

آب زیرزمینی در آبخوان کرمانشاه انجام شده است. بدین منظور، روند زمانی فرونشست زمین و نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی یکسان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش با بهره‌گیری از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به پایش و بررسی نرخ فرونشست زمین در آبخوان کرمانشاه پرداخته شد. بدین منظور از هفت سری تصاویر راداری سنتینل A-1 جهت بررسی نرخ فرونشست طی بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۱ استفاده شد. تحلیل تصاویر در محیط سیستم عامل ویندوز و با نرم‌افزار SNAP انجام گرفت. سپس به منظور برآورد میزان حداکثر افت سطح آب زیرزمینی آبخوان کرمانشاه از داده‌های ۳۸ حلقه چاه پیزومتری طی بازه زمانی مهرماه ۲۰۱۵-۲۰۲۱ استفاده شد. اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی و میانگین سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان وارد نرم‌افزار ArcGIS شده و با استفاده از روش درون‌یابی IDW، نقشه‌های پهنه‌بندی تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی محاسبه شد. سپس با استفاده از نقشه‌های فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی سالانه، نقشه میانگین نرخ هفت ساله فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی تهیه شد. این نقشه‌ها به منظور تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر از روند تغییرات و تأثیرات متقابل بین نرخ فرونشست سالانه و تغییرات سطح آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفتند. در پژوهش حاضر، ارتباط و همبستگی بین نرخ فرونشست سالانه با روند تغییرات سطح آب زیرزمینی، چه در بخش‌های شهری و کشاورزی و چه در کل محدوده آبخوان، مورد واکاوی و ارزیابی دقیق قرار گرفت.

نتایج

نتایج بررسی آبخوان کرمانشاه در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱، حاکی از نوسانات قابل توجه در نرخ فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی است. در سال‌های ابتدایی دوره مورد بررسی، نرخ فرونشست در محدوده پر تنش آبخوان به شدت افزایش یافت، به گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۶ این نرخ بین ۵/۶ تا ۱۴/۴ سانتی‌متر در سال متغیر بود. این میزان فرونشست هم‌زمان با افت بی‌سابقه سطح آب زیرزمینی تا حدود ۱۲/۶ متر در همان سال‌ها رخ داده است. با این حال، در سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، روند رو به بهبودی در وضعیت آبخوان مشاهده شد، به طوری که نرخ فرونشست به ۱۱/۹- تا ۶/۲ سانتی‌متر در سال کاهش و تغییرات سطح آب نیز به ۰/۱۹- تا ۱۱/۸ سانتی‌متر در سال محدود شد. بررسی تفصیلی نشان می‌دهد که بخش‌های شمالی و غربی آبخوان بیشترین میزان فرونشست را با متوسط ۳/۴- تا ۶/۳- سانتی‌متر

پایش فرونشست زمین بر مبنای روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان کرمانشاه)

محسن کاظمی^۱، حسن خسروی^۲، علی سلاجقه^{۳*}، شهرام خلیقی سیگارودی^۴

شیرین محمد خان^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

<https://doi.org/10.22034/18.67.3>

چکیده مبسوط مقدمه

مخاطرات طبیعی سالانه سبب بروز خسارت‌های جانی و مالی فراوانی در جهان می‌شوند. پدیده فرونشست یکی از این مخاطرات است که امروزه با وقوع خشکسالی‌های اخیر در شهرها و به‌ویژه کلان‌شهرها اهمیت فراوانی یافته است. این پدیده در بسیاری از دشت‌های ایران با بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی رخ داده است. نرخ و الگوهای مکانی فرونشست در طول زمان قابل تغییر است. بنابراین اندازه‌گیری دقیق و استفاده از ابزارهای پیش‌بینی جهت پایش و مطالعه آن لازم است. استفاده از تصاویر راداری (روش تداخل‌سنجی راداری) یکی از ابزارهای جدید و قدرتمند در تعیین میزان فرونشست زمین است. این روش به عنوان راهکاری مناسب و کم‌هزینه در مناطقی که فاقد زیرساخت‌های ترازابی هستند، بسیار کارآمد و مفید عمل می‌کند. در واقع، این تکنیک با ارائه تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالا، امکان رصد و پایش پدیده مخرب فرونشست را فراهم می‌سازد و نقشی حیاتی در مدیریت و کنترل فرونشست زمین ایفا کند. با توجه به اینکه میزان برداشت آب زیرزمینی به شدت بر میزان و توزیع فرونشست تأثیر می‌گذارد. این پژوهش با هدف پایش فرونشست سالانه و ارزیابی ارتباط آن با تغییرات سطح

۱- دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- نویسنده مسئول و استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. پست الکترونیکی: salajegh@ut.ac.ir

۴- دانشیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۵- استادیار گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

در سال تجربه کرده‌اند، در حالی که مناطق مرکزی و جنوبی با کاهش ۰ تا ۱/۸- سانتی‌متر در سال مواجه بوده‌اند. همچنین، در اراضی کشاورزی شمال آبخوان، افت سطح آب زیرزمینی به میانگین ۵۰ سانتی‌متر در سال رسیده است. تحلیل داده‌ها نشان داد که ضریب تعیین بین میانگین نرخ فرونشست و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در اراضی شهری و کشاورزی به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۰۷ و برای کل سطح آبخوان برابر با ۰/۰۸ بوده که نشان‌دهنده عدم همبستگی قوی بین این دو متغیر در هر دو کابری است.

بحث و نتیجه گیری

مطالعات تصاویر راداری آبخوان کرمانشاه طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که این منطقه با چالش‌های جدی مربوط به افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین مواجه بوده است. نتایج به دست آمده حاکی از روند کاهشی نرخ فرونشست از ۱۴/۴- سانتی‌متر در سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ به ۱۱/۹- سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰-۲۰۲۱ است. همچنین بیشترین نرخ فرونشست در بخش‌های شمال غربی و غربی آبخوان مشاهده شده است. همزمان با کاهش نرخ فرونشست، سطح آب زیرزمینی نیز روند نزولی داشته به طوری که بیشترین افت سطح آب ۱۲/۶- متر در سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ و کمترین آن ۰/۱۹- متر در سال ۲۰۱۹-۲۰۲۰ ثبت شده است. حداکثر افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی و شمالی آبخوان و کمترین آن در بخش‌های جنوبی و شهری بوده است. با این حال، همبستگی بین میانگین نرخ فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در اراضی شهری و کشاورزی پایین بوده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که عوامل مختلفی از جمله گسل، جنس و ضخامت آبخوان و تغییرات سطح آب زیرزمینی در دهه‌های گذشته می‌تواند در فرونشست آبخوان کرمانشاه نقش داشته باشد. تفاوت در روند تغییرات نرخ فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف آبخوان نیز حاکی از پیچیدگی این مسئله است. پژوهش حاضر با هدف ارائه دیدگاهی جامع و علمی از تغییرات سطحی و زیرزمینی آبخوان کرمانشاه انجام شده است. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به تصمیم‌گیران برای برنامه‌ریزی‌های زیرساختی و توسعه‌ای منطقه و همچنین درک بهتر چالش‌های مدیریت آب زیرزمینی و ارائه راهکارهای مناسب برای کنترل پدیده فرونشست، یاری رساند.

