



مدل سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی

عبدالخالق آروین^۱، قربان وهازاده کبریا^{۲*}، سیدرمضان موسوی^۲، مسعود بختیاری کیا^۳

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲. دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۳. استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۴. استادیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان

مشخصات مقاله

چکیده

پیشینه مقاله:

دریافت: ۲۲ تیر ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۷ شهریور ۱۳۹۸

دسترسی اینترنتی: ۲۵ مهر ۱۳۹۸

واژه‌های کلیدی:

تداخل سنجی راداری

فرونشست

تحلیل مکانی

آب زیرزمینی

تصاویر رادار

حوزه آبخیز میناب

دشت میناب در استان هرمزگان، در دهه‌های اخیر رشد جمعیت را در کنار توسعه کشاورزی داشته است. بارش کم‌سال‌های اخیر، خشک‌سالی‌های متوالی و محدودیت منابع آب سطحی، موجب حفر بی‌رویه چاه‌های آب در منطقه شده است. برداشت بی‌رویه از این چاه‌ها، موجب عدم تعادل آبخوان منطقه شده و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی را به دنبال داشته است. پیامدهای این روند، باعث ایجاد و گسترش فرونشست زمین در منطقه شده است. هدف از این تحقیق، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری Sentinel-1 سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ و روش تداخل سنجی تفاضلی راداری در بررسی میزان و گسترش فرونشست زمین است. نتایج پردازش‌های انجام‌شده بر روی این تصاویر نشان داد که در دوره مطالعاتی، حدود ۱۳ سانتی‌متر فرونشست داشته است. بعد از صحت‌سنجی پهنه‌بندی انجام‌شده با واقعیت‌های زمینی (شهریور ۱۳۹۷)، به‌منظور تشخیص رابطه فرونشست با میزان تغییرات و افت سطح آب زیرزمینی، ارتفاع سطح زمین و شیب، تحلیل‌های فضایی انجام و میزان همبستگی هر یک از فاکتورهای مذکور با تراکم فرونشست محاسبه گردید. تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را به میزان ۰/۹۲۵ نشان داد. همچنین بالا بودن امتیاز توزیع نرمال استاندارد (z) و پایین بودن مقدار سطح معنی‌داری (p_value) نشان‌دهنده رابطه خودهمبستگی قوی ۱/۸۹ و ۰/۰۶ بین عناصر مورد مطالعه است.

*ghorban.vahabzadeh2@gmail.com: پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

مقدمه

فرونشست زمین یکی از مشکلات اصلی زمین‌شناسی در سراسر جهان است که باعث فشرده شدن لایه‌های زیرزمین می‌شود. علت این پدیده را می‌توان به فعالیت‌های انسانی (مانند برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی) و فعالیت‌های طبیعی (مانند زمین‌لرزه) تقسیم‌بندی نمود (۲۶، ۲۹ و ۳۱). این پدیده همچنین یکی از مخاطرات اصلی زمین‌شناسی منطقه‌ای محسوب می‌شود که باعث ایجاد خسارت‌های جدی به ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها، راه‌های ارتباطی و پل‌ها می‌شود (۳۰، ۴۶ و ۵۱). بر اساس تعریف سازمان زمین‌شناسی آمریکا، پدیده فرونشست زمین، شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی اندکی باشد (۱۹). پدیده فرونشست در اصل به فرورفتگی در سطح زمین گفته می‌شود و به آهستگی و به تدریج گسترش می‌یابد، این پدیده تأثیر خطرهای ناگهانی و فاجعه باری مانند سیل و زلزله را نداشته باشند و در منطقه در حال فرونشست، شاید خرابی به میزان گسترده ایجاد نکند و حتی آثار سطحی حاصل از آن نیز به راحتی قابل تشخیص نباشد، اما به‌طور معمول، خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین، ترمیم‌ناپذیر و پرهزینه می‌باشند. در سال‌های اخیر، بیشتر مناطق کشور دچار تغییرات آب و هوایی، افزایش دما و کاهش بارندگی شده‌اند. این در حالی است که مصرف آب در کشور به‌واسطه افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و روند صعودی مهاجرت از روستا به شهر برای دستیابی به اشتغال و زندگی بهتر، افزایش یافته است. این عوامل به همراه نبود زیرساخت‌های مناسب و کافی برای تأمین آب موردنیاز و نبود منابع آبی بیشتر، بسیاری از مناطق کشور را در شرایط تنش آبی قرار داده است. برای مدیریت این وضعیت، به‌ناچار برداشت از منابع آب زیرزمینی برای استفاده‌های مختلف بیشتر شد. برداشت بی‌رویه و عدم جایگزین شدن این آب‌ها، باعث ایجاد و گسترش فرونشست در بسیاری از مناطق کشاورزی و مسکونی خصوصاً در جنوب کشور شده است. بنابراین، شناسایی و رصد این پدیده که یکی از مسائل مهم

زیست‌محیطی است، یک امر حیاتی برای حفظ پایداری این مناطق است. به این منظور، پژوهشگران برای مطالعه و رصد این پدیده از روش‌های گوناگونی استفاده می‌کنند که آن‌ها را براساس موقعیت ابزارهای مورد استفاده، می‌توان در سه دسته روش‌های زیرسطحی (Subsurface)، روش‌های زمین‌پایه (Ground Based) و روش‌های سنجش‌ازدور (Remote Sensing) تقسیم‌بندی نمود (۳۲). روش‌های زیرسطحی شامل تکنیک‌هایی است که از سنسورهای نصب‌شده در زیر سطح زمین استفاده می‌کند. این رویکرد گران، نیاز به پردازش پیچیده داده‌ها دارد و برای نظارت بر مکان‌های کمتر از یک کیلومترمربع استفاده می‌شود (۱۱). روش‌های زمین‌پایه، داده‌ها را با استفاده از دستگاه‌هایی که در تماس مستقیم با سطح زمین هستند، جمع‌آوری می‌کنند. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به رادار دیافراگم مصنوعی زمین‌پایه (GB-InSAR یا Ground based Interferometric Synthetic Aperture Radar) که از همان مفهوم DInSAR در سنجش‌ازدور ولی با ایستگاه زمینی استفاده می‌کند، روش Differential Global Navigation Satellite System (DGNSS) یا Differential Global Positioning System (DGPS) و روش لیزر اسکن زمینی (TLS; Terrestrial Laser Scanning) اشاره کرد (۱۶ و ۳۸). در روش‌های سنجش‌ازدور، با استفاده از ماهواره‌ها، هواپیماها یا وسایل نقلیه بدون سرنشین و بالن، داده‌ها را از هوا یا فضا گردآوری می‌کنند. روش تداخل‌سنجی راداری یا InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) به‌عنوان یکی از روش‌های پردازش تصاویر راداری در سنجش‌ازدور فعال، یکی از دقیق‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌هایی است که امکان آشکارسازی و تشخیص اختلاف ارتفاع‌های ایجادشده در سطح زمین را در کوتاه‌ترین زمان و برای مناطق بزرگ فراهم می‌سازد (۶، ۱۲، ۲۴، ۳۳ و ۴۴). مطالعات پیشین، از روش InSAR چند زمانه در حوزه‌های مختلف از جمله، فرونشست‌های حاصل از برداشت و بهره‌برداری زیاد از آب زیرزمینی (۱۴، ۱۵، ۲۰، ۲۲ و ۲۳) تغییر شکل سطوح شهری (۱۲، ۱۸، ۲۷ و ۳۵) فرونشست‌های حاصل از استخراج معادن

