

بررسی فرونشست آبخوان دشت عباس ایلام در دو دوره افت و خیز تراز آب زیرزمینی به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری

شهاب ابراهیمی^{۱*}، ابوالفضل رضایی^۲، زهرا موسوی^۳

۱. دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، ۴۵۱۳۷-۶۶۳۷۱، ایران.

۲. دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، ۴۵۱۳۷-۶۶۳۷۱، ایران.

۳. دانشیار ژئودزی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، ۴۵۱۳۷-۶۶۳۷۱، ایران.

*نویسنده مسئول: Shahabehrahimi@iasbs.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹

چکیده

دشت عباس واقع در منطقه دهلران استان ایلام از معدود دشت‌های ایران است که علی‌رغم افت شدید ۶ متری آب زیرزمینی در دوره افت از ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۴، در اثر انتقال آب از حوضه کرخه، تراز آب زیرزمینی طی دوره خیز از ۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰ به میزان ۱۸ متر افزایش داشته است. این شرایط هیدروژئولوژیکی فرصتی را فراهم کرده است که بتوان میزان جبران فرونشست طی دوره خیز را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، InSAR (Radar Interferometric Synthetic Aperture)، مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره ENVISAT حاکی از میانگین نرخ نشست معادل ۷ میلی‌متر در سال، طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۵ است. پردازش تصاویر ماهواره سنتینل برای سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ که در دوره خیز قرار دارد نشان می‌دهد که علی‌الرغم افزایش زیاد تراز آب زیرزمینی و جبران کامل افت رخ داده، نرخ فرونشست متوسط حدود ۳ میلی‌متر در سال کاهش داشته است. میزان جبران فرونشست در محدوده دارای بیشینه به حدود ۵۰ درصد می‌رسد. بنابراین، این مطالعه حاکی از این است که جبران کامل فرونشست حتی با برگشت آب به تراز بالاتر از مقدار اولیه پس از گذشت بیش از یک دهه، امکان‌پذیر نیست؛ یعنی در عمل ممکن است بخشی از آبخوان برای همیشه تحکیم یافته و قابل احیا نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تداخل سنجی راداری، دشت عباس، سد کرخه، فرونشست.

مقدمه

کشور شده است (Madani, 2014). این کسری مخازن آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور، تحکیم آبخوان و در نتیجه فرونشست زمین را به دنبال داشته است (Motagh et al., 2007; Motagh et al., 2008; Babaei et al., 2020). فرونشست حرکت قائم رو به پایین زمین است که در اثر برداشت بی‌رویه سیال زیرزمینی از نهشته‌های رسوبی جوان یا محیط‌های کارستی رخ می‌دهد (حمیدیان و همکاران، ۱۳۹۳). هنگامی که تراز هیدرولیکی آبخوان در سطحی پایین‌تر از تراز تاریخی قرار گیرد، تعادل بین وزن روباره و قدرت تحمل آب

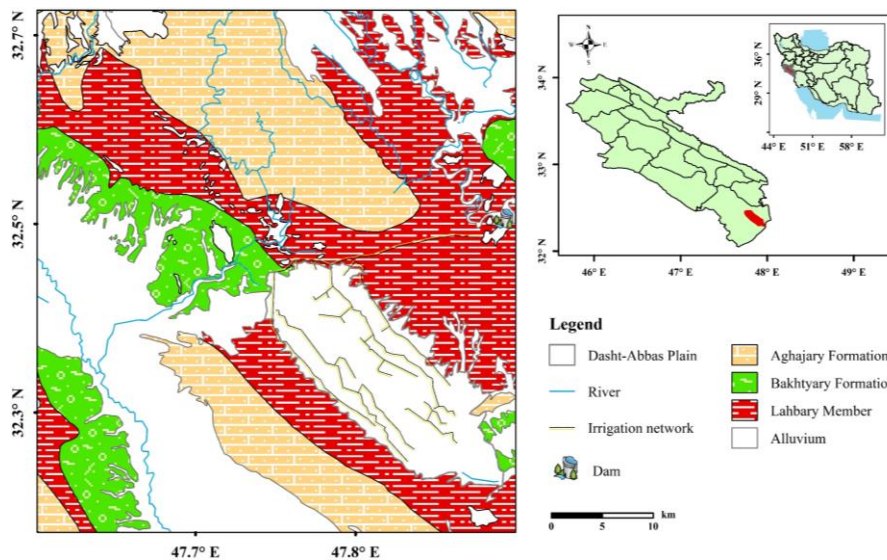
کشور ایران با آب‌وهوای گرم و خشک و نرخ بارش سالانه کم، به طور میانگین سالانه بارشی معادل ۲۵۰ میلی‌متر دریافت می‌نماید درحالی‌که بارش سالیانه در جهان حدوداً ۸۶۰ میلی‌متر در سال است. به‌علاوه، رشد زیاد جمعیت کشور در دهه‌های اخیر (Sadegh Talebi, 2022)، خشکسالی‌ها شدید، و مهم‌تر از همه عدم مدیریت درست منجر به برداشت بی‌رویه و تخلیه منابع آب زیرزمینی ایران شده است (Karbalaei et al., 2010)، این موضوع منجر به بیلان منفی در بیش از ۷۰۰ دشت

شدید (دوره ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۴)، در سال‌های اخیر به‌خاطر انتقال آب از حوضه کرخه، کسری مخزن آن به‌طور کامل جبران و حتی آب زیرزمینی به‌تراز بالاتر از تراز سال ۱۳۶۴ صعود کرده است (شرکت مه‌اب قدس، ۱۳۹۲). بر اساس بازدیدهای میدانی آثار فرونشست ناشی از دوره افت هنوز در دشت قابل مشاهده است. وجود یک دوره خیز پس از دوره افت ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۴ این فرصت را فراهم آورده است تا بتوان علاوه بر فرونشست رخ داده، نحوه رفتار آبخوان در دوره خیز در جهت جبران احتمالی بخشی از فرونشست را نیز بتوان مطالعه نمود. در این راستا، سعی شده است تا به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری، لاگ‌های لیتولوژیکی و داده‌های هیدروژئولوژیکی، نوسانات تراز ارتفاعی زمین در دو دوره افت (۱۳۶۴ تا ۱۳۸۴) و خیز (۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰) مورد بررسی قرار بگیرد.

