



بررسی روند فرونشست دشت اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفریقی راداری

مقاله
پژوهشی

مرجان طالبی نیا^۱، حسن خسروی^۲، غلامرضا زهتابیان^۳، آرش ملکیان^۴، حمیدرضا کشتکار^۵

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰ / پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۰۹ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

در ادامه خروجی نرم افزار اسنپ با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS10.8)، با لایه های کاربری اراضی و متوسط تغییرات سطح ایستایی، مورد مطالعه قرار گرفتند و نقشه های میانگین تغییرات فرونشست، افت آب زیرزمینی، انحراف معیار و زمان وقوع بیشترین مقدار فرونشست تهیه گردید. نتایج نشان داد، مناطق دارای افت آب زیرزمینی با کاربری شهری، راه و جاده سازی و اراضی کشاورزی دارای فرونشست با نرخ حداکثری ۲۰/۸-۱۴/۲ سانتی متر در سال های ۱۳۹۷-۱۳۹۸، هستند. متوسط تغییرات، بیانگر بیشینه فرونشست ۹/۶ سانتی متر در سال، در راستای خط دید ماهواره، در منطقه شهری است. همچنین تحلیل های مکانی مخاطرات فرونشست در نقاط استراتژیک نشان داد که منطقه مطالعاتی نیازمند ارائه هشدارهای لازم جهت رخداد بحران فرونشست در ابعادی وسیع تر در آینده است.

مقدمه

با توجه به تعریف ارائه شده توسط انستیتو زمین شناسی ایالت متحده، فرونشست زمین شامل پایین افتادن سطح زمین است، که در مقیاس های کوچک و بزرگ تحت تأثیر عوامل متعدد رخ

چکیده

در تحقیق حاضر، جهت بررسی رخداد پدیده فرونشست زمین در دشت اصفهان، از نرم افزار اسنپ ۸ و تکنیک تداخل سنجی تفریقی راداری استفاده گردید. به همین منظور، پس از پردازش تصاویر سنتینل-۱، نقشه های نرخ و شدت فرونشست در بازه زمانی ۱۳۹۴-۱۳۹۸، تهیه شدند. همچنین تغییرات سطح ایستایی آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۷، به عنوان یکی از عوامل ژئودوتیک مؤثر بر فرونشست، برای تطابق با نقاطی که دارای فرونشست هستند، مورد بررسی قرار گرفت.

مرجان طالبی نیا^۱، حسن خسروی^۲، غلامرضا زهتابیان^۳، آرش ملکیان^۴، حمیدرضا کشتکار^۵

۱. دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران
۲. استاد، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران
۳. استاد، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران
۴. استاد، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران
۵. استادیار، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

DOI: 10.30495/girs.2023.690220

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: hakhosravi@ut.ac.ir

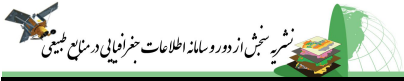
جهت تهیه نقشه نهایی فرونشست مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. لذا، به منظور تعیین نقش عوامل ژئودوتیک (آب زیرزمینی، شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، پوشش گیاهی و ...) بر احتمال وقوع فرونشست، نوسانات سطح آب زیرزمینی به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر این پدیده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به همین علت پس از دریافت داده از شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۸۵ پیژومتر معرف منطقه مطالعاتی با پراکنش و داده‌های مناسب انتخاب شد و داده‌های سالیانه سطح ایستابی چاه‌های پیژومتریک سه حوضه نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگری در دوره آماری ۱۳۹۷-۱۳۸۱ در اکسل تهیه گردید. جهت تهیه لایه‌های رستری میزان افت آب منطقه، مقادیر متوسط سطح ایستابی هر چاه در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی فراخوانی شدند و پس از رتبه دهی لایه‌ها نهایتاً نقشه کلاس‌بندی شده افت سطح آب زیرزمینی برای کل دوره مطالعاتی در چهار کلاس افت آب کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه گردید.

در ادامه از تصاویر راداری سنجنده سنتینل-۱ باند C در بازه زمانی، ۱۳ دسامبر ۱۳۹۴ تا ۴ دسامبر ۱۳۹۸ استفاده شد. داده‌های SAR موجود شامل ۵ تصویر IW-SLCSAR است، محصول سطح یک (L1) که از دسته تصاویر SAR می‌باشد دارای پولاریزیشن عمودی عمودی با دوره برداشت زمانی یک‌ساله با عرض برداشت ۲۵۰ کیلومتر است. در سال ۱۳۹۴، منطقه مورد مطالعه در دو تصویر ماهواره‌ای قرار دارد لذا تصویر دریافتی مربوط به سال ۱۳۹۴ با همان تاریخ و ویژگی، با بخش بالایی آن تصویر دریافت گردید. همچنین، منطقه مورد پژوهش در دو پهنای تداخل‌سنجی (The Interferometric Wide) قرار دارد لذا جهت دریافت اولین نقشه فرونشست که در آن سال ۱۳۹۴ به عنوان تصویر اصلی (Master) و سال ۱۳۹۵ به عنوان تصویر وابسته (Slave) است. برای هر سال تصویر با فرمت Orb استخراج شده مرحله قبل وارد بخش بعدی شده و تصاویر فاز و کوهرنسی تشکیل می‌شوند. جهت محاسبه دقیق فرونشست، اثر توپوگرافی سطح زمین باید حذف شود به همین علت بر اساس یک مدل رقومی و با استفاده از DEM

می‌دهد. فرونشست در هر منطقه تحت تأثیر یک یا چند عامل است. استخراج آب‌های زیرزمینی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، از عوامل عمده تخریب و فرونشست زمین است که می‌تواند خسارت‌های قابل توجهی به تأسیسات زیربنایی، نقاط حساس و خطوط انتقال نیرو وارد کند. در طول ۳۰ سال اخیر حداقل ۱۵ متر از عمق سفره‌های آب زیرزمینی در ایران کاسته شده است. دشت اصفهان با متوسط بارندگی ۱۲۵ میلی‌متر، با تراکم پوشش گیاهی پراکنده در بخش‌های مختلف دارای تمرکز بالای چاه‌های بهره‌برداری مجاز و غیرمجاز جهت فعالیت‌های کشاورزی و صنعت است که با توجه به سیستم‌های غلط کشت و آبیاری، تخلیه سفره‌های آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی در منابع آبی دشت اصفهان را به همراه داشته است، لذا دارای احتمال رخداد پدیده فرونشست با نرخ بالا به خصوص در مناطق با خاک سست‌تر و دارای بافت ریزدانه رسی و پوشش گیاهی اندک می‌باشد. در این تحقیق از تکنیک تداخل‌سنجی تفریقی راداری (DInSAR) به منظور تعیین محدوده و نرخ فرونشست در دشت اصفهان استفاده شده است. همچنین سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی به عنوان یکی از عوامل ژئودوتیک مرتبط با فرونشست زمین مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت. در این مقاله تلاش شد تا اولین نتایج حاصل از تداخل‌سنجی تفریقی راداری دشت اصفهان به صورت نقشه فرونشست در سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۵-۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ ارائه شود.

مواد و روش‌ها

جهت بررسی پدیده فرونشست، مطالعه تصاویر راداری و همچنین عواملی که تشدیدکننده نشست زمین هستند، مورد نیاز می‌باشد. در این راستا برای دریافت تصاویر راداری رایگان از آژانس فضایی اروپا در بازه‌های زمانی یک‌ساله، برای دوره آماری (۱۳۹۴-۱۳۹۸) اقدام گردید. پس از پردازش‌های لازم بر روی هر یک از تصاویر در نرم‌افزار تداخل‌سنجی راداری اسنپ ۸، خروجی‌های رادار (فایل‌های فرمت Geotiff)، در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS10.8) فراخوانی شده و



SRTM 1 SEC HGT اثر فاز ناشی از توپوگرافی حذف گردید. برای مشخص شدن میزان جابجایی ارتفاعی در طی بازه زمانی در تصاویر مدل رقومی، زمین به عنوان سطح مبنای ثابت برای همه تصاویر اعمال گردید. به این صورت که با ثابت در نظر گرفتن سطح مبنا میزان اختلاف ایجاد در هر تصویر نسبت به تصویر قبلی مشخص شده و در نهایت با جمع تمام اختلافات ایجاد شده در هر تصویر میزان کلی اختلاف ارتفاع حاصل گشت.

پس از فراخوانی خروجی‌های نرم‌افزار اسنپ در سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS)، در ادامه مناطق دارای فرونشست از سایر نقاط جدا شده و با روش طبقه‌بندی شکست طبیعی (Natural break) در ۵ کلاس نقشه‌های نهایی مناطق دارای فرونشست، کاربری اراضی، افت آب زیرزمینی، میزان میانگین و انحراف معیار فرونشست طی بازه آماری و در نهایت نقشه زمان وقوع بیشترین فرونشست تهیه گردید.

نتایج

نتایج تداخل‌سنجی تفریقی راداری برای ماهواره سنتینل-۱ در این تحقیق نشان می‌دهد، در سال ۱۳۹۴ بیشترین میزان تغییرات در مرکز حوضه و در منطقه شهری استان اصفهان می‌باشد. در سال ۱۳۹۵ نیز بیشترین میزان تغییرات مربوط به منطقه شهری است که دارای همپوشانی تقریبی با نقشه سال ۱۳۹۴ است و حدود ۷۵ درصد از حوضه مورد مطالعه فاقد فرونشست و به رنگ سبز و وسعت مناطق دارای فرونشست خیلی زیاد در حدود ۰/۰۱ درصد مساحت کل منطقه است.

