

پایش فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تحلیل پارامترهای مؤثر بر آن

زهرا خسروانی^۱، محمد اخوان قالی‌باف^{۲*}، مریم دهقانی^۳، ولی درهمی^۴، مصطفی بولکا^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲۸

چکیده

یکی از روش‌های مناسب پایش رخداد فرونشست، استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری است. در این پژوهش، مقدار فرونشست دشت ابرکوه در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از ۴۶ تصویر راداری ماهواره Sentinel-1 استفاده شد. پس از پردازش تصاویر و تهیه ۱۳۶ اینترفروگرام، نقشه فرونشست منطقه به کمک تحلیل سری زمانی تهیه شد. در ادامه به منظور تعیین عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست، دو عامل افت سطح آب زیرزمینی و جنس و ضخامت رسوبات لایه‌های زیرسطحی بررسی شدند. لذا داده‌های تغییرات سطح آب ۳۴ چاه پیزومتری و جنس و ضخامت رسوبات ۷۷ لاگ حفاری در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸ آنالیز و نقشه‌های مربوط در مقیاس زمانی ماهانه ترسیم شدند. نتایج نشان داد بیشترین مقدار فرونشست در شرق، شمال شرق و شمال منطقه رخ داده و مقادیر آن به ترتیب ۲۲، ۱۰ و ۶ سانتی‌متر در محدوده زمانی چهار سال بود. بررسی نقشه‌های افت سطح آب زیرزمینی و ضخامت رسوبات ریزدانه رسی نشان داد به‌رغم افت سطح آب زیرزمینی در کل دشت، فرونشست در مناطقی مشاهده می‌شود که جنس رسوبات زیرسطحی آن، رسوبات ریزدانه رسی باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اگرچه افت سطح آب در منطقه برای پدیده فرونشست لازم است، کافی نبوده و عوامل دیگری از جمله جنس رسوبات لایه‌های زیرسطحی نیز مؤثر است.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، رسوبات ریزدانه، سری زمانی، سنجش از دور، فرونشست.

۱. دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، گروه احیا و مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
 ۲. استادیار گروه احیا و مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، makhavan@yazd.ac.ir
 ۳. دانشیار بخش راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
 ۴. استاد بخش هوش مصنوعی، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران
 ۵. استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اژه، ازهر، ترکیه
- * این مقاله مستخرج از رساله دکتری دانشگاه یزد است.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی به عنوان تنها منبع تأمین آب در بخش‌های بزرگی از ایران مرکزی محسوب می‌شود. افزایش سریع جمعیت و توسعه روزافزون مصرف آب از یک سو و کاهش بارندگی و وقوع خشکسالی از سوی دیگر سبب شده است تا میزان بهره‌برداری از منابع آب، به‌ویژه منابع آب زیرزمینی افزایش پیدا کند. این روند افزایش مصرف، افت شدید سطح آب زیرزمینی و در نتیجه، ظهور پدیده فرونشست را به دنبال داشته است. فرونشست اگرچه در تمام شرایط اقلیمی دیده می‌شود، در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارای بیشترین پراکندگی است (صفاری و همکاران، ۲۰۱۶).

فرونشست عبارت است از حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد (آمیغ‌پی و همکاران، ۲۰۰۸). این پدیده به علت‌های گوناگونی رخ می‌دهد که یکی از علل رایج آن، برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها است. این وضعیت به‌ویژه در جایی که پمپاژ بی‌رویه از سفره‌های آبدار ماسه‌ای متخلخل که به‌صورت بین لایه‌ای با لایه‌های آبدار رسی نفوذناپذیر قرار دارد، بسیار حاد بوده و موجب فرونشست گسترده می‌شود (عالمی، ۲۰۰۲). هرچند در علت واقعه فرونشست، نقش افت سطح سفره، انکارنشدنی است، در نحوه وقوع این پدیده می‌تواند عوامل متفاوتی دخیل باشد که در این خصوص شاید بتوان به نظریه ژئودوالیتی^۱ یا زوجیت پورخسروانی (۲۰۱۴) اشاره کرد که در خصوص ژئومرفولوژی ایران به کار رفته است. به‌دلیل ویژگی‌های خاصی از زمین، رخداد نشست می‌تواند با شکل متفاوتی از نقاط دیگر نمایان شود. بنابراین لزوماً یک رابطه خطی میان افت سطح آب زیرزمینی و ایجاد پدیده فرونشست وجود ندارد. در بیشتر مواقع ستبرای رسوبات ریزدانه باعث ایجاد تأخیر زمانی بین افت سطح آب زیرزمینی و نشست سطح زمین می‌شود (حقیقت‌مهر و همکاران، ۲۰۱۲). به‌عبارت دیگر این پدیده معمولاً بلافاصله با خروج سیال رخ نمی‌دهد، بلکه در زمان طولانی‌تری بعد از برداشت اتفاق می‌افتد.

در نتیجه برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی،

سطح آن از حد معمول پایین‌تر می‌آید. آبی که در بین ذرات لایه‌های خاک قرار دارد، دارای فشاری است که به فشار آب بین منفذی موسوم است. این فشار در تعادل با فشار رو به پایین ناشی از وزن لایه‌های رویی خاک، منجر به ایجاد یک وضعیت تعادلی در آبخوان می‌شود. وقتی آب در آبخوان پایین می‌آید، حفره‌های لایه‌لای خاک که تاکنون از آب پر بوده، خالی می‌شود و هوا به جای آب قرار می‌گیرد. در عمل با حذف فشار آب بین منفذی، عاملی برای تحمل وزن لایه‌های رویی خاک وجود نداشته و لذا لایه‌های خاک به تدریج از بالا به لایه‌های زیرین خود فشار می‌آورند. با خروج تدریجی هوای بین رسوبات، ذره‌ها به هم فشرده‌تر می‌شوند و در نهایت لایه‌های خاک و رسوب به تدریج نشست می‌کنند. به همین خاطر قدرت نفوذپذیری و تخلخل مفید خود را از دست داده و در آینده، حتی اگر آبی هم در سطح زمین موجود باشد، امکان نفوذ و ذخیره آن بسیار کاهش یافته و به‌عبارت دیگر پایان عمر آبخوان محسوب خواهد شد (یمانی و همکاران، ۲۰۰۹).