راداری، در پژوهشی تصاویر ماهواره ENVISAT و Sentinel-1 و اندازه‌گیری‌های انجام‌شده با GPS و ترازیبی دقیق را مورد استفاده قرار داده و ضمن تأیید افزایش نرخ فرونشست در منطقه مطالعاتی، با استفاده از لایه‌های کاربری اراضی و چاه‌های منطقه، تراکم فرونشست‌ها را منطبق بر اراضی کشاورزی و چاه‌های منطقه تشخیص دادند. جمور و همکاران (۴) در پژوهش خود بر اساس وضعیت تراز آب زیرزمینی در یک دوره ۳۰ ساله، از طریق بررسی‌های میدانی و حفر ۳ حلقه گمانه و بررسی وضعیت رسوبات و آزمایش‌های شیمیایی نمونه‌های برداشت‌شده از محل گمانه‌ها، وضعیت فرونشست در دشت میناب را بررسی کردند. طبق این بررسی، افت سطح آب در این آبخوان از سال ۱۳۸۰ شدت گرفته و به‌طور متوسط سالانه ۴۶ سانتیمتر افت سطح آب مشاهده شده است. این افت موجب شده است تا تراز سطح آب آبخوان نسبت به سطح آب دریا منفی شده و آب از سمت دریا به سمت آبخوان حرکت کند. بررسی ژئوتکنیکی آن‌ها همچنین نشان داد علاوه بر افت سطح آب، وجود رسوبات تورم‌پذیر و انحلال‌پذیر در منطقه موجب افزایش شدت بروز فرونشست در سطح دشت شده است.

طبق گزارش سازمان زمین‌شناسی، تقریباً از سال ۱۳۴۶ این پدیده در کشور مشاهده شده است و در چند سال اخیر و با حاکمیت شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های رو به افزایش کشاورزی، مصارف آب شرب و صنعتی از منابع آب زیرزمینی، زیرساخت لازم را برای رویداد این پدیده فراهم آورده است و به‌عنوان یک بحران جدی در بسیاری از دشت‌های کشور تبدیل شده است. به‌طوری‌که هم‌اکنون بیش از ۱۰۰ دشت کشور با مشکل فرونشست مواجه‌اند. از آنجایی‌که آگاهی از وضعیت فرونشست‌ها و چگونگی تغییر و گسترش آن، جزء پیش‌شرط‌های اساسی جهت مدیریت آن محسوب می‌شود، به‌منظور مدیریت مطلوب این پدیده، این پژوهش نیز تلاش دارد تا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، جهت آشکارسازی و اندازه‌گیری میزان و

(۱۰، ۲۱ و ۲۵) زمین‌لغزش (۱۳، ۱۴ و ۳۶) گودال‌ها و چاله‌ها (۲۰، ۳۹ و ۴۲)، زمین‌لرزه (۳۴ و ۴۱)، تعیین ارتفاع برف (۶) و حرکات گنبد‌های نمکی (۹) استفاده کردند. در همه این حوزه‌ها، این روش قابلیت خود را به اثبات رسانیده و نتایج و دقت به‌دست‌آمده مورد تأیید قرار گرفته است.

باوجود سابقه چند دهه‌ای فرونشست زمین در کشور و وقوع این پدیده در بیش از نیمی از دشت‌ها، مطالعات منسجم و فراگیری در این زمینه انجام‌نشده است (۷). مطالعات انجام‌شده با روش InSAR نیز تنها محدود به بعضی از دشت‌های کشور بود. آمیغی و همکاران (۳) فرونشست یزد را با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد بررسی قرار دادند و ضمن آشکارسازی مناسب فرونشست‌ها، نتایج به‌دست‌آمده از آن در توافق مناسبی با نتایج ترازیبی دقیق بود و علت اصلی این فرونشست زمین را استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی بیان کردند. دهقانی (۷) بر مبنای تکنیک تداخل-سنجی راداری، فرونشست‌های ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در مشهد را با استفاده از تصاویر ENVISAT ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۳-۵ مورد پایش قرارداد. بر اساس این مطالعه، بیشینه مقدار فرونشست زمین در منطقه ۲۳ سانتی‌متر در سال و روند مکانی فرونشست در جهت شمال-غرب جنوب-شرق تشخیص داده شد. به‌منظور مطالعه علت رخداد فرونشست زمین، اطلاعات حاصل از تحلیل سری زمانی با اطلاعات سطح آب زیرزمینی ۳۰ چاه پیژومتری مقایسه و برداشت آب با میزان فرونشست همبستگی داشت. حاجب و همکاران (۵) با استفاده از داده‌های ماهواره ENVISAT و به کمک تکنیک تداخل‌سنجی رادار دهانه مصنوعی، نرخ فرونشست سالانه زمین در دشت‌های جعفرآباد و قنات استان قم را بررسی کردند و با استفاده از تغییرات تراز آب چاه‌های پیژومتری منطقه و مشاهده نمودارهای هیدروگراف واحد دشت‌ها، ارتباط تغییرات مکانی نرخ فرونشست در نقاط مختلف آبخوان با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را بررسی و تأیید کردند. احمدی و همکاران (۱) به‌منظور بررسی پدیده فرونشست در دشت خرم دره با استفاده از روش تداخل‌سنجی

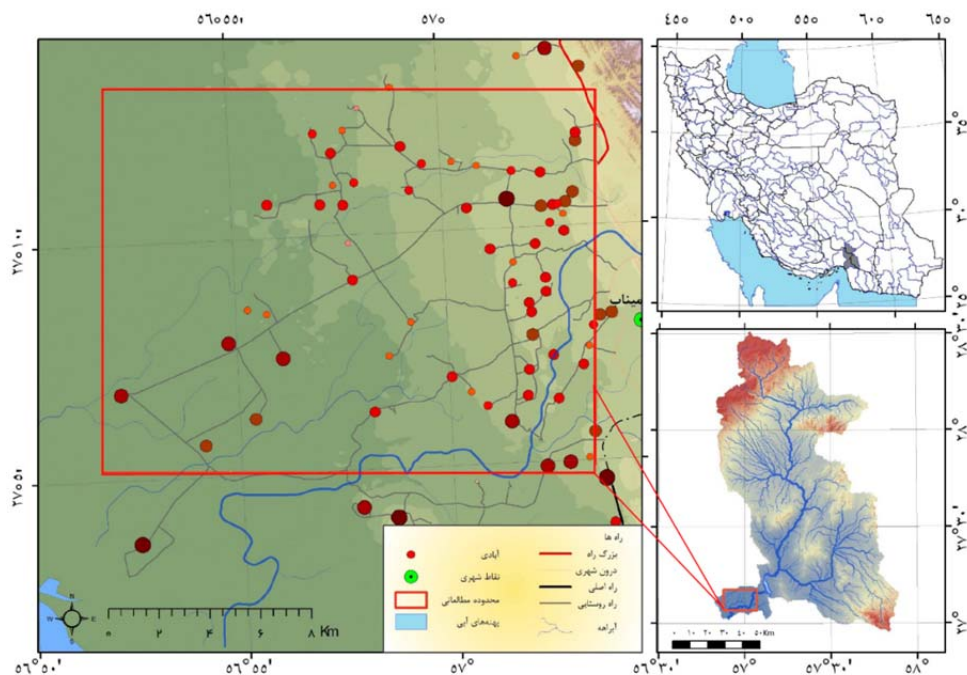
بسیار کم (۰/۵ درصد) به دریا ختم می‌شود. حداکثر ارتفاع دشت ۹۰ متر و حداقل آن صفر است، رودخانه اصلی آن رودخانه میناب است که سرشاخه‌های آن از ارتفاعات رودان، منوجان، مسافرآباد، فاریاب، گلاشگرد و ... سرچشمه می‌گیرند. دشت میناب از شمال به محدوده‌های رودان، جغین - توکهور، از شرق به محدوده کریان، از غرب به محدوده شمیل-تخت-قلعه قاضی و از جنوب به خلیج فارس محدود می‌شود. محدوده میناب دارای وسعتی ۶۵۲ کیلومترمربع است که از این مقدار حدود ۳۷۳ کیلومترمربع دشت میناب (محدوده مورد مطالعه) و ۲۴۷ کیلومترمربع مربوط به ارتفاعات است و همچنین وسعت دریاچه سد در حدود ۱۸ کیلومترمربع و وسعت دشت پشت سد حدود ۱۲ کیلومترمربع است.