در نقشه سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ میزان تغییرات و جابجایی بیشتری نسبت به دو سال قبل مشاهده می‌شود، به طوری که مناطق بدون فرونشست در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵، به کلاس‌هایی با شدت فرونشست کم و متوسط در سال‌های بعدی تبدیل شده‌اند، همچنین وسعت مناطق با فرونشست خیلی زیاد دارای روند افزایشی می‌باشد که درصد مساحت آن‌ها در سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ به ترتیب، ۰/۹۷، ۰/۳۳ و ۰/۰۶ افزایش یافته است. بررسی نقشه‌های شدت

فرونشست دشت اصفهان در سه سال اخیر (۱۳۹۸ و ۱۳۹۷، ۱۳۹۶) نشان می‌دهد نواحی مرکزی حوضه شهر اصفهان به طور عمده در دو کلاس فرونشست زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند؛ و اکثر مناطق شرقی و شمالی در کلاس‌های کم تا خیلی کم شدت فرونشست قرار می‌گیرند. طبق نقشه کاربری اراضی به وضوح نمایان است که مناطق شهری و کاربری کشاورزی در کلاس‌های شدت فرونشست زیاد و خیلی زیاد قرار دارند.

نرخ فرونشست نیز دارای روندی افزایشی از ۱۲/۵ سانتی‌متر بر سال، در سال ۱۳۹۴، به ۱۹/۹ سانتی‌متر بر سال در سال ۱۳۹۶ و افزایش آن به میزان ۲۰/۸ و ۱۴/۲ سانتی‌متر بر سال در بازه ۱۳۹۷-۱۳۹۸ می‌باشد.

همچنین از مجموع مساحت منطقه مطالعاتی، ۲۳۶۳ کیلومترمربع متوسط سالانه سطح ایستایی منطقه در پهنه افت خیلی زیاد، ۱۸۳۹ کیلومترمربع در پهنه افت زیاد، ۴۱۲۴ کیلومترمربع در پهنه افت متوسط و ۳۶۲۹ کیلومترمربع در پهنه افت کم قرار می‌گیرد.

بیشترین میزان تغییرات فرونشست از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ مربوط به مرکز حوضه، منطقه شهری استان اصفهان می‌باشد که فرونشست ۳-۹/۶ سانتی‌متری را نشان می‌دهد. سال ۱۳۹۶ دارای بیشترین میزان مساحت با نرخ فرونشست (۶/۱۹-۹/۹) سانتی‌متر بر سال در کلاس خیلی زیاد و بعد از آن سال ۱۳۹۷ با نرخ فرونشست (۵/۸-۲۰/۸) سانتی‌متر بر سال در کلاس خیلی زیاد، مساحت بیشتری از وقوع فرونشست را نشان می‌دهد. سال ۱۳۹۸، آخرین سال مورد بررسی در این پژوهش، دارای بیشترین میزان وقوع فرونشست در حوضه اصفهان برخوردار می‌باشد که نرخ نشست زمین در این سال در بازه (۱۴/۲-۴/۷) سانتی‌متر بر سال و در کلاس خیلی زیاد فرونشست قرار دارد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد مناطق دارای حداکثر نرخ فرونشست منطبق بر کاربری شهری و کشاورزی است که بیشترین سهم را در برداشت از آب‌های زیرزمینی دارا هستند.

تهیه شده در بازه آماری، با نقشه پهنه‌بندی افت آب زیرزمینی هم‌راستا است.

واژگان کلیدی: فرونشست، دشت اصفهان، سنتینل-۱، سیستم اطلاعات مکانی، کاربری اراضی

همچنین در نقشه پهنه‌بندی افت آب زیرزمینی مشاهده می‌شود که افزایش در میزان افت آب از سمت شرق حوضه کوهپایه-سگزی به طرف غرب و شمال غرب منطقه یعنی حوضه‌های برخوار و نجف‌آباد دارای سیر صعودی است و تمرکز افت آب در بخش مرکزی حوضه می‌باشد و لذا نقشه‌های فرونشست

مقدمه

با توجه به تعریف ارائه شده توسط انستیتو زمین‌شناسی ایالت متحده، فرونشست زمین شامل پایین افتادن سطح زمین است، که در مقیاس‌های کوچک و بزرگ تحت تأثیر عوامل متعدد رخ می‌دهد. این حرکت قائم رو به پایین سطح زمین می‌تواند با اندکی بردار جابجایی افقی همراه باشد (۲۵، ۲۹).

فرونشست زمین در میان شایع‌ترین خطرات زمین‌شناسی در سراسر جهان است که نشان‌دهنده شکلی از تخریب زمین توسط علل طبیعی یا انسان‌شناختی است (۳). فرونشست در هر منطقه تحت تأثیر یک یا چند عامل مذکور است. استخراج آب‌های زیرزمینی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، از عوامل عمده تخریب و فرونشست زمین است که می‌تواند خسارت‌های قابل‌توجهی به تأسیسات زیربنایی، نقاط حساس و خطوط انتقال نیرو وارد کند (۱۴). این امر در زمینه رشد سریع جمعیت و توسعه صنعتی هست (۱۹). این تخریب در سطح زمین با سرعت آهسته رخ می‌دهد، لذا باعث می‌شود مشکل تا حدود زیادی تا زمانی که اثر قابل‌توجهی ایجاد نمی‌شود، پدیدار نگردد (۲۸). با این حال، فرونشست زمین همچنین می‌تواند به‌عنوان یک فروپاشی ناگهانی از بخش‌های مختلف زمین رخ دهد. عمق سفره‌های آب زیرزمینی ایران در طول ۳۰ سال اخیر، حداقل ۱۵ متر افت داشته است؛ به طوری که هر ساله نیم‌متر افت سطح آبخوان در ایران صورت گرفته است، رخدادی که خسارت‌های هنگفت به تأسیسات زیربنایی و بحران فرونشست را به همراه داشته است (۲۷).

دشت اصفهان با متوسط بارندگی ۱۲۵ میلی‌متر، با تراکم پوشش گیاهی پراکنده در بخش‌های مختلف دارای تمرکز بالای چاه‌های بهره‌برداری مجاز و غیرمجاز جهت فعالیت‌های کشاورزی و صنعت است که با توجه به سیستم‌های غلط کشت و آبیاری، تخلیه سفره‌های آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی در منابع آبی دشت اصفهان را به همراه داشته است، لذا دارای احتمال رخداد پدیده فرونشست با نرخ بالا به‌خصوص در مناطق با خاک سست‌تر و دارای بافت ریزدانه رسی و پوشش گیاهی اندک می‌باشد. این پدیده یک بحران

جدی در اصفهان و بسیاری از دشت‌های آن می‌باشد که هنوز مورد توجه جدی قرار نگرفته است. اگر خشکسالی و روند برداشت بی‌رویه از منابع آبی ادامه یابد، پدیده نشست زمین با گسترش بسیار کند و تدریجی، خسارات ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب ایجاد می‌کند (۱۸). در بررسی فرونشست گام اصلی، تشخیص محدوده و نرخ این پدیده است که امروزه این امکان با استفاده از پردازش تصاویر راداری فراهم شده است. از آنجایی که پدیده فرونشست، پدیده‌ای مکانی است با استفاده از آنالیزهای مکانی و تحلیل‌ها در سیستم اطلاعات مکانی، می‌توان به بررسی عوامل ایجادکننده فرونشست پرداخت. همچنین به‌منظور مدیریت و جلوگیری از خسارات ناشی از فرونشست می‌توان با مطالعه روابط مکانی، میان فرونشست و تأسیسات زیربنایی و نقاط حساس، تصمیم‌گیرندگان را در مدیریت بحران فرونشست یاری نمود. در دو دهه اخیر تکنیک تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه پدیده‌هایی که سبب تغییر شکل سطح زمین می‌شود، به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (۱۶، ۲۳). آبیدين و همکاران (۱) اثرات زیست‌محیطی فرونشست را در مناطق شهری اندونزی بررسی کردند؛ و با تکنیک رادار و سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) نشان دادند که میزان فرونشست دارای تغییرات فضایی و زمانی است و مقدار آن را در این مناطق بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال اندازه‌گیری کردند؛ که ناشی از استفاده بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی، بار سازه‌ها و فعالیت‌های زمین‌شناسی در منطقه است و اثرات فرونشست را به اثرات محیطی، زیرساختی، اقتصادی و اجتماعی طبقه‌بندی کردند. آن (۴) ارتباط بین فرونشست زمین و افت آب‌های زیرزمینی در دشت شمال چین را با استفاده از ماهواره ICESAT بررسی کرد. این منطقه که بزرگ‌ترین تولیدکننده گندم در کشور چین است، حدود ۶۰ درصد به‌شدت به آب‌های زیرزمینی وابسته است. وی نشان داد که میزان افت آب‌های زیرزمینی میزان ۲/۳۰- سانتی‌متر در سال می‌باشد در حالیکه تغییرات ارتفاعی نشست زمین ۸-۵ سانتی‌متر در سال است و عنوان کرد که الگوهای فضایی افت آب‌های زیرزمینی