منطقه مورد مطالعه

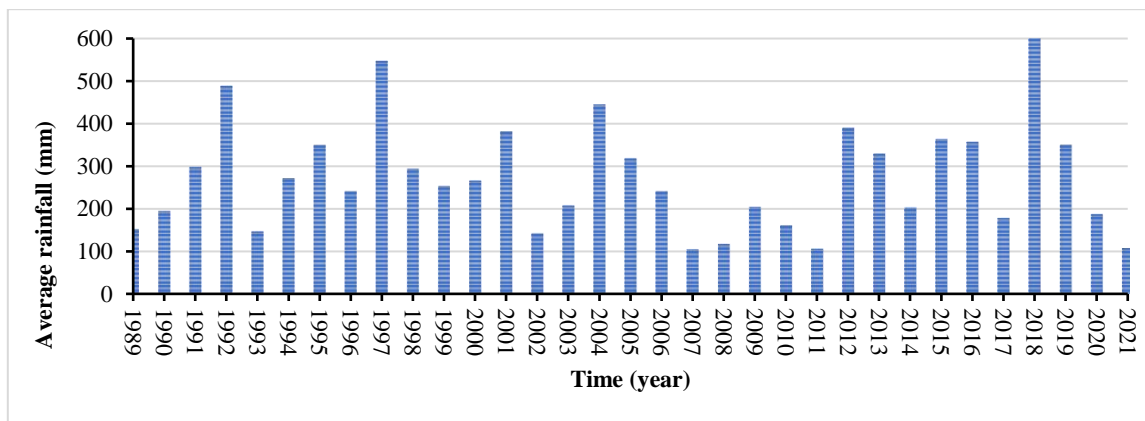
حوضه آبریز دشت عباس با عرض جغرافیایی $32^{\circ} 15'$ تا $28^{\circ} 32'$ شرقی و طول جغرافیایی $47^{\circ} 43'$ تا $47^{\circ} 59'$ شمالی، در جنوب شرقی استان ایلام و ۵۰ تا ۷۰ کیلومتری شهر دهلران واقع شده است (شکل ۱). این دشت با مساحتی در حدود ۱۶۰ کیلومتر مربع، ناودیس نامتقارنی است که بین دو تاقدیس دال پری در شمال و چشمه خوش در جنوب قرار دارد (شکل ۱). تنها منبع تامین آب جهت مصارف مختلف منطقه، آبخوان دشت عباس است که جهت جریان در آن عمدتاً به سمت مرکز دشت است. با توجه به آمار بارش از سال ۱۳۶۸ تا ۱۴۰۰ (داده‌ها از شرکت آب منطقه‌ای ایلام اخذ شده است)، میزان متوسط بارندگی دشت در حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال (حداکثر بارش در دی و بهمن ماه) است که در ترسالی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ (۲۰۱۷-۲۰۱۸) میزان بارش‌ها به شکل چشمگیری افزایش داشته است (شکل ۲). براساس داده‌های دمای روزانه، دمای متوسط سالانه‌ی دشت عباس ۲۴/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است. این دشت دارای شیب کم‌تر از ۷/۵ درصد می‌باشد که نشان از مسطح بودن منطقه دارد (شرکت مه‌اب قدس، ۱۳۹۲).

منغذی و اسکلت آبخوان به هم می‌خورد، در نتیجه اسکلت آبخوان برای تحمل وزن روباره متراکم‌تر می‌گردد که این پدیده منجر به فرونشست خواهد شد. در نتیجه، رسوبات دانه‌ریز خالی از آب خواهند شد و با توجه به تراکم‌پذیری و تخلخل بالا، این رسوبات در اثر فشار لایه‌های فوقانی دچار پدیده تحکیم می‌شوند که این پدیده به شکل فرونشست در سطح زمین ظاهر می‌گردد (لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۷). اگرچه در سال‌های مختلف تحقیقات متعددی پدیده فرونشست را در آبخوان‌های مختلف کشور به تصویر کشیده‌اند (Dehghani et al., 2009; Haghghi, 2019; Maghsoudi et al., 2021; Babaei et al., 2020; Rezaei et al., 2019; Shahbazi et al., 2022; Sabeti et al., 2023) و (توشه و همکاران، ۱۴۰۳؛ معظم‌نیا و صادق‌فام، ۱۴۰۲)، میزان برگشت‌پذیری آن در صورت جبران کسری مخزن چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. این‌که چه میزان از فرونشست اتفاق افتاده برگشت‌پذیر خواهد بود، مستقیماً با جنس رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان در ارتباط است. فرونشست دائمی زمین بیشتر حاصل تراکم رسوبات دانه‌ریزی چون رس و سیلت است زیرا میزان فرونشست غیرالاستیک (دائمی) در رسوبات دانه‌ریز بسیار بیشتر از رسوبات دانه‌درشت مانند ماسه و شن است. فرونشست دائمی ناشی از فروریختن بافت و ساختار دانه‌های خاک‌های ریزدانه است و عملاً حتی با جبران کسری فشار مخزن، برگشت‌ناپذیر است (Fulton, 2006). در مقابل، حضور رسوبات دانه درشت‌تر نظیر ماسه‌سنگ‌ها به علت الاستیسیته بیشتر، امکان بازگشت بخشی از نشست را فراهم می‌کند (Wilson and Goerlick, 1996). همواره در پایش تغییر شکل زمین نسبت به زمان، متناسب با هدف و منطقه مطالعاتی از روش‌های گوناگونی استفاده شده است. با استفاده از تصاویر راداری می‌توان مدل ارتفاعی رقومی و یا نقشه جابه‌جایی سطح زمین را تهیه کرد (Hanssen, 2001). در منطقه دهلران واقع در استان ایلام (شکل ۱)، منابع آبی (به‌ویژه آبخوان دشت عباس) غالباً جهت آبیاری زمین‌های کشاورزی، برداشت می‌شوند. با توجه به آبنمود آبخوان، دشت عباس از جمله معدود آبخوان‌های ایران است که پس از تجربه یک دوره افت



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه دهلران.

Figure 1- Geological map of Dehloran region.



شکل ۲- نمودار میزان بارش سالیانه. افزایش بارندگی در سال ۱۳۹۷ مشهود است.

Figure 2 - Graph of annual rainfall from 1989 to 2021. The significant increase in rainfall in 2018 is evident.

آبخوان را بعد از تجربه یک افت شدید، بررسی نمود. نتایج این کار می‌تواند به‌عنوان یک الگو برای تأثیر طرح‌هایی مانند تغذیه مصنوعی در میزان جبران فرونشست مطرح گردد.

مواد و روش‌ها

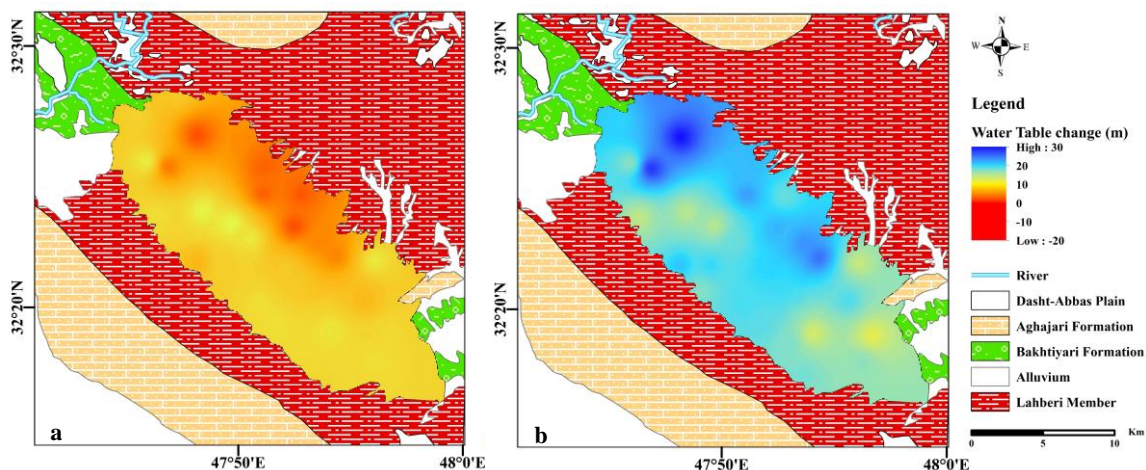
نوسانات تراز آب زیرزمینی منطقه

بررسی نوسانات تراز آب زیرزمینی در بازه زمانی مطالعاتی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۰ حاکی از وجود یک دوره افت شدید است که تحت تأثیر تغذیه حاصل از انتقال آب از سد کرخه (آغاز از بهمن‌ماه سال ۱۳۸۴) به طور کامل جبران شده است، به‌طوری‌که جبران کسری پس از سال ۱۳۸۴ باعث توقف روند نزولی تراز آب زیرزمینی در آبخوان شده و از سال ۱۳۸۹ به شکل خیزی شدید در تراز آب زیرزمینی ظاهر شده است (شکل ۴) و تراز آب به حدی بالاتر از سطح اولیه مربوط به