دامنه فرونشست‌های دشت میناب استفاده نماید تا با دقت و سرعت بیشتری این پدیده را شناسایی و مدل‌سازی کرده و در نتیجه کاهش زمان دستیابی به داده‌ها در منطقه و همچنین کاهش هزینه‌های مربوط به آن و مدیریت و برنامه‌ریزی بهتری را ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت میناب بین موقعیت جغرافیایی $56^{\circ} 48'$ تا $57^{\circ} 15'$ طول شرقی و $26^{\circ} 01'$ تا $27^{\circ} 27'$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). دشت میناب یک دشت آبرفتی بوده که توسط رسوبات دوران چهارم به صورت کامل پوشیده شده است. از نظر توپوگرافی، دشت بسیار هموار است که با یک شیب



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی

بر چاه‌های کشاورزی و روستایی، حدود ۵۰ حلقه چاه نیز برای تأمین آب بندرعباس در دشت میناب حفر شده است که به صورت شبانه‌روزی استخراج آب از آن‌ها ادامه دارد. برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، باعث افت ممتد سطح آب و در نتیجه

کمبود بارش سال‌های اخیر و تداوم خشک‌سالی در استان هرمزگان به‌ویژه در شرق استان، کاهش آب سد استقلال میناب، به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب شرب شهر بندرعباس و روستاهای مسیر را به دنبال داشته است. به همین دلیل، علاوه

روش تحقیق

برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار SNAP از روش تداخل‌سنجی رادار با درجه مصنوعی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) استفاده شد (۴۲). در تداخل‌سنجی راداری، فاز تصاویر اخذشده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه گردید. از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر اینترفروگرام تولید شد. اینترفروگرام یک طرح تداخلی فرینج (Fringe) است. فرینج‌ها خطوطی با اختلاف‌فازهای مساوی شبیه به خطوط تراز در نقشه‌های توپوگرافی است. تغییرات ایجادشده در سطح زمین باعث ایجاد اختلاف‌فاز در دو تصویر رادار در دو زمان مختلف می‌گردد (۲).

اختلاف‌فاز به‌دست‌آمده از تصاویر نشان‌دهنده میزان تغییر شکل در فاصله زمانی دو گذر ماهواره بر فراز منطقه است. اساس کار این روش استفاده از اطلاعات فاز امواج راداری بازتابی از عوارض سطح زمین است به‌نحوی که تغییرات ایجادشده در سطح زمین، سبب اختلاف‌فاز در دو تصویر رادار اخذشده در دو زمان مختلف از یک منطقه می‌شود (۵). مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.

موجب ایجاد و گسترش فرونشست در استان و به‌ویژه در منطقه مطالعاتی شده است. نمود فرونشست زمین در استان و منطقه مطالعاتی بیشتر به‌صورت ایجاد فرو چاله است. تمرکز اصلی فرو چاله‌ها در بزرگ‌ترین و حاصلخیزترین دشت استان یعنی دشت میناب و روستاهای واقع در آن است و با تخریب اراضی زراعی و باغی، از بین بردن راه‌ها و تأسیسات ارتباطی و خدماتی و به دام افتادن دام‌ها و احشام زندگی ساکنان این مناطق را متأثر کرده‌اند.

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، از دو تصویر راداری مربوط به تاریخ‌های ۱۳۹۳/۰۷/۲۰ و ۱۳۹۷/۰۷/۱۱ و در حالت IW (نوار ۲۵۰ کیلومتری و قدرت تفکیک ۵×۲۰ متر) ماهواره سنتینل-۱ استفاده شد. علاوه بر تصاویر راداری، در شهریور ۱۳۹۷ با انجام عملیات پیمایشی و میدانی و با استفاده از GPS، تعداد ۱۴۴ نمونه به‌صورت تصادفی از مناطق دارای فرونشست و بدون فرونشست جهت شناخت و صحت‌سنجی نتایج برداشت شد. همچنین به‌منظور یافتن علل فرونشست در منطقه مطالعاتی، یافته‌های روش تداخل‌سنجی راداری با تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی که به‌وسیله ۱۱ چاه مشاهده‌ای به دست آمد، مورد مقایسه و تحلیل آماری قرار گرفت.



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق

فاز اینترفروگرام ایجاد شده ناشی از مؤلفه‌هایی نظیر مؤلفه مداری، توپوگرافی، جابجایی، اتمسفر و نویز است که هر یک از این پارامترها سبب تغییر فاز می‌شود. ارتباط اختلاف فاز ایجاد شده در تداخل‌سنجی راداری و مؤلفه‌های ذکر شده، توسط رابطه ۲ تعیین شد.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{Deformation}} + \Delta\varphi_{\text{Atmosphere}} + \text{noise} \quad [2]$$

$$\Delta\varphi_2 = \varphi_{21} - \varphi_2 = \Delta\varphi_{\text{Geometry}} + \Delta\varphi_{\text{Topography}}$$

موقعیت نسبی تعدادی از عوارض زمینی در بازه زمانی بین دو تصویربرداری SAR به صورت جزئی تغییر می‌کند. این تغییرات ناشی از پدیده‌هایی نظیر فرونشست، زمین‌لرزه، زمین‌لغزش و یا حرکت گسل‌ها است. این اثر تغییر فازی را مستقل از خط مبنا ایجاد می‌کند که از رابطه ۳ تعیین شد.

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d \quad [3]$$

در این رابطه؛ d تصویر جابجایی نسبی عارضه در راستای رنج مایل است. پس از مسطح سازی اینترفروگرام، فاز تداخل‌سنجی شامل هر دو اثر ارتفاعی و جابجایی خواهد بود. بنابراین فاز تداخل‌سنجی در این حالت مطابق رابطه ۴ تعیین می‌شود.

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d \quad [4]$$

برای اندازه‌گیری میزان جابجایی‌های عوارض باید اطلاعات توپوگرافی و ارتفاع از فاز تداخل‌سنجی حذف شود. برای این منظور از مدل ارتفاعی رقومی استفاده شد و مؤلفه ارتفاعی عوارض از اطلاعات فاز حذف گردید. اینترفروگرام به دست آمده از این مرحله اینترفروگرام تفاضلی نامیده می‌شود و فاز باقیمانده به طور عمده ناشی از تغییرات پوسته زمین است. در مرحله آخر نقشه جابه‌جایی تولید شده زمین مرجع گردید. در نهایت، صحت‌سنجی نقشه نهایی با استفاده از داده‌های میدانی مقایسه شده و ارتباط آن با تغییرات سطح آب زیرزمینی بررسی گردید.

با استفاده از اختلاف فاز به دست آمده، تداخل‌نگارها ایجاد می‌شوند که شامل مؤلفه‌های ناشی از توپوگرافی، اثر کرویت زمین، تغییر شکل سطح زمین و خطاهای موجود است. برای تعیین فاز تغییر شکل باید اثر سهم مؤلفه دیگر در فاز تداخل‌نگار حذف گردد. فاز زمین مسطح با استفاده از فایل‌های مداری و فاز توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی تصحیح می‌شوند. پس از حذف مؤلفه‌های دیگر فاز تداخل‌نگار، روش خط مبنای کوتاه (۱۷) به منظور تحلیل آنالیز سری زمانی جابجایی در روش تداخل‌سنجی راداری مورد استفاده قرار گرفت.