زیرزمینی، بافت خاک ریزدانه و ضخامت آبرفت زیادی دارند. فتوحی و همکاران (۹) به بررسی میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (DInSAR) در دشت نهبندان-سهل آباد پرداختند. نتایج حاصله از این تحقیق نشان داد که بیشترین میزان فرونشست مربوط به محدوده زمین‌های کشاورزی در مرکز و شمال دشت، حدود ۱۳/۴ سانتی‌متر در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و در بازه ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ حدود ۱۳/۱ سانتی‌متر فرونشست است. آروین و همکاران (۵) به مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداختند. در این پژوهش در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۹۷ از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ و روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در بررسی و میزان گسترش فرونشست استفاده گردید. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که منطقه مطالعاتی در این بازه زمانی ۱۳ سانتی‌متر فرونشست داشته است. قره چلو و همکاران (۲۰) به ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب‌های زیرزمینی به کمک داده ماهواره‌ای سنتینل-۱ و الوس-۱ در دشت مشهد پرداختند. برای تعیین میزان فرونشست از طول‌موج‌های L و C در سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۹۷ استفاده گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که مناطق با کاربری زراعی و باغات با بیشترین سهم در برداشت آب زیرزمینی، دارای حداکثر فرونشست هستند. نرخ و دامنه فرونشست رخ داده در منطقه در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ روند افزایشی را نشان می‌دهد. در این پژوهش به بررسی وضعیت فرونشست در دشت اصفهان پرداخته شد. در سال‌های اخیر میزان ترک‌ها و پایین‌افتادگی زمین در اراضی کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی، خیابان‌ها و زیرساخت‌ها نمایان شده است به‌گونه‌ای که در بخش کشاورزی سبب تحلیل و از بین رفتن بخشی از زمین‌ها شده است. همچنین افت زمین در مناطق حساس مثل فرودگاه‌ها و جاده‌ها به یک خطر جبران‌ناپذیر در سطح مناطق شهری تبدیل شده است. در این راستا، تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از عوامل ژئودوتیک موثر بر فرونشست زمین مورد تجزیه

و فرونشست آن‌طور که انتظار می‌رفت ندارد. اسمیت و همکاران (۲۴) در پژوهش خود مبنی بر، از دست دادن دائمی ذخایر آب زیرزمینی در دره سن ژواکون کالیفرنیا به این نتیجه رسیدند که اگر آب بیش‌ازحد از آبخوان‌ها استخراج شود، مخصوصاً در نواحی که لایه‌های خاک رس دارند، متراکم شدن لایه‌های خاک به دلیل افت فشار آب باعث ایجاد حالت غیرقابل‌برگشت می‌شود و توانایی خاک برای حفظ و نفوذ آب از دست می‌رود، از این‌رو آبخوان ظرفیت دریافت آب خود را به‌طور دائم از دست می‌دهد. در ایران نیز، فرونشست بسیاری از دشت‌ها با استفاده از تداخل‌سنجی راداری بررسی شده است، معق و همکاران (۱۷) نرخ و محدوده فرونشست دشت رفسنجان را با پردازش تصاویر ماهواره‌های ENVISAT، ALOS و Sentinel در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ محاسبه کردند. رادوتو و کنستانتین (۲۱) نقش بازتاب زمانی بر تخریب مناطق شهری به دلیل استخراج آب‌های زیرزمین و رخداد پدیده فرونشست را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها مبنی بر این بود که روش‌های تداخل‌سنجی راداری (Synthetic Aperture Radar interferometry) پیشرفت قابل‌توجهی در دهه‌های گذشته داشته‌اند و می‌توانند برای بررسی رخداد پدیده فرونشست مورد استفاده قرار بگیرند.

صالحی‌متعهد (۲۲) به ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل‌سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و مطالعه دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد پرداختند. به این منظور ابتدا به کمک روش ترازبایی دقیق که قدیمی‌ترین داده‌ها را از فرونشست زمین در اختیار قرار می‌دهد، سابقه فرونشست بررسی گردیده است. سپس پردازش تداخل‌سنجی راداری برای کل دشت مشهد به کمک ۲۳ تصویر ماهواره ENVISAT انجام گرفته است. نتایج نشان داد که دو کاسه فرونشستی یکی از شمال غرب و دیگری از جنوب شرق وارد حریم شهر مشهد شده است و در دشت مشهد در سال ۱۳۸۹ محدوده‌ای به وسعت ۷/۱۳ کیلومترمربع با نرخ بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال، در حال فرونشست بوده است. بیشترین نرخ فرونشست در مناطقی ایجاد شده است که به‌غیر از افت شدید سطح آب

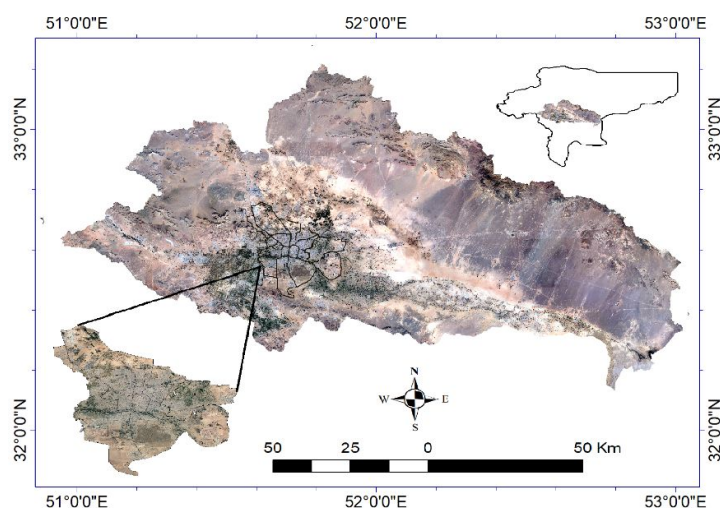
مجاورت ایران با منطقه نزول پرفشارهای جنب مداری باعث شده که نوار بیابانی نیم کرده شمالی از قلب این کشور عبور کند و شرایط نامساعد طبیعی را بر وسعت زیادی از این سرزمین حکم فرما سازد به طوری که ده درصد از بیابان‌های ایران در استان اصفهان قرار دارند. بارندگی در برخوار ۷۵-۱۰۰ میلی‌متر و در نجف‌آباد و کوهپایه ۱۱۰-۱۶۰ میلی‌متر است. سطح منطقه در حدود ۱۵۷۰ متر از سطح عمومی دریا و در شمال و شرق محدود به کویر است و در غرب و جنوب به کوه‌های زاگرس منتهی می‌شود. در این منطقه حداکثر درجه حرارت در تابستان ۳۹ درجه سانتی‌گراد است که تابستان‌های گرم و خشک را ایجاد می‌کند و در زمستان حداکثر آن به ۱۸- درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همچنین میانگین دمای سالانه ۲۷ درجه سانتی‌گراد و تعداد روزهای یخبندان سالانه ۹۱ روز است. منطقه مورد مطالعه در صفحه‌ای نسبتاً مسطح با شیب حدود ۲ درصد و در شمال شرقی با زمین‌های مسطح با رسوبات آبرفتی واقع شده و دارای ۱۸۵ چاه پیژومتر است. این منطقه در دامنه کوه‌های زاگرس و در کنار زاینده‌رود واقع شده است (۲۷).

تحلیل قرار گرفت. در ادامه تحقیق از تکنیک تداخل‌سنجی تفریقی راداری (DInSAR) به منظور تعیین محدوده و نرخ فرونشست در دشت اصفهان استفاده شده است و در این مقاله تلاش شد تا اولین نتایج حاصل از تداخل‌سنجی تفریقی راداری دشت اصفهان به صورت نقشه فرونشست در سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۵-۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ ارائه شود. از طرف دیگر، تحلیل‌های مکانی ارائه شده در این مقاله در بررسی خطرپذیری زیرساخت‌های موجود می‌تواند به مسئولین در تصمیم‌گیری‌های آتی جهت ارائه هشدارهای به موقع کمک زیادی نماید.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

اصفهان یکی از استان‌های میانه ایران است. منطقه مورد مطالعه (شکل ۱)، با مساحت ۱۱۹۲۳ کیلومتر مربع شامل سه منطقه در استان اصفهان از جمله کوهپایه-سگری، اصفهان-برخوار و نجف‌آباد می‌باشد که در محدوده طول شرقی ۵۱°۰' تا ۵۳°۰' و عرض شمالی ۳۲°۰' تا ۳۳°۲' واقع شده است.



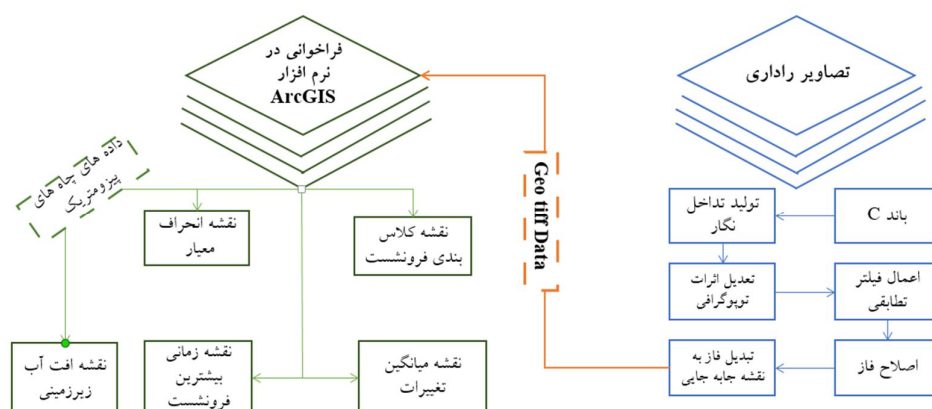
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان اصفهان - دشت اصفهان و منطقه شهری

Fig 1. Location of the study area in Isfahan province - Isfahan plain and urban area

روش کار

جهت بررسی پدیده فرونشست، مطالعه تصاویر راداری و همچنین عواملی که تشدیدکننده نشست زمین هستند، مورد نیاز می‌باشد (۲). ماهواره سنتینل-۱، اولین ماهواره از مجموعه ماهواره‌های آژانس فضایی اروپا با عنوان Sentinel است. این ماهواره به یک سنجنده راداری پیشرفته برای تهیه تصاویر سطح زمین در تمام ساعات شبانه‌روز و تمامی شرایط آب و هوایی مجهز شده است (۸). در این راستا برای دریافت تصاویر راداری رایگان از آژانس فضایی اروپا در بازه‌های زمانی یک‌ساله، برای دوره آماری (۱۳۹۸-۱۳۹۴) اقدام گردید. پس از پردازش‌های لازم بر روی هر یک از تصاویر در نرم‌افزار تداخل‌سنجی راداری اسنپ ۸، خروجی‌های رادار (فایل‌های فرمت Geotiff)، در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS10.8) فراخوانی شده و جهت تهیه نقشه نهایی فرونشست مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین، به منظور تعیین نقش عوامل ژئودوتیک (آب زیرزمینی، شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، پوشش گیاهی و ...) بر احتمال وقوع فرونشست، نوسانات سطح آب زیرزمینی به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر این پدیده (۲۶) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به همین علت پس از دریافت داده از شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۸۵ پیژومتر معرف منطقه مطالعاتی با پراکنش و داده‌های مناسب انتخاب شد و داده‌های سالیانه سطح ایستابی چاه‌های پیژومتریک سه حوضه نجف‌آباد، اصفهان برخوار و

