از رفتار ایزوتوپی آبهای سطحی تأیید می‌کند که منشأ تغذیه آب این چشمه از آبهای سطحی می‌باشد. بنابراین، نتایج ردیابی ایزوتوپی تأییدکننده نتایج ردیابی هیدروشیمیایی، حرارتی و دبی می‌باشد.



شکل ۷. مقادیر مقادیر $\delta^2\text{H}$ موجود در منابع آب محدوده مورد مطالعه بر حسب $\delta^{18}\text{O}$ موجود در آنها

با توجه به نتایج به دست آمده از ردیابی‌های هیدرو-شیمیایی، حرارتی، دبی و ایزوتوپی، مدل مفهومی تغذیه آب و نمک چشمه شور بستر شکستیان در فصل تر شامل پلان در شکل (۸ الف) و مقطع هیدروژئولوژیک در شکل (۸ ب) ترسیم شده است. لازم به ذکر است که در طی فصل تر تعدادی آبراهه کوچک در ضلع جنوبی رودخانه سلبیز نیز وجود دارند که آب آنها پس از طی مسافتی کوتاه و قبل از رسیدن به مرز سازندهای میشان و گچساران در بستر آبرفتی این آبراهه‌ها ناپدید می‌شوند. به احتمال زیاد این آب‌ها از طریق محیط آبرفتی بستر آبراهه‌های آنها به لایه‌های آهکی بخش تحتانی سازند میشان تغذیه شده و با آب تغذیه شده از بستر رودخانه سلبیز یکی می‌شوند. وجود فروچاله‌های متعدد در مرز بین سازندهای میشان و گچساران که موقعیت و تصاویر تعدادی از آنها بر روی شکل (۸ الف) آورده شده است، نشان می‌دهد که عامل شور کننده آب چشمه شور بستر واحد نمکی سازند گچساران می‌باشد که جهت حرکت آن از جنوب شرقی به سمت مسیر تغذیه آب چشمه شور بستر بوده که پس از تماس مستقیم با آن حل شده و باعث شور شدن آب خروجی از چشمه شور بستر می‌شود.



شکل ۸. مدل مفهومی تغذیه آب و نمک چشمه شور بستر شکستیان در فصل تر (الف) پلان (ب) مقطع طولی

نتیجه گیری و پیشنهادات

بر اساس آمار بلندمدت اندازه گیری شده دبی و شوری در ایستگاه هیدرومتری شکستیان، رودخانه شور شکستیان با متوسط آبدهی سالانه ۴۸/۵ میلیون متر مکعب، سالانه در حدود ۲۵۸۰۰۰ تن نمک به داخل رودخانه شاپور تخلیه می نماید. چشمه شور بستر شکستیان مهمترین منبع دائمی شور کننده رودخانه شور شکستیان می باشد. بررسی های زمین شناسی، نتایج آنالیز یونی، ردیابی حرارتی، ردیابی ایزوتوپی و اندازه گیری تغییرات دبی در محدوده بالادست و پایین دست چشمه شور بستر شکستیان نشان می دهد که فرار آب از لایه های آهکی سازند میشان در بستر رودخانه سلیمز، منشأ اصلی آب چشمه شور بستر می باشد. البته این چشمه نیز می تواند از بستر زیرشاخه شکستان و بارندگی های فصلی نیز تغذیه شود. بنابراین با حذف منبع تغذیه آب این چشمه می توان انتظار خشکاندن چشمه شور بستر شکستیان را داشت.

با توجه به اینکه چشمه شور بستر شکستیان مهمترین عامل شور کننده رودخانه شکستیان می باشد، خشکاندن یا کاهش دبی چشمه شور بستر شکستیان با حفر چند حلقه چاه پمپاژ و یا احداث یک زهکش حائل زیرزمینی در ضلع جنوبی رودخانه سلیمز به

منظور زهکشی آب تغذیه شده از بستر رودخانه سلیبز در قبل از رسیدن به محل چشمه شور بستر می‌تواند بهترین روش کاهش شوری رودخانه شکستیان باشد. ولی قبل از آن پیشنهاد می‌شود که در حدفاصل بین رودخانه سلیبز تا محل چشمه شور بستر شکستیان، یک شبکه پیزومتری (حداقل ۵ پیزومتر) به عمق سازند میشان ایجاد شود و سپس تغییرات مکانی و زمانی کیفیت و تراز سطح آب در داخل این پیزومترها در دو فصل خشک و تر پایش شود تا بتوان با قاطعیت بیشتری در ارتباط با وجود یا عدم وجود راه‌حل، اظهارنظر کرد.

