



گستره آبخوان تحت فشار زنجانرود و ارتباط آن با منابع آب سطحی: تداخل سنجی راداری و هیدروژئولوژی

زینب توشه^۱، ابوالفضل رضائی^{۲*}، زهرا موسوی^۳، میثم امیری^۴، فاطمه عینلو^۵

- ۱- کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.
- ۲- دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.
- ۳- دانشیار ژئودزی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.
- ۴- دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.
- ۵- دکتری مهندسی آبیاری، گروه مطالعات منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای زنجان، زنجان، ایران.

* نویسنده مسئول: arezaei@iasbs.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

چکیده

اخیراً چندین چاه عمیق در انتهای حوضه آبرگیر زنجانرود، تشکیل شده از مارن‌های ضخیم، حفر گردیده که به‌طور تصادفی به یک آبخوان تحت فشار برخورد نموده‌اند. برای تعیین گستره این آبخوان عمیق، و ارزیابی ارتباط هیدرولیکی آن با آب‌های جوی و منابع آب سطحی، این تحقیق از تلفیق تداخل‌سنجی راداری، لاگ لیتولوژی، هیدروشیمی و ایزوتوپ‌های پایدار منابع آبی منطقه به همراه بارش ارتفاعات استفاده می‌برد. ابتدا، تصاویر ماهواره Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ پردازش و سپس میدان سرعت متوسط در منطقه در راستای خط دید ماهواره با روش آنالیز سری زمانی خط مبنای کوتاه محاسبه شده است. در عمل یک رابطه مستقیم بین نوسانات فشار هیدرواستاتیک آبخوان تحت فشار و تغییرات ضخامت آبخوان و به تبع نوسانات تراز ارتفاعی زمین وجود دارد. بنابراین، نقشه بزرگای فصلی نوسانات تراز ارتفاعی زمین حاصل از تداخل‌سنجی راداری به خوبی گستره آبخوان تحت فشار زنجانرود (۱۳۵ کیلومتر مربع) را به نمایش درآورد، به‌نحوی که با شواهد هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی منطقه نیز همخوان است. نتایج هیدروشیمیایی و ایزوتوپ‌های پایدار منابع آبی منطقه بیانگر ارتباط آبخوان تحت فشار با سیستم هیدرولوژی کنونی است. اما منشا آن متفاوت از رودخانه زنجانرود و آبخوان آزاد سطحی است. در مقابل، منشا احتمالی آن به دامنه‌های ارتفاعات شمال شرقی منطقه نسبت داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبخوان تحت فشار زنجانرود، ایزوتوپی، تداخل‌سنجی راداری، هیدروشیمی.

مقدمه

میانگین معادل ۳۰۰ میلی‌متر در سال، در دسته‌بندی مناطق نیمه خشک ایران قرار دارد که میانگین نرخ رشد جمعیت سالانه در استان زنجان برابر با ۰/۸۱ درصد بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). در نتیجه با توجه به افزایش روز افزون جمعیت، برداشت از آب‌های زیرزمینی نسبت به گذشته حدود شش برابر افزایش داشته است، به‌طوری‌که طبق آمارهای در دسترس، میزان برداشت سالانه از منابع آب در برخی از

افزایش روزافزون جمعیت و پیشرفت‌های صنعتی باعث شده است که انسان امروزی از منابع طبیعی در دسترس خود بهینه‌تر استفاده کند. از آنجا که ایران غالباً در منطقه خشک و نیمه خشک قرار دارد، شناسایی گستره و عمق منابع آب زیرزمینی و برآورد حجم ذخیره آبخوان‌ها می‌تواند به مدیریت بهینه آب در یک منطقه کمک نماید. استان زنجان با بارش

هیدرولیکی در نقاط فاقد پیزومتر (Chen et al., 2016)؛
(Shahbazi et al., 2022؛ Rezaei and Mousavi, 2019
کالیبراسیون مدل‌های ریاضی جریان آب زیرزمینی
(Calderhead et al., 2011؛ Hoffmann et al., 2003)
تغییرات ذخیره آب زیرزمینی (Jiang et al., 2018)؛
(Castellazzi et al., 2016؛ Shahbazi et al., 2022) و اخیراً
نقشه‌برداری سیستم‌های آب زیرزمینی تحت فشار با هزینه کم
(Rezaei and Mousavi, 2019؛ Shahbazi et al., 2022)؛
(Mirzadeh et al., 2023؛ Sabeti et al., 2023)
(Rezaei and Mousavi, 2019) استفاده از تلفیق تکنیک
تداخل‌سنجی راداری با داده‌های هیدروژئولوژیکی، علاوه بر
تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان تحت فشار گرگان،
توانستند گستره دقیق آن را شناسایی کنند. (Shahbazi et al.,
2022) با استفاده از تغییر شکل‌های فصلی زمین بدست آمده
از تداخل‌سنجی راداری، ابتدا مرز سیستم آبخوان تحت فشار
در دشت سلماس را بطور دقیق ترسیم کردند و سپس ضریب
ذخیره اسکلتون، تراز هیدرولیکی در نقاط فاقد پیزومتر و حجم
آب برگشت‌ناپذیر برداشت شده که حاصل تحکیم لایه‌های رس
است را تخمین زدند. اخیراً به کمک تکنیک تداخل‌سنجی
راداری، گستره بخش تحت فشار آبخوان در دشت‌های ابرقو
یزد (Mirzadeh et al., 2023) و ابهر زنجان (Sabeti et al.,
2023) تعیین شده است؛ در حالیکه قبلاً اعتقاد بر این بود که
همه گستره این دو دشت تنها حاوی آبخوان آزاد است.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

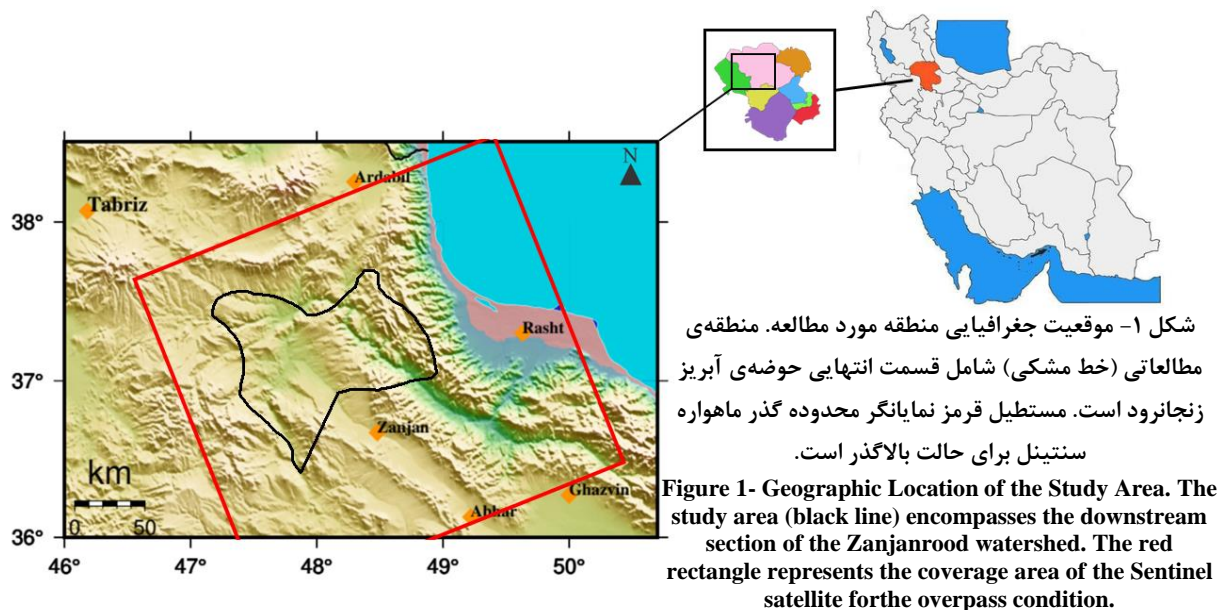
منطقه‌ی مطالعاتی، شامل بخش انتهایی حوضه‌ی آبریز
زنجان در شمال استان زنجان (شمال غربی ایران) بین
عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}00'$ تا $37^{\circ}30'$ و طول‌های جغرافیایی
 $47^{\circ}30'$ تا $49^{\circ}00'$ است (شکل ۱). این محدوده تاکنون مورد
مطالعه هیدروژئولوژیکی قرار نگرفته است، زیرا با توجه به وجود
لایه‌های ضخیم مارنی در منطقه فرض بر این بوده است که
فاقد منبع آب زیرزمینی مناسب است. از نظر زمین‌شناسی، دو
واحد PL و PL-Qt بیشترین رخمون را دارند. PL شامل
توالی رسوبات دانه درشت کنگلومرا، سلیتستون و ماسه سنگ
همراه با مارن و PL-Qt حاوی رسوبات دانه ریز پلیوسن-
کواترنری تفکیک نشده است. از آنجا که واحد PL در زیر واحد
PL-Qt قرار دارد، از نظر تئوریک رسوبات دانه‌ریز PL-Qt
می‌تواند به عنوان لایه محبوس کننده برای لایه PL که