کوهپایه سگری در دوره آماری ۱۳۹۷-۱۳۸۱ در اکسل تهیه گردید. جهت تهیه لایه‌های رستری میزان افت آب منطقه، مقادیر متوسط سطح ایستابی هر چاه در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS10.8) فراخوانی شدند و از آنجایی که روش وزن معکوس فاصله (Inverse Distance Weighting) با دارا بودن مقدار کم RMSE و مقدار بالای R^2 بهترین برآورد را در منطقه داشته است لذا در پهنه‌بندی از این روش استفاده گردید (۲۷) و پس از رتبه دهی لایه‌ها نهایتاً نقشه کلاس‌بندی شده افت سطح آب زیرزمینی برای کل دوره مطالعاتی در چهار کلاس افت آب کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه گردید. همچنین، شناسایی نقاط آسیب‌پذیر همچون (مناطق مسکونی، آثار باستانی، پل‌ها، بیمارستان‌ها، خطوط انتقال آب و برق و ...) که در صورت رخداد فرونشست دچار خسارات جبران‌ناپذیر می‌گردند دارای اهمیت ویژه می‌باشد. در این تحقیق جهت ارائه هشدارهای لازم، پس از دریافت اطلاعات از شهرداری استان اصفهان، مناطق پرخطر به نقاط استراتژیک درجه ۱ (مناطق مسکونی، آثارهای باستانی، بیمارستان‌ها خطوط انتقال آب و برق)، درجه ۲ (پادگان‌ها، ایستگاه‌های راه آهن، نیروگاه‌ها) و درجه ۳ (کارخانه‌ها، معادن، مرغداری‌ها و ...) تقسیم‌بندی گردید. سپس نقاط استراتژیک درجه ۱ در نرم‌افزار بر روی نقشه متوسط فرونشست فراخوانی شدند. شکل ۲ مراحل کلی انجام تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲. فلوچارت پژوهش

Fig 2. Research flowchart

SAR می‌باشد (۶) دارای پولاریزیشن عمودی عمودی (Vertical Vertical) با دوره برداشت زمانی یک‌ساله با عرض برداشت ۲۵۰ کیلومتر است. جزئیات تصاویر مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جهت انجام این پژوهش از تصاویر راداری سنجنده سنتینل-۱ باند C در بازه زمانی، ۱۳ دسامبر ۱۳۹۴ تا ۴ دسامبر ۱۳۹۸ استفاده شد. داده‌های SAR موجود شامل ۵ تصویر IW-SLCSAR است، محصول سطح یک (L1) که از دسته تصاویر

جدول ۱. تصاویر مورد استفاده در تداخل‌سنجی

Table 1. Satellite images used for interference

ردیف	فرمت تصویر	حالت تصویربرداری	تصویر ۱ (master)	تصویر ۲ (slave)
۱	SLC	IW	۲۰۱۵-۱۲-۱۳	۲۰۱۶-۱۲-۰۷
۲	SLC	IW	۲۰۱۶-۱۲-۰۷	۲۰۱۷-۱۲-۱۴
۳	SLC	IW	۲۰۱۷-۱۲-۱۴	۲۰۱۸-۱۲-۰۹
۴	SLC	IW	۲۰۱۸-۱۲-۰۹	۲۰۱۹-۱۲-۰۴
۵	SLC	IW	۲۰۱۹-۱۲-۰۴	۲۰۲۰-۱۲-۱۰

$$\text{Subsidence rate: } \frac{LOS \text{ deformation}}{\Delta t} \times D \quad [2]$$

که در اینجا Δt خط مبنای تعداد روزها و D مجموع تعداد روزهای یک سال می‌باشند (۱۲).

در سال ۱۳۹۴، منطقه مورد مطالعه در دو تصویر ماهواره‌ای قرار دارد لذا تصویر دریافتی مربوط به سال ۱۳۹۴ با همان تاریخ و ویژگی، با بخش بالایی آن تصویر دریافت گردید. همچنین، منطقه مورد پژوهش در دو پهنای تداخل‌سنجی (The Interferometric Wide) قرار دارد لذا جهت دریافت اولین نقشه فرونشست که در آن سال ۱۳۹۴ به‌عنوان تصویر اصلی (Master) و سال ۱۳۹۵ به‌عنوان تصویر وابسته (Slave) است. برای هر سال تصویر با فرمت Orb استخراج شده مرحله قبل وارد بخش بعدی شده و تصاویر فاز و کوهرنسی تشکیل می‌شوند.

سپس دو تصویر خروجی مرحله قبل به روش Merg، یک تصویر خروجی می‌دهد. در مرحله تشکیل تصویر Stack، در بخش Band تصویر اول باید به‌عنوان تصویر اصلی و تصویر دوم به‌عنوان تصویر وابسته باشد. تصویر اصلی تصویری است که از لحاظ هندسی و رادیومتریکی مبنای است و تصویر وابسته

تصاویر به‌دست آمده از تکنیک تداخل‌سنجی تفریقی راداری از نظر موقعیت جغرافیایی با مرز منطقه مورد نظر یکسان‌سازی گردید و برای شناسایی نقاط مشخص شده در تصاویر بر روی منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. سپس نرخ و میزان فرونشست از طریق نقاط نمایان شده در تصاویر راداری برای منطقه مورد مطالعه به‌وسیله نرم‌افزار اسنپ ۸ مورد محاسبه قرار گرفتند.

در فاز تداخل‌سنجی تفریقی، هر فرینچ (نقطه) یا یک سیکل فاز کامل (2π اختلاف فاز رادیان) نشان‌دهنده $\lambda/2$ (صف طول موج رادار) جابجایی زمین در امتداد خط دید رادار است که در آن λ طول موج پالس رادار است (۱۳، ۱۵).

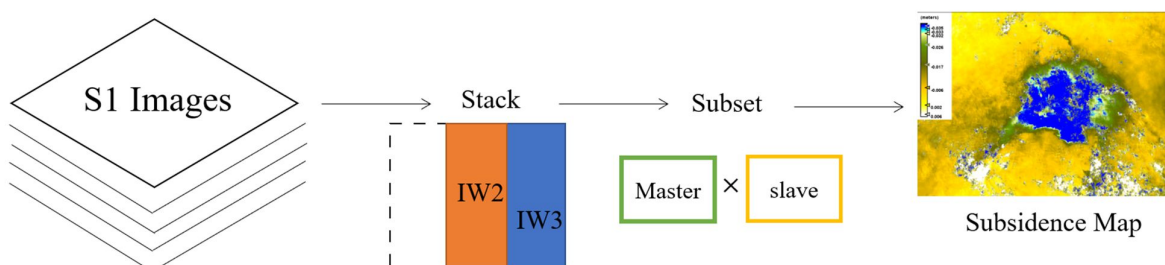
با توجه به اینکه طول موج باند C سنجنده سنتینل-۱ برابر ۵ سانتی‌متر است، بنابراین $\lambda/2$ برابر با 2.5 خواهد بود. در نتیجه رابطه ۱ بیانگر میزان فرونشست در خط دید رادار می‌باشد:

$$LOS \text{ deformation} = N \times 2.5 \quad [1]$$

که در اینجا N مجموع کل تعداد رنگ‌های تخصیص داده شده است؛ بنابراین جهت محاسبه نرخ فرونشست طبق رابطه ۲ خواهیم داشت:

وابسته است. پیکسل‌های کوه‌رنسی بین (۱-۰) است که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد محاسبات در آن پیکسل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین به‌منظور کاهش نویز و افزایش نسبت سیگنال به نویز در تداخل‌سنج‌های تولیدشده از فیلتر گلدشتاین استفاده شد (۱۰)(شکل ۳).

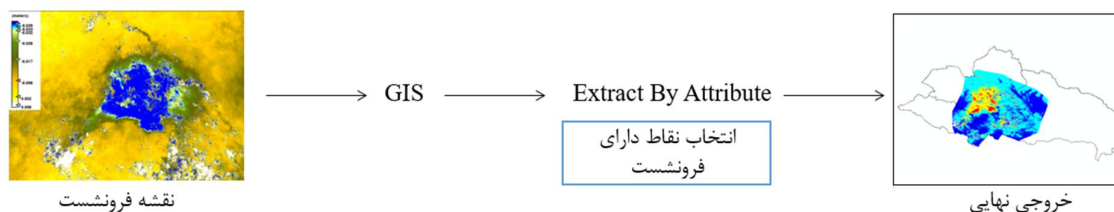
از لحاظ هندسی و رادیومتریکی با تصویر اصلی تطابق می‌یابد. تصویر فاز تصویری است که نشان‌دهنده اختلاف پرتوهای ارسالی راداری و سیگنال‌های دریافتی برای هر یک از پوشش‌ها است که نشان‌دهنده تفاوت پیکسل‌هایی است که در داخل تصویر فاز وجود دارد. تصویر کوه‌رنسی نشان‌دهنده میزان تطابق سیگنال‌های تداخل‌سنجی تصویرهای اصلی و



شکل ۳. گردش کار داده‌های Sentinel-1 در بستر برنامه کاربردی (SNAP)
Fig 3. Sentinel-1 data workflow in the application platform (SNAP)

پس از فراخوانی خروجی‌های نرم‌افزار اسنپ در سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS)، در ادامه مناطق دارای فرونشست از سایر نقاط جدا شده و با روش طبقه‌بندی شکست طبیعی (Natural break) در ۵ کلاس نقشه‌های نهایی مناطق دارای فرونشست، کاربری اراضی، افت آب زیرزمینی، میزان میانگین و انحراف معیار (Standard deviation) فرونشست طی بازه آماری و در نهایت نقشه زمان وقوع بیشترین فرونشست (Lowest Position Map) تهیه گردید (شکل ۴).