کلیدواژه‌ها: تصاویر Sentinel-A، مدیریت منابع آب، مدل معکوس وزنی فاصله‌ای، نرم‌افزار SNAP

مقدمه

مخاطرات طبیعی سالانه سبب بروز خسارت‌های جانی و مالی فراوانی در جهان می‌شوند. فرونشست زمین یکی از مخاطراتی است که امروزه با وقوع خشکسالی‌های اخیر در شهرها و به‌ویژه کلان‌شهرها اهمیت فراوانی یافته است [۱۱]. فرونشست زمین شامل فرو ریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندک باشد. این حرکت محدودیتی از

نظر شدت، وسعت و میزان گسترش در منطقه ندارد [۲۱]. رشد روزافزون جمعیت منجر به استفاده بی‌رویه از آب در مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی شده و پیرو آن اثرات نامطلوب کمی و کیفی در منابع آب رخ داده است. متأسفانه، بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های ایران، منجر به فرونشست زمین شده است [۱۳، ۱۸]. با تخلیه آب‌های زیرزمینی، فشار منفذی کاهش یافته و لایه‌های زمین فشرده می‌شوند و به تبع آن در سطح زمین سبب کاهش ارتفاع و نشست سطح آن به شکل ناگهانی و یا تدریجی می‌شود [۶]. در بررسی علل اصلی فرونشست دشت‌های ایران، تغییرات سطح آب زیرزمینی به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار و محوری بر میزان و روند فرونشست معرفی شده است [۱، ۲۶]. فرونشست زمین برای اولین بار در سال ۱۹۲۱ در شهر شانگ‌های چین اتفاق افتاده است [۷، ۲۴]. در این شهر با افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین برای زیرساخت‌های شهری همچون ساختمان‌های بلند و تونل‌های مترو به تهدیدی مبدل شده است [۱۷]. الگوهای مکانی فرونشست در طول زمان قابل تغییر است. بنابراین اندازه‌گیری دقیق و استفاده از ابزارهای پیش‌بینی جهت پایش و مطالعه آن ضروری است. البته لازم به ذکر است که محاسبه میزان فرونشست زمین از دو روش مستقیم و غیرمستقیم تعیین می‌شود. روش غیرمستقیم که شامل، مدل‌سازی ریاضی و مدل‌های رستر پایه است؛ و روش مستقیم که شامل اندازه‌گیری تغییرات تراز در نقاط تراز ارتفاعی به کمک سیستم موقعیت جهانی^۱، ابزار تراکم‌سنج و روش تداخل‌سنجی راداری دریاچه مصنوعی^۲ است. استفاده از تصاویر راداری یکی از ابزارهای جدید در تعیین میزان فرونشست زمین است که به عنوان روشی مناسب و کم‌هزینه در مناطقی که فاقد نقطه تراز یابی بوده، بسیار کارآمد است و از طرفی روش تداخل‌سنجی داده‌های راداری، به‌عنوان بهترین روش آشکارسازی تغییرات پیوسته زمین مطرح است [۸]. در پژوهشی قاسمی و همکاران [۲۱] به مطالعه فرونشست زمین در دشت کبود آهنگ با استفاده از ۱۱ تصویر سنتینل-۱A پرداختند، نتایج آن حاکی از فرونشست تجمعی به میزان ۱۲۴/۷ میلی‌متر و به‌طور متوسط ۱۳ میلی‌متر در هر شش ماه بوده است. نتایج حاصل از بررسی میزان فرونشست زمین با روش تداخل‌سنجی راداری و با تصاویر سنتینل-۱A از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ در منطقه صنعتی غرب شهر کرمان نشان داد که میزان فرونشست این محدوده از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ حداقل ۳/۳ سانتی‌متر و حداکثر ۶ سانتی‌متر و از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ حداقل ۳/۶ تا حداکثر ۱۳/۲ سانتی‌متر بوده است [۱۹]. حسین‌زاده و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای نرخ فرونشست زمین در دشت قائنات استان خراسان جنوبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان فرونشست زمین از سال ۲۰۱۷-۲۰۲۰ افزایش داشته است؛ به‌طوری که از ۲/۶ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ به ۷/۸ سانتی‌متر در سال