بهره‌برداری بی‌رویه از آبخوان دشت عباس طی چند دهه گذشته، باعث افت قابل توجه تراز آب شده است؛ به‌طوری‌که در سال ۱۳۵۶ به‌عنوان دشت ممنوعه اعلام شد (شرکت مهاب قدس، ۱۳۹۲) و از آن سال نیز افت تراز آب زیرزمینی با نرخ میانگین ۰/۲۷ متر در سال تا سال ۱۳۸۴ ادامه داشته است. این موضوع سبب ایجاد یک دوره افت چشمگیر از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۴ در منطقه شده است (شرکت مهاب قدس، ۱۳۹۲). اما پس از انتقال آب از مخزن سد کرخه به مناطق جنوبی دشت عباس (آغاز از بهمن‌ماه ۱۳۸۴) (شکل ۱)، تراز آب زیرزمینی منطقه شروع به خیز نموده است، به‌طوری‌که به طور متوسط میزان خیز آب زیرزمینی تا سال ۱۴۰۰ به حدود ۱۸ متر نیز می‌رسد. این شرایط ویژه دشت عباس فرصتی را فراهم آورده است که بتوان تأثیر خیز تراز آب بر تغییر شکل اسکلت

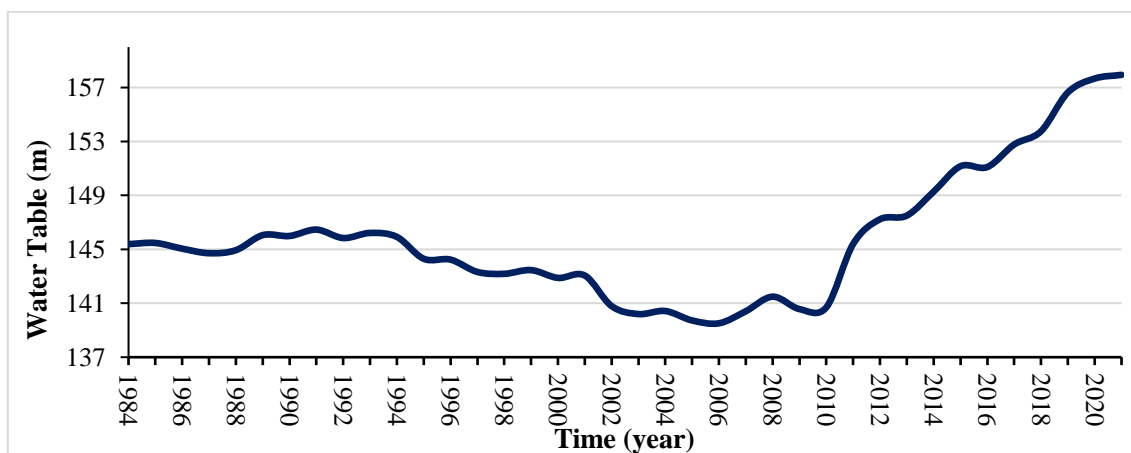
میزان خیز در قسمت‌های مختلف دشت را نمایش می‌دهد. دشت عباس پس از تجربه یک دوره افت شدید ۶ متری (شکل ۴) در اکثر نقاط خود دارای خیز قابل توجهی بوده (شکل ۳) است، که میزان این خیز به صورت میانگین ۱۸ متر می‌باشد (شکل ۴).

سال ۱۳۶۳ رسیده است (شکل ۴). در شکل ۳ الف، نقشه هم افت تراز آب زیرزمینی بر اساس میزان افت آب در محل چاه‌های مشاهده‌ای در بازه زمانی ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۴ مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۳ ب، مربوط به نقشه هم‌خیز تراز آب زیرزمینی دشت عباس در بازه زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰ است که



شکل ۳- نقشه تغییرات تراز هیدرولیکی در محل چاه‌های مشاهده‌ای (a) هم افت تراز آب زیرزمینی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۴ و (b) هم خیز تراز آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰. میزان افت رخ داده در اکثر نقاط دشت عباس با خیزی چشمگیر در دوره خیز همراه بوده است.

Figure 3 - Map of changes in hydraulic head at the location of observation wells: (a) Groundwater level decline from 1984 to 2005, and (b) Groundwater level rise from 2005 to 2021. The significant decline observed in most parts of Dashte-Abbas has been followed by a substantial increase during the rising period.



شکل ۴- آبنمود آبخوان دشت عباس (منبع داده‌ها از آب منطقه‌ای استان ایلام).

Figure 4 - Representative groundwater curve of the Dashte-Abbas aquifer (data source: Ilam Regional Water Authority).

هیدرواستراتیگرافی دشت به کمک داده‌های حاصل از نگاشت‌های حفاری در نرم‌افزار تخصصی مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی ¹GMS ترسیم گردید. در حقیقت فرونشست به‌شدت تابع جنس رسوبات و به‌ویژه وجود لایه‌های رسی ضخیم است. بدین منظور ابتدا نگاشت‌های حفاری از لحاظ

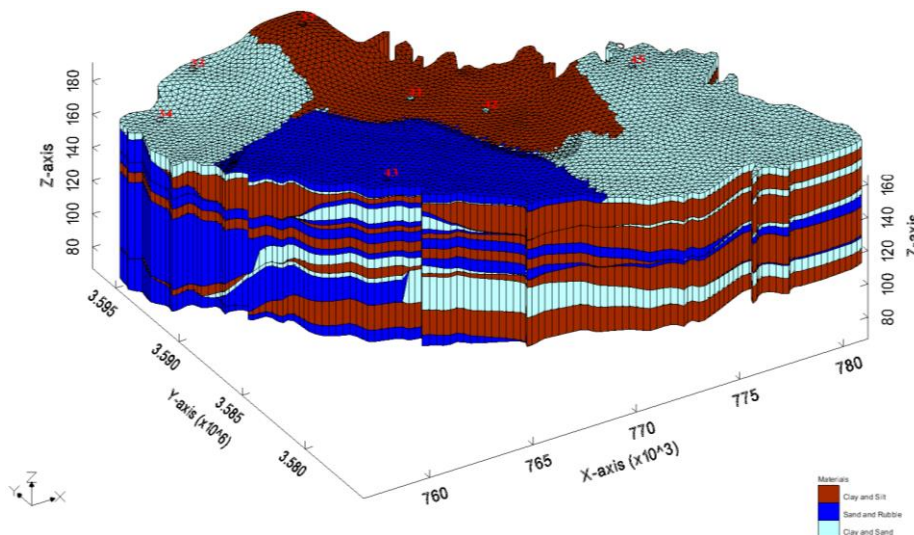
ستون هیدرواستراتیگرافی

از آنجاکه علاوه بر نوسانات تراز آب زیرزمینی، جنس لایه‌های زیرسطحی نیز از اهمیت بسیار زیادی در کنترل فرونشست برخوردار است، به‌منظور آگاهی از جنس لایه‌های رسوبی تشکیل‌دهنده آبخوان در دشت عباس، نقشه ستون