جهت محاسبه دقیق فرونشست، اثر توپوگرافی سطح زمین باید حذف شود (۷) به همین علت بر اساس یک مدل رقومی (Interferogram Formation) و با استفاده از DEM SRTM اثر فاز ناشی از توپوگرافی حذف گردید. برای مشخص شدن میزان جابجایی ارتفاعی در طی بازه زمانی در تصاویر مدل رقومی، زمین به‌عنوان سطح‌مبنای ثابت برای همه تصاویر اعمال گردید. به این صورت که با ثابت در نظر گرفتن سطح‌مبنا میزان اختلاف ایجاد در هر تصویر نسبت به تصویر قبلی مشخص شده و در نهایت با جمع تمام اختلافات ایجادشده در هر تصویر میزان کلی اختلاف ارتفاع حاصل گشت.



شکل ۴. گردش کار خروجی نرم‌افزار تداخل‌سنجی راداری در نرم‌افزار ArcGIS
Fig 4. Radar interference software output workflow in ArcGIS software

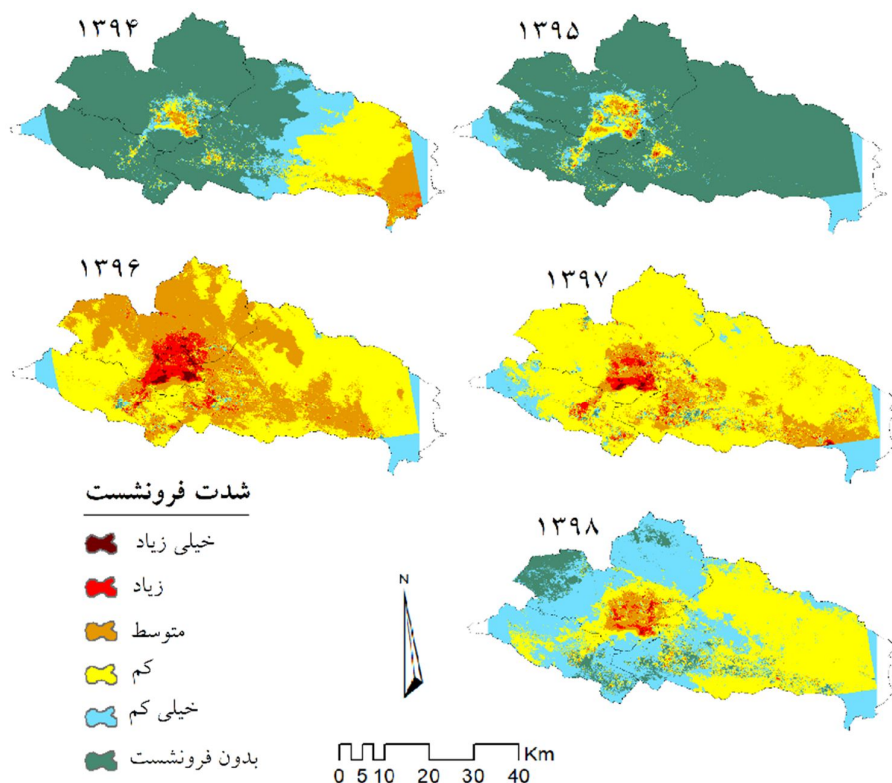
نتایج

شکل (۵) نتایج ارزیابی فرونشست بین سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در سال ۱۳۹۴ بیشترین میزان تغییرات در مرکز حوضه و در منطقه شهری استان اصفهان می‌باشد. در سال ۱۳۹۵ نیز بیشترین میزان تغییرات مربوط به منطقه شهری می‌باشد که دارای همپوشانی تقریبی با نقشه سال ۱۳۹۴ است و حدود ۷۵ درصد از حوضه مورد مطالعه فاقد فرونشست و به رنگ سبز و وسعت مناطق دارای فرونشست خیلی زیاد در حدود ۰/۰۱ درصد مساحت کل منطقه است.

در نقشه سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ میزان تغییرات و جابجایی بیشتری نسبت به دو سال قبل مشاهده می‌شود، به طوری که مناطق بدون فرونشست در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵، به کلاس‌هایی با شدت فرونشست کم و متوسط در سال‌های بعدی تبدیل شده‌اند، همچنین وسعت مناطق با

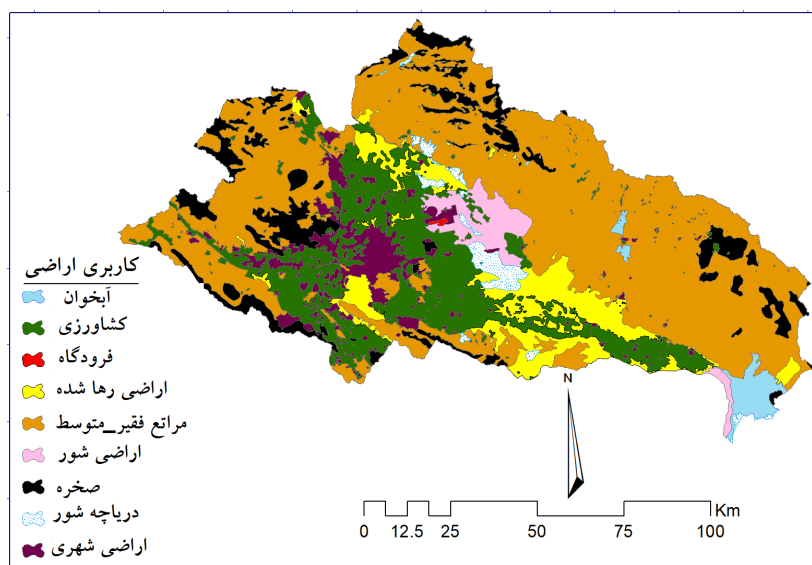
فرونشست خیلی زیاد دارای روند افزایشی می‌باشد که درصد مساحت آن‌ها در سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ به ترتیب، ۰/۹۷، ۰/۳۳ و ۰/۰۶ افزایش یافته است. بررسی نقشه‌های شدت فرونشست دشت اصفهان در سه سال (۱۳۹۶، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸) نشان می‌دهد نواحی مرکزی حوضه شهر اصفهان به طور عمده در دو کلاس فرونشست زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند؛ و اکثر مناطق شرقی و شمالی در کلاس‌های کم تا خیلی کم شدت فرونشست قرار می‌گیرند. طبق نقشه کاربری اراضی (شکل ۶) به وضوح نمایان است که مناطق شهری و کاربری کشاورزی در کلاس‌های شدت فرونشست زیاد و خیلی زیاد قرار دارند.

همچنین جدول ۳ نیز، نشانگر افزایش نرخ فرونشست در کلاس خیلی زیاد از ۱۲/۵ سانتی‌متر بر سال، در سال ۱۳۹۴ به ۱۹/۹ سانتی‌متر بر سال در سال ۲۰۱۷ و افزایش آن به میزان ۲۰/۸ و ۱۴/۲ سانتی‌متر بر سال در بازه ۱۳۹۸-۱۳۹۷ است.



شکل ۵. نقشه شدت فرونشست در بازه زمانی ۱۳۹۴-۱۳۹۸

Fig 5. Map of subsidence intensity in the period 1394-1398



شکل ۶. کاربری اراضی منطقه مطالعاتی

Fig 6. Land use of the study area

جدول ۲. مقادیر نرخ فرونشست بر حسب سانتی متر

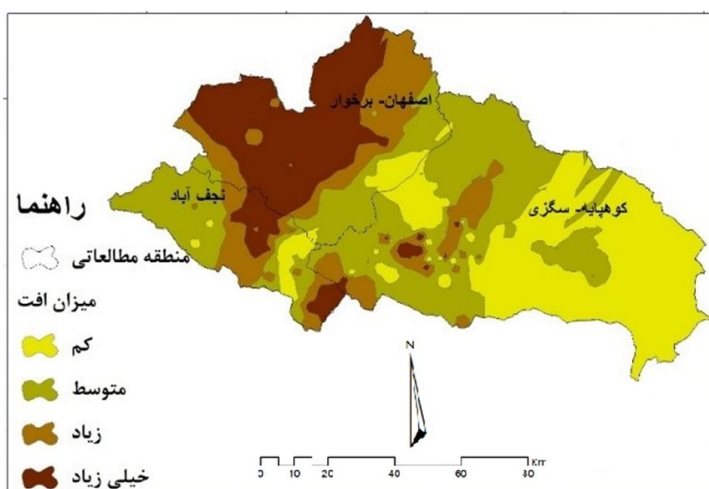
Table 2. Rates of land subsidence (cm)

ردیف	سال	شدت فرونشست	نرخ فرونشست (سانتی متر)
۱	۱۳۹۴	خیلی زیاد	۴/۳ - ۱۲/۵
۲	۱۳۹۵	خیلی زیاد	۴/۵ - ۱۳/۱
۳	۱۳۹۶	خیلی زیاد	۶/۹ - ۱۹/۹
۴	۱۳۹۷	خیلی زیاد	۵/۸ - ۲۰/۸
۵	۱۳۹۸	خیلی زیاد	۴/۷ - ۱۴/۲

مطالعاتی به خصوص حوضه اصفهان برخوار و نجف آباد در مرحله بحرانی قرار دارند لذا، با توجه به محاسبات صورت گرفته و تجزیه و تحلیل سطح ایستابی در بازه آماری ۱۶ ساله، آب زیرزمینی دارای روندی نزولی می باشد.