1. GPS

2. InSAR

۲۰۲۰ رسیده و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی از دلیل افزایش نرخ فرونشست بیان شده است. طی پژوهشی صدرکیا [۲۵] با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۱A و تحلیل سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری پراکنشگرهای دائمی، نرخ جابه‌جایی سطح زمین در دشت سراب را طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ تعیین کردند. نتایج پردازش سری زمانی با روش StaMPS نشان داد در فاصله زمانی مورد مطالعه، فرونشستی معادل ۱۳۵- میلی‌متر در راستای قائم دیده شده است. علاوه بر مناطق دارای فرونشست، مناطقی با بالآمدگی نیز در دشت سراب وجود دارد که شامل قسمت‌های شمالی شهر سراب و بالادست آن است. بررسی تغییرات ارتفاعی پراکنشگرهای دائمی نشان داد که فرونشست زمین در مناطقی با افت تراز سطح ایستابی قابل توجه رخ داده است، در حالی که در مناطق فاقد افت سطح ایستابی، فرونشستی مشاهده نشده است. طی پژوهشی فرونشست زمین در پنجمین شهر بزرگ پاکستان مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده تغییر شکل سطح با استفاده از مجموعه داده‌های سنتینل A-1 و روش زیرمجموعه‌های خط مبنا کوتاه (SBAS) و روش و روش تداخل‌سنجی راداری در پیچه مصنوعی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ نشان داد که فرونشست تا ۳/۲۳ سانتی‌متر رخ داده است. از نظر زمین‌شناسی، این منطقه در فرآیند تغییر شکل فعال مرتبط با کوه‌های هیمالیا است [۱۴]. در پژوهشی دیگر که بر روی منطقه بیجین-تیانجین-هبنی (BTH) در چین انجام شده است، محققان به بررسی پدیده کاهش سطح زمین با استفاده از فناوری پیشرفته رادار زمینی و تحلیل داده‌های مربوط به ذخایر آب زیرزمینی پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که منطقه چانگپینگ-تونگژو در بیجین با بالاترین نرخ کاهش سطح زمین و بیشترین کاهش تجمعی با نرخ سالانه ۱۵۹ میلی‌متر و کاهش کل ۹۲۸ میلی‌متر مواجه شده و بالاترین مقادیر رابطه بین بارش و کاهش سطح زمین در هبنی بوده است ($R^2 = 0.76$)، [۱۰]. اصغری سراسکانرود و شیشه‌گران [۲] در پژوهشی به منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست در دشت پاکدشت از تصویر راداری سنتینل-۱A در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۰ استفاده کردند. طبق نتایج، حداکثر نرخ فرونشست پنج سال در دشت پاکدشت ۱۰ سانتی‌متر برآورد شده است. همچنین نتایج نشان داد که بالاترین میزان نرخ فرونشست به ترتیب برای کاربری‌های کشاورزی با مقدار ۱۰ سانتی‌متر، اراضی مرتع با ۹ سانتی‌متر و کاربری‌های شهری و خاک با ۸ سانتی‌متر بوده است. پاپی و همکاران [۲۰] به تحلیل سری زمانی فرونشست با روش تداخل‌سنجی راداری و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی در دشت شهریار پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که پیوستگی رخداد فرونشست در زمین‌های کشاورزی با نرخ متوسط ۹۰- میلی‌متر و حداکثر ۲۳- سانتی‌متر در سال بوده که ناشی از افت ۰/۵ تا ۱/۵ متری سطح آب در آبخوان بوده است. از طرفی بین فرونشست و توسعه مناطق شهری نیز رابطه‌ای وجود دارد. به

1. Small Baseline Subset

طوری که در پژوهشی در طی ۱۳ سال در هانوی با استفاده از داده‌های InSAR نشان داد که نرخ فرونشست در سال اول بالاترین میزان بوده است و سپس به تدریج کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که اصل نرخ بالای فرونشست به استخراج بیشتر آب زیرزمینی نسبت داده شده است [۵]. طی پژوهشی خرمی و همکاران [۱۶] با ارزیابی فرونشست زمین در شهر مشهد با روش تداخل‌سنج راداری بیان داشتند که خصوصیات ژئوروشی منطقه و میزان برداشت آب زیرزمینی بر میزان و توزیع فرونشست مؤثر است. بنابراین این پژوهش با هدف پایش فرونشست سالانه و ارزیابی ارتباط آن با تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان کرمانشاه انجام شده است. یکی از اهداف اصلی این پژوهش، تحلیل روند زمانی فرونشست زمین و نوسانات سطح آب زیرزمینی در یک بازه زمانی یکسان است. با تحلیل این روندها، می‌توان الگوهای همبستگی و تأثیرات متقابل بین این دو عامل را شناسایی کرد. نتایج این پژوهش می‌تواند به بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی در منطقه آبخوان کرمانشاه کمک کنند. با شناسایی ارتباط بین فرونشست زمین و تغییرات سطح آب زیرزمینی، می‌توان راهکارهای مناسبی برای کاهش برداشت بی‌رویه آب و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی ارائه داد. همچنین، این نتایج می‌تواند به تصمیم‌گیران و مدیران کمک کنند تا در برنامه‌ریزی‌های زیرساختی و توسعه‌های منطقه، مخاطرات ناشی از فرونشست زمین را در نظر بگیرند و اقدامات پیشگیرانه مناسبی جهت بهبود مدیریت منابع طبیعی و کاهش مخاطرات محیطی انجام دهند.

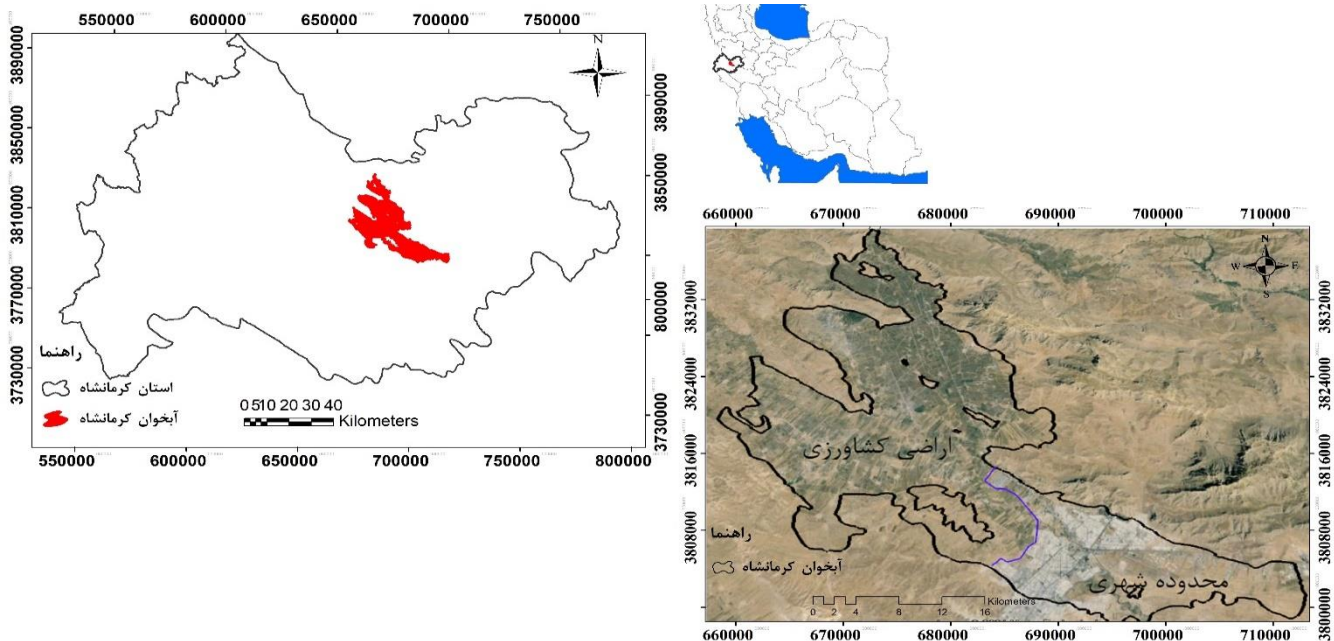
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در استان کرمانشاه و در موقعیت شهرستان کرمانشاه بین طول‌های جغرافیایی $30^{\circ} 30' 47''$ تا $30^{\circ} 42' 46''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ} 08' 00''$ تا $34^{\circ} 42' 00''$ قرار دارد. وسعت محدوده مطالعاتی کرمانشاه برابر با ۱۹۸۵/۵ کیلومتر مربع است که وسعت آبخوان آن برابر با ۶۷۲/۶۶ کیلومتر مربع و مابقی مربوط به ارتفاعات مشرف بر دشت کرمانشاه است. آبخوان کرمانشاه از نوع آبخوان آزاد است. میزان متوسط بارندگی محدوده مورد پژوهش حدود ۴۵۰ میلی‌متر در سال است و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، جز اقلیم نیمه خشک و استپی قرار می‌گیرد. کاربری اراضی در محدوده آبخوان کرمانشاه شامل اراضی کشاورزی، شهری، مراتع، تالاب و صخره‌های است که بیشترین کاربری را اراضی کشاورزی دارد. مهمترین مرکز جمعیتی آن در حد شهرستان بوده و شهرستان کرمانشاه تقریباً در جنوب محدوده آبخوان واقع شده است [۳، ۴] (شکل ۱).