¹ Groundwater Modeling System

نشان می‌دهد که ساختار رسوبی دشت، توالی مشخصی از رسوبات ریزدانه و درشت‌دانه را در برمی‌گیرد، و با توجه به حضور گسترده رسوبات درشت‌دانه در لایه‌های بالایی آبخوان، می‌توان به آزاد بودن آبخوان در این نقاط پی برد. با توجه به شکل ۵ انتظار می‌رود در نواحی که میزان رسوبات دانه‌درشت در محل کم است، به تبع میزان فرونشست الاستیک و بازگشت‌پذیر نیز کم باشد، بنابراین از نظر تئوریک کاهش نرخ فرونشست نسبت به سایر نواحی دشت نیز در این مناطق کمتر خواهد بود. مهم‌تر اینکه، ضخامت زیاد رسوبات دانه‌ریز سبب خواهد شد (قسمت جنوبی و مرکزی) که میزان تأخیر زمانی بین نوسانات تراز آب و تراز ارتفاعی زمین نیز بیشتر شود، بنابراین در صورت بازگشت‌پذیر بودن بخشی از فرونشست رخ داده، این بازگشت احتمالاً به زمان بیشتری برای نمایان شدن نیاز دارد.

جنس رسوبات دربرگیرنده در سه دسته کلی دسته‌بندی شده و میزان ضخامت هر دسته در هر نگاشت حفاری مشخص گردید؛ تا بدین ترتیب برای هر نگاشت حفاری ستونی از سه دسته رسوبات مشخص و متناسب با هدف، داشته باشیم. دسته اول این تقسیم‌بندی را رسوبات دانه‌ریز، نظیر رس و سیلت، دسته دوم را رسوبات درشت‌دانه مانند ماسه و گراول و در نهایت دسته سوم را رسوباتی مخلوط از جنس رس، ماسه یا گراول تشکیل می‌دهند. در این تحقیق اطلاعات مربوط به ۷ نگاشت حفاری از دشت عباس در اختیار بود که با درون‌یابی جنس رسوبات بین دو نگاشت حفاری نزدیک به هم و مشابه از لحاظ جنس و ترتیب قرارگیری لایه‌های رسوبی، ستون هیدرواستراتیگرافی ترسیم شد؛ و بدین ترتیب نقشه‌ای از وضعیت و جنس لایه‌های رسوبی در دشت عباس به دست آمد (شکل ۵). ستون هیدرواستراتیگرافی دشت عباس به‌خوبی



شکل ۵- ستون هیدرواستراتیگرافی دشت عباس. وضعیت و جنس لایه‌های رسوبی در آبخوان دشت عباس نشان از حضور گسترده رسوبات دانه‌درشت در توالی با رسوبات دانه‌ریز دارد.

Figure 5 - Hydrostratigraphic column of Dashte-Abbas Aquifer which consists of coarse-grained sediments interbedded with fine-grained units.

اختلاف فاز بین دو موج متفاوت اندازه‌گیری شده و این اختلاف فاز به تغییر فاصله بین سنجنده و هدف یا جابه‌جایی سطح زمین نسبت داده می‌شود. تصاویر SAR جابه‌جایی سطح زمین را در راستای خط دید ماهواره به دست می‌دهند؛ اما با استفاده از تصاویر SAR که در دو حالت بالاگذر و پایین‌گذر تهیه شده‌اند، امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین در دو راستای قائم و افقی فراهم می‌شود. در تصاویر راداری، سطرها نشان‌دهنده راستای آزمون و ستون‌ها نشانگر راستای برد

تکنیک تداخل‌سنجی راداری

تکنیکی که برای استخراج اطلاعات مکانی از تصاویر به کار می‌رود، تحت عنوان تداخل‌سنجی راداری شناخته می‌شود که در آن اختلاف فاز بین دو یا چند تصویر SAR محاسبه شده و این اختلاف فاز به توپوگرافی و یا جابه‌جایی‌های سطحی نسبت داده می‌شود (Hanssen, 2001). در تکنیک تداخل‌سنجی رادار درجه‌م‌صنوعی^۲ یا به اختصار InSAR

² Interferometric Synthetic Aperture Radar

پیکسل هدف را روی بیضوی مرجع فرض می‌کنیم. هر میزان $B_{||}$ (خط مبنای مکانی) کم‌تر و به صفر نزدیک باشد، ترم مولفه فازی زمین مسطح کوچک‌تر می‌شود (Hanssen, 2001). برای از بین بردن خطای اتمسفر روش‌هایی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از آنالیز سری زمانی مانند PS یا SBAS، استفاده از مدل‌های هواشناسی و داده‌های سنجنده Meris و Modis و داده‌های GPS، اشاره داشت (Zebker et al., 1997). مؤلفه‌ی فازی ناشی از نویز را نیز می‌توان با میانگین‌گیری از چند گروه از پیکسل‌ها کم کرد. به‌منظور پایش نشست احتمالی حاصل از دوره‌ی افت، در دشت عباس، ۲۰ تصویر مختلط منفردنگر سطح یک پایین‌گذر مسیر ۴۶۴ ماهواره انویست^۵ در بازه زمانی ۲۰۰۳ (۱۳۸۲) تا اواخر ۲۰۰۵ (۱۳۸۴) استفاده شد. پردازش این تصاویر با بسته نرم‌افزاری StaMPS و به روش‌های پراکنشگر دائمی (PS^۶) و کم‌ترین خط مبنای (SBAS) و نیز روش ترکیبی PS و SBAS صورت گرفت (شکل ۶الف). در پردازش‌ها تصویر تاریخ ۲۰۰۴/۱۱/۰۶ به‌عنوان تصویر پایه در نظر گرفته شده است و داده توپوگرافی مورد نیاز برای پردازش تصاویر انویست این تحقیق، مدل ارتفاع رقومی ماهواره راداری ناسا (SRTM) است (Farr and Kobrick, 2000)، که دارای قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر می‌باشد. همچنین فایل دقیق اطلاعات مدارای ماهواره (ODR) (Doornbos and Scharroo, 2005)، برای محاسبه مولفه مداری و خطای آن مورد استفاده قرار گرفت. در نقشه‌ی جابه‌جایی بدست آمده از منطقه‌ی مورد مطالعه (شکل ۶الف)، پیکسل‌های قرمز رنگ نقشه، معرف دور شدن زمین از ماهواره در راستای خط دید یا همان فرونشست هستند. با توجه به نقشه، میانگین و بیشینه نشست ثبت شده برای دشت عباس به ترتیب ۷ و ۱۷/۲ میلی‌متر در سال است (شکل ۶الف).

هستند. در این تصاویر هر پیکسل دارای یک مقدار مختلط است که با استفاده از تابع نمایی رابطه ۱ بیان می‌شود (Hanssen, 2001):

$$Z = |y| \exp(i\varphi) \quad (1)$$

در رابطه فوق φ نشان‌دهنده فاز تصویر راداری و $|y|$ بیانگر دامنه آن است.