حوضه‌های آبریز، از ۴۹ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۶۰ به
۳۹۰ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۸۹ افزایش داشته است
(مهندس مشاور کنکاش عمران، ۱۳۹۴). در نتیجه مطالعه
منابع آب زیرزمینی می‌تواند نقش مهمی در مدیریت آب استان
ایفا کند. در چند سال اخیر، چندین چاه نسبتاً عمیق با عمق
بیشتر از ۱۰۰ متر در بخش انتهایی حوضه آبریز زنجان، در
اطراف اتوبان زنجان-تبریز، که قبلاً به عنوان یک منطقه فاقد
منابع آب زیرزمینی قابل استحصال شناخته شده بود، حفر
گردیده است که به‌طور اتفاقی به آبخوان نسبتاً عمیق تحت
فشاری برخورد نموده و آرتزین شده‌اند. این امر برای شرکت
آب منطقه‌ای زنجان به یک چالش تبدیل شد که آیا این
آبخوان عمیق از گستره و عمق قابل توجهی برای
سرمايه‌گذاری‌های آبی برخوردار است یا نه. نکته مهم دیگر
این است که آیا آبخوان مذکور حاوی آب فسیل است یا به
سیستم هیدروژئولوژیکی کنونی متصل است. همچنین، نحوه
ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان تحت‌فشار مذکور با رودخانه
زنجانرود و آبخوان آزاد کم عمق مجاور رودخانه به چه شکلی
است؟ به منظور پاسخ به این سوالات، این تحقیق از تلفیق
داده‌های تداخل‌سنجی راداری و هیدروژئولوژی (زمین‌شناسی،
لاگ حفاری، هیدروشیمی و ایزوتوپی) بهره برده است. شایان
ذکر است که داده‌های ایزوتوپی به عنوان یک روش مرسوم در
مطالعات هیدروژئولوژی کاربرد فراوان دارد (محمدزاده و
اسکندری، ۱۳۹۷؛ هادیپور هفشجانی و همکاران، ۱۳۹۷).

به منظور شناسایی گستره آبخوان، نتایج تکنیک تداخل
سنجی راداری با مشخصات لاگ‌های حفاری منطقه تلفیق
شده است. این تکنیک، روشی دقیق، کم‌هزینه با قدرت تفکیک
مکانی بالا برای اندازه‌گیری تغییر شکل زمین بشمار می‌رود
(Hanssen, 2001). تکنیک ژئودتیکی تصویربرداری راداری با
دریچه مصنوعی (InSAR) که نقشه سرعت جابه‌جایی زمین را
با وضوح فضایی بالا و دقت قابل قبولی در مقیاس جهانی ارائه
می‌دهد (J. Hu et al., 2014؛ Osmanoglu et al., 2016)؛
(Pepe and Calò, 2017؛ Xu et al., 2020)، علاوه بر تهیه نقشه
فرونشست (Galloway et al., 1998) تاکنون برای افزایش
دانش هیدروژئولوژیکی و توصیف ویژگی‌های آبخوان‌ها، به‌ویژه
در سیستم‌های آب زیرزمینی تحت فشار نیز بکار برده شده
است. مهمترین کاربردهای این تکنیک در مسائل
هیدروژئولوژیکی عبارتند از: تخمین ضرایب ذخیره اسکلتون
(به عنوان مثال، Galloway et al., 1998؛ Hoffmann et al.,
2003؛ Rezaei and Mousavi, 2019). تخمین تراز

پتانسیل تشکیل آبخوان دارد، عمل نماید. عملا با نزدیک شدن به مرکز دشت، لایه دانه درشت PL کاملا در زیر لایه دانه ریز PL-Qt دفن می‌گردد که این امر شرایطی را فراهم می‌کند که می‌تواند به عنوان یک سیستم آبخوان تحت فشار عمل کند.

پتانسیل تشکیل آبخوان دارد، عمل نماید. عملا با نزدیک شدن به مرکز دشت، لایه دانه درشت PL کاملا در زیر لایه دانه ریز PL-Qt دفن می‌گردد که این امر شرایطی را فراهم می‌کند که می‌تواند به عنوان یک سیستم آبخوان تحت فشار عمل کند.



کلی، فاز یک تداخل‌نگار از مولفه‌های زیر تشکیل شده است (Hanssen, 2001):

$$\phi_{int} = \Delta\phi_{disp} + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{flat} \quad (1)$$

که در این معادله $\Delta\phi_{int}$ نشان‌دهنده اختلاف فاز تداخل‌نگار، مولفه $\Delta\phi_{topo}$ نشان‌دهنده اختلاف فاز ناشی از توپوگرافی و $\Delta\phi_{flat}$ ناشی از مسطح بودن زمین است (Hanssen, 2001). برای تعیین مولفه ناشی از تغییرشکل، مولفه‌های دیگر با استفاده از فایل‌های کمکی از فاز تداخل‌نگار حذف می‌شود. فاز زمین مسطح با استفاده از فایل‌های مداری و فاز توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی تصحیح می‌شوند. جهت انجام آنالیز تحلیل سری زمانی بر روی تداخل‌نگارهای تولید شده از روش خط مبنای کوتاه^۴ استفاده می‌شود. در این روش فقط از زوج تصاویری استفاده می‌شود که مولفه خط مبنای عمودی آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنای باشد و همچنین خط مبنای زمانی آن‌ها نیز کمینه باشد. بنابراین با توجه به خط مبنای مکانی و زمانی که تعیین شده است، مجموعه‌ای از تداخل‌نگارهایی که همبستگی مناسبی داشته باشند، تشکیل می‌گردد. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات مقدار

تکنیک تداخل‌سنجی راداری

تکنیک تداخل‌سنجی راداری به تکنیک استفاده از تداخل موج‌های الکترومغناطیسی به منظور استخراج داده‌ها گفته می‌شود. تصاویر راداری بدست آمده از ماهواره‌ها بسته به جهت حرکت ماهواره از پایین به بالا (جنوب به شمال) یا از بالا به پایین (شمال به جنوب) به ترتیب به دو دسته بالاگذر^۱ و پایین‌گذر^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. سیگنال‌های دریافتی توسط ماهواره به صورت مجموعه‌ای از اعداد مختلط هستند که این اعداد مختلط دارای یک بخش حقیقی دامنه و یک بخش موهومی فاز می‌باشند. تغییر شکل ایجاد شده در سطح زمین بر روی دامنه تاثیر زیادی نمی‌گذارند ولی فاز را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند. به همین علت اساس کار علم تداخل‌سنجی راداری بر مبنای اختلاف فاز بین دو تصویر است. برای بدست آوردن اختلاف جابه‌جایی در دو تاریخ مختلف، فاز بدست آمده از دو گذر متوالی ماهواره از منطقه را از هم کم می‌کنیم، این اختلاف فاز بدست آمده تشکیل یک تداخل‌نگار^۳ را می‌دهد. در حالتی که هیچ خطا و نویزی در کار نباشد این اختلاف فاز به تنهایی نتیجه جابه‌جایی ایجاد شده در سطح زمین است. اما در شرایط واقعی عواملی بر این اختلاف فاز تاثیر می‌گذارند که باید از فاز تداخل‌نگار حذف گردند. در حالت

⁴ Small baseline subset (SBAS)

¹ Ascending

² Descending

³ Interferogram

پیزومتریکی کاهش می‌یابد، اسکلتون آبخوان منقبض و فرونشست الاستیک را خواهیم داشت. این رفتار آبخوان بخوبی توسط فرمول زیر قابل بیان است (Riely, 1969):

$$S_{ke}^* = \frac{\Delta b_e^*}{\Delta h_e} \quad (3)$$

که در آن Δb_e^* نشان دهنده جابجایی الاستیک سطح زمین در بالای آبخوان است (Chen et al., 2016)، و Δh_e افت تراز هیدرولیکی در شرایطی که تراز هیدرولیکی بالاتر از حداقل تراز پیش تحکیمی قرار دارد (Smith et al., 2017). با توجه به اینکه در رابطه بالا بین نوسانات فصلی سطح زمین و نوسانات فصلی فشار هیدرولیکی آبخوان محبوس رابطه مستقیم وجود دارد، بنابراین می‌توان به کمک نقشه نوسانات تراز ارتفاعی زمین حاصل از تداخل‌سنجی راداری گستره آبخوان محبوس را در هر دشتی مشخص نمود. شایان ذکر است که این رابطه در آبخوان آزاد صادق نیست زیرا تغییرات ذخیره آن بیشتر تابع زهکشی یا پر شدن خلل و فرج آبخوان است.