روش تحقیق

به منظور پایش نرخ فرونشست زمین در آبخوان کرمانشاه، از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. تداخل‌سنجی راداری یک روش پیشرفته است که از تصاویر راداری برای اندازه‌گیری



شکل ۱- موقعیت آبخوان کرمانشاه در استان کرمانشاه و ایران

Fig 1. Location of the Kermanshah aquifer in Kermanshah province and Iran

سطح آب زیرزمینی را با دقت بالا به تصویر می‌کشد. این مدل با استفاده از اصول آماری و ریاضی، داده‌های موجود را تحلیل کرده و نقشه‌ای دقیق از سطح آب زیرزمینی تهیه می‌کند که امکان تحلیل جامع‌تری از وضعیت منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌سازد. در مرحله آخر، نقشه‌های فرونشست و هم‌تراز سطح آب زیرزمینی بر یکدیگر منطبق شدند تا ارتباط بین فرونشست سالانه و روند تغییرات سطح آب زیرزمینی بررسی شود. این انطباق به منظور شناسایی الگوهای همبستگی و تأثیرات متقابل بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین به روش رگرسیون خطی انجام شد. با انطباق این نقشه‌ها، می‌توان روابط پیچیده بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار داد و الگوهای مکانی و زمانی این تغییرات را تحلیل کرد. مراحل انجام پژوهش حاضر در شکل ۲ ارائه شده است.

تداخل سنجی راداری

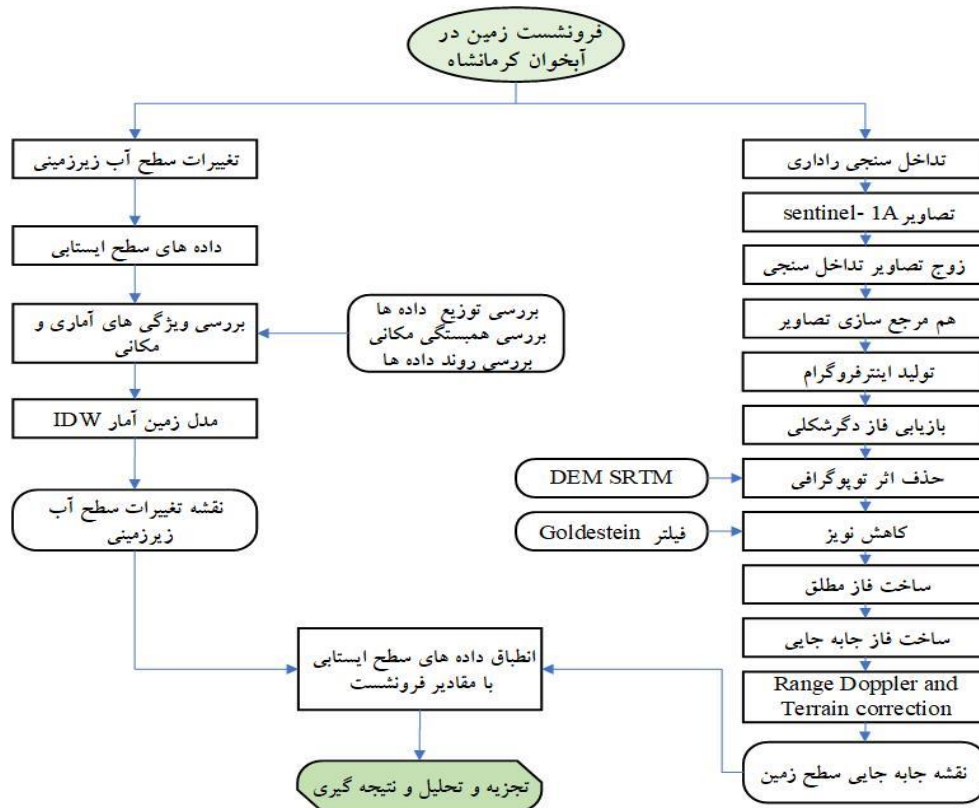
داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های راداری که شامل هفت سری تصاویر سنتینل A-1 جهت محاسبه نرخ فرونشست طی بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۱ استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده مربوط به سازمان فضایی اروپا^۵ با فرمت SLC با پلاریزاسیون VV طی شش سال است. تحلیل تصاویر در محیط سیستم عامل ویندوز و با نرم‌افزار SNAP انجام گرفت (جدول ۱). انتخاب مناسب و بهینه زوج تصاویر راداری جهت تداخل سنجی یکی از مهم‌ترین مراحل موجود در عملیات تداخل سنجی است. از مهم‌ترین عوامل پایه در انتخاب زوج تصاویر می‌توان به فرکانس سنجنده مورد استفاده، خط مبنای عمود مکانی،