به‌منظور تولید تداخل نگار^۳ اختلاف فاز بین دو تصویر SAR از حاصل ضرب تصویر اول در مزدوج تصویر دوم به دست می‌آید (Hanssen, 2001):

$$I = Z_1 Z_2^* = |y_1| |y_2| \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2)) \quad (2)$$

دامنه تداخل نگار برابر حاصل ضرب دامنه دو تصویر اولیه و فاز تداخل نگار برابر اختلاف فاز بین این دو تصویر است؛ بنابراین پیکسل‌های تداخل نگار نیز دارای مقادیر مختلط هستند. تصویر این اختلاف فاز یک سری حلقه‌های رنگی ایجاد می‌کند که به آن‌ها فرینج گفته می‌شود. نقاطی که در فرینج‌های هم‌رنگ قرار دارند به شرطی که فرینج رنگی دیگری از بین آن‌ها عبور نکرده باشد دارای جابه‌جایی یکسانی می‌باشد. اختلاف فاز محاسبه شده فقط فاز تغییر شکل زمین نیست بلکه شامل تجمعی از عوامل مختلف است که برای به دست آوردن فاز تغییر شکل زمین لازم است این مؤلفه‌ها حذف گردد. مؤلفه‌های فاز اصلی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود (Hanssen, 2001):

$$\Delta\phi_{int} = \Delta\phi_{disp} + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{flat} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{noise} \quad (3)$$

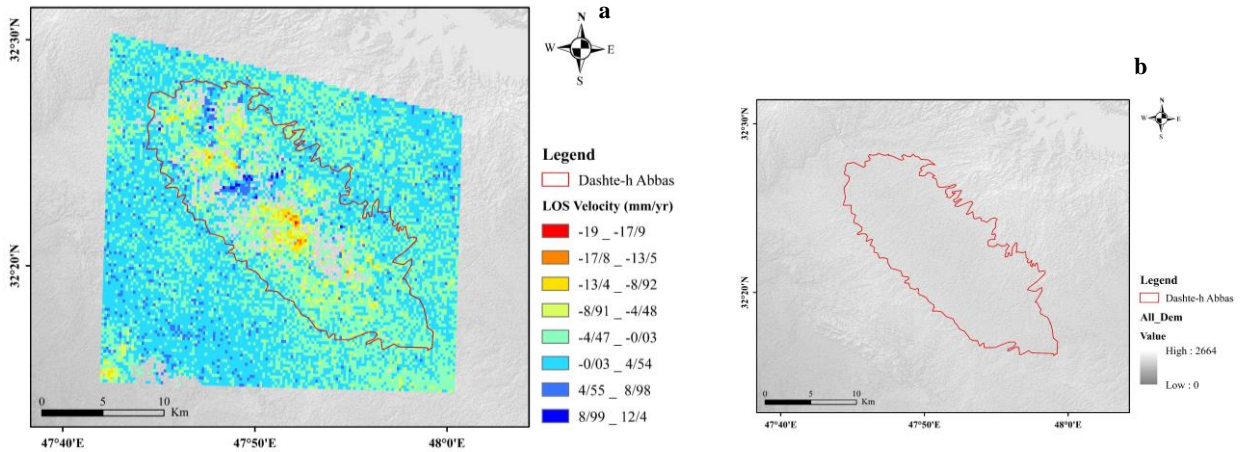
مؤلفه فازی $\Delta\phi_{disp}$ نشانگر تغییر شکل سطح زمین، $\Delta\phi_{topo}$ اختلاف فاز تداخل سنجی ناشی از توپوگرافی، $\Delta\phi_{flat}$ اختلاف فاز تداخل سنجی مربوط به مسطح بودن زمین، $\Delta\phi_{atm}$ مؤلفه‌ی فازی ناشی از اتمسفر و $\Delta\phi_{noise}$ مؤلفه‌ی ناشی از نویز فازی سیستم راداری در تداخل نگار است (Hanssen, 2001). برای بدست آوردن مؤلفه تغییر شکل سطح زمین، باید مؤلفه‌های دیگر در تداخل نگار حذف گردد. برای حذف اثر توپوگرافی، نیاز است از مدل ارتفاعی رقومی^۴ (DEM) منطقه مورد مطالعه استفاده شود (شکل ۶ب). برای حذف مؤلفه زمین مسطح نیاز به فایل‌های مداری دقیق است، که در آن

⁵ Envisat

⁶ Persistent Scatterer

³ Interferogram

⁴ Digital Elevation Model (DEM)



شکل ۶- (a) میدان جابه‌جایی در دوره افت (۱۳۸۲ تا ۱۳۸۴) برای دشت عباس پس از حذف خطاهای باقی‌مانده توپوگرافی، رمپ مداری و فاز اتمسفری به روش PS. رنگ قرمز معرف نشست و رنگ آبی معرف بالا آمدگی و رنگ سفید معرف مناطقی است که فاز از دست رفته است. (b) نقشه توپوگرافی منطقه دشت عباس.

Figure 6 - (a) Mean velocity map of land deformation in the Dashte-Abbas plain during the declining period (2003 to 2005) after removing residual topography, orbital ramp, and atmospheric phase errors using the PS method. The red color indicates subsidence, blue indicates rebound, and white represents areas with lost phase. (b) Topographical map of the Dashte-Abbas region.

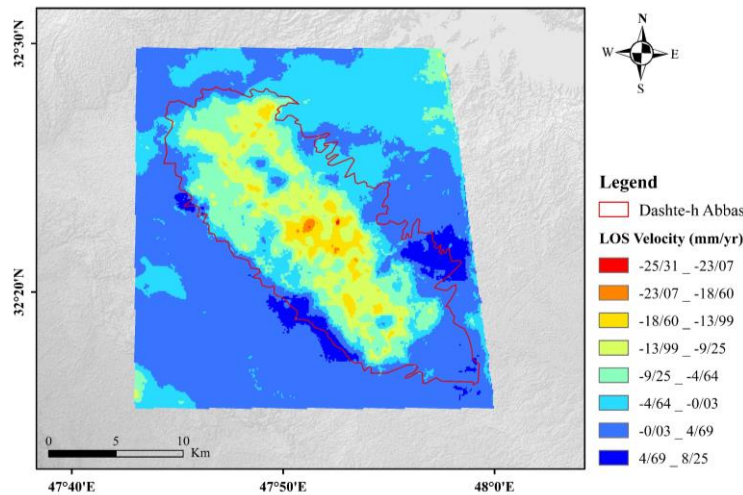
راداری ناسا (SRTM) است که دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر می‌باشد. همچنین فایل‌های مداری مورد نیاز جهت محاسبه مؤلفه مداری و نیز برداشتن اثر زمین مسطح، از سایت esa (<https://www.esa.int>) دانلود و مورد استفاده قرار گرفت. در نقشه میانگین سرعت برای دوره خیز محدوده دشت عباس با کادر قرمز مشخص گردیده است (شکل ۷). پیکسل‌های قرمز رنگ نقشه مؤید دور شدن سطح زمین (فرونشست) در راستای خط دید ماهواره هستند. با توجه به نقشه، نرخ نشست به طور متوسط برای دشت عباس ۴ میلی‌متر در سال با بیشینه تقریبی ۹ میلی‌متر در سال مشاهده می‌شود.