داده‌های هیدروژئولوژی

به‌منظور شناسایی عمق و ضخامت لایه تحت‌فشار زنجانرود، از لاگ‌های لیتولوژیکی تهیه‌شده در محل ۹ حلقه چاه آرتزین بهره برده شد. برای این کار با استفاده از نرم‌افزار GMS پروفایل هیدرواستراتیگرافی سیستم آبخوان به کمک لاگ‌های لیتولوژیکی موجود برای تعدادی از چاه‌ها تهیه شد. نقشه هیدرواستراتیگرافی نشان می‌دهد که یک‌لایه دانه درشت در عمق حدود ۱۰۰ و بیشتر از آن قرار دارد که پتانسیل تشکیل آبخوان تحت‌فشار را دارد. بالای این لایه دانه درشت یک واحد ضخیم از رسوبات رس و مارنی (آکیوتارد) واقع شده است که به عنوان لایه محبوس کننده عمل می‌کند (شکل ۲).

جابجایی هر پیکسل در طول زمان و بنابراین سرعت تغییر هر پیکسل در راستای خط دید ماهواره محاسبه می‌شود (Berardino et al., 2002).

برای بررسی و مطالعه میزان فرونشست و بالآمدگی فصلی در آبخوان تحت فشار زنجانرود از داده‌های ماهواره سنتینل-۱ متعلق به سازمان فضایی اروپا (ESA) استفاده شده است که دارای طول موج ۵/۶ سانتی متر است که در باند C و محدوده ماکروویو تصویربرداری می‌نماید. این ماهواره در ۳ آوریل ۲۰۱۴ مأموریت خود را آغاز کرد و قابلیت تصویربرداری در تمامی شبانه روز و در هر شرایط آب و هوایی را داراست. این تصاویر بصورت رایگان در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ دانلود شده و با استفاده از روش آنالیز سری زمانی خط مبنا کوتاه پردازش شده‌اند. تعداد تصاویر ۱۳۹ تصویر بوده و در مسیر بالاگذر تصویربرداری شده‌اند. داده توپوگرافی مورد نیاز جهت پردازش تصاویر این ماهواره در این مطالعه، مدل ارتفاعی رقومی ماهواره راداری ناسا (SRTM) است که قدرت تفکیک مکانی آن حدود ۳۰ متر می‌باشد. در اینجا برای برای پردازش داده‌ها از نرم‌افزار GMTSAR (به عنوان یک نرم‌افزار متن باز) و برای آنالیز سری زمانی از روش SBAS استفاده شده است.

مبانی ارتباط نوسانات فشار پیزومتریکی با نوسانات تراز ارتفاعی زمین

فشار پیزومتریکی به فشار هیدرولیکی آبخوان‌های تحت فشار گفته می‌شود و معمولاً بیشتر از فشار اتمسفر است. با افزایش تغذیه آبخوان در طی فصل‌های تر، فشار پیزومتریکی آبخوان افزایش می‌یابد که این امر سبب انبساط رسوبات آبخوان تحت فشار و در نتیجه افزایش ضخامت آبخوان می‌شود. این افزایش ضخامت خودش را بصورت افزایش تراز ارتفاعی زمین در سطح نشان می‌دهد که بوسیله تکنیک تداخل‌سنجی راداری قابل اندازه‌گیری می‌باشد. برای فصل خشک که فشار

جدول ۱- نتایج آنالیزهای فیزیکوشیمیایی و ایزوتوپی برای ۱۷ نمونه آب منطقه در طی عملیات صحرائی ۲۳ فروردین ۱۴۰۱ (فصل تر).
ها میلی‌اکی‌والان بر لیتر است. واحد اندازه‌گیری آنیون‌ها و کاتیون

Table 1 - Results of physicochemical and isotopic analyses for 17 water samples from the region during field operations on April 12, 2022 (wet season). The unit of measurement for anions and cations is meq/L.

ID	T (°C)	pH	EC (µS/cm)	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	Waer type	Error (%)	δD	δO ¹⁸
AW1	26.5	7.50	2450	1.84	5.77	16.80	0.11	5.44	0.88	18.09	0.12	Na-Cl	<0.05	-72.35	-9.37
AW2	22.3	7.21	13400	5.60	4.61	123.00	0.31	43.20	28.91	60.97	0.91	Na-Cl	<0.05	-60.6	-6.86
AW3	20.5	7.80	1220	2.48	0.51	9.00	0.19	3.36	1.20	7.51	0.12	Na-Cl	<0.05	-77.33	-9.25
AW4	21.4	7.77	1080	2.48	0.45	7.60	0.26	2.96	1.77	5.98	0.10	Na-Cl	<0.05	-77.36	-8.94

AW5	19.8	7.63	1640	2.44	1.07	12.60	0.29	2.16	3.05	11.10	0.12	Na-Cl	<0.05	-77.27	-8.97
AW6	15.4	8.40	2220	2.00	0.56	19.30	0.34	1.20	0.88	20.02	0.12	Na-Cl	<0.05	-81.11	-9.71
AW7	21.6	8.90	2330	3.52	2.54	16.80	0.32	2.72	3.85	16.52	0.13	Na-Cl	<0.05	-68.39	-8.33
AW8	21.5	7.50	5500	4.32	5.90	44.20	0.31	20.00	4.82	29.87	0.27	Na-Cl	<0.05	-62.27	-7.09
AW9	22.8	7.78	3600	3.08	0.97	31.40	0.39	1.68	3.05	31.02	0.22	Na-Cl	<0.05	-93.81	-10.71
AW10	19.0	7.20	1310	2.28	0.66	9.70	0.44	3.28	1.28	8.36	0.19	Na-Cl	<0.05	-77.12	-9.67
AW11	20.9	8.90	1290	2.40	0.76	9.21	0.38	3.84	1.28	7.66	0.10	Na-Cl	<0.05	-71.4	-10.09
AW12	NA	7.57	1430	2.64	1.55	9.08	1.17	4.48	1.61	8.29	0.11	Na-Cl	<0.05	-72.18	-9.82
R1	18.0	7.48	3780	3.48	13.25	19.89	1.07	16.16	5.30	16.03	0.31	Na-Ca-Cl-SO4	<0.05	-52.96	-7.13
R2	22.1	7.62	3030	3.20	13.02	13.05	0.98	10.32	6.34	13.38	0.24	Na-Ca-Cl-SO4	<0.05	-47.59	-5.54
R3	16.8	7.75	2630	4.40	7.39	13.00	1.45	8.00	5.62	12.45	0.23	Na-Ca-Cl-SO4	<0.05	-48.05	-5.29
W1	174.0	7.51	4430	5.64	21.20	15.60	1.84	27.60	1.20	15.20	0.26	Ca-Na-SO4-Cl	<0.05	-51.74	-6.32
W2	14.9	7.21	7700	4.04	32.18	39.00	1.60	41.60	6.42	28.45	0.41	Ca-Na-Cl-SO4	<0.05	-50.26	-6.04

جدول ۲- شبیه جدول ۱، اما برای نمونه‌های آب منطقه طی عملیات صحرایی ۱۴ مرداد ۱۴۰۱ (فصل خشک) است.

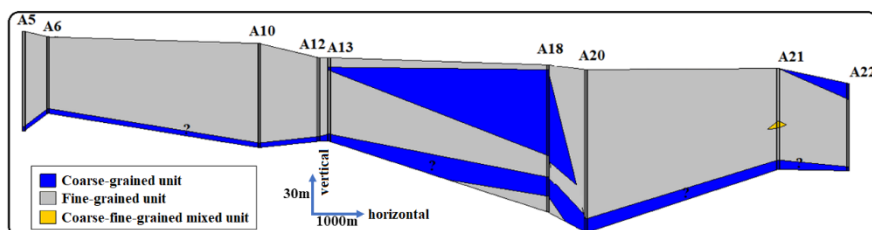
Table 2 – As in Table 1, but for water samples during field operations on August 5, 2022 (dry season).

ID	T (°C)	pH	EC (µS/cm)	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	Waer type	Error (%)	δD	δO ¹⁸
AW1	NA	NA	2710	1.80	6.39	0.23	0.23	6.05	1.97	18.82	0.20	Na-Cl	<0.05	-	-
AW2	25.2	7.46	13610	1.48	25.40	0.80	0.80	40.00	41.76	53.55	0.77	Na-Cl	<0.05	-	-
AW3	29.4	8.02	1930	2.32	7.90	0.30	0.30	4.40	1.44	13.24	0.18	Na-Cl	<0.05	-	-
AW4	23.6	8.17	1530	3.00	4.00	0.33	0.33	2.64	2.17	10.30	0.16	Na-Cl	<0.05	-	-
AW5	18.4	7.33	6580	5.00	24.00	0.75	0.75	16.24	6.57	42.52	0.48	Na-Cl	<0.05	-	-
AW7	22.4	8.08	2490	2.40	10.01	0.43	0.43	2.80	5.06	16.76	0.21	Na-Cl	<0.05	-	-
AW8	26.5	7.67	5710	1.40	24.57	0.60	0.60	13.28	4.33	39.00	0.39	Na-Cl	<0.05	-	-
AW11	26.2	8.11	1252	2.52	4.48	0.46	0.46	2.64	2.33	7.40	0.13	Na-Cl	<0.05	-	-
AW12	28.9	8.14	1354	2.32	5.47	0.64	0.64	2.80	2.87	7.82	0.11	Na-SO4-Cl	<0.05	-	-
AW13	32.7	8.04	2510	2.40	8.01	0.28	0.28	2.78	3.21	18.90	0.19	Na-Cl	<0.05	-	-
W1	19.9	7.55	5420	5.60	22.58	0.76	0.76	27.56	4.66	21.63	0.36	Ca-Na-Cl-SO4	<0.05	-	-
W2	35.0	7.22	11990	3.88	40.31	1.67	1.67	37.00	26.56	54.20	0.80	Na-Ca-Cl-SO4	<0.05	-	-
S4	20.4	8.13	2440	2.36	12.53	0.67	0.67	10.28	3.53	10.31	0.25	Na-SO4	<0.05	-58.46	-6.48

جدول ۳- شبیه جدول ۱، اما برای ۴ نمونه آب منطقه در طی عملیات صحرایی ۲ بهمن ۱۴۰۱ (فصل زمستان).