دقیق تداخل‌نگار، حاصل ضرب مختلط دو تصویر راداری است و اطلاعات ارزشمندی درباره تغییرات سطح زمین فراهم می‌آورد. اولین بار توسط گابریل و همکاران [۹] روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری^۱ معرفی شد که امکان اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر توپوگرافی، تغییرات و جابه‌جایی سطحی زمین را از طریق تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با روزه مجازی^۲ فراهم می‌کند. در تغییرات سطحی زمین بهره می‌گیرد. در این روش، فاز حاصل از دو تصویر راداری گرفته شده از یک منطقه معین با یکدیگر تطبیق داده می‌شود تا تداخل‌نگار تولید شود. این روش، حداقل سه تصویر (دو تصویر به همراه مدل رقومی ارتفاع^۳) یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری مورد نیاز است. این تصاویر به منظور آشکارسازی تغییرات سطحی رخ داده در زمین در بازه‌های زمانی متفاوت با دقت میلی‌متری استفاده می‌شوند. دقت نتایج به طول موج داده‌های مورد استفاده بستگی دارد، که این امر بر کیفیت تصاویر و دقت تحلیل‌ها تأثیرگذار است. روش تداخل‌سنجی راداری به دلیل دقت بالا و کارایی مناسب در اندازه‌گیری تغییرات سطحی پوسته زمین، به طور گسترده‌ای در مطالعات زمین‌شناسی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳]. برای بررسی ارتباط بین حداکثر تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین، نقشه‌های هم‌تراز سطح آب‌های زیرزمینی همراه از محدوده آبخوان کرمانشاه تهیه شد. این نقشه‌ها با استفاده از مدل زمین‌آمار معکوس وزنی فاصله‌ای^۴ در نرم‌افزار ArcGIS تولید شد. مدل IDW با در نظر گرفتن فاصله و وزن نقاط داده، توزیع مکانی

1. D-InSAR
2. SAR
3. DEM
4. IDW

5. European Space Agency



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش

Fig 2. Flowchart of research

از عملگر Back Geocoding استفاده شد. در این فرآیند، با استفاده از اطلاعات مداری ماهواره و مدل رقومی ارتفاعی، مختصات هر پیکسل در تصویر به مختصات جغرافیایی مبتنی بر سیستم مرجع مشخص (مانند WGS84) تبدیل می شود. به منظور استفاده از یک آزمون و برد یکسان برای کل تصاویر، از عملگر آنالیز طیفی پیشرفته^۳ بهره گرفته شد. این امر باعث افزایش همگنی و انسجام طیفی بین تصاویر چند زمانه می شود و در نتیجه پردازش های بعدی را تسهیل می نماید.

تولید اینترفروگرام

پس از انجام فرآیند هم مرجع سازی بین دو تصویر ماهواره ای سنتینل-۱A در نرم افزار پردازش تصاویر ماهواره ای SNAP، مراحل اصلی تولید اینترفروگرام به شرح زیر است: ابتدا اختلاف فاز بین دو تصویر ماهواره ای با استفاده از عملگر تداخل سنجی رادار انجام شد. این عملگر، اختلاف فاز موج های رادیویی بازتاب یافته از سطح زمین در دو تصویر را محاسبه می کند که نشان دهنده تغییرات سطحی بین زمان ثبت دو تصویر است. هر زوج تصویر راداری قادر به تولید یک تداخل نیست. بنابراین با n تصویر از منطقه می توان $N(n-1)/2$ تداخل نما تولید کرد. تداخل سنجی تصاویر راداری بر پایه اندازه گیری یکی از ویژگی های امواج الکترومغناطیسی به نام

هم پوشانی مکانی و هم چنین هم پوشانی طیفی در راستای پرواز اشاره کرد. سپس با در نظر داشتن موارد فوق مبادرت به تهیه تصاویر مورد استفاده در این پژوهش از سایت asf.alaska.ir شد.

هم مرجع سازی تصاویر^۱

پس از افزودن زوج تصاویر به نرم افزار SNAP، مرحله هم مرجع سازی تصاویر با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه و نقاط پراکنش گر انجام شد. این مرحله نقش بسیار مهمی در پردازش تصاویر چند زمانه ایفا می کند. هدف از آن تطبیق دقیق موقعیت مکانی تصاویر با یکدیگر است.

برای این منظور، از مدل رقومی ارتفاعی و نقاط پراکنش گر موجود در تصاویر استفاده می شود. این فرآیند باعث می شود که پیکسل های متناظر در دو تصویر به طور دقیق روی یکدیگر منطبق شوند. ابتدا، محدوده مورد نظر از تصاویر اصلی جدا شد تا پردازش با سرعت بیشتری انجام شود. سپس، برای تصحیح مداری تصاویر^۲، عملیات Apply-Orbit-File اعمال شد. اعمال این تصحیح باعث می شود که موقعیت مکانی هر پیکسل در تصویر با دقت بیشتری نسبت به سیستم مختصات جغرافیایی مشخص شود. این مرحله به کمک اطلاعات مداری ماهواره انجام می شود. در مرحله بعد، به منظور تبدیل مختصات هر پیکسل در دو تصویر به مختصات جغرافیایی،

1. Image Co-registration
2. Orbit Correction

جدول ۱- مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده در پژوهش

Table 1. Specifications of radar images in the research

سال	نوع ماهواره	تاریخ	نوع پردازش	نوع گذر	کانال	قطبش	جهت مدار
Year	Satellite Type	Date	Processing Type	Image mode	Band	Polarization	Image Orbit Type
2015	Sentinel-1A	19.09.2015	IW.SLC	Master- اصلی	C	VV-VH	Dessending- نزولی
	Sentinel-1A	13.09.2016	IW.SLC	Slave- ثانویه	C	VV-VH	Dessending- نزولی
2016	Sentinel-1A	13.09.2016	IW.SLC	Master- اصلی	C	VV-VH	Dessending- نزولی
	Sentinel-1A	8.09.2017	IW.SLC	Slave- ثانویه	C	VV-VH	Dessending- نزولی
2017	Sentinel-1A	8.09.2017	IW.SLC	Master- اصلی	C	VV-VH	Dessending- نزولی
	Sentinel-1A	30.09.2018	IW.SLC	Slave- ثانویه	C	VV-VH	Dessending- نزولی
2018	Sentinel-1A	30.09.2018	IW.SLC	Master- اصلی	C	VV-VH	Dessending- نزولی
	Sentinel-1A	16.10.2019	IW.SLC	Slave- ثانویه	C	VV-VH	Dessending- نزولی
2019	Sentinel-1A	16.10.2019	IW.SLC	Master- اصلی	C	VV-VH	Dessending- نزولی
	Sentinel-1A	1.09.2020	IW.SLC	Slave- ثانویه	C	VV-VH	Dessending- نزولی
2020	Sentinel-1A	1.09.2020	IW.SLC	Master- اصلی	C	VV-VH	Dessending- نزولی
	Sentinel-1A	5.10.2021	IW.SLC	Slave- ثانویه	C	VV-VH	Dessending- نزولی