اندازه‌گیری میزان فرونشست در ابتدا متکی بر بررسی‌های پیمایشی و عملیات مکانیک خاک و ژئوتکتونیک بود که این روش‌ها علاوه بر دقت اندک، زمان‌بر و پرهزینه بودند (عرب‌عامری و همکاران، ۲۰۱۹). در دهه‌های گذشته استفاده از GPS، ترازبایی دقیق و تکنیک‌های سنجش از دور به‌خصوص تداخل‌سنجی راداری بسیار متداول شدند. مشاهدات ترازبایی و GPS فقط قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی در محل ایستگاه‌ها هستند؛ لذا با استفاده از این روش‌ها نمی‌توان پهنه و گستره منطقه تحت تأثیر فرونشست را مشخص کرد. بنابراین تداخل‌سنجی داده‌های راداری در بین روش‌های متنوع و گوناگون آشکارسازی تغییرات پوسته زمین، به‌عنوان بهترین روش اندازه‌گیری پیوسته این تغییرات از حیث هزینه، مقیاس و سرعت مطرح است (دهقانی و همکاران، ۲۰۱۱).

مطالعه پدیده فرونشست به‌سبب فراگیری فضایی آن مورد توجه طیف وسیعی از محققان قرار گرفته و در سال‌های اخیر از تکنیک‌های رایج از جمله تداخل‌سنجی راداری برای تخمین

تغییرات سطح آب زیرزمینی بر فرونشست دشت سمنان از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده کردند؛ نتایج نشان داد که پهنه‌های دارای فرونشست بر مناطق افت سطح آب‌های زیرزمینی منطبق هستند یا در نزدیکی آن‌ها قرار دارند.

هدف از این پژوهش، استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری برای تعیین گستره و میزان فرونشست دشت ابرکوه در یک بازه زمانی ۴ ساله (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸) است. همچنین تأثیر برخی عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست مورد پایش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت ابرکوه با وسعت حدود ۱۳۹۰ کیلومتر مربع بخشی از حوزه آبخیز ابرکوه - سیرجان است که موقعیت جغرافیایی آن بین طول ۶۹۰۴۴۴ تا ۷۲۸۰۳۹ متر شرقی و عرض ۳۴۱۸۱۲۱ تا ۳۴۵۵۰۱۸ متر شمالی قرار دارد. این منطقه شامل مخروط‌افکنه و دشتی است که از غرب، جنوب و جنوب غربی به ارتفاعات و از شرق به کفه نمکی کویر ابرکوه منتهی شده است (شکل ۱). وضعیت ژئومورفولوژی منطقه نشان می‌دهد که شیب عمومی دشت از غرب به شرق بوده و حداکثر ضخامت رسوبات آبرفتی حدود ۳۴۰ متر است که در قسمت شمال شرق منطقه مطالعاتی مشاهده شده است. واحدهای چینه‌شناسی محدوده مطالعاتی ابرکوه مشتمل بر ردیفی از سازندهای پالئوزوئیک تا کواترنر است. اراضی کم‌ارتفاع را رسوبات آبرفتی جوان کواترنر مانند رسوبات کنگلومرای تحکیم‌نیافته، پهنه‌های رسی، شنی و نمکی پوشانده است. این نهشته‌های آبرفتی متعلق به عهد حاضر و محل حفر بسیاری از چاه‌های بهره‌برداری، اکتشافی و... است. ارتفاعات مشتمل بر تشکیلات آهکی و دولومیتی با رگه‌های کلسیتی است.

بر اساس اطلاعات پردازش‌شده در ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی سازمان هواشناسی کشور، متوسط دمای ماهانه و مجموع بارندگی سالانه منطقه مورد مطالعه در دشت و ارتفاعات به ترتیب ۱۷/۳ و ۱۵/۷ درجه سانتی‌گراد و ۸۵/۸ و ۱۷۲/۵ میلی‌متر است. با توجه به وضعیت دمایی و بارش

میزان فرونشست استفاده شده است (ترانووا^۱ و همکاران، ۲۰۱۵؛ چوشیانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۷؛ آماتو^۳ و همکاران، ۲۰۱۷؛ پولکاری و همکاران، ۲۰۱۹؛ اسمیت و نایت^۴، ۲۰۱۹؛ یانگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۰؛ المهدی و همکاران، ۲۰۲۰). آرهان^۶ و همکاران (۲۰۲۱) از داده‌های InSAR و سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی برای درک بهتر روابط فرونشست و استخراج آب‌های زیرزمینی در حوزه Karpinar کشور ترکیه استفاده کردند؛ نتایج نشان داد که پدیده فرونشست ارتباط معناداری با تغییرات سطح آب زیرزمینی دارد و در جایی که لایه‌های نزدیک به سطح زمین ریزدانه هستند، فرونشست بیشتر است. همچنین متوسط فرونشست منطقه بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸، حدود ۷۰ میلی‌متر در سال برآورد شد. شی^۷ و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی خصوصیات فرونشست شهر وهان (۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹) از تصاویر Sentinel-1 و روش InSAR استفاده کردند. نتایج نشان داد که متوسط نرخ فرونشست در منطقه حدود ۲۰ میلی‌متر در سال است. آن‌ها دریافتند که توسعه شهری، وجود کارست و افت سطح آب زیرزمینی، تأثیر فراوانی در رخداد فرونشست دارد. تحقیقات انجام‌گرفته در ایران نیز نشان می‌دهد که فرونشست همواره به‌عنوان تهدیدی جدی برای پروژه‌های انسانی مطرح بوده است. دهقانی (۲۰۱۴) در پایش فرونشست دشت مشهد، به ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداخت. ایشان بیشترین نرخ فرونشست در این دشت را بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵، حدود ۲۳ سانتی‌متر در سال برآورد کرد. عرب‌عامری و همکاران (۲۰۱۹) در برآورد میزان سالیانه فرونشست در دشت مهیار، از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده کردند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان فرونشست در مناطق تحت کشت و در نتیجه استحصال بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی و به مقدار ۶/۴ سانتی‌متر در سال اتفاق افتاده است. حداد و خراسانی (۲۰۱۹) در بررسی اثر

1. Terranova
2. Qiuxiang
3. Amato
5. Smith and Knight
6. Yang
8. Orhan
9. Shi

برای حذف اثر توپوگرافی از اینترفروگرام‌های پردازش شده، مدل ارتفاعی رقومی $SRTM^5$ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تحلیل سری زمانی جابه‌جایی از الگوریتم مبنی بر خط مبنای کوتاه ($SBAS^6$) استفاده شد (دهقانی و همکاران، ۲۰۱۱). به منظور تحلیل سری زمانی، در ابتدا باید اثر خطای مداری را از اینترفروگرام‌ها حذف نماییم. بدین منظور صفحه‌ای را به کمک نقاط خارج از محدوده فرونشست و حتی الامکان دور از آن، بر روی منطقه برآزش داده و آن را از اینترفروگرام‌ها کم کردیم. همچنین یک نقطه در منطقه به عنوان نقطه مرجع انتخاب شد و جابه‌جایی‌ها نسبت به آن محاسبه شدند. در میان تصاویر، یک تاریخ به عنوان مبدأ زمانی انتخاب شد تا تغییرات تصاویر، همگی نسبت به آن مبدأ زمانی سنجیده شوند. اینترفروگرام‌ها نقش مشاهدات را دارا بوده و مجهولات، فاز مربوط به جابه‌جایی در هر اپک تصویربرداری است (صفاری و همکاران، ۲۰۱۶). مجهولات به کمک حل کمترین مربعات با دخالت دادن شرط نرم‌کنندگی برای کاهش نوسانات ناشی از اتمسفر، از سری زمانی برآورد شدند.