منطقه مورد مطالعه به علت قرار داشتن در تقسیمات دشت های ممنوعه مجاز به حفر چاه نمی باشند در صورتی که برخلاف ممنوعه بودن آنها چاه های غیرمجاز زیادی برای انجام فعالیت های گسترده کشاورزی، حفاری شده است که اطلاعات آن در شرکت مدیریت منابع آب وجود ندارد.

نقشه افت سطح ایستابی (شکل ۷)، در چهار کلاس افت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی شده است. نتایج ارزیابی این نقشه نشان می دهد که از مجموع مساحت منطقه مطالعاتی، ۲۳۶۳ کیلومتر مربع در پهنه افت خیلی زیاد، ۱۸۳۹ کیلومتر مربع در پهنه افت زیاد، ۴۱۲۴ کیلومتر مربع در پهنه افت متوسط و ۳۶۲۹ کیلومتر مربع در پهنه افت کم قرار می گیرد. مجموع پهنه های زیاد تا خیلی زیاد دارای مساحتی در حدود ۴۲۰۲ کیلومتر مربع وسعت دشت را به خود اختصاص می دهد. بنابراین با توجه به موارد مذکور، می توان گفت که سه حوضه

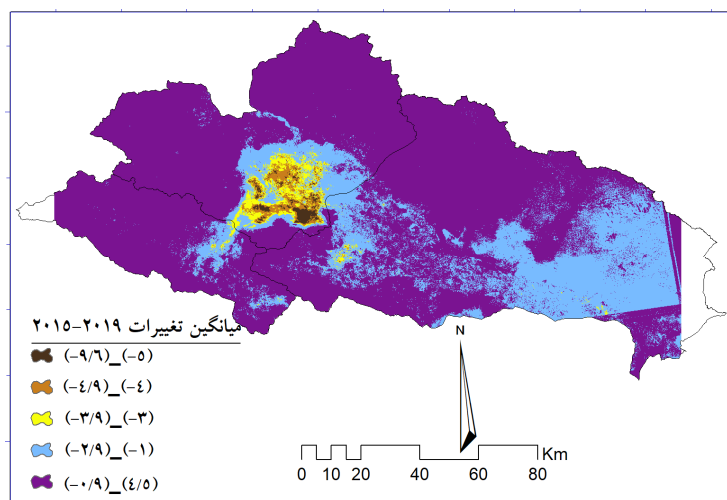


شکل ۷. پهنه‌بندی افت آب‌های زیرزمینی کل دوره مطالعاتی

Fig 7. The zoning of decreased groundwater level for the whole study period

منطقه شهری استان اصفهان است که این نقاط بیشترین سهم را در برداشت از آب‌های زیرزمینی سهمیم هستند و فرونشست ۳/۶-۹ سانتی متری را نشان می‌دهند.

شکل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب نقشه متوسط فرونشست، انحراف معیار و زمان وقوع بیشترین مقدار فرونشست در دوره را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۸، بیشترین میزان تغییرات فرونشست از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ مربوط به مرکز حوضه،



شکل ۸. نقشه متوسط فرونشست دشت اصفهان

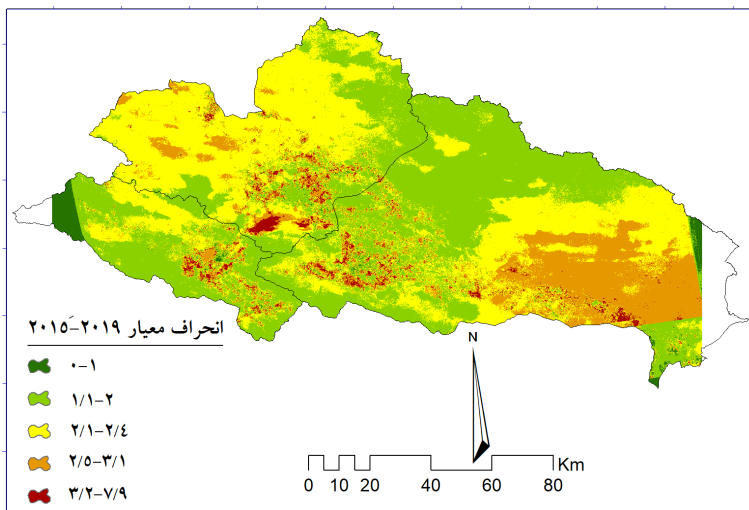
Fig 8. Map of the average land subsidence in Isfahan plain

باشد، نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها زیاد است. لذا انحراف معیار، عددی برای نشان دادن میزان پراکندگی اعضای یک مجموعه از داده‌ها است. همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد

هر چه انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها عدد پایین‌تری باشد، نشانه آن است که داده‌ها به میانگین نزدیک‌تر هستند و پراکندگی اندکی دارند. در صورتی که انحراف معیار عدد بزرگی

تغییرات زیادتری در واحد زمان هستند، فرونشست نیز در این نواحی تغییرات بیشتری نسبت به سایر نقاط دارد.

بیشترین میزان تغییرات تا ۷/۹ سانتی متری به رنگ قرمز و در مرکز حوضه مورد مطالعه است. به طور کلی مناطقی که دارای

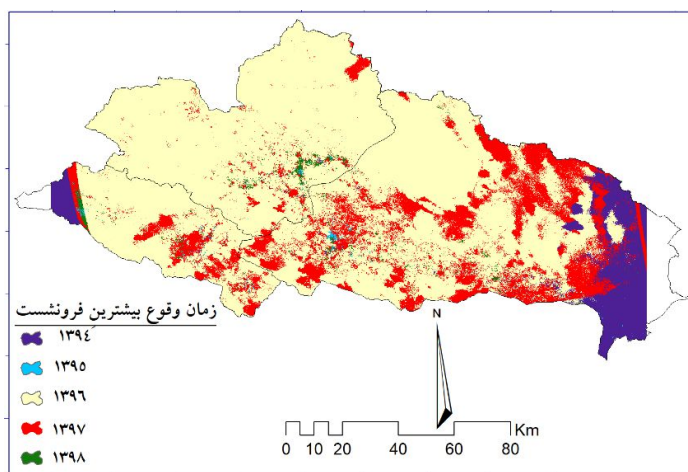


شکل ۹. نقشه انحراف معیار دشت اصفهان

Fig 9. Standard deviation map of Isfahan plain

فرونشست را نشان می دهد. طبق نقشه تهیه شده در سال ۱۳۹۸، آخرین سال مورد بررسی در این پژوهش، بیشترین میزان وقوع فرونشست به رنگ سبز در حوضه اصفهان برخوردار می باشد که نرخ نشست زمین در این سال در بازه (۴/۷ - ۱۴/۲) سانتی متر بر سال و در کلاس خیلی زیاد فرونشست قرار دارد.

با توجه به نقشه زمان وقوع بیشترین رخداد فرونشست در شکل ۱۰، سال ۱۳۹۶ دارای بیشترین میزان مساحت با نرخ فرونشست (۶/۱۹-۹/۹) سانتی متر بر سال در کلاس خیلی زیاد و بعد از آن سال ۱۳۹۷ با نرخ فرونشست (۵/۸-۲۰/۸) سانتی متر بر سال در کلاس خیلی زیاد، مساحت بیشتری از وقوع

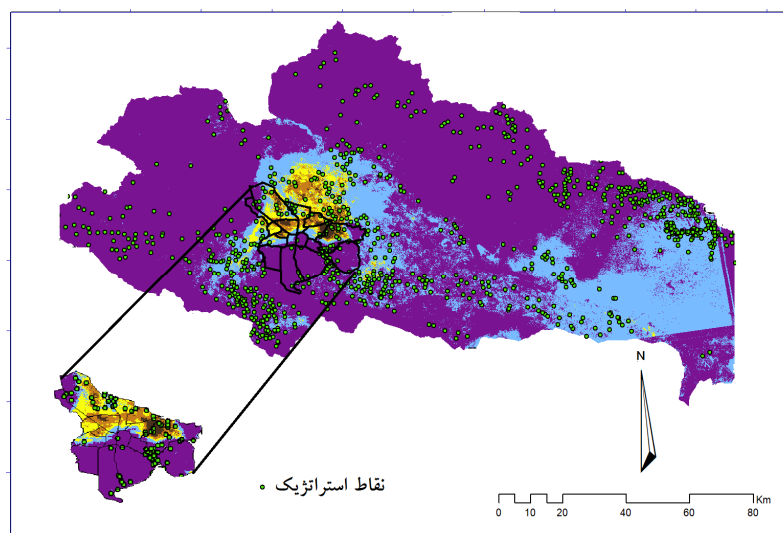


شکل ۱۰. مکان وقوع بیشترین میزان فرونشست در سال های مختلف

Fig 10. Location of the largest amount of subsidence in different years

فرونشست و نقاط استراتژیک، نقشه پراکندگی نقاط در منطقه موردپژوهش حاصل شد (شکل ۱۱). همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، قسمت بسیار زیادی از نقاط استراتژیک در منطقه شهری استان اصفهان که دارای بیشینه میانگین شدت فرونشست است قرار دارند.