نمایش داده می‌شوند که به این پدیده، فاز Wrapped گفته می‌شود. هدف، بازیابی فاز اصلی بدون محدودیت بازه است که الگوریتم SNAPHU با استفاده از روش‌های آماری و جریان شبکه‌ای، این وظیفه را به انجام می‌رساند. نتیجه این فرآیند، فایل Unphase است که حاوی فاز واقعی سیگنال بوده و می‌تواند در محاسبات و پردازش‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد. عملیات پس از بازیابی فاز واقعی شامل چندین مرحله اساسی است. ابتدا، مقادیر جابجایی عمودی از تفاوت‌های فاز موجود در فایل Unphase استخراج شدند؛ این کار با استفاده از هندسه تحصیل داده‌های راداری و طول موج شناخته‌شده سیگنال راداری انجام می‌شود. جابجایی‌های عمودی به‌دست آمده، تغییرات ارتفاع یا فرونشست در منطقه مورد مطالعه را نمایان می‌سازند. سپس، روش نرم‌افزاری حداقل مربعات برای هموارسازی داده‌های جابجایی عمودی به‌کار رفت تا اثرات نویز و خطاهای دیگر کاهش یافته و برآوردی بهتر از تغییر شکل زمین به‌دست آید. این فرآیند هموارسازی همچنین به اصلاح هرگونه خطا هندسی ناشی از فرآیند تصویربرداری راداری کمک می‌کند. در نهایت، داده‌های جابجایی عمودی پردازش‌شده به مختصات جغرافیایی تبدیل شده و الگوی تغییر شکل زمین و نرخ فرونشست در بازه زمانی مورد مطالعه، قابل مشاهده و تحلیل شد.

تغییرات سطح آب زیرزمینی

در این مرحله به منظور برآورد میزان حداکثر افت سطح آب زیرزمینی آبخوان کرمانشاه از داده‌های مهرماه ۳۸ حلقه چاه پیرومتری در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۱ استفاده شد (شکل ۳ الف). سپس اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی و میانگین سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان وارد نرم‌افزار ArcGIS شده و با استفاده

phase استوار است. موج ارسالی به‌صورت تابع $\sin x$ و موج بازتابی برابر $\sin x + 2$ است. ترکیب موج‌های بازتابی و ارسالی را تفاوت فاز می‌نامند. ترکیب این دو موج، موج برآیند را کنترل می‌کند. یک تصویر ایتترفرومتری با تلفیق دو موج تداخل‌سنجی راداری تولید می‌شود. بهترین و با دقت‌ترین تداخل‌نما را می‌توان با پارامتر هم‌دوستی انتخاب کرد. در واقع هم‌دوستی پارامتری مختلط است که مقدار دامنه آن معرف کیفیت تداخل‌نما است و بر اساس میزان همبستگی پیکسل‌های متناظر دو تصویر و مقدار فاز آن که همان اختلاف فاز دو تصویر یا فاز تداخل‌نماست تعیین می‌شود که تصویر ایجاد شده می‌تواند نشان‌دهنده دور شدن یا نزدیک شدن به سنجنده باشد [۱۵]. در ادامه فرآیند استخراج اطلاعات دگرشکلی از ایتترفروگرام، ابتدا مدل رقومی ارتفاعی زمین مورد استفاده در پردازش ایتترفروگرام بازخوانی شد و با استفاده از آن، فازی مشابه با فاز توپوگرافی موجود در ایتترفروگرام محاسبه و از ایتترفروگرام اصلی کسر شد تا مؤلفه دگرشکلی بازیابی شود؛ سپس اثر فاز توپوگرافی با استفاده از DEM SRTM حذف شد و در نهایت به منظور کاهش نویزهای موجود در ایتترفروگرام، از فیلتر گلدشتاین^۱ استفاده شد تا زمینه برای تفسیر بهتر الگوی دگرشکلی فراهم شود.

ساخت فاز مطلق

تبدیل فاز پیچیده به فاز واقعی از عملگر Export Snaphu با بهره‌گیری از الگوریتم SNAPHU^۲، انجام شد. به طوری که در برخی موارد، مقادیر فاز سیگنال به صورت محدود در بازه‌ی $\pi -$ تا $\pi +$

1. Goldstein
2. Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping

سال (۲۰۱۹-۲۰۲۰) و ۱۱/۹- تا ۶/۲ سانتی متر در سال (۲۰۲۰-۲۰۲۱) قرار داشته است. جابه‌جایی رخ داده در جهت دید ماهواره است به طوری که عدد مثبت بیانگر نزدیک شدن سطح زمین به ماهواره و بالآمدگی و اعداد منفی نشانگر فاصله سطح از ماهواره و پایین‌رفتگی است. مشاهده می‌شود که حداکثر نرخ فرونشست در اراضی کشاورزی بخش‌های شمال‌غربی و غربی آبخوان کرمانشاه رخ داده است. همچنین، بیشترین نرخ فرونشست در سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ و کمترین آن در سال ۲۰۱۸-۲۰۱۹ اتفاق افتاده است. جالب توجه است که مقادیر حداکثری فرونشست طی این دوره زمانی حدود دو سانتی‌متر کاهش یافته است.