پس از برآورد فاز جابه‌جایی در هر اپک زمانی، میزان جابه‌جایی در هر اپک برای هر پیکسل اینترفروگرام‌ها، با ضرب ضریب $2\pi/\lambda$ در فاز برآورد شده به دست می‌آید. بدین صورت می‌توان سری زمانی در هر پیکسل را به‌ازای هر اپک تصویربرداری ترسیم کرد. حال به هر سری زمانی، خطی برآزش داده می‌شود که از روی آن می‌توان سرعت متوسط جابه‌جایی را در هر پیکسل در بازه زمانی مورد نظر به دست آورد. بدین صورت نرخ متوسط جابه‌جایی به دست می‌آید (صفاری و همکاران، ۲۰۱۶). تمام مراحل پردازش تداخل سنجی راداری در نرم‌افزار GMTSAR تحت سیستم عامل لینوکس و تمام مراحل برنامه‌نویسی مربوط به تحلیل سری زمانی و برآورد سرعت متوسط جابه‌جایی در محیط Matlab انجام شد. نمودار جریانی فرایند تداخل سنجی راداری روزانه مصنوعی و تحلیل سری زمانی در زیر ارائه شده است (شکل ۲).

موجود، می‌توان اقلیم منطقه را با توجه به طبقه‌بندی دومارتن، خشک دانست.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure (1): Geographical Location of the Study Area

روش کار

یکی از ابزارهای توانمند برای پایش پدیده فرونشست، روش تداخل سنجی راداری است. این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه، در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی است. فاز اخذ شده از یک عارضه بر روی سطح زمین متناسب با فاصله آن تا سنجنده راداری است. بنابراین ایجاد تغییر در این فاصله بر روی فاز اندازه‌گیری شده اثر می‌گذارد. به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری، تصویری به نام اینترفروگرام^۱ ساخته می‌شود. یک اینترفروگرام تصویری است که حاوی اختلاف فاز دو تصویر راداری است که با دقت نسبت به هم ثبت هندسی شده‌اند (دنیل^۲ و همکاران، ۲۰۰۳).

برای اندازه‌گیری میزان فرونشست دشت ابرکوه، از ۴۶ تصویر راداری با روزنه مجازی SAR^3 ، مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ استفاده شد (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷). این تصاویر مربوط به ماهواره Sentinel-1 از سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC^4 با پلاریزاسیون VV اخذ شد. این نوع داده‌ها، داده‌های خامی هستند که تنها پردازش‌های اولیه بر روی آنها انجام گرفته و به تصاویر تک‌منظر تبدیل شده‌اند و اطلاعات آنها به هیچ عنوان مخدوش نشده است.

1. Interferogram
2. Daniel
3. Synthetic Aperture Radar
4. Single Looking Complex

5. Shuttle Radar Topography Mission
6. Small Baseline Subset

نشان داده شده است. برای این منظور در بازه تغییرات یک ماهه سطح آب زیرزمینی، جنس و ضخامت لایه رسوب یا رسوبات مربوط به این تغییرات، ثبت و بررسی شد.



شکل (۳): موقعیت پیزومترها در منطقه مورد مطالعه

Figure (3): Location of Piezometric wells in study area



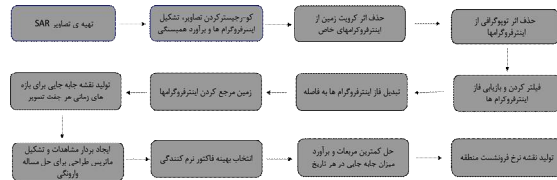
شکل (۴): موقعیت لاگ‌های حفاری در منطقه مورد مطالعه

Figure (4): Location of logging in study area

در ادامه با بررسی روند داده‌های موجود، مقایسه خروجی نقشه فرونشست و دیگر نقشه‌های موجود، به تحلیل عوامل مؤثر در پدیده فرونشست و ارتباط آن با دیگر عوامل پرداخته شد.

نتایج

به منظور بررسی فرونشست منطقه مورد مطالعه، از روش تداخل سنجی راداری استفاده شد. از میان اینترفروگرام‌های متعددی که تهیه شدند، تعداد ۱۳۶ اینترفروگرام که وضعیت مناسبی از نقطه نظر طول خط مبنای مکانی و زمانی داشتند، انتخاب و در فرایند تداخل سنجی و تهیه نقشه فرونشست،



شکل (۲): نمودار جریانی فرایند تداخل سنجی راداری روزه‌نویسه مصنوعی و تحلیل سری زمانی

Figure (2): Flowchart of InSAR Process and Time Series Analysis

برای ترسیم نقشه فرونشست منطقه، متوسط تغییرات و جابه‌جایی عمودی هر پیکسل در بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸) محاسبه شد. به عبارت دیگر میزان اختلاف مقادیر محاسبه شده در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸، میزان فرونشست هر نقطه را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از میان‌یابی به روش کریجینگ، نقشه فرونشست منطقه ترسیم شد.

تحلیل پارامترهای مؤثر بر فرونشست

عوامل متعددی بر پدیده فرونشست تأثیر دارند. معمولاً ارزیابی علت فرونشست در اکثر منابع علمی، براساس دو متغیر عمده و اصلی صورت می‌گیرد که شامل میزان افت سطح آب زیرزمینی و جنس لایه‌های رسوبات زیرسطحی است (رهنما و میراثی، ۲۰۱۶؛ اکبری امیری و همکاران، ۲۰۱۹) که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

سطح آب زیرزمینی

به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت ابرکوه، از داده‌های اندازه‌گیری شده ۳۴ چاه پیزومتری، طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. موقعیت پیزومترها در شکل (۳) ارائه شده است. در ابتدا داده‌های آماری، مرتب‌سازی و از لحاظ نواقص آماری و نرمال بودن بررسی شد. به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی و تعمیم مقادیر نقاط پیزومتری به سطح دشت، با استفاده از نرم‌افزار GIS و میان‌یابی به روش کریجینگ، نقشه سطح آب زیرزمینی و همچنین افت سطح آب زیرزمینی در مقیاس ماهانه ترسیم شد.