در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار گرفت که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا بود. همچنین خط مبنای زمانی آن‌ها نیز هم‌زمان کمینه بود. به این ترتیب، فقط تداخل‌نگارهایی تشکیل شد که همبستگی مناسبی داشته باشد. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد شد و با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین زده شد (۸). رابطه فاز اینترفرومتری طبق رابطه ۱ محاسبه گردید.

[۱]

$$y_1 = |y_1| \exp(i\varphi_1)$$

$$y_2 = |y_2| \exp(i\varphi_2)$$

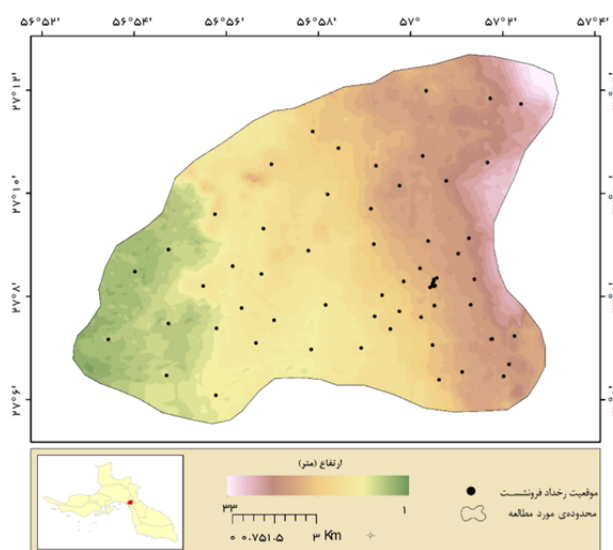
$$y_1 y_2 = |y_1| |y_2| \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2))$$

در این رابطه؛ y_1 و y_2 سیگنال‌های دو پیکسل متناظر است که اولی تصویر اصلی (Master) و دومی تصویر فرعی (Slave) است. پس از ضرب مختلط این دو سیگنال، رابطه دیگری به دست می‌آید که در این رابطه $|y_1| |y_2|$ دامنه θ_2 و θ_1 برابر فاز اینترفروگرام است. از تفاضل فاز تصاویر، تصویر اینترفروگرام اولیه می‌شود. همان‌گونه که قبلاً گفته شد اینترفروگرام طرحی تداخلی از منحنی‌هایی با اختلاف فاز مساوی است (۴۵). در این رابطه، تغییر فاز به اندازه 2π معادل جابجایی به اندازه نصف طول موج مورد استفاده توسط ماهواره است که نمایش دهنده یک فرینج کامل در اینترفروگرام است.

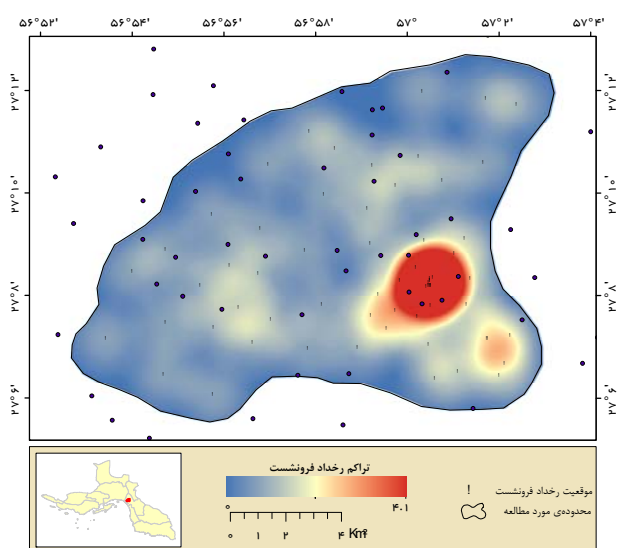
نتایج

برداشت شده پدیده فرونشست را نشان می‌دهد. جهت دستیابی به درک بهتری از شرایط منطقه، نقاطی که فاقد فرونشست بوده‌اند نیز در منطقه ثبت گردیده و نقشه تراکم فرونشست تهیه شد. تراکم رخداد فرونشست را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنان که ملاحظه می‌شود ناحیه جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه بیشترین رخداد فرونشست را تجربه کرده است و سایر نواحی در سطحی کمتر شاهد رخداد این پدیده بوده‌اند.

نتایج پردازش‌های انجام شده بر روی تصاویر نشان‌دهنده فرونشست حدود ۱۳ سانتی‌متری در منطقه مطالعاتی است (شکل ۳). به منظور مطالعه فرونشست و تأثیرپذیری آن از برداشت ذخایر آب‌های زیرزمینی، بخشی از دشت میناب که بیشترین رخداد فرونشست را دارد، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. شکل ۴ موقعیت جغرافیایی منطقه انتخاب شده به همراه موقعیت نقطه‌ای محل رخدادهای



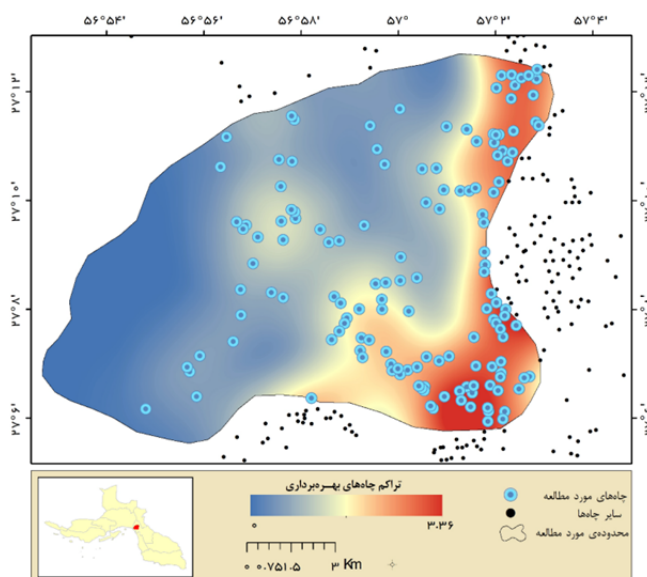
شکل ۳. نقاط برداشت شده پدیده فرونشست در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴. تراکم رخداد فرونشست در منطقه مورد مطالعه

مورد مطالعه را نشان می‌دهد. از بین چاه‌های موجود در منطقه، چاه‌های انتخابی در مطالعه حاضر بارنگ آبی مشخص شده است. ملاحظه می‌شود که بیشترین تراکم چاه‌های بهره‌برداری نیز در نیمه شرقی منطقه و در محور جنوب شرقی از مرکز واقع شده است.