تغییرات سطح آب زیرزمینی

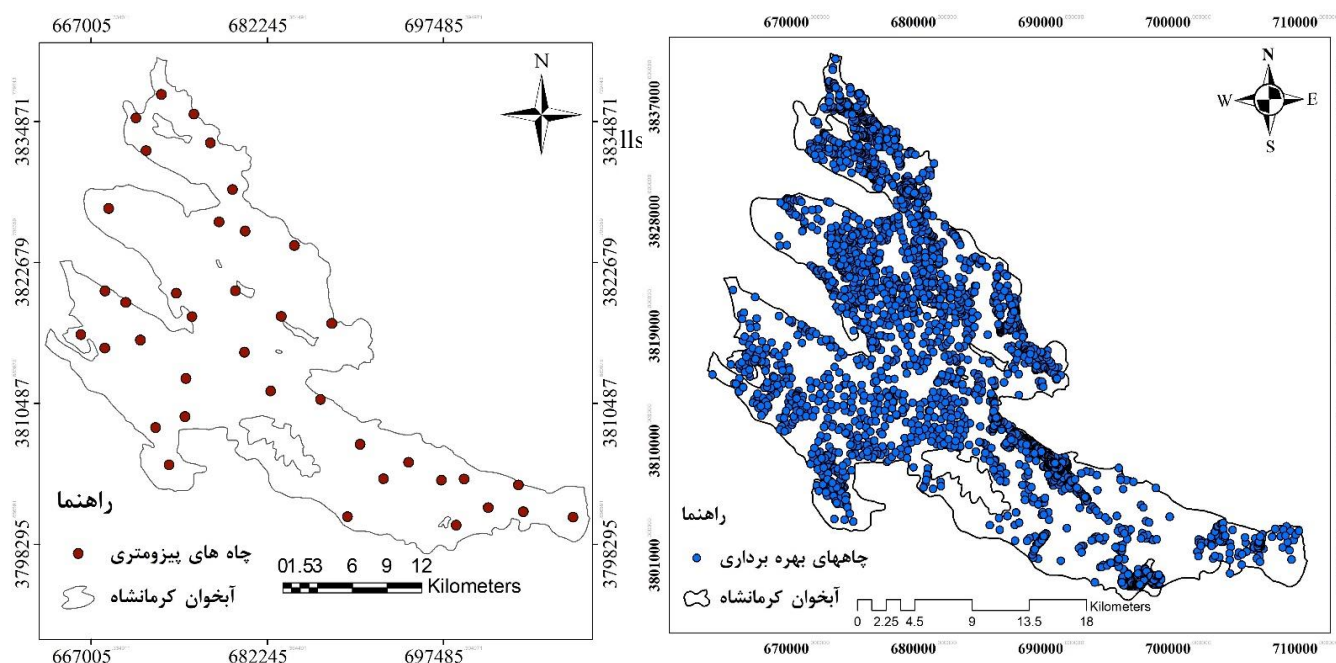
نتایج درون‌یابی حداکثر تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان کرمانشاه در همراه طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱، در شکل ۵ ارائه شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش سطح آب زیرزمینی، در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ رخ داده است، به طوری که این متغیر از محدوده ۱۲/۶- متر تا ۲/۹۹ متر در سال نوسان داشته است. در مقابل، کمترین تغییرات کاهشی سطح آب زیرزمینی، در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ رخ داده که از محدوده ۰/۱۹- متر تا ۱/۸ متر در سال متغیر بوده است. مقادیر منفی بیانگر کاهش سطح آب زیرزمینی و پایین‌رفتن آن است، در حالی که مقادیر مثبت حاکی از افزایش سطح آب و کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی است. همچنین، بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در همراه طی این بازه زمانی در سطح آبخوان کرمانشاه، همراه با نوع کاربری اراضی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر تغییرات

از روش درون‌یابی IDW نقشه‌های پهنه‌بندی تغییرات سطح آب زیرزمینی سالانه در منطقه مطالعاتی تهیه شد. سپس برای تهیه نقشه میانگین سالانه از نقشه‌های سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۱ میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی برآورد شد. روش درون‌یابی IDW بر این فرض استوار است که تأثیر پدیده مورد نظر با افزایش مسافت کاهش می‌یابد به بیانی دیگر پدیده پیوسته در نقاط اندازه‌گیری نشده، بیشترین شباهت را به نزدیکترین نقاط برداشت شده دارد. موقعیت چاه‌های بهره‌برداری آبخوان کرمانشاه در شکل ۳ ب آمده است. بیشترین تراکم این چاه‌ها در قسمت شمالی و غربی آبخوان است که کاربری کشاورزی دارد و کمترین تراکم تعداد چاه‌های بهره‌برداری در نواحی جنوبی و بخش انتهایی آبخوان با کاربری شهری است.

نتایج

تغییرات جابه‌جایی سطح زمین

بررسی تحولات زمانی و مکانی فرونشست سطح زمین در محدوده آبخوان کرمانشاه طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ بر اساس داده‌های تصاویر راداری حاکی از روند قابل توجه این پدیده در این منطقه است (شکل ۴). نتایج تحلیل این داده‌ها نشان می‌دهد که نرخ فرونشست در طول این بازه زمانی شش ساله روندی نوسانی داشته است. در سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶، نرخ فرونشست در محدوده ۱۴/۴- تا ۵/۶ سانتی‌متر در سال متغیر بوده است. این روند در سال‌های بعدی به ترتیب در محدوده ۱۲/۶- تا ۸/۴ سانتی‌متر در سال (۲۰۱۶-۲۰۱۷)، ۱۳/۸- تا ۸/۱ سانتی‌متر در سال (۲۰۱۷-۲۰۱۸)، ۱۰/۸- تا ۸/۶ سانتی‌متر در سال (۲۰۱۸-۲۰۱۹)، ۱۲- تا ۸/۳ سانتی‌متر در



شکل ۳ - موقعیت چاه‌های پیزومتری (الف) و بهره‌برداری (ب) در پژوهش حاضر

Fig 3. Position of piezometric wells (a) and exploitation wells (b) in the research