Table 3 – As in Table 1, but for 4 water samples during field operations on January 22, 2023 (winter season).

ID	T (°C)	pH	EC (µS/cm)	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	Waer type	Error (%)	δD	δO ¹⁸
Q1	13.0	8.24	1890	2.80	10.80	4.20	1.08	6.56	1.14	11.10	0.09	Na-SO4	<0.05	-51.46	-7.19
S1	10.1	8.47	560	2.10	2.42	0.80	0.30	2.08	1.42	2.09	0.01	Na-Ca-SO4	<0.05	-54.01	-7.26
S2	12.8	8.27	2300	2.38	16.10	2.00	2.51	7.48	1.39	14.10	0.05	Na-SO4	<0.05	-64.12	-8.44
S3	6.4	8.21	3380	4.10	17.80	10.70	1.21	10.78	2.13	10.30	0.57	Ca-Na-SO4	<0.05	-58.27	-7.59
Q1	13.0	8.24	1890	2.80	10.80	4.20	1.08	6.56	1.14	11.10	0.09	Na-SO4	<0.05	-51.46	-7.19
S1	10.1	8.47	560	2.10	2.42	0.80	0.30	2.08	1.42	2.09	0.01	Na-Ca-SO4	<0.05	-54.01	-7.26
S2	12.8	8.27	2300	2.38	16.10	2.00	2.51	7.48	1.39	14.10	0.05	Na-SO4	<0.05	-64.12	-8.44



شکل ۲- ستون هیدرواستراتیگرافی آبخوان تحت فشار زنجانرود حاصل از ۹ عدد لایگ لیتولوژیکی نشان داده شده در شکل ۴. شایان ذکر است که همه این چاه‌های حین حفاری آرتزین شده‌اند.

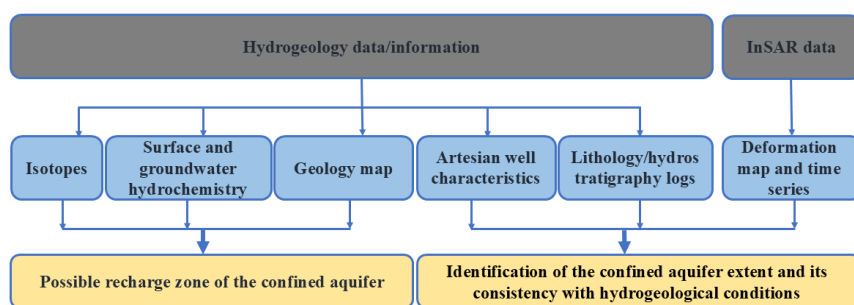
Figure 2- Hydrostratigraphic profile of the Zanjanrood confined aquifer system based on the 9 lithological logs shown in Figure 4. These wells had been artesian when drilled.

اطراف آن، چاه‌های آرتزین، چشمه‌های منطقه و نمونه برف و باران صورت گرفت. تعداد نمونه‌های برداشت شده در برداشت اول شامل ۱۲ نمونه از چاه‌های آرتزین، ۳ نمونه از رودخانه

به‌منظور بررسی هیدروشیمی و ایزوتوپی منابع آبی منطقه، در کل چندین عملیات صحرایی در فروردین، مرداد و بهمن ماه ۱۴۰۱ و برای برداشت آب از زنجانرود، آبخوان آزاد کم عمق

پارامترهای مورد آنالیز و مطالعه در آنالیزهای هیدروشیمی شامل آنیون‌های بیکربنات، سولفات، کلراید، و نیترات و کاتیون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم بودند. خطای آنالیز در همه نمونه‌ها در حد قابل قبول و کمتر از ۵ درصد است. نتایج آنالیزهای شیمیایی، به تفکیک فصل تر و خشک و دوره نمونه‌گیری، در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده‌اند. برای آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار محیطی مقادیر اکسیژن-۱۸ و دوتریم اندازه‌گیری شد. میزان هدایت الکتریکی، دما و pH نیز در صحرا اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که نحوه تلفیق همه داده‌های مذکور در سه بخش بالا، بصورت فلوجارت در شکل ۳ ارائه شده است.

زنجانرود و ۲ نمونه از چاه‌های کم عمق مربوط به آبخوان آزاد حاشیه زنجانرود؛ همچنین نمونه‌های برداشت شده در برداشت دوم که در فصل خشک انجام شد شامل ۱۰ نمونه از چاه‌های آرتزین، ۲ نمونه از چاه‌های کم عمق و یک نمونه چشمه است (رودخانه زنجانرود به علت نمونه برداری در فصل خشک، خشک شده بود). در عملیات صحرائی آخر نیز ۳ نمونه چشمه و یک نمونه قنات برداشت شد. ۱۷ نمونه برف و باران نیز برای مقایسه نمونه‌های آب برداشت شده با سیستم بارش امروزی برداشت شد. نمونه‌های برداشت شده جهت انجام آنالیزهای هیدروشیمی و ایزوتوپی به ترتیب به آزمایشگاه جهاد دانشگاهی زنجان و شرکت مصباح انرژی اراک ارسال شدند.



شکل ۳- فلوجارت روش کار و نحوه تلفیق داده‌های تداخل‌سنجی راداری و هیدروژئولوژیکی.

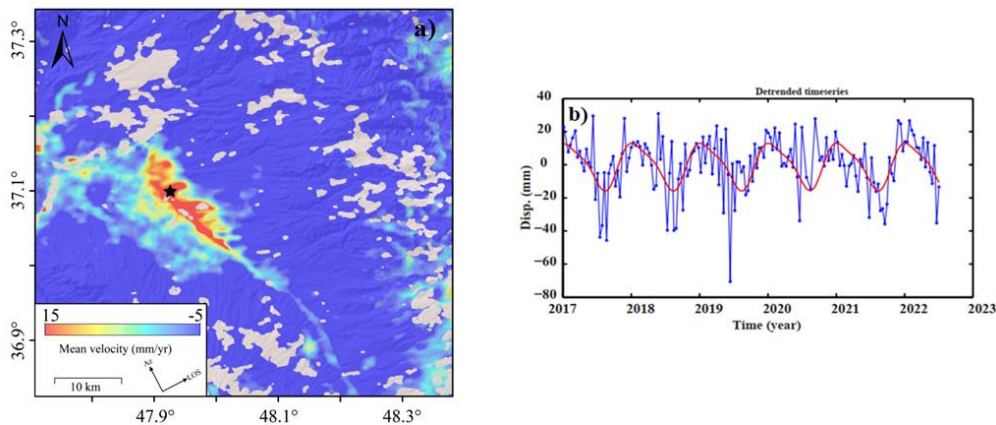
Figure 3- Flowchart of the methodology and the integration of radar interferometry and hydrogeological data.

فشار است و آبخوان آزاد معمولاً فاقد چنین رفتاری هستند یا به‌صورت ضعیف آن را نشان می‌دهند. این ویژگی نوسانات فصلی تراز ارتفاعی زمین عملاً به عنوان یک شاهدی عمل می‌کند که با استفاده از آن می‌توان بدون صرف هزینه زیاد با دقت مناسب، گستره فضایی آبخوان تحت فشار را مشخص نمود. قبلاً، در دشت گرگان، سلماس، ابرقو و ابهر محققین توانسته‌اند با این تکنیک، محدوده آبخوان‌های تحت فشار را بخوبی به نمایش در بیاورند (Rezaei and Mousavi, 2019; Shahbazi et al., 2022; Mirzadeh et al., 2023; Sabeti et al., 2023). به‌صورت تئوریک، اگر در نقاط مختلف آبخوان، تراز ارتفاعی زمین دارای نوسانات فصلی بزرگ متناسب با نوسانات فصلی تراز هیدرولیکی آبخوان باشد می‌توان ادعا کرد که آبخوان تحت فشار وجود دارد (Rezaei, 2018). طبیعتاً هرچه درجه تحت فشار بودن و نوسانات فصلی تراز هیدرولیکی آبخوان بیشتر باشد، دامنه نوسانات فصلی زمین نیز بزرگتر خواهد بود. به منظور تعیین گستره آبخوان تحت فشار در ادامه سعی شده است تا تراز ارتفاعی دو تاریخ زمانی از هم کم شود.