فرونشست‌ها می‌تواند باعث آسیب‌دیدگی تأسیسات زیربنایی و نقاط استراتژیک شوند که از جمله آن‌ها می‌توان به خطوط انتقال نیرو، نیروگاه‌ها و سدها اشاره کرد. به‌منظور تحلیل این مخاطرات، پس از دریافت اطلاعات مکانی نقاط استراتژیک در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی فراخوانی شده و مورد پردازش قرار گرفتند. با تلفیق نقشه متوسط



شکل ۱۱. نقاط استراتژیک بر روی نقشه متوسط فرونشست دشت اصفهان
Fig 11. Strategic points on the average subsidence map of Isfahan plain

میزان فرونشست در راستای خط دید ماهواره را نشان می‌دهد در واقع در این تحقیق قابلیت روش تداخل‌سنجی راداری در دشت اصفهان به تصویر کشیده شده است. به‌منظور کاهش اثرات اتمسفر، خطاهای مربوط به عمل بازیابی فاز و افزایش نسبت سیگنال به نویز، فیلتر گلدشتاین اعمال گردید. نتایج نشان دادند که فرونشست در این دشت، از سال ۱۳۹۴ وجود داشته، ولی نرخ آن در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت می‌باشد، به‌طوری‌که نرخ فرونشست در کلاس خیلی زیاد از ۱۲/۵ سانتی‌متر بر سال، در سال ۱۳۹۴ به ۱۹/۹ سانتی‌متر بر سال در سال ۲۰۱۷ و افزایش آن به میزان ۲۰/۸ و ۱۴/۲ سانتی‌متر بر سال در بازه ۱۳۹۸-۱۳۹۷ رسیده است.

همچنین مقدار تغییرات فرونشست دشت اصفهان از مناطق دارای برآمدی به ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر به مقدار بیشینه

بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست به‌عنوان یک بحران ملی و جهانی، در نوع خود پدیده‌ای پیچیده و بغرنج است که مدیریت و مقابله مؤثر در راستای کاهش وقوع فرونشست و اثرات آن نیازمند رویکردی جامع در مدیریت ریسک فرونشست دارد. برای مدیریت ریسک فرونشست لازم به تعیین میزان نرخ و شدت فرونشست رخ داده در سال‌های اخیر است.

در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، پهنه و نرخ فرونشست دشت اصفهان در ۵ سال، (۱۳ دسامبر ۱۳۹۴ تا ۴ دسامبر ۱۳۹۸) محاسبه گردد. همچنین بررسی میزان تطابق نقاط دارای فرونشست با افت آب زیرزمینی به‌عنوان یک عامل ژئودوتیک مؤثر بر این پدیده مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی‌که تداخل‌سنجی راداری

توسعه شهرسازی و راه و جاده‌سازی‌ها باعث تخریب سرزمین و گسترش رخداد فرونشست شده‌اند، نتایج این پژوهش با مطالعات احمدی و همکاران (۲) و تورانی و همکاران (۲۶) دارای مشابهت و همپوشانی است.

با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان، ضمن شناسایی نقاط پرخطر، هشدارهای لازم جهت جلوگیری از خسارات هنگفت را ارائه نمود. این تحقیق جهت مدیریت ریسک وقوع فرونشست، ضرورت مدیریت منابع آب زیرزمینی و همچنین اصلاح تغییرات کاربری صورت گرفته در منطقه را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که اولویت مدیریتی کمتر در مناطق دارای فرونشست کم و خیلی کم به این معنا نیست که این نقاط تحت تأثیر آسیب ناشی از فرونشست قرار ندارند و یا همیشه در کلاس شدت فرونشست کم قرار گرفته‌اند، لذا این نقاط باید حتماً در امر مدیریت ریسک رخداد فرونشست مورد توجه قرار بگیرند. همچنین توصیه می‌گردد برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، در سایر تحقیقات نقش گسل و بافت خاک منطقه در نشست زمین، مورد توجه قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

مؤلفان مقاله از آژانس فضایی اروپا به خاطر فراهم کردن داده‌های راداری Sentinel-1A و از شهرداری استان اصفهان بابت حمایت از این پژوهش قدردانی می‌کنند.

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی با عنوان بررسی روند فرونشست زمین متأثر از شاخص‌های تخریب زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفریقی راداری (DInSAR) (مطالعه موردی: دشت اصفهان) مصوب شهرداری اصفهان در سال ۱۳۹۸ با شماره ۱۲۱/۹۸/۴۵۹۴ است که با حمایت دانشگاه تهران اجرا شده است.

فرونشست (۹/۶-) سانتی‌متر در منطقه شهری دشت اصفهان رسیده است. روش تداخل‌سنجی راداری دقت بسیار بالایی در اندازه‌گیری تغییر شکل‌های سطح زمین دارد و درعین حال پوشش وسیع و پیوسته‌ای را از منطقه فراهم می‌کند و با توجه به این امر تعیین پهنه منطقه تحت تأثیر فرونشست به راحتی ممکن گردید که با پژوهش حقیقت‌مهر و همکاران (۱۱) مطابقت دارد. لذا کاربری شهری دشت اصفهان دارای بیشترین تغییرات فرونشست می‌باشد.

نقشه پهنه‌بندی افت آب‌های زیرزمینی نیز بیانگر این است که با توجه به مساحت منطقه مورد پژوهش، ۲۳۶۳ کیلومترمربع در پهنه افت خیلی زیاد، ۱۸۳۹ کیلومترمربع در پهنه افت زیاد، ۴۱۲۴ کیلومترمربع در پهنه افت متوسط و ۳۶۲۹ کیلومترمربع در پهنه افت کم قرار می‌گیرد و مجموع پهنه‌های زیاد تا خیلی زیاد دارای مساحتی در حدود ۴۲۰۲ کیلومترمربع وسعت دشت را به خود اختصاص می‌دهد. در واقع آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع آبی کشور محسوب می‌شوند و اطلاع یافتن از میزان تغییرات این منابع به منظور مدیریت صحیح آن اهمیت زیادی دارد. در نقشه پهنه‌بندی افت آب زیرزمینی مشاهده می‌شود که افزایش در میزان افت آب از سمت شرق حوضه کوهپایه-سگزی به طرف غرب و شمال غرب منطقه یعنی حوضه‌های برخوار و نجف‌آباد دارای سیر صعودی می‌باشد و تمرکز افت آب در بخش مرکزی حوضه و مربوط به منطقه شهری اصفهان می‌باشد. همچنین، نقشه‌های فرونشست تهیه‌شده در بازه آماری، بیشترین فرونشست رخ داده را در منطقه شهری نشان می‌دهد که با نقشه پهنه‌بندی افت آب زیرزمینی هم‌راستا است.

با توجه به نتایج و نقشه‌های تهیه‌شده با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی، مشخص شد که تأسیسات زیربنایی از قبیل راه‌های اصلی، بزرگراه‌ها و فرودگاه در منطقه شهری در معرض آسیب بحران فرونشست با شدت بیشتری هستند. از طرف دیگر تغییرات کاربری اراضی نادرست و

منابع

1. Abidin H Z, Andreas H, Gumilar I, Sidiq TP, Gamal M. 2015. Environmental impacts of land subsidence in urban areas of Indonesia. In FIG Working Week. pp. 1-12.
2. Ahmadi N, Mousavi Z, Masoumi Z. 2018. Study of subsidence of Khorramdareh plain using radar interferometry technique and its hazards. Remote Sensing and GIS Iran, 10 (3), 52-33. (In Persian)
3. Allaby M. 2013. Dictionary of Geology and Earth Sciences (4th ed.). Oxford University Press.
4. An K. 2015. Investigating the Relationship between Land Subsidence and Groundwater Depletion in the north Plain Using GRACE and ICESat Master's Thesis, University of California, Los Angeles. p44.
5. Arvin A, Wahabzadeh Gh, Mousavi R, Bakhtiari Kia M. 2020. Spatial modeling of land subsidence in the south of Minab watershed using remote sensing and GIS. Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources.19-34. (In Persian)
6. Cigna F, Bateson L.B, Jordan C.J, Dashwood C. 2014. Simulating SAR geometric distortions and predicting Persistent Scatterer densities for ERS-1/2 and ENVISAT C-band SAR and InSAR applications: Nationwide feasibility assessment to monitor the landmass of Great Britain with SAR imagery. Remote Sensing of Environment. 152: 441-466.
7. Farr, T.G. and Kobrick, M. 2000. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data, Eos, Transactions American Geophysical Union, 81(48): 583-585.
8. Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 39(1): 8-20.
9. Fotohi S, Almodaresi A, Delaram R. 2021. Investigation of land subsidence using radar interferometry (D-InSAR) technique in Nehbandan-Sahlabad plain. Remote sensing and GIS in natural resources. (In Persian)
10. Goldstein R.M, Werner C.L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophysical research letters, 25(21): 4035-4038.
11. Haghightmehr P, Valadanouzj M. J, Tajik R, Jabari S, Sahebi M. R, Eslami R, Dehghani M. 2012. Time series analysis of Hashtgerd subsidence using radar interferometry and global positioning system. Journal of Geoscience, 22(85), 105-114. (In Persian)
12. Hanssen R.F. 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2), Springer Science & Business Media.
13. Mahdavian Ch, Mahdavian A. 2014. Principles and methods of application of radar interferometry method in earthquake study. First National Conference on the Application of Advanced Spatial Analysis Models (Remote Sensing and GIS) in Land Management. (12), 5-10. (In Persian)
14. Mortazavi M, Soleimani K, Ghaffari F. 2010. Water Resources Management and Sustainable Development, Case Study of Rafsanjan Plain, Journal of Water and Waste water, 3: 131-126.
15. Massonnet D, Feigl K.L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, Reviews of geophysics. 36(4): 441-500.
16. Motaq M, Davoodi Jam M, Momeni M, Hashemi M. 2012. Detection and display of subsidence of Mahyar plain of Isfahan with the help of radar interferometry, scientific journal promoting surveying engineering and spatial information, 3(2). (In Persian)
17. Motagh M, Shamshiri R, Haghghi M.H, Zschau J, Arabi S. 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. Geophysical Journal International, 168(2): 518-526.
18. Organization of Geology and Mineral Exploration of the country (review of regional land meeting in Iran and compilation of land subsidence database.
19. Poland J. S. 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal. UNESCO.
20. Qara Cheloo S, Akbari Quchani H, Galian S, Ganji K. 2021. Assessment of land subsidence in relation to groundwater with the help of Sentinel-1 and Alus-1 radar satellites (study area: Mashhad plain). Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources, 12 (3), 11-14. (In Persian)
21. Radutu, A. Gogu, R. 2019. Chronological reflection on monitoring urban areas subsidence due to groundwater extraction. E3S Web of Conferences 85, 07015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198507015>
22. Salehi Motahed F. 2019. Assessment of land subsidence by combining radar interference method and field measurements and study of its causes and effects on the city of Mashhad. Kharazmi University. Journal of Engineering Geology, 13(3). (In Persian)
23. Sharifi Kia M. 2012. Determining the rate of land subsidence using radar interferometry (DInSAR) in East Nogh - Bahrman, Lecturer of Humanities - Space Planning and Planning, 16 (3). (In Persian)
24. Smith, R.G, Knight R, Chen J, Reeves J, Zebker H.A, Farr T. 2017. Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San