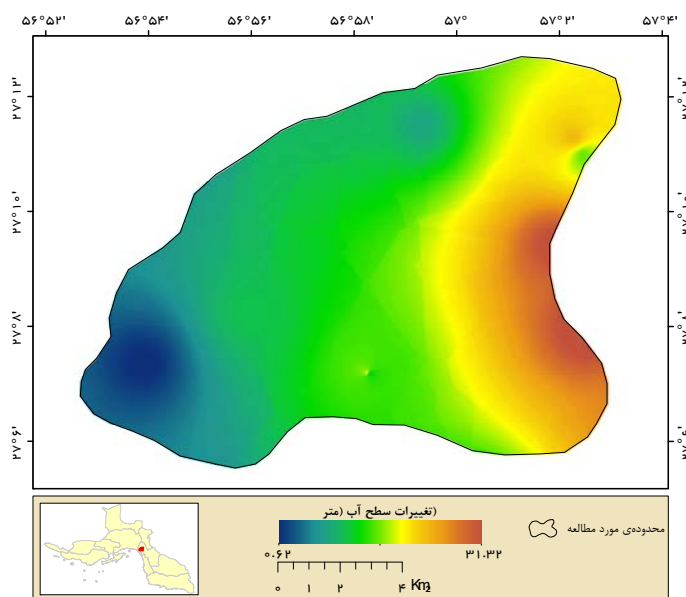
نظر به اینکه مطالعه حاضر در پی یافتن رابطه‌ای بین برداشت آب از چاه‌های موجود و رخداد پدیده فرونشست بود، موقعیت هر دو نوع چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای نیز در منطقه، مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری که برداشت آب از آن‌ها صورت می‌گیرد، در منطقه



شکل ۵. موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مورد مطالعه

ملموس‌تر، تغییرات تراز سطح آب در دوره آماری مورد مطالعه برای تمامی چاه‌ها محاسبه و به کمک درون‌یابی به روش نزدیک‌ترین فاصله IDW، نقشه تغییرات تراز سطح آب نیز برای منطقه تهیه شد. با توجه به نقشه استخراج‌شده، ملاحظه شد که بیشترین تغییرات تراز سطح آب در نیمه شرقی منطقه، جایی که بیشترین ارتفاع و بیشترین تراکم توزیع چاه‌ها و فرونشست واقع شده، رخ داده است (شکل ۶).

به منظور بررسی دقیق‌تر، روند تغییرات تراز سطح آب مربوط به چاه‌های مورد بررسی مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات آماری چاه‌های مورد مطالعه و میزان میانگین سالانه تراز آب در دوره آماری سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴ برای چاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ درج شده است. اندازه‌گیری تراز آب، از سطح زمین تا سطح آب موجود در چاه صورت می‌گیرد و بنابراین، میزان بیشتر باشد، در حقیقت افت سطح آب چاه را نشان می‌دهد. به جهت تسهیل محاسبات و دستیابی به نتایج



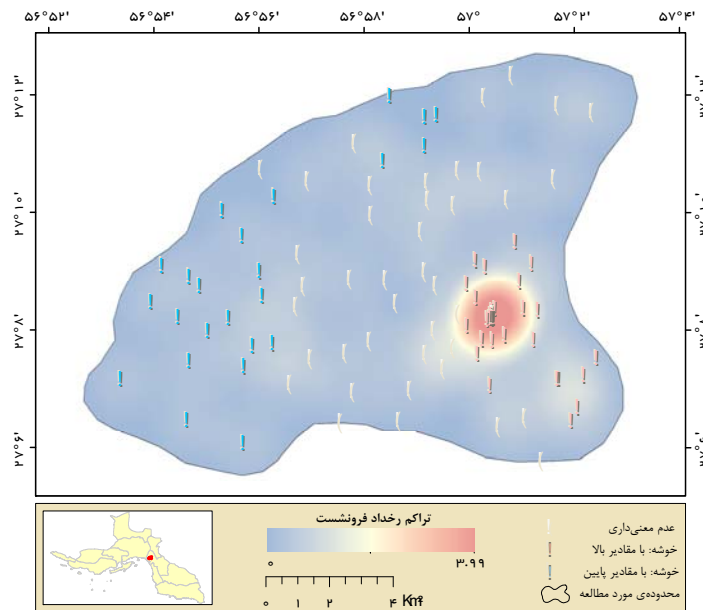
شکل ۶. تغییرات تراز سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه مورد مطالعه در دوره آماری ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴

جدول ۱. ویژگی‌های آماری افت آب در چاه‌های مورد بررسی

ردیف	شماره چاه	بیشینه سطح آب مشاهده‌ای (متر)	کمینه سطح آب مشاهده‌ای (متر)	دامنه تغییرات سطح آب در کل دوره (متر)	سطح آب در سال ۶۵ (متر)	سطح آب در سال ۹۴ (متر)
۱	۱۸	۲۶/۲۹	۴/۶۶	۲۱/۶۳	۴/۶۶	۲۶/۲۹
۲	۱۹	۱۶/۹۷	۲/۶۲	۱۴/۳۵	۲/۶۲	۱۶/۹۷
۳	۲۱	۹/۱۸	۲/۸۰	۶/۳۸	۲/۸۰	۹/۱۸
۴	۲۳	۱۴/۶۷	۳/۳۱	۱۱/۳۶	۳/۳۱	۱۴/۶۷
۵	۲۴	۹/۵۰	۲/۱۲	۷/۳۸	۲/۱۲	۹/۵۰
۶	۲۵	۳۹/۵۲	۹/۷۶	۲۹/۷۶	۹/۷۶	۳۹/۵۲
۷	۲۶	۲۳/۵۶	۳/۷۱	۱۹/۸۵	۳/۷۱	۲۳/۵۶
۸	۳۷	۴۰/۰۹	۸/۲۰	۳۱/۸۹	۸/۲۰	۴۰/۰۹
۹	۳۸	۱۲/۳۰	۲/۴۵	۹/۸۵	۲/۴۵	۱۲/۳۰
۱۰	۴۰	۱۱/۲۰	۳/۸۱	۷/۴۰	۳/۸۱	۱۱/۲۰
۱۱	۴۱	۵/۰	۴/۳۹	۰/۶۲	۴/۳۹	۴/۸۸

صورتی‌رنگ در شکل ۷) مؤید ارتباط بیشترین تغییرات تراز سطح آب با رخداد فرونشست و خوشه با مقدار پایین (نقاط آبی‌رنگ در شکل ۷) مؤید ارتباط تغییرات ناچیز تراز سطح آب با عدم رخداد فرونشست است. نقاط سفیدرنگ توزیع شده در منطقه هیچ‌گونه معنی‌داری خاصی را نشان نمی‌دهند.

با در اختیار داشتن نقشه تراکم رخداد فرونشست و تغییرات تراز سطح آب، تحلیل‌های مکانی روی این دو پارامتر صورت گرفت. بررسی معنی‌داری تغییرات تراز سطح آب با تراکم رخداد فرونشست، وجود این معنی‌داری را به صورت خوشه‌ای در ناحیه جنوب شرقی تأیید کرد. خوشه با مقادیر بالا (نقاط

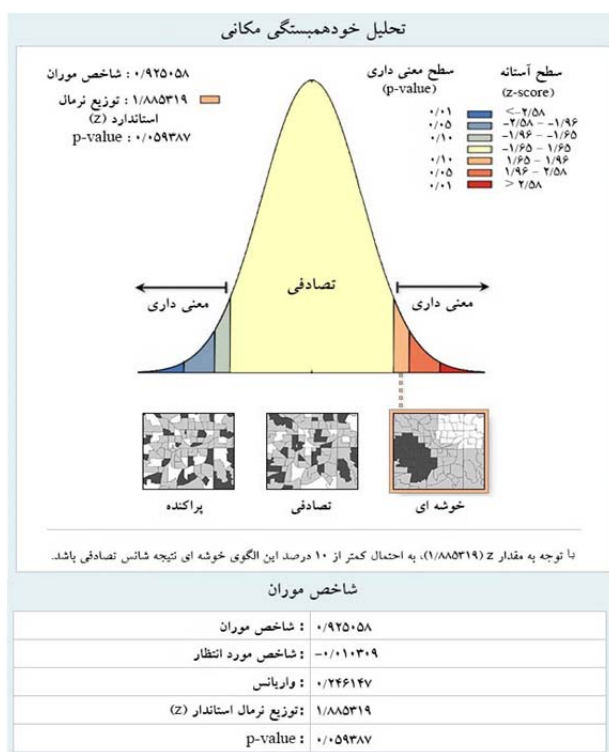


شکل ۷. انطباق معنی داری تغییرات تراز سطح آب با تراکم رخداد فرونشست در منطقه مورد مطالعه

مقدار p_value مؤید رابطه خودهمبستگی قوی بین عناصر مورد مطالعه است که در تحلیل حاضر هرکدام به ترتیب مقادیر ۱/۸۹ و ۰/۰۶ را اتخاذ کرده‌اند (شکل ۸).