نتایج و بحث

تداخل‌سنجی راداری و تعیین گستره آبخوان تحت فشار

به‌منظور شناسایی گستره آبخوان تحت فشار و نیز آگاهی از نوسانات فصلی احتمالی تراز ارتفاعی زمین ناشی از وجود آبخوان تحت فشار از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. بر اساس روش آنالیزی که در بخش "تکنیک تداخل‌سنجی راداری" ارائه شد، نتایج اولیه حاصل از پردازش داده‌های بالا گذر ماهواره به‌وسیله نرم‌افزار GMTSAR در شکل ۴ نشان داده شده است. رنگ قرمز در این نقشه به معنای دور شدن از ماهواره و با فرض عدم وجود تغییر شکل مسطحاتی، نشانگر فرونشست است. بنابراین در اینجا دو نکته به خوبی جلب توجه می‌کند: نقشه فرونشست رخ داده در بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ (شکل a۴) و نمودار دامنه فصلی تراز ارتفاعی زمین (شکل b۴). شکل ۴ به خوبی نمایش می‌دهد که علاوه بر فرونشست بلند مدت، منطقه دارای نوسانات فصلی تراز ارتفاعی زمین نیز می‌باشد (شکل b۴). وجود نوسانات فصلی بین فصل تر و خشک سال، یک ویژگی منحصر بفرد در آبخوان‌های تحت



شکل ۴- (a) نقشه میزان فرونشست بلند مدت از سال ۲۰۱۷ تا اواسط ۲۰۲۲ که در آن رنگ قرمز به معنای دور شدن از ماهواره و یا به عبارتی فرونشست است، (b) سری زمانی نوسانات فصلی جابجایی ارتفاعی زمین در نقطه مشخص شده با ستاره در شکل a.
Figure 4 - (a) Long-term subsidence map from 2017 to mid-2022 for ground elevation where the color red signifies moving away from the satellite or, in other words, subsidence, (b) Time series of seasonal variations in ground displacement at the point marked with a star in Figure a.

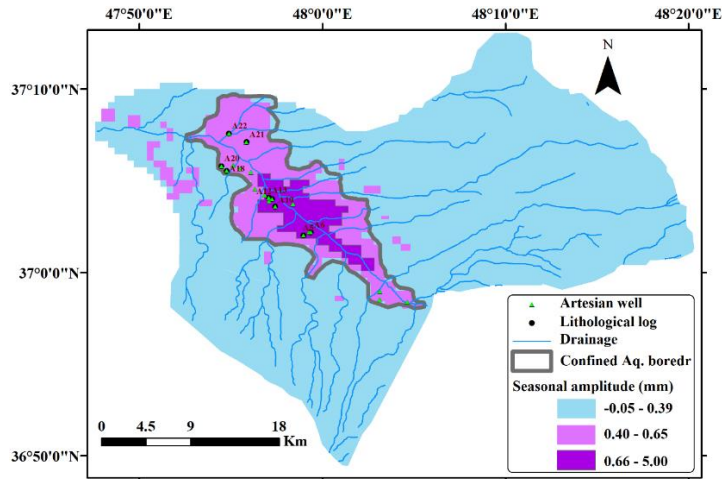
زمین‌شناسی PL-Qt (مجموعه رسوبات پلیوسن-کواترنری تفکیک نشده) که غالباً دانه ریز و از جنس مارن و رس است که می‌تواند به عنوان لایه محبوس کننده (aquitard) عمل کند، قرار دارد (شکل ۷). نکته قابل توجه دیگر این است که واحد PL (توالی کنگلومرا، سیلتستون و ماسه سنگ همراه با مارن) در نواحی شمال شرقی واحد زمین‌شناسی PL-Qt و رخنمون دارد. واحد PL به سمت رودخانه و نواحی جنوبی به زیر لایه دانه ریز PL-Qt می‌رود. از آنجاکه این واحد حاوی میان‌لایه‌های دانه درشت است، بنابراین می‌تواند به عنوان لایه آبدار عمل کند. از نظر هیدروژئولوژیکی، این شرایط می‌تواند برای تشکیل آبخوان مناسب باشد زیرا عملاً گسل کناوند سبب شده است که رسوبات دانه درشت تر در جناح راست رودخانه رخنمون یافته و به عنوان زون تغذیه برای آبخوان تحت فشار عمل کنند.

به منظور درک بهتر رفتار سیستم، علاوه بر رفتار الاستیک فصلی، شکل ۶ محدوده فرونشست رخ داده در دشت را به همراه محل چاه‌های بهره‌برداری نمایش می‌دهد. محدوده اوج فرونشست در محدوده اطراف آبراهه‌های جناح راست رودخانه و خود زنجانرود دیده می‌شود که حداکثر میزان آن حتی به حدود ۱۵ میلی‌متر بر سال نیز می‌رسد. جالب توجه این است که محدوده فرونشست با محل چاه‌های کم عمق که بیش از ۹۵ درصد کل چاه‌های منطقه را شامل می‌شوند، همخوانی ندارد. این امر نشان می‌دهد که فرونشست حاصل برداشت از آبخوان آزاد کم عمق نیست. این امر با مطالعات هیدروشیمی

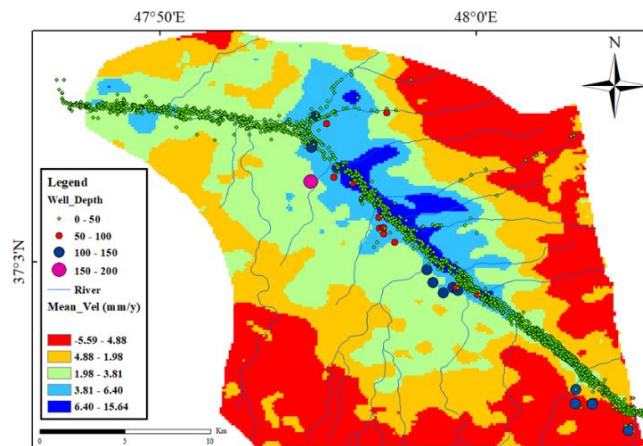
با توجه به وجود نویز زیاد در داده‌های تداخل‌سنجی راداری از اواسط بهار تا انتهای پاییز هر سال، امکان استفاده از تصاویر تابستان برای تهیه نقشه نوسانات فصلی تراز زمین در منطقه فراهم نشد. به ناچار، اختلاف میزان جابه‌جایی زمین در دو تاریخ ۲۰۱۹/۱۱/۱۵ و ۲۰۲۰/۰۱/۲۶ مبنای تعیین نقشه نوسانات فصلی تراز ارتفاعی زمین در منطقه قرار گرفت. همانطور که در شکل ۵ مشخص است، محدوده دارای بیشترین نوسانات فصلی تراز ارتفاعی بیشتر در اطراف رودخانه زنجانرود و محلی که چاه‌های آرتزین قرار دارند، گسترش یافته است. از آنجا که داده‌های تداخل‌سنجی راداری بصورت سلولی هستند و این امر سبب می‌شود که مرز به صورت زیگزاگ در بیاید، در اینجا سعی شد با یک پلات نرم تر، محدوده اوج نوسانات فصلی تراز ارتفاعی زمین را مطابق با توضیحاتی که قبلاً ارائه شده است، به عنوان محدوده آبخوان تحت فشار مشخص شود که مساحت این گستره معادل ۱۳۵ کیلومتر مربع است. گستره آبخوان تحت فشار مشخص شده در شکل ۵ به دلایل زیر با واقعیت و وجود آبخوان تحت فشار در این گستره همخوان است: (۱) همه چاه‌های آرتزین حفر شده درون این گستره قرار گرفته‌اند (شکل ۵)، (۲) بیشترین نرخ فرونشست متوسط (شکل ۶) در گستره آبخوان تحت فشار رخ داده است و با این تئوری که تحت شرایط یکسان میزان فرونشست آبخوان تحت فشار خیلی بیشتر از آبخوان آزاد است (Rezaei, 2018) کاملاً همخوان است، و (۳) با شرایط زمین‌شناسی منطقه نیز تطابق دارد زیرا همه گستره آبخوان تحت فشار بر روی واحد

پیزومتریک آبخوان تحت فشار منطقه است، یعنی در عمل ناشی از تخلیه آبخوان در طی چند سال اخیر از طریق (۱) سرریز شدن آب در این چاه‌های آرتزین، و (۲) برداشت‌هایی که در حال انجام است، می‌باشد.