رسوبات زیرسطحی

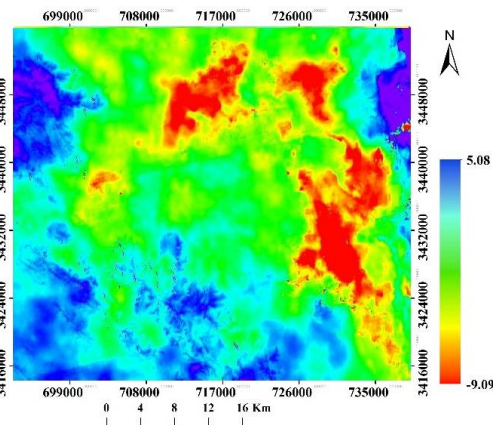
برای بررسی تغییرات رسوبات زیرسطحی و ضخامت آن‌ها، از اطلاعات موجود ۷۷ لاگ حفاری استفاده شد (مهندسین مشاور پورآب، ۲۰۱۲). موقعیت لاگ‌های حفاری در شکل (۴)

در طول دوره بررسی (۴ سال)، در شرق منطقه و به مقدار ۲۲ سانتی متر رخ داده است. این منطقه جزء اراضی کشاورزی منطقه مهردشت است. منطقه دوم با بیشینه فرونشست ۱۰ سانتی متر در شمال شرق منطقه قرار دارد. منطقه سوم نیز در شمال منطقه مورد مطالعه قرار داشته و بیشترین مقدار فرونشست آن ۶ سانتی متر است. مناطق شمال شرق و شمالی در واقع اراضی کشاورزی پیرامون شهر ابرکوه هستند. مقدار فرونشست در دیگر قسمت‌ها کمتر بوده و میزان آن در برخی مناطق بسیار ناچیز و حتی به صفر می‌رسد. مقادیر منفی نشان‌دهنده مقدار فرونشست سطح زمین است.

یکی از مزایای استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در پایش فرونشست، بررسی نقش گسل در رخداد فرونشست است. اگر شکل فرونشست در منطقه دارای کشیدگی باشد و این کشیدگی در امتداد گسل‌های منطقه باشد، می‌توان با احتمال زیاد گسل فعال را به‌عنوان عامل اصلی و طبیعی فرونشست معرفی کرد. اما اگر شکل فرونشست به شکل تقریباً دایره باشد، نقش گسل در ایجاد فرونشست ناچیز است. به‌عبارت دیگر در پدیده فرونشست، گسل نقش ندارد و فرونشست متأثر از دیگر عوامل است (پورخسروانی و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین با توجه به اینکه شکل فرونشست در منطقه مورد مطالعه به‌صورت خطی نیست، به نظر می‌رسد فرونشست منطقه منشأ غیرگسلی داشته باشد.

به‌منظور بررسی عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست، میزان افت سطح آب زیرزمینی و جنس و ضخامت لایه رسوب یا رسوبات زیرسطحی در مقیاس ماهانه مورد بررسی قرار گرفت. واکاوی تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه نشان داد اگرچه در بازه زمانی ۱۵ ساله، افت سطح آب در تمام چاه‌ها مشاهده شد، میزان و شدت تغییرات آن در بازه‌های زمانی مختلف کاملاً متغیر بوده و از یک روند کلی پیروی نمی‌کند. نتایج بررسی نقشه‌های افت سطح آب نشان داد که تقریباً به‌طور متوسط هر ۵ سال، میزان و شدت افت سطح آب و روند آن تغییر می‌کند؛ لذا نقشه‌های مقدار افت سطح آب زیرزمینی در مقیاس زمانی ۵ ساله ترسیم شد (شکل‌های ۷، ۸ و ۹).

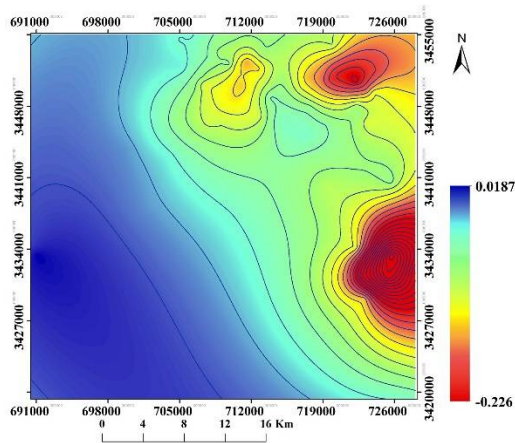
مورد پردازش قرار گرفتند. نمونه‌ای از تصویر اینترفروگرام در شکل (۴) نشان داده شده است. تمام پردازش‌ها توسط نرم‌افزار GMTSAR و در محیط Linux انجام گرفت که نتیجه نهایی آن تهیه نقشه کلی فرونشست بود.



شکل (۵): تصویر اینترفروگرام در بازه زمانی می تا دسامبر ۲۰۱۶

Figure (5): Constructed interferogram from May 2016 to December 2016

در ادامه با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط Matlab، سری زمانی فرونشست ۷۷ نقطه که مقادیر افت سطح آب و خصوصیات رسوب‌شناسی زیرسطحی آن مشخص بود، تعیین و برای پهنه‌بندی و تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۶) نقشه فرونشست دشت ابرکوه را در بازه زمانی دسامبر ۲۰۱۴ تا دسامبر ۲۰۱۸ نشان می‌دهد.