به منظور پیش‌بینی رخداد پدیده فرونشست در آینده، از پارامترهای تغییرات سطح آب، ارتفاع سطح زمین، شیب و ناهمواری‌ها استفاده شد. خلاصه مشخصات آماری پارامترهای مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که، ناهمواری‌های محدوده مطالعاتی دامنه‌ای بین ۱ تا ۳۳ متر داشته و بیشینه شیب منطقه، حدود ۲۶ درجه است. با توجه به برداشت‌های صورت گرفته، تغییرات تراز آب زیرزمینی و میزان افت آن از ۰/۶۲ متر تا بیش از ۳۰ متر در منطقه مشاهده می‌شود. میانگین این افت، حدود ۱۴ متر است. بیشترین تراکم مشاهده شده فرونشست زمین در منطقه نیز ۴/۱ بود.

تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران نیز خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را تأیید کرد. خودهمبستگی به رابطه بین مقادیر باقیمانده در طول خط رگرسیون مربوط می‌شود و زمانی خودهمبستگی قوی رخ می‌دهد که مقادیر باقیمانده شدیداً باهم در ارتباط باشند، به عبارت دیگر تغییراتشان به صورت سیستماتیک رخ دهد. شاخص موران ابزاری در تحلیل خودهمبستگی فضایی است که به تحلیل الگوی توزیع عوارض در فضا با ملاحظه هم‌زمان موقعیت مکانی و مقدار خصیصه مورد نظر می‌پردازد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که آیا عوارض به صورت تصادفی، پراکنده یا خوشه‌ای در فضا توزیع شده‌اند. هر چه میزان شاخص موران به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده قوی‌تر بودن الگوی خوشه‌ای است. نتایج تحلیل مطالعه حاضر میزان ۰/۹۲۵ را برای شاخص موران نشان داد. از طرفی بالا بودن امتیاز استاندارد Z و پایین بودن



شکل ۸. نتایج تحلیل خودهمبستگی مکانی تغییرات تراز سطح آب و فرونشست زمین

جدول ۲. خلاصه مشخصات آماری پارامترهای مورد مطالعه

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
تراکم فرونشست	۰	۴/۱	۰/۴۱	۰/۵
تغییرات تراز سطح آب	۰/۶۲	۳۱/۳۲	۱۳/۳۲	۶/۳۲
ارتفاع	۱	۳۳	۱۳/۷۳	۶/۰۸
شیب	۰	۲۶/۵۲	۰/۴۶	۱/۳۸

تغییرات تراز سطح آب و عامل ارتفاع زمین بیشترین میزان همبستگی (۰/۸۳) وجود داشت و بین سایر عوامل، ضریب همبستگی کم و ارتباط معنی داری مشاهده نشد.

به منظور شناخت ارتباط بین این عوامل، ماتریس همبستگی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. یافته‌های همبستگی بین شاخص‌ها نشان داد که بین عامل

جدول ۳. ماتریس همبستگی تراکم رخدادهای فرونشست (متغیر وابسته) با سایر پارامترهای مستقل

پارامتر	تراکم فرونشست	تغییرات تراز سطح آب	ارتفاع زمین	شیب
تراکم فرونشست	۱	۰/۳۶	۰/۱۷	-۰/۰۲
تغییرات تراز سطح آب	۰/۳۶	۱	۰/۸۳	-۰/۰۱
ارتفاع زمین	۰/۱۷	۰/۸۳	۱	۰/۰۰۱
شیب	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۰۱	۱
معادله رگرسیون	(شیب) × (-۰/۰۲) + (ارتفاع) × (۰/۱۷) + (تغییرات تراز سطح آب) × (۰/۳۶) = تراکم رخدادهای فرونشست			

بحث و نتیجه گیری

منطقه مورد مطالعه در دهه های اخیر رشد جمعیت را در کنار توسعه کشاورزی تجربه کرده است. بارش کم سال های اخیر و خشک سالی های متوالی، محدودیت منابع آب سطحی، روش های نادرست آبیاری در بخش کشاورزی در منطقه مطالعاتی، به همراه الگوی کشت نامناسب، موجب حفر بی رویه چاه های آب در منطقه شده است. برداشت بی رویه از این چاه ها و منابع آب زیرزمینی، موجب عدم تعادل آبخوان منطقه شده و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی را به دنبال داشته است. پیامدهای این روند، باعث ایجاد و گسترش فرونشست زمین در منطقه و آسیب های غیرقابل جبران شده است. در مقیاس جهانی نیز شدت این پدیده در بین سال های ۷۰-۱۹۵۰ و هم زمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی دیده شده است. نمود فرونشست زمین در استان غالباً به صورت ایجاد فرو چاله است. تمرکز اصلی فرو چاله ها در بزرگ ترین و حاصلخیزترین دشت استان یعنی دشت میناب است. هم اکنون غالب مناطق درگیر با پدیده فرو چاله روستاهای اطراف میناب هستند اما در برخی مناطق گسترش فرو چاله ها به برخی محلات شهر میناب نیز رسیده است. فرو چاله ها اکنون اراضی روستاهای گورزانگ، کاشرانی، تمبلوچان، باغگالن، تمبک، تمبساط، گشنو، چلوگاو میشی، تمبانو، کلنتان، زهرایی، کناران، محمودی، نصیرایی، کلو، کلیبی، درخانه، سرکنتان، ماکیان، ماه خاتونی، سرریگان و سرباران را در بر گرفته است و با تخریب اراضی زراعی و باغی، از بین بردن راه ها و تأسیسات ارتباطی و خدماتی و به دام افتادن دام ها و احشام زندگی ساکنان این مناطق را متأثر کرده اند. علت اصلی ایجاد و گسترش فروچاله ها در میناب تداوم خشک سالی، کاهش آب سد استقلال میناب به عنوان منبع اصلی تأمین آب شرب بندرعباس و در نتیجه برداشت بی رویه آب از این دشت برای تأمین آب بندرعباس است. هم اکنون علاوه بر چاه های کشاورزی و روستایی حدود ۵۰ حلقه چاه نیز برای تأمین آب بندرعباس در این دشت حفر شده است که به صورت شبانه روزی استخراج آب از آنها ادامه دارد.