همچنین در این مطالعه، به منظور پایش وضعیت نشست و تأثیر دوره خیز بر روی دشت عباس، ۱۱۴ تصویر مختلط منفردنگر سطح یک (SLC⁷) بالاگذر مأموریت A و B، مسیر^۸ ۱۷۴ ماهواره سنتینل-۱ از سال ۲۰۱۴ (۱۳۹۳) تا ۲۰۲۰ (۱۳۹۸) مورد استفاده قرار گرفت. پردازش این تصاویر توسط بسته نرم‌افزاری NSBAS و به روش کم‌ترین خط مینا^۹ (SBAS) صورت پذیرفت (Doin et al., 2009; Doin et al., 2011). تصویر تاریخ ۲۰۱۴/۰۴/۰۲، به منظور هم مرجع کردن تمام تصاویر و مدل رقومی ارتفاعی، تصویر پایه این پردازش در نظر گرفته شده است. داده توپوگرافی مورد نیاز برای پردازش تصاویر سنتینل در این تحقیق، مدل ارتفاع رقومی ماهواره

⁹ Small Temporal Baseline Subset

⁷ Single Look Complex

⁸ Track



شکل ۷- نقشه‌ی میانگین جابه‌جایی دشت عباس در دوره‌ی خیز (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸) در راستای دید ماهواره. پیکسل‌های قرمز مؤید دور شدن زمین از ماهواره یا همان فرونشست است.

Figure 7 - Average displacement map of the Dashte-Abbas plain during the rising period (2014 to 2018) along the satellite's line of sight. Red pixels indicate that the ground is moving away from the satellite, signifying subsidence.

۱۷، ۱۴ و ۱۶ متر را در دوره‌ی افت تراز آب زیرزمینی خود متحمل شده‌اند. علت اصلی افت تراز آب زیرزمینی در دشت عباس را می‌توان به برداشت بیش از حد آب زیرزمینی جهت آبیاری زمین‌های کشاورزی منطقه نسبت داد. اثر این افت آب در دشت عباس در بازه‌ی زمانی مذکور به صورت فرونشستی با نرخ میانگین ۷ میلی‌متر در سال دیده می‌شود (شکل ۶الف). مقدار میانگین نشست در محل ۲۸ پیزومتر نیز فرونشستی معادل ۷ میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد. همچنین بیشینه فرونشست رخ داده در دوره‌ی افت در محل پیزومتر شماره ۲۱ با نرخ ۱۷/۲ میلی‌متر در سال مشاهده شد (شکل ۶الف). اگر چه به علت پوشش گیاهی متراکم، در نقشه‌ی میانگین جابه‌جایی دشت در دوره‌ی افت، پیکسل‌های زیادی از دست رفته است (پیکسل‌های سفیدرنگ)، اما با توجه به آنچه در قسمت‌های بازبایی شده‌ی فاز مشاهده می‌شود، مناطق دارای افت شدید تراز آب، فرونشست قابل توجه‌تری از خود نشان داده‌اند (شکل ۸). در قسمت مرکزی دشت بالاآمدگی مشاهده می‌شود. این مسئله را می‌توان به وجود رسوبات دانه‌درشت با الاستیسیته بالا در این منطقه مرتبط دانست (شکل ۵). به علت وجود رسوبات دانه‌درشت بسیار در منطقه که دارای تراکم‌پذیری بسیار پایینی هستند، فرونشست در این محدوده مشاهده نمی‌شود.

با توجه به شروع انتقال آب از سد کرخه در بهمن‌ماه سال ۱۳۸۴ و نیاز کمتر به آب زیرزمینی و نیز افزایش نرخ تغذیه

بحث و بررسی

بررسی تغییر شکل سطح زمین دشت عباس در دوره افت و خیز تراز آب

ستون هیدرواستراتیگرافی حاصل از ۷ نگاشت حفاری در آبخوان دشت عباس (شکل ۵) نشان از آن دارد که این آبخوان از رسوبات دانه‌درشت، دانه‌ریز و مخلوطی از این دو تشکیل شده است و رسوبات دانه‌درشت نقش بسزایی در شکل‌گیری آبخوان دارند و همچنین عامل مؤثری در برگشت تراز آب زیرزمینی در نواحی مختلف آبخوان هستند. رسوبات دانه‌درشت نظیر شن و ماسه، محل ذخیره و منبع اصلی آب زیرزمینی در این دشت هستند. انتظار می‌رود رسوبات دانه‌ریز به علت الاستیسیته پایین و تراکم‌پذیری بالا، نقش مؤثری در فرونشست احتمالی داشته باشند. یادآور می‌شود که روند تغییرات بلند مدت سطح آب زیرزمینی در دشت عباس، دو دوره‌ی متفاوت را تجربه کرده است. مطابق با آبنمود آبخوان که برای منطقه مطالعاتی ترسیم گردید (شکل ۴) و نیز بررسی تمامی پیزومترها از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۴ (۲۱ سال)، دشت عباس به طور متوسط بیش از ۶ متر افت تراز آب را تجربه کرده است. البته این مقدار در محل برخی از پیزومترها بسیار بیشتر است و پیوسته نبودن اطلاعات تراز آب زیرزمینی بعضی از پیزومترها و عدم استفاده از این داده‌ها در ترسیم آبنمود، اجازه‌ی خودنمایی این مقدار از افت را در آبنمود نداده است. به طور مثال می‌توان به پیزومترهای ۲۷، ۱۹ و ۲۵ (شکل ۳) اشاره داشت که به ترتیب، افتی معادل

دشت، ضخامت منطقه غیراشباع کاهش یافته و این امر کمک می‌کند تا تغذیه به آبخوان با نرخ بیش‌تر و سریع‌تر اتفاق بیافتد. بنابراین با این احتمال که این پیک فصلی بوده و با کاهش بارش، به روند قبلی خود باز می‌گردد، ملاک بررسی دوره خیز، در تمامی پیژومترهای دشت به بازه مطالعاتی t₁ (مهر ۹۳ تا خرداد ۹۸) محدود شده است. شایان است که وجود پیک‌های مثبت در تراز ارتفاعی زمین حاکی از این است که حداقل بخشی از فرونشست رخ داده، الاستیک بوده و با جبران کامل کسری مخزن و گذشت زمان کافی (بسته به نرخ تأخیر زمانی بین نوسانات آب و تغییرات تراز ارتفاعی زمین که خود به جنس رسوبات وابسته است) بخشی از فرونشست برگشت‌پذیر خواهد بود. برای بررسی دقیق‌تر وضعیت فرونشست در دو دوره افت و خیز دشت عباس، به صورت ویژه تغییرات تراز ارتفاعی زمین، در محل هر پیژومتر به شکل نمودار مقایسه‌ای بر روی نقشه‌ی جابه‌جایی در دوره‌ی خیز، به نمایش درآمده است (شکل ۸). با توجه به شکل ۸، قسمت مرکزی دشت نسبت به نیمه شمالی و جنوبی دشت، میزان فرونشست بیشتری را به خود دیده است. همچنین همانگونه که انتظار می‌رفت، متناسب با سازوکار حاکم بر فرونشست، پیژومترهای حاشیه‌ای دشت میزان فرونشست کم‌تری نسبت به مرکز دشت متحمل شده‌اند (شکل ۸). نکته حائز اهمیت در مورد نقشه‌ی میانگین سرعت جابه‌جایی این است که در نواحی مرکزی دشت که فرونشست قابل توجهی در دوره‌ی افت به خود دیده بود، روند نرخ فرونشست به صورت چشم‌گیری تغییر پیدا کرده، و افت تراز ارتفاعی زمین (میله‌ی قرمز رنگ) در دشت عباس کاهش پیدا کرده است (شکل ۸). با توجه به شکل ۸ و مقایسه‌ی تغییر شکل‌های رخ داده در دوره‌ی افت و بازه‌های زمانی مربوط به خیز دشت عباس، رفتار فرونشست در دشت را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم بندی نمود.