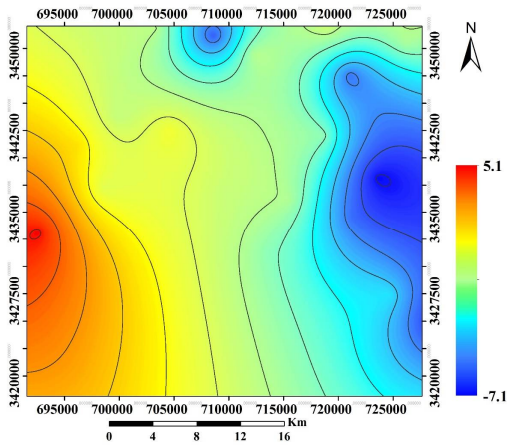
شکل (۶): نقشه فرونشست منطقه مورد مطالعه برحسب متر در بازه

زمانی دسامبر ۲۰۱۴ تا دسامبر ۲۰۱۸

Figure (6): Land Subsidence map (m) from December 2014 to December 2018

این نقشه نشان می‌دهد که پدیده فرونشست در ۳ ناحیه به‌صورت فعال‌تر حادث شده است. بیشترین مقدار فرونشست

افزایش مقدار افت سطح آب در نواحی شرقی، شاهد افت سطح آب در نواحی غربی نیز هستیم. اما عمده تغییرات این بازه ۵ ساله، افزایش چشمگیر افت سطح آب در نواحی غربی است که بیشینه آن به ۹/۹۵ متر می‌رسد. بررسی هم‌زمان نقشه‌های افت سطح آب و فرونشست نشان می‌دهد اگرچه افت سطح آب در مناطق شرقی همچنان با فرونشست نقاط مشابه هم‌خوانی دارد، میزان افت شدید آب در غرب منطقه، هیچ تأثیری بر روی ایجاد فرونشست در آن منطقه نداشته است.

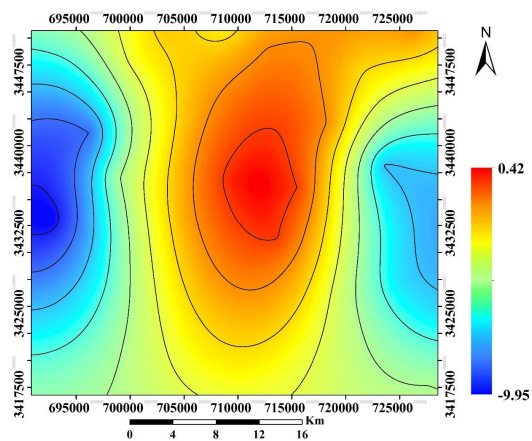


شکل (۸): میزان افت سطح آب زیرزمینی بین سالهای ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ برحسب متر

Figure (8): Water level decline map (m) from 2008 to 2013

افت سطح آب در بین سالهای ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ در شکل (۹) نشان داده شده است. این نقشه یک روند کاملاً متفاوتی را نسبت به نقشه‌های قبلی دارد. در کل منطقه شاهد افت سطح آب هستیم. اما از شدت افت سطح آب در نیمه شرقی کاسته شده و بر افت سطح آب در نیمه غربی افزوده شده است. به طوری که مقدار افت سطح آب از ۰/۷۵ متر در شرق به ۱۳/۱ متر در غرب منطقه می‌رسد. مقایسه نقشه افت سطح آب مذکور با نقشه فرونشست نشان می‌دهد که اگرچه افت سطح آب در منطقه غربی شدت گرفته، سبب رخداد فرونشست در غرب منطقه نشده است.

شکل (۷) میزان افت سطح آب زیرزمینی را بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده است، میزان افت سطح آب در مناطق شرق، شمال و شمال شرقی، قابل توجه بوده که بیشینه آن در قسمت شرقی به ۷/۱ متر می‌رسد. این تغییرات در مناطق مرکزی و جنوبی چندان قابل توجه نیستند، اما در قسمت‌های غربی منطقه با افزایش سطح آب روبه‌رو بودیم که بیشینه آن ۵/۱ متر بود. بر روی نقشه، مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش سطح آب و مقادیر منفی، نشان‌دهنده افت سطح آب است. مقایسه و تطبیق نقشه افت سطح آب در این سال‌ها با نقشه فرونشست، حکایت از ارتباط افت سطح آب با پدیده فرونشست داشت. در مکان‌هایی که افت سطح آب زیاد بود، مقدار فرونشست نیز قابل توجه بود. این امر احتمال دارد تأخیر زمانی بین افت سطح آب و رخداد فرونشست را نشان دهد. در برخی مناطق به علت ضخامت رسوبات ریزدانه و قابلیت هدایت هیدرولیکی اندک این رسوبات، گاه ممکن است تأخیر زمانی بین کاهش سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست وجود داشته باشد. بنابراین همواره نمی‌توان رابطه خطی‌ای بین کاهش سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست سطح زمین متصور شد (حقیقت‌مهر و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل (۷): میزان افت سطح آب زیرزمینی بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ برحسب متر

Figure (7): Water level decline map (m) from 2003 to 2008

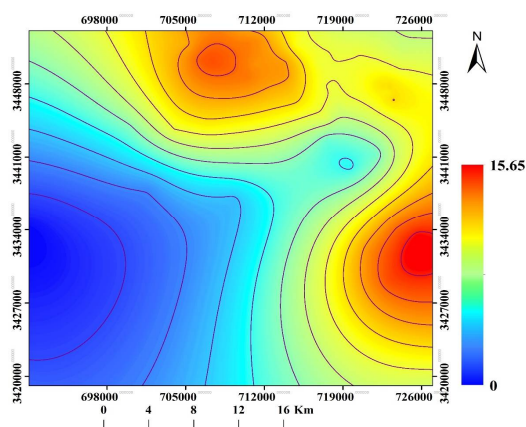
شکل (۸) مربوط به افت سطح آب زیرزمینی بین سالهای ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ است که در مقایسه با نقشه قبلی دارای تغییرات قابل توجهی است. با توجه به این نقشه، علاوه بر

شمال شرق منطقه ۱۳/۶ متر و شمال منطقه ۱۴/۷ متر است. در مناطق مرکزی، غرب، جنوب و جنوب غربی، ضخامت رسوبات ریزدانه بسیار کمتر است و در بخش غربی منطقه نزدیک به صفر می‌رسد. مقایسه نقشه فرونشست و نقشه ضخامت رسوبات ریزدانه نشان داد که در مناطقی که ضخامت رسوبات ریزدانه قابل توجه است، پدیده فرونشست اتفاق افتاده و در مناطقی که ضخامت رسوبات ریزدانه قابل توجه نیست، فرونشست مشاهده نمی‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور پایش فرونشست، رفتار سطح زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری ارزیابی شد. این تکنیک راداری، اندازه‌گیری دقیق و سریع تغییرات سطح زمین را در گستره مکانی وسیع فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از این تکنیک در پژوهش حاضر، بیانگر این بود که بیشینه فرونشست حدود ۲۲ سانتی‌متر و در شرق منطقه واقع شده است که در بازه زمانی ۴ ساله به دست آمد. با حرکت از سمت غرب به شرق و از سمت جنوب به شمال، مقدار فرونشست بیشتر می‌شود.