و ایزوتوپی منطقه که در ذیل بحث شده‌اند، همخوان است بطوریکه ترکیب ایزوتوپی و هیدروشیمیایی آبخوان عمیق تحت فشار کاملاً متفاوت از آبخوان آزاد کم عمق و رودخانه زجانرود است. در مقابل، تقریباً تمامی چاه‌های عمیق که معمولاً آرتزین هستند، درون محدوده اوج فرونشست قرار دارند که بیانگر این است که فرونشست حاصل از افت فشار

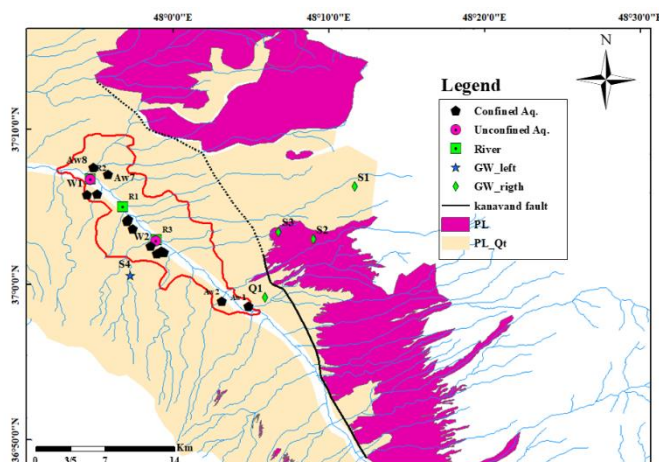


شکل ۵- نقشه بزرگای نوسانات فصلی تراز ارتفاعی زمین در محدوده مطالعاتی به منظور تعیین گستره آبخوان تحت فشار زجانرود.
 Figure 5 - Seasonal elevation amplitude map for the purpose of delineating the Zanzanrود confined aquifer extent.



شکل ۶- نقشه میانگین سرعت جابجایی زمین در بازه ۲۰۱۷ تا اواسط ۲۰۲۲ و محل چاه‌های بهره برداری منطقه که بر اساس عمق (بر حسب متر) طبقه بندی شده‌اند. در این نقشه رنگ آبی نشان دهنده دور شدن از ماهواره و یا به عبارتی فرونشست است.

Figure 6 - Map of the average ground displacement velocity between 2017 and mid-2022 and the location of production wells in the region classified by depth (in meters). In this map, the color blue indicates moving away from the satellite or, in other words, subsidence.



شکل ۷- موقعیت نقاط نمونه برداری در محدوده مورد مطالعه. محل مادر چاه قنات روی لایه PL قرار دارد.

Figure 7 - Locations of sampling points within the study area. The location of the mother well of the Qanat is situated on the PL unit.

نکته حائز اهمیت این است که برخلاف رودخانه و آبخوان آزاد کم عمق و نیز چشمه S4 واقع در جناح چپ، برخی از نمونه‌های آب زیرزمینی جناح راست رودخانه (چشمه S2 و قنات Q1) دارای خصوصیات هیدروشیمیایی مشابه آبخوان تحت فشار هستند. در نمودار پایپر، این دو نمونه کاملاً منطبق بر نمونه‌های چاه‌های آرتزین هستند (شکل ۸) که این نشان از منشا مشابه این دو منبع آبی دارد. بر اساس شواهد زمین‌شناسی چشمه S2 و همچنین مادر چاه قنات Q1 (نه مظهر آن) بر روی لایه زمین‌شناسی PL حاوی رسوبات دانه درشت تر قرار دارد که بطور تئوریک پتانسیل تشکیل آبخوان را دارد و به احتمال زیاد زون تغذیه آبخوان تحت فشار باشد. نکته قابل توجه دیگری که نمودار پایپر آن را به نمایش می‌گذارد این است که چاه‌های آرتزین Aw2 و Aw8 دارای تیپ آب مشابه یا نزدیک به منابع آب سطحی هستند. طی بازدید میدانی جهت بررسی نحوه تجهیز این چاه‌ها مشاهده شد که تجهیز این چاه‌ها به خوبی انجام نشده بطوریکه سبب اختلاط آب سطحی مانند رواناب با آب زیرزمینی شده است. برای مثال، در گفتگوی حضوری با صاحب چاه Aw2 مشخص شد که این چاه اوایل دارای کیفیت مناسبی بوده است اما به مرور و بعد از حدود ۳ سال شور شده و در حال حاضر هدایت الکتریکی آن به بیش از ۱۳ هزار میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌رسد. این مشاهدات حاکی از این است که به خاطر عدم تجهیز مناسب و عدم استفاده از لوله کور در بخش‌های بالایی چاه و به علت قرارگیری چاه در کنار یک آبراهه فصلی که رواناب آن از روی رسوبات نمکی و گچی می‌گذرد و دارای

هیدروشیمی و ایزوتوپی آبخوان تحت فشار

به‌منظور بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی، نمودار پایپر برای نمونه‌های آب برداشت‌شده از محدوده مورد مطالعه در نرم‌افزار AqQA پلات شد (شکل ۸). شایان ذکر است که در آن نقاط نمونه‌برداری که بیش از یک نمونه آب، آنالیز هیدروشیمیایی شده بود، میانگین نتایج برای هر پارامتر مد نظر قرار گرفت. در نمودارهای پایپر ارائه شده، نمونه‌های آب چاه‌های کم‌عمق (W1-W2)، زنجانرود (R1 تا R3 در فصل‌تر)، و چاه‌های عمیق آرتزین (Aw1 تا Aw12) تقریباً به خوبی از هم تفکیک شده‌اند. اما نمونه‌های W1 و W2 (نمونه‌های آبخوان آزاد سطحی) تقریباً به محل R1 و R2 و R3 (نمونه‌های زنجانرود) و همچنین نمونه چشمه S4 واقع در جناح چپ رودخانه) نزدیک هستند. در مقابل، نمونه‌های چاه‌های عمیق آرتزین در یک بخش جدا افتاده‌اند. این تفکیک‌شدگی قبل از هر چیز حاکی از متفاوت بودن منشأ هیدروشیمیایی این منابع آبی دارد. البته نمونه‌های رودخانه زنجانرود و آبخوان آزاد سطحی حاشیه آن تقریباً در کنار هم قرار دارند که نشان از وجود ارتباط هیدرولیکی این دو منبع با هم است. در عمل نمونه‌های آب آبخوان تحت فشار عمیق دارای مجموع کلسیم و منیزیم کمتر از زنجانرود و آبخوان آزاد سطحی هستند. به طور کلی کاملاً مشخص است که خصوصیات هیدروشیمیایی آبخوان تحت فشار کاملاً سبب تفکیک آن از رودخانه زنجانرود و آبخوان آزاد شده است.

W1 در فصل خشک در تغییر است (جدول ۱ و ۲). همچنین، برای مثال در فصل تر، میزان نیترات آبخوان تحت فشار (۰.۱۱ تا ۰.۴۴ میلی اکسیژن در لیتر، غیر از یک نمونه) کمتر از نصف مقادیر نیترات (۰.۹۸ تا ۱.۸۰ میلی اکسیژن در لیتر) رودخانه و آبخوان آزاد سطحی است (جدول ۱).

نتایج ایزوتوپ‌های پایدار می‌تواند برای محققین در شناسایی محل‌های تغذیه و همچنین ارتباط منابع آبی مختلف موثر واقع شود. شکل ۹ مقایسه ترکیب ایزوتوپی اکسیژن-۱۸ در برابر دوتریم مربوط به نمونه‌های آبی منطقه و نمونه‌های باران و برف برداشت شده، را به تصویر می‌کشد. در عمل برداشت تعداد کافی نمونه برف و باران سبب شد تا به راحتی بتوان خط آب جوی محلی منطقه را ترسیم نمود که معادله آن بصورت $\delta D = 7.6367 \delta O^{18} + 12.37$ بدست آمد. از این نمودار می‌توان موارد زیر را استخراج نمود. اول اینکه، از نظر ایزوتوپی منشأ آب آبخوان تحت فشار متفاوت از منابع آب آبخوان آزاد کم عمق اطراف زنجانرود، رودخانه زنجانرود و آب زیرزمینی جناح چپ است. در شکل ۹ نمونه‌های آبخوان تحت فشار (غیر از دو چاه Aw2 و Aw8 که دچار اختلاط با این منابع شده‌اند) به‌طور کامل دور از آبخوان آزاد سطحی و رودخانه زنجانرود پلات شده‌اند که این نشان از منشأ متفاوت آن‌ها دارد. نکته جالب توجه این است که دو چاه Aw2 و Aw8 که تحت تأثیر اختلاط با منابع مخرب آب سطحی قرار گرفته‌اند، دارای ترکیب ایزوتوپی متمایل به منابع آبخوان آزاد سطحی هستند که این امر بحث نفوذ آب شورتر سطحی از طریق خود چاه به آبخوان تحت فشار را تأیید می‌کند. در مقابل، شباه نزدیکی بین مقادیر اکسیژن-۱۸ نمونه‌های چشمه‌ها و قنات جناح راست زنجانرود با آبخوان تحت فشار وجود دارد که این امر تأییدی بر نتایج به‌دست‌آمده در بخش هیدروشیمی مبنی بر اینکه رسوبات PL به احتمال فراوان به عنوان زون تغذیه برای آبخوان تحت فشار عمل می‌کند.