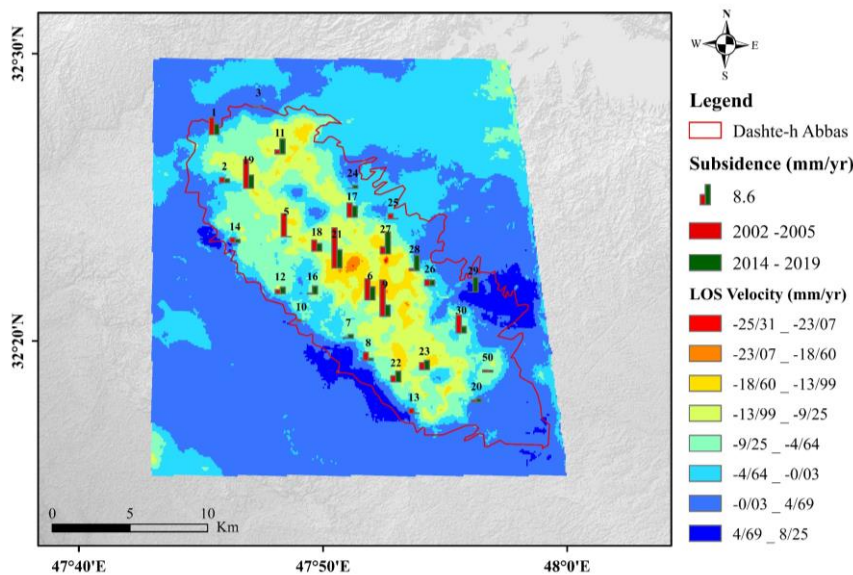
دسته اول مناطقی هستند که در طی دوره افت، فرونشستی به خود ندیده‌اند یا اگر نشستی در محل وجود داشته، بسیار ناچیز بوده است (شکل ۸). برخی از پیژومترهای این دسته (۱۴، ۲۰، ۲۹، و ۵۰) در طی دوره خیز و ضمن افزایش تراز آب، تغییر شکلی در قالب بالآمدگی در منطقه نشان داده‌اند (شکل ۸). این پیژومترها غالباً در حاشیه دشت که ضخامت آبرفت کمتر و غالباً حاوی ذرات دانه‌درشت‌تر است، قرار دارند. وجود یکی

حاصل از آب برگشتی کشاورزی، روند تراز آب زیرزمینی به‌تدریج از افت به خیز تغییر پیدا کرد (شکل ۴). روند خیز با تأخیری متناسب با جنس رسوبات آغاز شده و در نهایت خیزی ۱۸ متری را در آبنمود دشت در پایان سال ۱۴۰۰ به ثبت رسانیده است (شکل ۴). تأثیر خیز تراز آب زیرزمینی بر روی تغییرات سطح زمین در آبخوان دشت عباس نیز به‌وسیله پردازش ۱۱۴ تصویر بالاگذر ماهواره سنتینل بررسی گردید. مطابق با نقشه میانگین سرعت جابه‌جایی دوره‌ی خیز دشت عباس (شکل ۷)، نرخ فرونشست به‌صورت میانگین در دشت ۴ میلی‌متر در سال مشاهده شد و بیشینه فرونشست رخ داده دشت در این دوره مربوط به پیژومتر ۲۷ با نرخ ۹/۳ میلی‌متر در سال است. میانگین نشست به‌دست‌آمده در محل ۲۸ پیژومتر نیز ۴ میلی‌متر در سال ثبت شده است. اگرچه نرخ فرونشست در مقایسه با مقدار میانگین در دوره افت (۷ میلی‌متر در سال)، کاهش معادل سه میلی‌متر در سال را به خود دیده است؛ اما در محل پیژومترها میزان جبران فرونشست بزرگ‌تر است. برای مثال، در محل پیژومتر ۲۱ میزان جبران فرونشست ۱۰ میلی‌متر در سال است. همچنین شایان‌ذکر است که میزان جبران فرونشست در محدوده دارای بیشینه فرونشست دشت در مقایسه با دوره افت به ۸ میلی‌متری در سال نیز می‌رسد؛ یعنی در عمل نرخ فرونشست تقریباً به نصف کاهش یافته است. برای مقایسه دقیق تغییر شکل سطح زمین در دوره افت و خیز دشت عباس، سری زمانی جابه‌جایی ارتفاعی زمین در محل پیژومترهای دشت مورد بررسی قرار گرفت. نکته جالب توجه در مورد سری زمانی پیژومترها، وجود یک پیک افزایشی در انتهای دوره مطالعاتی است (شکل ۲). در تمامی پیژومترهای دشت و در انتهای بازه مطالعاتی، از فروردین ۱۳۹۸ تا مهر ۱۳۹۸ خیز (پیک) شدیدی مشاهده می‌شود. این خیز شدید به احتمال زیاد ناشی از تأثیر تغذیه حاصل از ترسالی بی‌سابقه سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در منطقه می‌باشد (شکل ۲). اگر به نمودار نوسانات بارش ایستگاه دهلران (شکل ۲) دقت شود، دیده می‌شود که در این سال بیشترین مقدار بارش (۷۱۴ میلی‌متر) کل دوره آماری موجود رخ داده است. طبیعتاً این بارش سبب افزایش چشم‌گیر تغذیه آبخوان و ایجاد یک شوک مثبت به آن شده است؛ زیرا در چند سال اخیر به خاطر افزایش تراز آب

گروه سوم غالباً پیزومترهای مرکز دشت را شامل می‌شود که در محل اکثر آن‌ها نرخ فرونشست رخ داده در دوره خیز به‌خاطر افزایش تراز آب، نسبت به دوره افت کاهش یافته است. طبق انتظار، بیشینه فرونشست رخ داده معمولاً در مرکز دشت می‌باشد و کاهش نرخ نشست حاصل از افزایش تراز آب زیرزمینی نیز بیشتر در پیزومترهای این منطقه دیده می‌شود (شکل ۸). پیزومترهای شماره ۶، ۹، ۱۹ و ۲۱ از جمله پیزومترهایی هستند که در محل آن‌ها میزان جبران فرونشست بیشترین مقدار است (شکل ۸).

از این فاکتورها یا هر دو در کنار هم اجازه رخ دادن فرونشست را نخواهند داد (شکل ۸).