هیچ منبع علمی را نمی‌توان یافت که بر نقش مؤثر و اصلی افت سطح آب در پدیده فرونشست اشاره نکرده باشد. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، با توجه به روند متفاوت افت سطح آب زیرزمینی پیرومترهای منطقه، تغییرات سطح آب در ۳ بازه زمانی ۵ ساله بررسی شد. در بازه زمانی اول (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸)، افت سطح آب در قسمت شرق، شمال شرق و شمال منطقه و افزایش سطح آب در قسمت غرب و جنوب غربی مشاهده شد. مقایسه موقعیت مکانی مناطقی که با افزایش یا کاهش سطح آب مواجه بودند با موقعیت مشابه بر روی گوگل ارث نشان داد که افت سطح آب در مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی که در آن تمرکز چاه‌های بهره‌برداری بیشتر است و عموماً برداشت از منابع آب زیرزمینی با شدت بیشتری صورت می‌گیرد، اتفاق افتاده و به تبع آن میزان فرونشست نیز در این مناطق بیشتر است. بررسی مناطق با کاهش افت سطح آب یا افزایش سطح آب نشان داد که آبخوان این مناطق توسط مناطق کوهستانی و مخروط‌افکنه‌های موجود در منطقه تغذیه

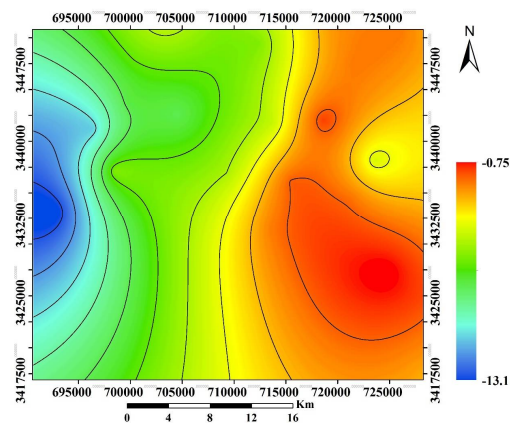


شکل (۹): میزان افت سطح آب زیرزمینی بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸

برحسب متر

Figure (9): Water level decline map (m) from 2013 to 2018

بررسی لایه‌های رسوبی ۷۷ لاگ حفاری نشان داد که جنس رسوبات زیرسطحی منطقه عمدتاً رس و رسوبات ریزدانه، رس ماسه‌دار (بیش از ۷۰٪ رس)، فلوه‌سنگ، ماسه و رسوبات آهکی است. با توجه به اهمیت رسوبات ریزدانه، به‌ویژه رس و نقش آفرینی آن در پدیده فرونشست، ضخامت رسوبات ریزدانه در بازه مکانی تغییرات سطح آب و بازه زمانی ۱۵ ساله مورد بررسی قرار گرفت. واکاوی داده‌ها نشان داد که تغییرات مکانی جنس رسوبات و ضخامت آن‌ها از یک روند تقریباً ثابتی پیروی می‌کند. بنابراین نقشه ضخامت رسوبات ریزدانه در بازه زمانی ۱۵ سال ترسیم شد (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): ضخامت رسوبات ریزدانه بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸

Figure (10): Thickness of fine-grain sediments (m) from 2003 to 2018

همان‌طور که در شکل نشان داده شده، بیشینه ضخامت رسوبات ریزدانه به‌ویژه رس در شرق منطقه ۱۵/۶۵ متر، در

کشت، ایجاد مراکز صنعتی جدید و... حکایت دارد. به عبارت دیگر در این بازه زمانی، کشاورزی در شرق دچار مشکلات و محدودیت شده و اراضی غرب با شدت بیشتری مورد استفاده قرار گرفتند. اما همچنان به دلایل گفته شده، رخدادهای فرونشست در مناطق غرب و جنوب غربی اتفاق نیفتاده است. تغییرات سطح آب زیرزمینی به موقعیت محل نسبت به مناطق تغذیه و تخلیه و همچنین مقادیر تغذیه و برداشت این محلها بستگی دارد. به همین دلیل روند تغییرات سطح آب بخش‌های مختلف آبخوان با یکدیگر متفاوت است. شفيعی و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی مشابه به این موضوع اشاره کردند.

یکی از عوامل تشدیدکننده در فرونشست زمین، وجود لایه‌های متعدد رسی با استعداد واگرایی متفاوت است که به صورت نامنظم و تصادفی در کنار یکدیگر قرار دارند. افت و نوسانات سطح آب زیرزمینی علاوه بر افزایش تنش مؤثر و کاهش فشار منفذی، سبب شده است تا با توالی‌های آبیگری و آماس رس و خروج از آب و کاهش حجم آن، نقش تشدیدکنندگی را در نشست زمین داشته باشد. در نهایت به علت ناهمگن بودن آبخوان، شرایط برای ایجاد فرونشست و شکاف‌های فرونشستی در امتداد سطوح ضعف فراهم شود.

پدیده تحکیم، یک پدیده تدریجی و وابسته به زمان است و تعیین تأخیر زمانی بین افت سطح آب و فرونشست به راحتی امکان‌پذیر نیست. همچنین این فاز تأخیر در هر نقطه‌ای متفاوت از نقطه دیگر عمل کرده و به عوامل مختلفی بستگی دارد. بنابراین میزان فرونشست این بازه ۴ ساله قطعاً به شرایط هیدرولیکی قبل از این بازه برمی‌گردد. دهقانی (۲۰۱۴) در پایش فرونشست سطح زمین در دشت مشهد، قابلیت هدایت هیدرولیکی را یکی از عوامل تأخیر زمانی بین افت سطح آب و نشست زمین عنوان می‌کند.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، شکل ظاهری مناطق تحت‌تأثیر فرونشست بر روی نقشه‌های مستخرج از روش تداخل سنجی راداری، نقش عوامل مؤثر در رخداد آن را تا حدی می‌توان پیش‌بینی کرد؛ به طوری که فرونشست‌های کشیده و خطی منشأ گسلی و فرونشست‌های دایره‌ای یا