نکته دوم این است که خط برازش داده شده به نمونه‌های آبخوان تحت فشار با $R^2=0.60$ تا حد زیادی موازی با خط آب جوی محلی است که این نشان از امروزی بودن منشأ آب آبخوان تحت فشار دارد. اما نمونه‌های آب سطحی (R1 تا R3، W1 و W2) منطقه دارای شبیهی کمتر از خطوط آب جوی هستند که این امر نشان می‌دهد که یا این نمونه‌ها دچار تبخیر شده‌اند یا اینکه به خاطر انحلال زیاد لایه‌های زمین‌شناسی مثل ژیبس ترکیب ایزوتوپی آن‌ها به نسبت غنی از اکسیژن ۱۸ شده است. هر دوی این احتمال می‌تواند تأثیر گذار باشد

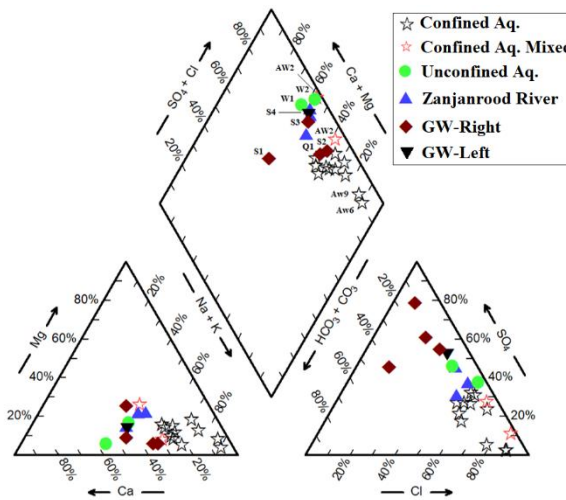
کیفیت نامناسب است، آب سطحی شور به مرور به چاه نفوذ کرده و کیفیت آن را تخریب کرده است.

نکته حائز اهمیت این است که برخلاف رودخانه و آبخوان آزاد کم عمق و نیز چشمه S4 واقع در جناح چپ، برخی از نمونه‌های آب زیرزمینی جناح راست رودخانه (چشمه S2 و قنات Q1) دارای خصوصیات هیدروشیمیایی مشابه آبخوان تحت فشار هستند. در نمودار پایپر، این دو نمونه کاملاً منطبق بر نمونه‌های چاه‌های آرتزین هستند (شکل ۸) که این نشان از منشأ مشابه این دو منبع آبی دارد. بر اساس شواهد زمین‌شناسی چشمه S2 و همچنین مادر چاه قنات Q1 (نه مظهر آن) بر روی لایه زمین‌شناسی PL حاوی رسوبات دانه درشت تر قرار دارد که بطور تئوریک پتانسیل تشکیل آبخوان را دارد و به احتمال زیاد زون تغذیه آبخوان تحت فشار باشد. نکته قابل توجه دیگری که نمودار پایپر آن را به نمایش می‌گذارد این است که چاه‌های آرتزین Aw2 و Aw8 دارای تیپ آب مشابه یا نزدیک به منابع آب سطحی هستند. همانطور که در بالا توضیح داده شد، طی بازدید میدانی جهت بررسی نحوه تجهیز این چاه‌ها مشاهده شد که تجهیز این چاه‌ها به خوبی انجام نشده، بطوریکه سبب اختلاط آب سطحی مانند رواناب با آب زیرزمینی شده است.

شرایط مشابه در محل چاه شماره Aw8 نیز مشاهده شد به‌طوری‌که اطراف لوله چاه کاملاً باز بود. در عمل، آبخوان تحت فشار دارای کیفیت بهتری نسبت به منابع آبخوان کم‌عمق و زنجانرود است زیرا به‌طور متوسط میزان هدایت الکتریکی و املاح موجود در آن کمتر است (جدول ۱ تا ۳). در همه نمونه‌های آبخوان تحت فشار در فصل تر، تیپ آب از نوع کلراید سدیم با هدایت الکتریکی ۱۰۸۰ تا ۲۳۳۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر (غیر از سه چاه Aw2، Aw8 و Aw9 که تحت تأثیر اختلاط قرار دارند) است (جدول ۱). در مقابل، هر سه نمونه رودخانه زنجانرود (R1 تا R3) دارای تیپ کلراید-سولفات سدیم-پتاسیم هستند و هدایت الکتریکی آن‌ها از ۲۶۳۰ در بالادست (R1) تا ۳۷۸۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در قسمت‌های پایین دست رودخانه در تغییر است. نمونه‌های آبخوان آزاد کم‌عمق در هر دوی فصل تر و خشک دارای تیپ سولفات-کلراید کلسیم-سدیم هستند که با تیپ آب رودخانه همپوشانی دارد اما متمایز از تیپ آبخوان تحت فشار می‌باشد. هدایت الکتریکی آبخوان آزاد سطحی از حدود ۴۴۳۰ در فصل تر تا حدود ۱۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در محل چاه

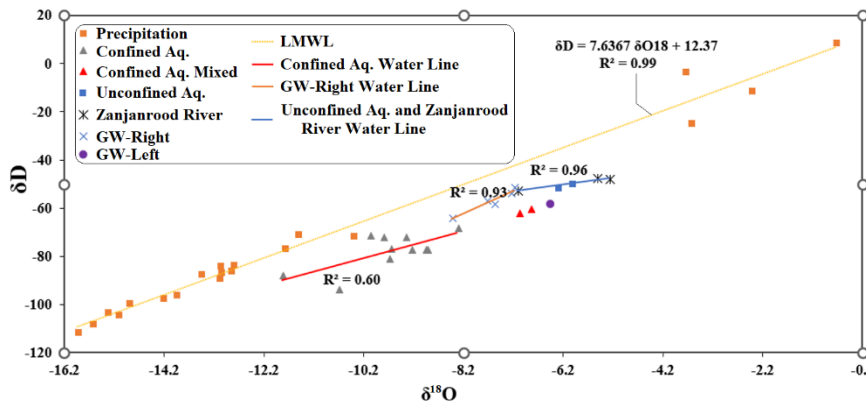
گرفته‌اند. همیشه بارانی که در ارتفاعات یک منطقه رخ می‌دهد دارای ترکیب ایزوتوپی سبک‌تری نسبت به دشت‌های پست اطراف است. نکته سوم این است که زنجانرود و آبخوان سطحی دارای ترکیب ایزوتوپی مشابه هستند. این شباهت بین نمونه‌های R2 و R3 با آب زیرزمینی سطحی بیشتر است. این مشاهده حاکی از این است که این دو منبع آبی باهم دارای ارتباط هیدرولیکی زیاد هستند.

زیرا ترکیب سولفات این نمونه‌ها به‌طور معناداری با EC افزایش می‌یابد و از سویی منطقه سردسیر است که بارش ارتفاعات آن غالباً به‌صورت برف است که تبخیر از برف می‌تواند سبب غنی‌شدگی در اکسیژن-۱۸ شود. در مقابل در نمونه‌های آبخوان تحت فشار ترکیب اکسیژن-۱۸ سبک‌تر و تا حدی موازی خط آب جوی منطقه است. این امر حاکی از این است که منشأ آب آبخوان تحت‌فشار در مقایسه با نمونه‌های سطحی تحت تأثیر تبخیر قابل توجه قرار نگرفته و به احتمال فراوان از ترکیب بارش امروزی نازل‌شده بر ارتفاعات بلندتر منشأ



شکل ۸- نمودار پایپر برای داده‌های هیدروشیمی منابع آبی منطقه.

Figure 8 - Piper diagram for the hydrochemical data of the water resources in the region.



شکل ۹- نمودار اکسیژن-۱۸ در برابر دوتریوم برای نمونه‌های آب منطقه که با خط آب جوی محلی مقایسه شده است.

Figure 9 - Oxygen-18 versus Deuterium diagram for water samples from the region compared to the local meteoric water line.