- Joaquin Valley, California, Water Resources Research journal, 53: 2133-2148.
25. Taheri Tizro A. 2008. Groundwater. Razi University Press, Second Edition. (In Persian)
26. Turani M, Aq Atabai M, Rustaei M. 2019. Study of subsidence in the west of Golestan province using radar interferometry method. Journal of Spatial Planning. Journal of Golestan University. 8(27): 65-79. (In Persian)
27. Talebiniya M, KhosraviH, Zehtabian GH, Malekian A, Keshtkar H. 2022. Investigating the role of meteorological drought and geodetic factors on land subsidence vulnerability using fuzzy overlay. Desert
28. UNESCO. 2015. Land Subsidence. Retrieved from Land Subsidence: <http://landsubsidenceunesco.org/content/what-land-subsidence>.
29. Yamani M, Najafi I, Abedini M. 2009. The relationship between land subsidence and groundwater level drop in Qarabolagh plain of Fars province. Geography Quarterly, Islamic Azad University - Central Tehran Branch 3 (9, 8): 27-9. (In Persian)



Original
paper

Investigation of subsidence trend in Isfahan plain using radar differential interferometry technique

M. Talebinia¹, H. Khosravi², G. Zehtabian³, A. Malekian⁴, H. Keshtkar⁵

Received: 2022-01-30 / Accepted: 2022-03-29 / Published: 2023-05-22

Abstract

In the present study, to investigate the occurrence of land subsidence in Isfahan plain, SNAP8.0 software and radar differential interferometry technique were used. For this purpose, after processing Sentinel-1A images in the period 2019-2015, rate and intensity subsidence maps were prepared in the desired period. Also, changes in groundwater water level in the period 2002-2018, as one of the geodetic factors affecting subsidence, were studied to match the points that have subsidence. Then the output of SNAP software was studied using ArcGIS10.8, with land use layers and

average water level changes and Maps of mean subsidence changes, groundwater drop, standard deviation and time of maximum subsidence were prepared. The results show the occurrence of subsidence phenomenon in areas with groundwater decline with urban use, roads and agricultural lands with a maximum rate of 14.2- 20.8 cm in the years 2018-2019. The average change represents the maximum subsidence of 9.6 cm per year, in line with the satellite line of sight, in the urban area. Also, spatial analysis of subsidence hazards at strategic points showed that the study area needs to provide the necessary warnings for the occurrence of subsidence crisis on a larger scale in the future.

M. Talebinia¹, H. Khosravi²(✉), G. Zehtabian³, A. Malekian⁴, H. Keshtkar⁵

1. PhD Student in Desert Management and Control, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.

2. Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.

3. Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.

4. Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.

5. Assistant Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.

DOI: 10.30495/girs.2023.690220

e-mail: hakhosravi@ut.ac.ir

Introduction

According to the definition provided by the US Geological Survey, land subsidence involves subsidence, which occurs on a large and small scale under the influence of various factors. Subsidence in each area is affected by one or more factors. Groundwater extraction in arid and semi-arid climates is a major cause of land degradation and subsidence that can cause significant damage to infrastructure, hotspots and power lines. During the last 30 years, the depth of groundwater aquifers in Iran has decreased by at least 15 meters. Isfahan plain with an average rainfall of 125 mm, with vegetation scattered in different parts has a high concentration of authorized and unauthorized exploitation wells for agricultural and industrial

activities. Abi has brought the plain of Isfahan, so there is a possibility of occurrence of subsidence at high rates, especially in areas with looser soil and fine-grained clay texture and little vegetation. In this research, radar differential interferometry (DInSAR) technique has been used to determine the range and subsidence rate in Isfahan plain. Groundwater water table as one of the geodetic factors related to land subsidence was also analyzed. In this paper, an attempt was made to present the first results of differential radar interference measurement in Isfahan plain as a subsidence map in the years 2015-2016-2017-2018 and 2019.

materials and methods

To study the phenomenon of subsidence, it is necessary to study radar images as well as the factors that aggravate subsidence. In this regard, to receive free radar images from the European Space Agency in one-year periods, for the statistical period (2015-2019). After the necessary processing on each of the images in SNAP 8 radar interference software, the radar outputs (Geotiff format files) were input in ArcGIS10.8 software and analyzed to prepare the final subsidence map. Therefore, in order to determine the role of geodetic factors (groundwater, slope, altitude, distance from the river, vegetation, etc.) on the probability of subsidence, fluctuations in groundwater level as one of the factors affecting this phenomenon are analyzed. For this reason, after receiving data from Iran Water Resources Management Company, 185 piezometers representing the study area with appropriate distribution and data were selected and annual data on the water level of piezometric wells in Najafabad, Isfahan, Barkhar and Kuhpayeh Segzi basins in the statistical period 2003-2019 were prepared in Excel. In order to prepare the raster layers of water loss in the region, the average values of water table of each well were input in GIS software and after ranking the layers, finally the classified map of groundwater level for the whole study period in four classes of low, medium, high and very high.

Then, C-band Sentinel-1 radar images were used in the period from December 13, 2015 to December 4, 2019. The available SAR data consists of 5 IW-SLCSAR images, the first level SAR image product has vertical polarization with a one-year harvest width of 250 km. In 2015, the study area is located in two satellite images, so the received image related to 2015 with the same date and

feature, with the upper part of the image was received. Also, the study area is located in two the Interferometric Wide so to receive the first subsidence map in which 2015 as the Master image and 2016 as the Slave image. For each year, the extracted image in Orb format of the previous step enters the next section and phase and coherence images are formed.

In order to calculate the subsidence accurately, the topographic effect of the ground surface must be eliminated. Therefore, based on a digital model and using DEM SRTM 1SEC HGT, the phase effect due to topography was removed. To determine the amount of height displacement over time in digital model images, the ground was applied as a fixed base surface for all images. In this way, by considering the base level, the amount of difference in each image compared to the previous image was determined, and finally, by summing all the differences created in each image, the total amount of height difference was obtained. After calling SNAP software outputs in ArcGIS, subsidence areas are separated from other points and by final failure classification method in 5 classes, final maps of subsidence areas, land use, groundwater drop, mean and standard deviation of subsidence during statistical interval Finally, a map Location of the largest amount of subsidence in different years was prepared.

Results

The results of radar differential interferometry for Sentinel-1 satellite in this study show that in 2015, the highest rate of change is in the center of the basin and in the urban area of Isfahan province. In 2016, the highest rate of change is related to the urban area, which has an approximate overlap with the map of 2015, and about 75% of the study basin has no subsidence and is green, and the area of areas with subsidence is very large, about 0.01% of the total area.

In the map of 2017, 2018 and 2019, more changes and displacements are observed than in the previous two years, so that the areas without subsidence in 2015 and 2016 have become classes with low and medium subsidence intensity in the following years, Also, the area of areas with very high subsidence has an increasing trend that the percentage of their area in 2017, 2018 and 2019 have increased by 0.97, 0.33 and 0.06, respectively. The study of subsidence maps of Isfahan plain in the last three years (2017, 2018 and 2019) shows that the central areas of Isfahan basin are mainly in two classes of high and very

high subsidence and most of the eastern and northern regions are in the classes of low to very low subsidence intensity. According to the land use map, it is clear that urban and agricultural areas are in high and very high subsidence intensity classes. The subsidence rate has an increasing trend from 12.5 cm per year in 2015 to 19.9 cm per year in 2017 and an increase of 20.8 and 14.2 cm per year in 2018-2019.

Also, out of the total area of the study area, 2363 square kilometers, the average annual water table of the region is in very high slope zone, 1839 square kilometers in high slope zone, 4124 square kilometers in medium slope zone and 3629 square kilometers in low slope zone. The highest rate of subsidence changes from 2015 to 2019 is related to the center of the basin, the urban area of Isfahan province, which shows subsidence of 3-9.6 cm. The year 2017 has the highest amount of area with a subsidence rate (6.19-9.9) cm per year in the classroom is very high and after 2018 with a subsidence rate (5.8-20.8) cm per year in the classroom is very high, Shows a larger area of occurrence of subsidence. The year 2019, the last

year studied in this study, has the highest occurrence of subsidence in Isfahan basin that the rate of land subsidence in this year is in the range (4.7-14.2) cm per year and is in a very high subsidence class.

Conclusion

Findings show that areas with maximum subsidence rates are consistent with urban and agricultural use, which have the largest share in groundwater abstraction. Also in the groundwater zoning map, it can be seen that the increase in water loss from the east of the Kohpaye-Segzi basin to the west and northwest of the region, Borkhar and Najafabad basins has an upward trend and the concentration of water loss is in the central part of the basin. Therefore, subsidence maps prepared in the statistical period are in line with the groundwater loss zoning map.

Keywords: subsidence, Isfahan plain, Sentinel-1 A, spatial information system, land use