مراجع

- [۱] مرکز تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو. (۱۳۷۱). مطالعه ایزوتوپی منابع آب حوزه رودخانه شاپور: بررسی منشا و ارتباط آب شور و شیرین حوزه رودخانه شاپور، گروه تحقیقات و اندازه‌گیری صحرایی.
- [۲] مهندسین مشاور یکم. (۱۳۷۳). گزارش مطالعات مرحله اول جلوگیری از شوری رودخانه شاپور. جلد اول، زمین‌شناسی تکمیلی.

- [3] Bosak, P., Jaros, J., Spudil, J., Sulovsky, P., and Vaclavek, V. (1998). Salt plugs in the eastern Zagros, Iran: results of regional reconnaissance. *GeoLines*, 7, 3–174.
- [4] Cañedo-Argüelles, M., Kefford, B.J., Piscart, C., Prat, N., Schäfer, R.B., and Schulz, C.J. (2013). Salinisation of rivers: an urgent ecological issue. *Environmental Pollution*, 173, 157–167.
- [5] Cañedo-Argüelles, M., Hawkins, C.P., Kefford, B.J., Schäfer, R.B., Dyack, B.J., Brucet, S., Buchwalter, D., Dunlop, J., Fror, O., Lazorchak, J., Coring, E., Fernandex, H.R., Goodfellow, W., Gonzalez Achem, A.L., Hatfield-Dodds, S., Karimov, B.K., Mensah, P., Olson, J.R., Piscart, C., Prat, N., Ponsa, S., Schulz, and C.J., Timpano, A.J. (2016). Saving freshwater from salts. *Science*, 351 (6276), 914–916.
- [6] Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702–1703.
- [7] Heydarizad, M., Raeisi, E., Sorí, R., and Gimeno, L. (2019). Developing meteoric water lines for Iran based on air masses and moisture sources. *Water*, 11, 2359.
- [8] Jalali, L., Zarei, M., and Gutiérrez, F. (2019). Salinization of reservoirs in regions with exposed evaporites. The unique case of Upper Gotvand Dam, Iran. *Water Research*, 157, 587-599.
- [9] Jones, E., and van Vliet, and M.T.H. (2018). Drought impacts on river salinity in the southern US: Implications for water scarcity. *Science of the Total Environment*, 644, 844–853.
- [10] Kent, P.E. (1979). The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 2, 117–144.
- [11] Leonard, A.R., and Ward, P.E. (1962). Use of Na/Cl ratios to distinguish oil field from salt-spring brines in western Oklahoma. US Geological Survey Professional Paper, B126-B8127.
- [12] Morford, S. (2019). Salinity in the Colorado River Basin. [https://watershed.ucdavis.edu/education/classes/files/content/page/6%20Morford-Colorado Basin Salinity.pdf](https://watershed.ucdavis.edu/education/classes/files/content/page/6%20Morford-Colorado%20Basin%20Salinity.pdf).
- [13] Richter, B.C., and Kreitler, C.W. (1987). Sources of ground water salinization in parts of west Texas. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 7(4), 75–84.
- [14] Sun, S., Li, M., Yan, M., Fang, X., Zhang, G., Liu, X. and Zhang, Z. (2019). Bromine content and Br/Cl molar ratio of halite in a core from Laos: implications for origin and environmental changes. *Carbonates and Evaporites*, 34, 1107-1115.
- [15] Whittemore, D. (1984). Geochemical identification of salinity sources, in R. H. French (ed.), *Salinity in watercourses and reservoirs* (Proceedings of the 1983 International Symposium on State-of-the-Art Control of Salinity), 505-514.
- [16] Whittemore, D. (1995). Geochemical differentiation of oil and gas brine from other saltwater sources contaminating water resources: Case studies from Kansas and Oklahoma. *Environmental Geosciences*, 2(1), 15-31.