گروه دوم شامل پیزومترهایی از حاشیه دشت است که در فازی نزدیک‌تر به فرونشست مرکزی دشت قرار دارند؛ این پیزومترها علی‌رغم اینکه در دوره افت فرونشستی به خود ندیده‌اند، در دوره خیز با وجود افزایش تراز آب زیرزمینی، در محل خود دچار فرونشست شده‌اند؛ علت این موضوع را می‌توان در سازوکار فرونشست و پیشرفت آن از مرکز دشت به حاشیه دشت در گذر زمان دانست. از پیزومترهایی که در دشت چنین رفتاری را نشان می‌دهند می‌توان به پیزومترهای شماره ۱۱، ۱۲، ۲۷ و ۲۸ اشاره داشت (شکل ۸).



شکل ۸- مقایسه میزان جابه‌جایی ارتفاعی در محل پیزومترها، در دوره افت و خیز بر روی نقشه میانگین سرعت جابه‌جایی دوره خیز در راستای دید ماهواره برای آبخوان دشت عباس. میله‌های قرمز رنگ معرف میزان جابه‌جایی در محل پیزومترها برای دوره افت و میله‌های سبز رنگ معرف میزان جابه‌جایی در محل پیزومترها برای دوره خیز می‌باشد.

Figure 8 - Comparison of land displacements during declining (red bars) and rising (green bars) periods at piezometer locations.

اگرچه به طور بخشی جبران شده است، اما بخشی از آن حتی با وجود جبران کامل کسری مخزن به میزان ۱۳ متر تا سال ۱۴۰۰ بالاتر از تراز اولیه آبخوان در سال ۱۳۶۴، برگشت پذیر نیست که این نشان از این دارد که بخشی از لایه‌های ریزدانه دچار پدیده تحکیم شده و بافت خاک در آن‌ها برای همیشه تغییر یافته است. این نتایج بیانگر این است که متخصصان و تصمیم‌گیران حوزه منابع آبی کشور بایستی توجه داشته باشند که عواقب مخرب افت شدید مخازن زیرزمینی ممکن است در برخی موارد به هیچ عنوان، حتی با جبران کامل کسری آب مخزن، قابل جبران نباشد زیرا هنگام فرونشست دائمی، تغییر

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که اگرچه فرونشست حاصل از دوره افت آب زیرزمینی در بازه ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۴ (به طور متوسط ۷ میلی‌متر در سال) به‌طور کامل در طی دوره خیز آب زیرزمینی در بازه ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷ (۴ میلی‌متر در سال) جبران نشده است اما در مناطق مرکزی دشت که بیشترین نرخ فرونشست (حدود ۱۷ میلی‌متر در سال) را تجربه کرده است، میزان جبران فرونشست در طی دوره خیز به حدود ۵۰ درصد نیز می‌رسد. این نتایج حاکی از این است که فرونشست بلندمدت

- Doin, M.P., Lodge, F., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Ducret, G., Grandin, R., Pathier, E. and Pinel, V., 2011, September. Presentation of the Small Baseline NSBAS Processing Chain on a Case Example: The Etan Deformation Monitoring from 2003 to 2010 Using Envisat Data. In Fringe Symposium.
- Doornbos, E., Scharroo, R., 2005. April. Improved ERS and Envisat precise orbit determination. In Envisat & ERS Symposium, 572.
- Farr, T. G., and M. Kobrick., 2000. "Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data." Eos, Transactions American Geophysical Union 81 (48): 583-585.
- Fulton, A., 2006. Land subsidence: What is it and why is it an important aspect of groundwater management, California Department of Water Resources, 4 p.
- Haghighi, M. H., Motagh, M., 2019. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. Remote sensing of environment, 221, 534-550.
- Hanssen, R. F., 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis, Springer Science & Business Media.
- Karbalaee, F., 2010. Water crisis in Iran. In Chemistry and Chemical Engineering (ICCCE), International Conference, 398-400.
- Madani, K., 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. Journal of environmental studies and sciences, 4(4), 315-328.
- Maghsoudi, Y., Amani, R., Ahmadi, H., 2021. A study of land subsidence in west of Tehran using Sentinel-1 data and permanent scatterer interferometric technique. Arabian Journal of Geosciences, 14, 1-10.
- Motagh, M., Djamou, Y., Walter, T. R., Wetzel, H. U., Zschau, J., Arabi, S., 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. Geophysical Journal International, S. Hensley. 168(2), 518-526.
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., Zschau, J., 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. Geophysical Research Letters, 35(16).
- 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.
- Sabeti, H., Pourmina, A., Rezaei, A., Tayfehrostami, A., Einlou, F., Nankali, H., 2023. Discovering confined zones and land deformation
- بافت خاک منجر به فشردگی اسکلتون آبخوان و کاهش نرخ نفوذ عمیق و به تبع، کاهش ضریب ذخیره می‌گردد.
- تقدیر و تشکر**
- از سازمان آب منطقه‌ای ایلام برای در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز هیدروژئولوژیکی و همچنین از سازمان فضایی اروپا، esa (<https://www.esa.int>)، به منظور در اختیار قرار دادن تصاویر ماهواره‌ای تشکر می‌شود.
- منابع**
- حمیدیان، هـ، صادقی، ج، ۱۳۹۳. بررسی فرونشست زمین‌های آبرفتی ناشی از کاهش فشار در آبخوان‌ها و چگونگی اثرگذاری نوع آبرفت بر فرونشست زمین در دشت تهران. مخاطرات محیط طبیعی، ۹۵-۱۱۰.
- توشه، ز، رضائی، الف، موسوی، ز، امیری، م، عینلو، ف، ۱۴۰۳. گستره آبخوان تحت فشار زنجانرود و ارتباط آن با منابع آب سطحی: تداخل‌سنجی راداری و هیدروژئولوژی. هیدروژئولوژی، ۸(۲)، ۸۰-۹۳.
- شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، ۱۳۹۲. گزارش هیدروژئولوژی طرح مطالعات نیمه تفصیلی و تهیه مدل ریاضی آب زیرزمینی دشت عباس و دهلران.
- لشکری پور، غ، غفوری، م، رستمی بارانی، ج، ۱۳۸۷. بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر. رخساره‌های رسوبی، ۱(۱)، ۹۵-۱۱۱.
- معظم‌نیا، م، صادق فام، س، ۱۴۰۲. ارزیابی تأخیر زمانی افت تراز آب زیرزمینی نسبت به وقوع فرونشست با استفاده از تحلیل آسیب‌پذیری در آبخوان دشت تسوج. هیدروژئولوژی، ۸(۱)، ۷۸-۹۲.
- Babae, S., Mousavi, Z., Masoumi, Z., Malekshah, A. H., Roostaei, M., Aflaki, M., 2020. Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. International Journal of Remote Sensing, 41(12), 4780-4798.
- Dehghani, M., Valadan Zoj, M. J., Entezam, I., Mansourian, A., Saatchi, S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. Geophysical Journal International, 178(1), 47-56.

- characteristics across an aquifer system in Iran using GNSS and InSAR techniques. *Hydrogeology Journal*, 31(8), 2061-2076.
- 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.
- Talebi, M., 2023. Water crisis in iran and its security consequences. *Journal of Hydraulic Structures*, 8(4), 17-28.
- Wilson, A. M., Gorelick, S., 1996. The effects of pulsed pumping on land subsidence in the Santa Clara Valley, California. *Journal of hydrology*, 174(3-4), 375-396.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of geophysical research: solid earth*, 102(B4), 7547-7563.