می‌شوند. بنابراین با توجه به عدم افت قابل توجه آب یا حتی افزایش سطح آب در برخی نقاط، انتظار رخداد فرونشست نیز وجود ندارد. بررسی نقشه فرونشست نیز حکایت از بالآآمدگی این مناطق را دارد که احتمال می‌رود به علت افزایش ضخامت رسوبات سطح مخروط افکنه یا بالآآمدگی ارتفاعات باشد. حداد و خراسانی (۲۰۱۹) در بررسی فرونشست دشت سمنان به بالآآمدگی برخی مناطق در نقشه فرونشست اشاره کرده‌اند. در بازه زمانی دوم (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳) نیز افت سطح آب در کل منطقه مشاهده شد. مناطقی که در مرحله قبل دچار افت سطح آب بودند، با شدت بیشتری این روند افت را نشان دادند. بنابراین می‌توان گفت همچنان فشار بر روی آبخوان زیاد بوده و میزان برداشت‌ها بیش از مقدار تغذیه است. اما نکته مهم این بود که اراضی که در بازه قبلی افزایش سطح آب داشتند، این بار کاهش قابل توجه سطح آب را نشان دادند. این پدیده ناشی از کاهش تغذیه سفره‌های زیرزمینی به دلیل خشکسالی چندساله و افزایش برداشت آب زیرزمینی به سبب توسعه اراضی کشاورزی بود. به رغم افت شدید سطح آب در این مناطق، فرونشستی در منطقه مشاهده نمی‌شود. این مسئله را می‌توان به جنس لایه‌های آبخوان نسبت داد که عمدتاً شامل رسوبات ماسه (متوسط تا درشت) و قلوه سنگ هستند. به طور کلی رسوبات درشت‌دانه، درجه تراکم‌پذیری پایینی دارند و با افزایش تنش بین ذره‌های به دلیل خروج آب از بین آن‌ها، به میزان قابل توجهی مترکم نمی‌شوند. به بیان دیگر، بافت رسوبات درشت و گراولی آن‌ها می‌تواند از خطر وقوع فرونشست بکاهد. دهقانی (۲۰۱۴) و ملکی و رضایی (۲۰۱۶) در تحقیقات خود به نتایج مشابهی دست یافتند.

در بازه سوم (۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸)، میزان افت سطح آب در نواحی شرقی، شمال و شمال شرقی کاهش یافت. همچنین در این بازه زمانی تعدادی از پیزومترها خشک شدند. احتمالاً بتوان کاهش سطح آب را در ارتباط با خشک شدن تعدادی از چاه‌های بهره‌برداری، تغییر الگوی کشت و تغییر سیستم‌های آبیاری دانست که منجر به کاهش استفاده از آب‌های زیرزمینی می‌شود. اما در مناطق غرب و جنوب غربی افت سطح آب بسیار چشمگیر بود که برخی شواهد از افزایش سطح زیر

در پایان می‌توان نتیجه گرفت اگرچه افت سطح آب زیرزمینی در رخدادهای پدیده فرونشست لازم است، کافی نیست. بنابراین افت سطح آب زیرزمینی و وجود لایه‌های زیرسطحی ریزدانه، به خصوص رس، به‌رغم وجود احتمالی علت‌های مختلف دیگر، سبب رخداد فرونشست در مناطقی از دشت ابرکوه شده است.

بیضوی منشأ غیر گسلی داشته و عوامل دیگری در وقوع آن مؤثر هستند. به‌عبارت دیگر در پدیده فرونشست، گسل نقش ندارد و فرونشست متأثر از دیگر عوامل است. در تحقیق حاضر با توجه به شکل دایره‌ای فرونشست بر روی نقشه، به نظر می‌رسد گسل در منطقه فعال نبوده و عوامل دیگری در این پدیده نقش داشته‌اند.

منابع

- Akbari Arimi, H., Momeni, A. and Khorasani, E., 2019. Assessment of land subsidence of the Semnan plain due to groundwater extraction, *New Findings in Applied Geology* 13, Issue 26, 96-110.
- Alemi, A. 2002. The causes of subsidence in the plain of Yazd-Ardakan. 6 th International Congress of Geomatics and soil Mechanic, Iran.
- Amato, V., Aucelli, P.C., Bellucci Sessa, E., Cesarano, E., Incontri, G. Pappone, E. Valente and G. Vilardo. 2017. Multidisciplinary approach for fault detection: Integration of PS-InSAR, geomorphological, stratigraphic and structural data in the Venafro intermontane basin (Central-Southern Apennines, Italy). *Geomorphology* 283, 80-101.
- Amighpey, M., Mousavi, Z., Nankali, H., Arabi, S., Sedighi, M. and Hosseini, S., 2008. Studying subsidence in Iran with leveling and permanent GPS observations, *Geophysical Research Abstracts* 10,
- Arab Ameri, A., Rafyi, M., Khalil, R., Shirani, K., Mohamadi, N., 2019. Estimation of Land Subsidence Rate Using Insar Technique and Analysis of the Effective Parameters in Mahyar Plain. *Journal of Watershed Engineering and Management* 11, 661-675.
- Daniel, R., Maisons, C., Carnec, S., Le Mouelic, C., King, C. and Hosford, S., 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment* 88, 468-478.
- Dehghani, M., 2014. An Enhanced Algorithm based on Radar Interferometry for Monitoring Land Subsidence Caused by Over-Exploitation of Groundwater, *Journal of Geospatial Information Technology* 2, 61-73.
- Dehghani, M., ValadanZoej, M. J., Entezam, I., Saatchi, S. and Shemshaki, A., 2011. Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater. *Journal of Applied Remote Sensing* 4, 56-73.
- Elmahdy, S. E., Mohamed, M. M., Tarig A. A., Abdalla, J. and Abouleish, M., 2020. Land subsidence and sinkholes susceptibility mapping and analysis using random forest and frequency ratio models in Al Ain, UAE. *Geocarto International* 35, 1-18.
- Haddad, A. and Khorasani, E., 2019. Groundwater level changes effect on the subsidence in Semnan plain. *Geosciences* 28, 181-190.
- Haghighatmehr, P., ValadanZoej, M. J., Tajik, R., Jabari, S., Sahebi, M. R., Eslami, R., Ganjiyan, M. and Dehghani, M., 2012. Time Series Analysis of Hashtgerd Subsidence Using Radar Interferometry and Global Positioning System. *Geosciences* 22, 105-114.
- Maleki, A. and Rezaee P. 2016. Forecast locations at risk of subsidence plain Kermanshah. *The Journal of Spatial Planning*, 20 :235-251
- Orhan, O., Oliver-Cabrera, T., Wdowinski, S., Yalvac, S. and Yakar, M., 2021. Land Subsidence and Its Relations with Sinkhole Activity in Karapinar Region, Turkey: A Multi-Sensor InSAR Time Series Study. *Sensors*. 21, 774-791.
- Polcari, M., Marco, M., Romaniello, V. and Stramondo, S., 2019. Anthropogenic subsidence along railway and road infrastructures in Northern Italy highlighted by Cosmo-SkyMed satellite data. *Journal of Applied Remote Sensing*. 13, 024515-26.
- Pourab Consulting Engineers, 2012. *Geology and Hydrogeology Reports (Abarkouh)*.
- Pourkhosravani, M., 2014. *Geoduality Theory. Geography and Environmental Planning* 25, 25-36.
- Qiuxiang, T., Tengfei, G., Guolin, L. and Zhiwei, W., 2017. Effect of external digital elevation model on monitoring of mine subsidence by two-pass differential interferometric synthetic aperture radar, *Journal of Applied Remote Sensing*. 11, 026037-53.
- Rahnema, H. and Mirassi, S., 2016. Analysis and evaluate the effective parameters on land subsidence. *Modares Civil Engineering Journal* 16, 45-53.
- Saffari, A., Jafari, F. and Tavakoli Sabour, S. M., 2016. Monitoring Land Subsidence and Its Relation to Groundwater Harvesting Case Study: Karaj Plain -Shahriar. *Quantitative Geomorphological Research* 5, 82-93.
- shafie, N., GoliMokhtari, L., Amir Ahmadi, A. and Zandi, R., 2020. Investigation of subsidence of Noorabad plain aquifer using radar interferometry method. *Quantitative Geomorphological Research*. 8(4):93-111.