نتیجه گیری

به طور کلی نتایج این پژوهش را می توان بصورت زیر خلاصه نمود:

(۱) به کمک نقشه نوسانات ارتفاعی سطح زمین حاصل از تداخل سنجی راداری، محدوده آبخوان محبوس با مساحت حدود ۱۳۵ کیلومتر مربع مشخص شد که با شواهد هیدروژئولوژیکی و زمین شناسی منطقه نیز همخوان است. (۲) بر پایه نقشه میانگین سرعت حاصل از تداخل سنجی راداری مشخص شد که محدوده آبخوان محبوس در حال فرونشست است، به طوریکه بیشینه نرخ آن حتی به حدود ۱۵ میلی متر بر سال نیز می رسد که به احتمال فراوان ناشی از تخلیه آبخوان در چند سال پیشین از طریق سرریز شدن آب در این چاه های آرتزین و برداشت هایی که در حال انجام است، می باشد. (۳) نقشه هیدرواستراتیگرافی تهیه شده به کمک لاگ حفاری چاه های آرتزین نشان می دهد که یک سیستم آبخوان تحت فشار در عمیق ترین بخش چاه ها قرار دارد که به وسیله یک لایه ضخیم ریزدانه غالباً رسی محدود شده است. لایه آبدار در بیشتر چاه ها در عمق حدود ۱۰۰ متر و بیشتر از آن قرار دارد. (۴) به طور کلی از بحث هیدروشیمی و ایزوتوپی نتیجه گرفته می شود که اولاً منشا آبخوان آزاد سطحی و زنجانرود تا حدی مشابه و به طور کلی متفاوت از منشا آبخوان تحت فشار عمیق می باشند. اما، برخی از منابع آبی جناح راست (قنات Q1 و S2) ترکیب هیدروشیمیایی مشابه آبخوان تحت فشار دارند و از آنجا که این دو نمونه هر دو بر روی واحد زمین شناسی (PL) حاوی رسوبات دانه درشت قرار دارند، محل تغذیه آبخوان تحت فشار به احتمال فراوان به دامنه های واقع شده در جناح راست مرتبط است. (۵) مشخص شد که دو چاه آرتزین Aw1 و Aw2 به شدت تحت تأثیر اختلاط با آب سطحی با کیفیت نامطلوب تر قرار گرفته اند. عملاً تأثیر رسوبات گچی و نمکی در منطقه سبب تخریب منابع آبی به ویژه رودخانه زنجانرود و آبخوان آزاد سطحی شده است. (۶) خط برازش داده شده به مقادیر ایزوتوپ های پایدار آبخوان تحت فشار تا حد زیادی شبیه به خط آب جوی محلی است که این نشان از امروزی بودن منشا آب آبخوان تحت فشار دارد.

وجود ایزوتوپ اکسیژن-۱۸ سبک تر و نیز هیدروشیمی متمایز در چاه های آرتزین نسبت به آب رودخانه زنجانرود و آبخوان سطحی اطراف آن نشان از این دارد که منشأ تغذیه آبخوان تحت فشار در ارتفاعات بالاتر قرار دارد. در مقابل، هردوی آبخوان تحت فشار و نمونه های منابع آب زیرزمینی ارتفاعات جناح راست رودخانه دارای ترکیب اکسیژن-۱۸ مشابه هستند و شیب خط برازش داده شده به آن ها تقریباً موازی هم است. این امر نشان می دهد که به احتمال فراوان منشا اصلی آب زیرزمینی آبخوان عمیق از منابع سمت راست رودخانه منشا می گیرند.

زون احتمالی تغذیه به آبخوان تحت فشار

با تلفیق نتایج حاصل از آنالیزهای هیدروشیمی، ایزوتوپی و شواهد زمین شناسی منطقه، می توان به احتمال فراوان زون تغذیه آبخوان تحت فشار را به ارتفاعات و رخنمون های واحد PL (شکل ۶) رخنمون یافته در جناح راست زنجانرود نسبت داد زیرا اولاً با وجود اینکه چاه های عمیق آرتزین (غیر از سه مورد) همگی در جناح چپ زنجانرود حفر شده و آب برداشت می کنند، زبانه های منطقه حداکثر فرونشست (شکل ۶) به سمت راست رودخانه کشیده شده اند. شایان ذکر است که این زبانه های فرونشست درست در راستای آبراهه های اصلی است که از جناح راست رودخانه به زنجانرود می پیوندند. این شواهد حاکی از این است که سیستم هیدرولیکی آبخوان تحت فشار به احتمال فراوان دارای ارتباط هیدرولیکی قویتری با آب زیرزمینی جناح راست رودخانه است. ثانیاً برخی از نمونه های جناح راست رودخانه (چشمه S2 و قنات Q1) تنها مواردی هستند که دارای ترکیب هیدروشیمیایی مشابه با چاه های آرتزین دارند (شکل ۸). ثالثاً مقادیر ایزوتوپی اکسیژن-۱۸ نمونه های جناح راست تقریباً مشابه چاه های آرتزین و تا حدی متفاوت از سایر منابع مانند آبخوان آزاد سطحی و رودخانه زنجانرود هستند (شکل ۹). رابعاً از نظر زمین شناسی بخاطر عملکرد گسل کناوند، واحد زمین شناسی PL (حاوی لایه های درشت دانه مانند گراول و ماسه سنگ) در جناح راست رودخانه رخنمون نسبتاً قابل توجهی دارد (شکل ۷). نکته قابل توجه این است که چشمه S2 و همچنین مادر چاه قنات Q1 (نه مظهر آن) بر روی این لایه زمین شناسی (PL)، که بطور تئوریک پتانسیل تشکیل آبخوان را دارد، قرار دارند.

Hanssen, R.F., 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Springer Science & Business Media: 1-308.

Hoffmann, J., Galloway, D.L., Zebker, H.A., 2003. Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. *Water Resources Research*, 39.

Jiang L., Bai L., Zhao Y., Cao G., Wang H., Sun Q., 2018. Combining InSAR and hydraulic head measurements to estimate aquifer parameters and storage variations of confined aquifer system in Cangzhou, North China plain. *Water resources research*, 54(10): 8234–8252.

Galloway, D.L., Hudnut, K.W., Ingebritse, S.E., Phillips, S.P., Peltzer, G., Rogez, F., Rosen, P.A., 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water resources research*, 34(10): 2573–2585.

Sabeti, H., Pourmina, A., Rezaei, A., Tayfehrostami, A., Einlou, F., Nankali, H., 2023. Discovering confined zones and land deformation characteristics across an aquifer system in Iran using GNSS and InSAR techniques. *Hydrogeology Journal*, 31(8): 2061-2076.

Mirzadeh, S. M. J., Jin, S., Chaussard, E., Bürgmann, R., Rezaei, A., Ghotbi, S., Braun, A., 2023. Transition and Drivers of Elastic to Inelastic Deformation in the Abarkuh Plain from InSAR Multi-Sensor Time Series and Hydrogeological Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2023JB026430.

Rezaei, A., Mousavi, Z., 2019. Characterization of land deformation, hydraulic head, and aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, from InSAR observations. *Journal of Hydrology*, 579: 124196.

Rezaei, A., 2018. Comments on “Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements” by Motagh, M., Shamshiri, R., Haghghi, MH, Wetzal, HU, Akbari, B., Nahavandchi, H., ... and Arabi, S. [*Engineering Geology*, 218 (2017), 134-- 151]. *Engineering Geology*, 246: 417-419.

Riley, F.S., 1969. Analysis of borehole extensometer data from central California. *Land subsidence*, 2: 423-431.

سپاسگزاری

از گروه مطالعات پایه شرکت آب منطقه‌ای زنجان بخاطر حمایت مالی و همچنین فراهم کردن اطلاعات چاه‌ها سپاسگزاری می‌شود.

منابع

محمدزاده، ح.، اسکندری، ع.، ۱۳۹۷. استفاده از تکنیک های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی به منظور فهم بهتر ویژگی های منابع آبی مهم محدوده های مطالعاتی پاوه و جوانرود، استان کرمانشاه. *هیدروژئولوژی*، ۳ (۱): ۹۸-۸۰.

مهندسين مشاور کنکاش عمران، ۱۳۹۴. مطالعات بهنگام سازی بیلان منابع آب حوزه آبریز سفیدرود بزرگ مختوم به سال آبی ۸۹. جلد پنجم - ارزیابی منابع آب، ضمیمه شماره ۴: بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی زنجان.

مرکز ملی آمار، ۱۳۹۵. درگاه ملی آمار، <https://www.amar.org.ir>

هادیپور هفشجانی، ز.، ناصری، م.ر.، علیجانی، ف.، ۱۳۹۷. فرآیندهای هیدروژئوشیمی آبخوان کوهدشت. *هیدروژئولوژی*، ۳ (۱): ۶۴-۳۲.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 40: 2375-2383.

Calderhead, A. I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R., Garfias, J., 2011. Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, 34(1): 83-97.

Castellazzi, P., Martel, R., Rivera, A., Huang, J., Pavlic, G., Calderhead, A.I., Chaussard, E., Garfias, J. Salas, J., 2016. Groundwater depletion in Central Mexico: Use of GRACE and InSAR to support water resources management. *Water resources research*, 52(8): 5985-6003.

Chen, J., Knight, R., Zebker, H.A., Schreüder, W.A., 2016. Confined aquifer head measurements and storage properties in the San Luis Valley, Colorado, from spaceborne InSAR observations. *Water Resources Research*, 52: 3623-3636.

Shahbazi, S., Mousavi, Z., Rezaei, A., 2022. Constraints on the hydrogeological properties and land subsidence through GNSS and InSAR measurements and well data in Salmas plain, northwest of Urmia Lake, Iran. *Hydrogeology Journal*, 30(2): 533-555.

Smith, R.G., Knight, R., Chen, J., Reeves, J.A., Zebker, H.A., Farr, T., Liu, Z., 2017. Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California. *Water Resources Research*, 53: 2133-2148.