به منظور بررسی میزان و گسترش این پدیده در منطقه مطالعاتی، در این پژوهش از بررسی تصاویر ماهواره ای راداری و استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری، اقدام به آشکار سازی و تعیین میزان فرونشست زمین شد. نتایج پردازش های انجام شده بر روی تصاویر سنجنده Semtinel-1 نشان داد که در دوره مطالعاتی زمین حدود ۱۳ سانتی متر فرونشست داشت. پژوهش های پیشین، بر نقش و اهمیت استفاده از تصاویر راداری سنجنده های مختلف در شناسایی دقیق این پدیده تأکید داشته اند (۴۰). تحقیق حاضر همانند مطالعات امام اوغلو و همکاران (۳۵)، لین و همکاران (۴۰)، لیو و همکاران (۴۱)، اوسمانو و همکاران (۴۴) و کیو و همکاران (۴۷)، از سازگاری بسیار بالای نتایج تداخل سنجی راداری با مشاهدات زمینی را نشان می دهد و مناسب بودن این روش در اندازه گیری تغییر شکل سطح زمین را تأیید می کند. هدف بیشتر تحقیقات انجام شده با تصاویر راداری، تنها افزایش دقت شناسایی این پدیده با این تصاویر بود ولی علت یابی وقوع آنها در مطالعات تصاویر راداری کمرنگ بود. در حالی که در پژوهش حاضر، ضمن استفاده از این ابزار در جهت شناسایی فرونشست ها، نسبت به شناسایی علت و تعیین روابط میان شاخص های مختلف با استفاده از تحلیل های فضایی در منطقه مطالعاتی، اقدام کرد. به منظور تعیین ارتباط فرونشست ها با تغییرات تراز سطح آب، تحلیل های مکانی روی این دو پارامتر صورت گرفت. بررسی معنی داری حاکی از ارتباط میان فرونشست و برداشت آب از سفره های آب زیرزمینی و تمرکز چاه ها در مناطق فرونشست داشت و وجود این معنی داری را به صورت خوشه ای تأیید کرد که با یافته های حاصل از به کارگیری این روش با دیدگاه افت سطح آب زیرزمینی که توسط پژوهشگران مختلف مانند گالووی و همکاران (۲۸)، متاگ و همکاران (۴۳)، فین و همکاران (۴۵) همسو بود. همچنین، نتایج این تحقیق نقش برداشت آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی را به عنوان محرک اصلی در بروز این پدیده را به اثبات رساند که با تحقیقاتی که توسط آمیغ پی و همکاران (۳)، حاجب و همکاران (۵)، دهقانی (۷)، جادا و همکاران

۵. حاجب، ز.، موسوی، ز.، معصومی و ا. رضایی. ۱۳۹۷. بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری. مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۱۸ تا ۲۰ اردیبهشت‌ماه، انجمن ژئوفیزیک ایران، تهران، ۳۵۲-۳۵۵.
۶. زارع کمالی، م.، س. ع. الحسینی المدرسی و ک. نقدی. ۱۳۹۶. مقایسه میزان جابجایی عمودی زمین با استفاده از الگوریتم SBAS در باندهای راداری X و C (مطالعه موردی: اراضی تهران). نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۸(۳): ۱۰۴-۱۲۰.
۷. دهقانی، م. ۱۳۹۴. ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل‌سنجی راداری به‌منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی. نشریه مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۲(۲): ۶۱-۷۳.
۸. شریفی کیا، م. ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهرمان. نشریه برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۱۶(۳): ۵۵-۷۷.
۹. مهربانی، ع. ۱۳۹۷. شناسایی شواهدی بر وجود گنبد نمکی مدفون و جدید در ناحیه زاگرس با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری سنتینل-۱ و ایسار. نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۹(۴): ۹۰-۱۰۱.
10. Abdikan S, Arıkan M, Sanlı FB, Cakir Z. 2014. Monitoring of coal mining subsidence in peri-urban area of Zonguldak city (NW Turkey) with persistent scatterer interferometry using ALOS-PALSAR. Environmental earth sciences, 71(9): 4081-4089.
11. Abelson M, Aksinenko T, Kurzon I, Pinsky V, Baer G, Nof R, Yechieli Y. 2018. Nanoseismicity forecasts sinkhole collapse in the Dead Sea coast years in advance. Geology, 46(1): 83-86.
12. Aslan G, Cakir Z, Ergintav S, Lasserre C, Renard F. 2018. Analysis of secular ground motions in istanbul from a long-term insar time-series (1992–2017). Remote Sensing, 10(3): 408-419.
13. Bayer B, Simoni A, Mulas M, Corsini A, Schmidt D. 2018. Deformation responses of slow moving landslides to seasonal rainfall in the Northern Apennines, measured by InSAR. Geomorphology, 308: 293-306.
14. Béjar-Pizarro M, Notti D, Mateos RM, Ezquerro P, Centolanza G, Herrera G, Bru G, Sanabria M, Solari L, Duro J. 2017. Mapping vulnerable urban areas affected by slow-moving landslides using (۳۷)، پولند و همکاران (۴۶)، شوجون و همکاران (۴۸)، توماس و همکاران (۴۹)، وونگ و همکاران (۵۰) انجام شد، مطابقت دارد.
- با توجه به نتایج این تحقیق، روند افزایشی برداشت آب در منطقه و وجود بیلان منفی، افت تراز سطح آب در آبخوان در منطقه را تشدید کرده است. این افت، که هم‌زمان با وقوع پدیده فرونشست که بیشتر در زمین‌های کشاورزی دیده می‌شود، می‌تواند شیب هیدرولیکی منطقه را از حالت طبیعی خارج ساخته و به‌واسطه فاصله کم این دشت تا دریا، باعث نفوذ آب دریا به این ناحیه می‌شود. در نتیجه، این محدوده نه‌تنها از نظر کمی در وضعیت نامناسبی قرار دارد، از نظر کیفی هم در معرض خطر خواهد بود. به همین دلیل، برای کنترل این پدیده و کاهش اثرات منفی آن، به مدیریت درست و برنامه‌ریزی مناسب‌تر نیاز خواهد بود.
- ### منابع مورد استفاده
- احمدی، ن.، موسوی و ز. معصومی. ۱۳۹۷. مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن. فصلنامه سنجش‌ازدور و GIS ایران، ۱۰(۳): ۳۳-۵۲.
 - المدرسی، س. ع.، ج. حاتمی و ع. سرکارگر. ۱۳۹۵. محاسبه خصوصیات فیزیکی برف با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و تصاویر سنجنده ترا سارایکس باند (TerraSAR-X) و مودیس (MODIS). نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷(۲): ۵۹-۷۵.
 - آمیغی، م.، س. عربی، ع. طالبی و ی. جموری. ۱۳۸۸. کاربرد تکنیک تداخل‌سنجی راداری در مطالعات مناطق فرونشست. شانزدهمین همایش ملی ژئوماتیک، ۲۰ تا ۲۱ اردیبهشت‌ماه، سازمان نقشه‌برداری کشور، گروه مهندسی نقشه‌برداری-پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران. ۱۰ صفحه.
 - جمور، ر.، م. ایل بیگی و م. مرسلی. ۱۳۹۸. ارزیابی بحران فرونشست زمین و پیشروی آب‌شور دریا در آبخوان دشت میناب. نشریه اکوهیدرولوژی، ۶(۱): ۲۲۳-۲۳۸.