21. Shi, X., Zhang, S., Jiang, M., Pei, Y., Qu, T., Xu, J. and C., Yang, 2021. Spatial and temporal subsidence characteristics in Wuhan city (China) during 2015-2019 inferred from Sentinel-1 SAR Interferometry, *Natural Hazards and Earth System Sciences, Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-35>, in review.
22. Smith, R. and Knight, R., 2019. Modeling land subsidence using InSAR and airborne electromagnetic data. *Water Resources Research* 55, 2801–2819.
23. Terranova, C., Ventura, G. and Vilardo, G., 2015. Multiple causes of ground deformation in the Napoli metropolitan area (Italy) from integrated persistent scatterers DinSAR, geological, hydrological, and urban infrastructure data. *Earth-Science Reviews* 146, 105–119.
24. Yamani, M., Najafi, E. and Abedini, M. H., 2009. The Relationship between Ground Subsidence And Groundwater Level Drop In Ghare-Bolagh Plain (Fars Province). *Geography* 8-9, 9-27.
25. Yang, C., Qiuxiang, T., Anye, H., Liujian, D., Guolin, L. and Ke, W., 2020. Accuracy verification and evaluation of Sentinel-1A repeat track differential interferometric synthetic aperture radar in monitoring mining subsidence. *Journal of Applied Remote Sensing*. 14, 014501-19.

Monitoring the Subsidence of Abarkouh Plain and Analyzing its Effective Parameters Using Radar Interferometry

Zahra Khosravani¹, Mohammad Akhavan Ghalibaf^{2*}, Maryam Dehghani³, Vali Derhami⁴, Mustafa Bolca⁵

Received: 01/05/2020

Accepted: 19/07/2021

Extended Abstract

Introduction: Rapid population growth, increasing water demand, decrease in precipitation, and occurrence of drought may increase the use of water resources, especially the extraction of groundwater resources, leading to a drastic decline in groundwater level, and consequently the occurrence of land subsidence phenomenon. There are various methods for monitoring land subsidence. However, from among ground and space-based methods for the detection of earth crust deformations, the application of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) on the collected data is considered as the most proper method in terms of accuracy and continuous spatial coverage.

Materials and methods: Located in central Iran in the west of Yazd Province, Abarkouh plain is a part of the Abarkouh – Sirjan basin, covering an area of 1390 km². The area consists of alluvial fans and plains, surrounded by mountains on the west, south, and southwest and bounded on the east by Abarkouh Playa. This study used 46 satellite images taken from 2014 to 2018 to measure the amount of land subsidence in the Abarkouh plain. Moreover, the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM was applied with 30 m resolution to remove the topography effect. A small Baseline Subset (SBAS) time series analysis was also performed to examine the short-term and long-term behavior of the subsidence.

1. Ph.D. Student of Combat Desertification, Department of Arid Land and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Iran

2. Assistant Professor of Arid Land and Desert Management Department, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Iran; makhavan@yazd.ac.ir

3. Associated Professor of Civil and Environmental Engineering Department, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz

4. Professor of Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, Yazd University, Iran

5. Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ege University, Izmir, Turkey

\ Decline in groundwater level and the subsurface sediment thickness are the two most important factors affecting the subsidence. The data used in this study were collected from 34 piezometric wells and 77 geologic logs. Finally, the most effective factors involved in subsidence and their relationship with other factors were investigated by comparing the output of the subsidence map and other existing maps.

Results

The study's results indicated that the subsidence occurred in the east, northeast, and north of the area with the maximum accumulated value of 21, 10, and 6 cm, respectively, over four years. Moreover, the study of groundwater level and the thickness of fine-grained sediments showed that despite the decline in water level throughout the whole plain, subsidence is observed only in regions with clay subsurface sediments.

According to different trends of decline in the groundwater level of the study area, groundwater level variations are changed during three periods. Accordingly, the water level declines during the first period in the east, northeast, and north of the area, while it increases in the west and southwest of the region. However, the decline in water level occurs throughout the whole region during the second period, and it is decreased at a lower rate in the east, north, and northeast during the third period.

Discussion and Conclusion: In the first period, the comparison of the location of areas with increase or decrease in their water level with their corresponding areas on the Landsat showed that the water level declined in those residential and agricultural areas where there are more water wells, and, therefore, the subsidence rate is much more than other areas. On the other hand, the study of areas with an increase in water level suggested that the aquifer of these areas was recharged by mountains and alluvial fans.

In the second period, those areas whose water had declined in the previous period experience more decline. Therefore, it can be concluded that the aquifer had not sufficiently been recharged in wet periods. In other words, the increase in the decline of the areas' water level occurred due to the decrease in the recharging of the underground waters because of several years of drought, and the increased groundwater withdrawal caused by the development of agricultural lands. However, despite the sharp decline in the areas' water level, no subsidence was found in the region.

In the third period, some piezometric wells were dried, and the water level decline was significant in the west and southwest areas, which could be attributed to factors such as increased acreage, creation of new industrial centers, etc. Therefore, it could be argued that the subsidence rate of this four-year period will certainly return to the hydraulic conditions before this period. Thus, it can be concluded that in addition to the decline in groundwater level, other geological and hydrogeological factors play an important role in causing subsidence.

Keywords: Fine Sediment, Groundwater, Remote Sensing, Subsidence, Time series.