- Sentinel-1 InSAR data. *Remote Sensing*, 9(9): 876-889.
15. Bell JW, Amelung F, Ferretti A, Bianchi M, Novali F. 2008. Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long - term aquifer - system response to groundwater pumping and artificial recharge. *Water Resources Research*, 44(2): 1-18.
 16. Benito-Calvo A, Gutiérrez F, Martínez-Fernández A, Carbonel D, Karampaglidis T, Desir G, Sevil J, Guerrero J, Fabregat I, García-Arnay Á. 2018. 4D monitoring of active sinkholes with a terrestrial laser scanner (TLS): a case study in the evaporite karst of the Ebro valley, NE Spain. *Remote Sensing*, 10(4): 571-585.
 17. 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(11): 2375-2383.
 18. Boni R, Bosino A, Meisina C, Novellino A, Bateson L, McCormack H. 2018. A methodology to detect and characterize uplift phenomena in urban areas using Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 10(4): 607-620.
 19. Brambati A, Carbognin L, Quaià T, Teatini P, Tosi L. 2003. The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence. *Episodes*, 26(3): 264-268.
 20. Caló F, Notti D, Galve J, Abdikan S, Görüm T, Pepe A, Balik Şanlı F. 2017. Dinsar-based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya plain, Turkey. *Remote Sensing*, 9(1): 83-95.
 21. Carlà T, Farina P, Intrieri E, Ketizmen H, Casagli N. 2018. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. *Engineering Geology*, 235: 39-52.
 22. Chaussard E, Milillo P, Bürgmann R, Perissin D, Fielding EJ, Baker B. 2017. Remote sensing of ground deformation for monitoring groundwater management practices: Application to the Santa Clara Valley during the 2012–2015 California drought. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(10): 8566-8582.
 23. Chen M, Tomás R, Li Z, Motagh M, Li T, Hu L, Gong H, Li X, Yu J, Gong X. 2016. Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry. *Remote Sensing*, 8(6): 468-479.
 24. Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N, Crippa B. 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 78-89.
 25. Czikhardt R, Papco J, Bakon M, Liscak P, Ondrejka P, Zlocha M. 2017. Ground stability monitoring of undermined and landslide prone areas by means of Sentinel-1 multi-temporal InSAR, case study from Slovakia. *Geosciences*, 7(3): 87-101.
 26. Du Z, Ge L, Li X, Ng A. 2016. Subsidence monitoring over the Southern Coalfield, Australia using both L-Band and C-Band SAR time series analysis. *Remote Sensing*, 8(7): 543-556.
 27. Erten E, Rossi C. 2019. The worsening impacts of land reclamation assessed with Sentinel-1: The Rize (Turkey) test case. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74: 57-64.
 28. Galloway DL, Burbey TJ. 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8): 1459-1486.
 29. Ge L, Ng AH-M, Li X, Abidin HZ, Gumilar I. 2014. Land subsidence characteristics of Bandung Basin as revealed by ENVISAT ASAR and ALOS PALSAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 154: 46-60.
 30. GuangYao D, HuiLi G, Huanhuan L, Youquan Z, BeiBei C, KunChao L. 2016. Monitoring and analysis of land subsidence along Beijing-Tianjin Inter-city railway. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(6): 915-931.
 31. Guo J, Zhou L, Yao C, Hu J. 2016. Surface subsidence analysis by multi-temporal insar and grace: A case study in Beijing. *Sensors*, 16(9): 1495-1503.
 32. Gutiérrez F, Benito-Calvo A, Carbonel D, Desir G, Sevil J, Guerrero J, Martínez-Fernández A, Karampaglidis T, García-Arnay Á, Fabregat I. 2019. Review on sinkhole monitoring and performance of remediation measures by high-precision leveling and terrestrial laser scanner in the salt karst of the Ebro Valley, Spain. *Engineering Geology*, 248: 283-308.
 33. Hooper A, Bekaert D, Spaans K, Arkan M. 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514: 1-13.
 34. Hussain E, Wright TJ, Walters RJ, Bekaert DP, Lloyd R, Hooper A. 2018. Constant strain accumulation rate between major earthquakes on the North Anatolian Fault. *Nature communications*, 9(1): 1392-1404.
 35. Imamoglu M, Kahraman F, Abdikan S. 2018. Preliminary results of temporal deformation analysis in Istanbul using multi-temporal InSAR with Sentinel-1 SAR data. In: *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, pp 1352-1355.
 36. Intrieri E, Raspini F, Fumagalli A, Lu P, Del Conte S, Farina P, Allievi J, Ferretti A, Casagli N. 2018. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. *Landslides*, 15(1): 123-133.

37. Jadda M, Shafri HZ, Mansor SB, Sharifikia M, Pirasteh S. 2009. Landslide susceptibility evaluation and factor effect analysis using probabilistic-frequency ratio model. *European Journal of Scientific Research*, 33(4): 654-668.
38. Kersten T, Kobe M, Gabriel G, Timmen L, Schön S, Vogel D. 2017. Geodetic monitoring of subsidence-induced subsidence processes in urban areas. *Journal of Applied Geodesy*, 11(1): 21-29.
39. Kim J-W, Lu Z, Degrandpre K. 2016. Ongoing deformation of sinkholes in Wink, Texas, observed by time-series Sentinel-1A SAR interferometry (preliminary results). *Remote Sensing*, 8(4): 313.
40. Lin B, Jiang L, Wang H, Sun Q. 2016. Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift (2009–2010) over wuhan in central china revealed by terrasar-X insar analysis. *Remote Sensing*, 8(4): 350.
41. Liu C, Ji L, Zhu L, Zhao C. 2018. InSAR-constrained interseismic deformation and potential seismogenic asperities on the Altyn Tagh Fault at 91.5–95 E, Northern Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 10(6): 943-960.
42. Massonnet D, Feigl KL. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 441-500.
43. Motagh M, Walter TR, Sharifi MA, Fielding E, Schenk A, Anderssohn J, Zschau J. 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16): 1-5.
44. Osmanoğlu B, Sunar F, Wdowinski S, Cabral-Cano E. 2016. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 90-102.
45. Phien-Wej N, Giao P, Nutalaya P. 2006. Land subsidence in bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82(4): 187-201.
46. Poland JF. 1982. The Occurrence and Control of Land Subsidence Due to Ground-Water Withdrawal with Special Reference to the San Joaquin and Santa Clara Valleys, California. Ph.D. California, 240 p.
47. Qu F, Zhang Q, Lu Z, Zhao C, Yang C, Zhang J. 2014. Land subsidence and ground fissures in Xi'an, China 2005–2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 155: 366-376.
48. Shujun Y, Xue Y, Wu J, Yan X, Yu J. 2016. Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeology Journal*, 24(3): 685-693.
49. Tomas R, Herrera G, Lopez-Sanchez J, Vicente F, Cuenca A, Mallorquí J. 2010. Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: Distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors. *Engineering Geology*, 115(1-2): 105-121.
50. Wang G, You G, Shi B, Yu J, Tuck M. 2009. Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, China. *Engineering Geology*, 104(1-2): 109-118.
51. Yang H-l, Peng J-h. 2015. Monitoring urban subsidence with multi-master radar interferometry based on coherent targets. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(3): 529-538.



Geospatial modeling of land subsidence in the south of the Minab watershed using remote sensing and GIS

A. K. Arvin ¹, Gh. Vahabzadeh Kebria ^{2*}, S. Ramazan Mousavi ³, M. Bakhtyari Kia ³

1. PhD Student of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

2. Assoc. Prof. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

3. Assist. Prof. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

4. Assist. Prof. Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Hormozgan

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 July 2019

Accepted 18 September 2019

Available online 17 October 2019

Keywords:

InSAR

Subsidence

Spatial analysis

Groundwater

Radar images

Minab basin

ABSTRACT

Minab plain in Hormozgan province has experienced population growth with agricultural development in recent decades. Low rainfall in recent years, successive droughts, and limited surface water resources, irregular irrigation practices in the agricultural sector in the study area, along with inappropriate cultivation patterns, have caused the extraction of water wells in the region. The extraction of these wells and groundwater resources has led to an imbalance in the aquifer in the area and a decline in groundwater levels. The consequences of this trend have caused the creation and expansion of subsidence in the region. This research, by investigating radar, satellite images and using differential radial interferometry, has been used to detect and determine the amount of subsidence in order to investigate the extent of this phenomenon in the study area. In this study, data from the Sentinel-1 refer to the dates 2014 and 2018 were used. The results showed it had 13-centimeter subsidence in the study period. After verifying the results by control points (in September 2018), in order to find the relationship of subsidence with changes in groundwater level, elevation, and slope, a spatial analysis was performed and the correlation of each of these factors with subsidence event density was calculated. Spatial autocorrelation analysis and Moran's index showed that climatic event due to water level changes in the study area was 0.925. The values of 1.89 and 0.06 for standard normal distribution (z) and the p -value respectively, confirm a strong autocorrelation between the studied factors.

* Corresponding author e-mail address: ghorban.vahabzadeh2@gmail.com