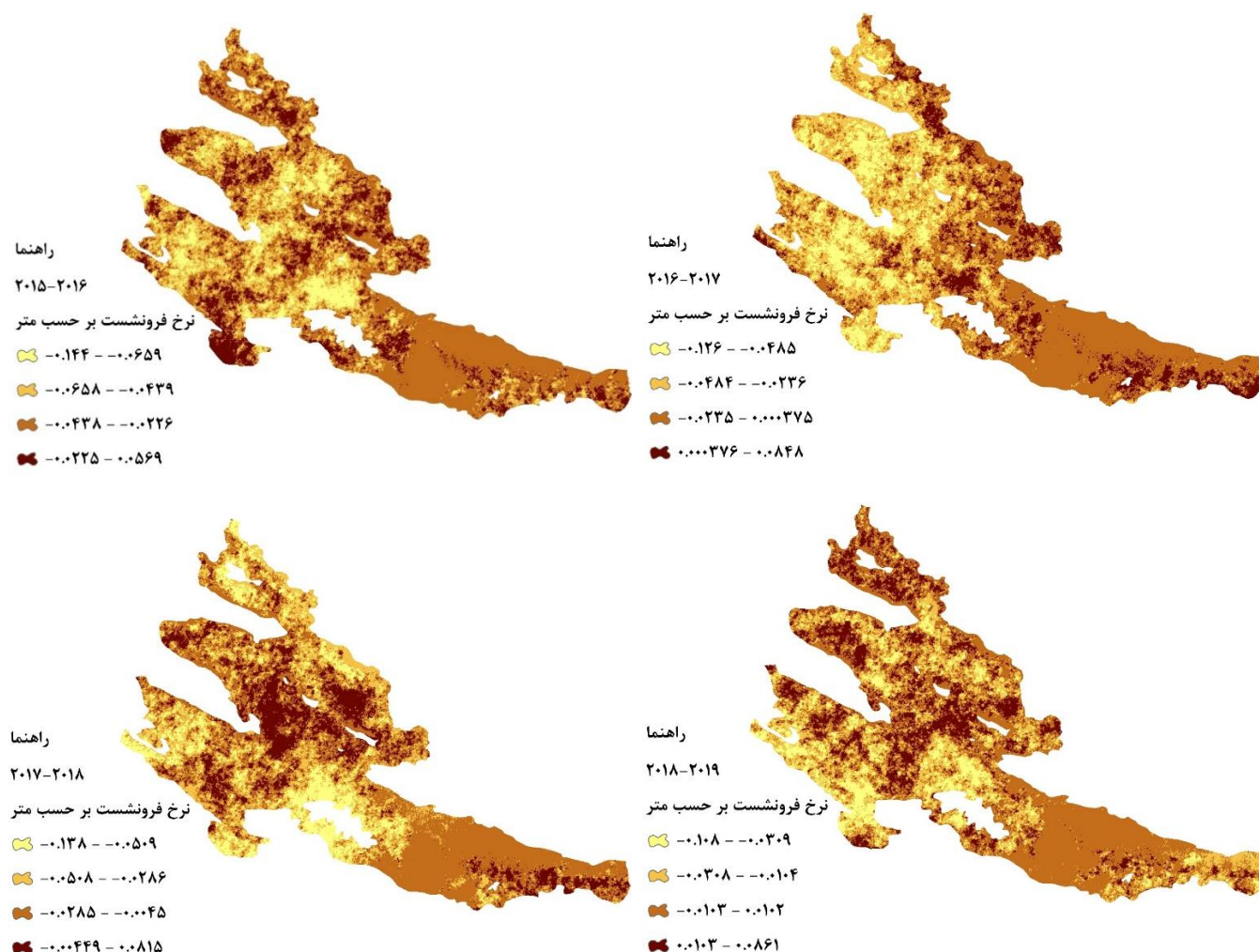
است. در مقابل، کمترین مقادیر افت آبخوان در بخش جنوبی و انتهای با کاربری شهری در محدوده آبخوان رخ داده است.

سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ در بخش مرکزی آبخوان بوده و سپس به سمت قسمت‌های شمالی آن گسترش یافته

جدول ۲- تغییرات حداکثری سطح آب زیرزمینی آبخوان کرمانشاه از ۲۰۱۵-۲۰۲۱

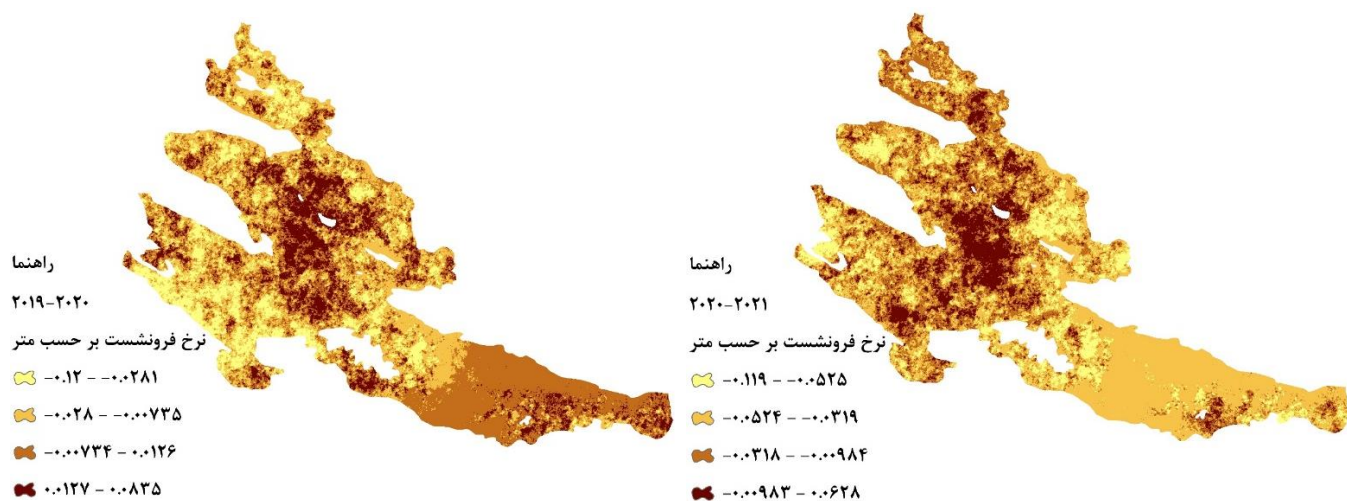
Table 2. Maximum changes in groundwater level from 2015-2021

نوع کاربری	محدوده‌ی آبخوان	تغییرات حداکثری سطح آب	سال
Land use type	Aquifer areas	Maximum water level changes	Year
Agriculture کشاورزی	مرکزی - Central	-6.91 - -12.6	2015-2016
Agriculture کشاورزی	مرکزی - غربی western-Central	1.7 - -1.49	2016-2017
Agriculture کشاورزی	شمالی - مرکزی Central-North	-3.7 - -9.66	2017-2018
Agriculture کشاورزی	غربی - western	-2.56 - -6.29	2018-2019
Agriculture کشاورزی	شمالی - مرکزی Central-North	2.82 --0.19	2019-2020
Agriculture کشاورزی	شمالی - North	-2.3 - -4.08	2020-2021

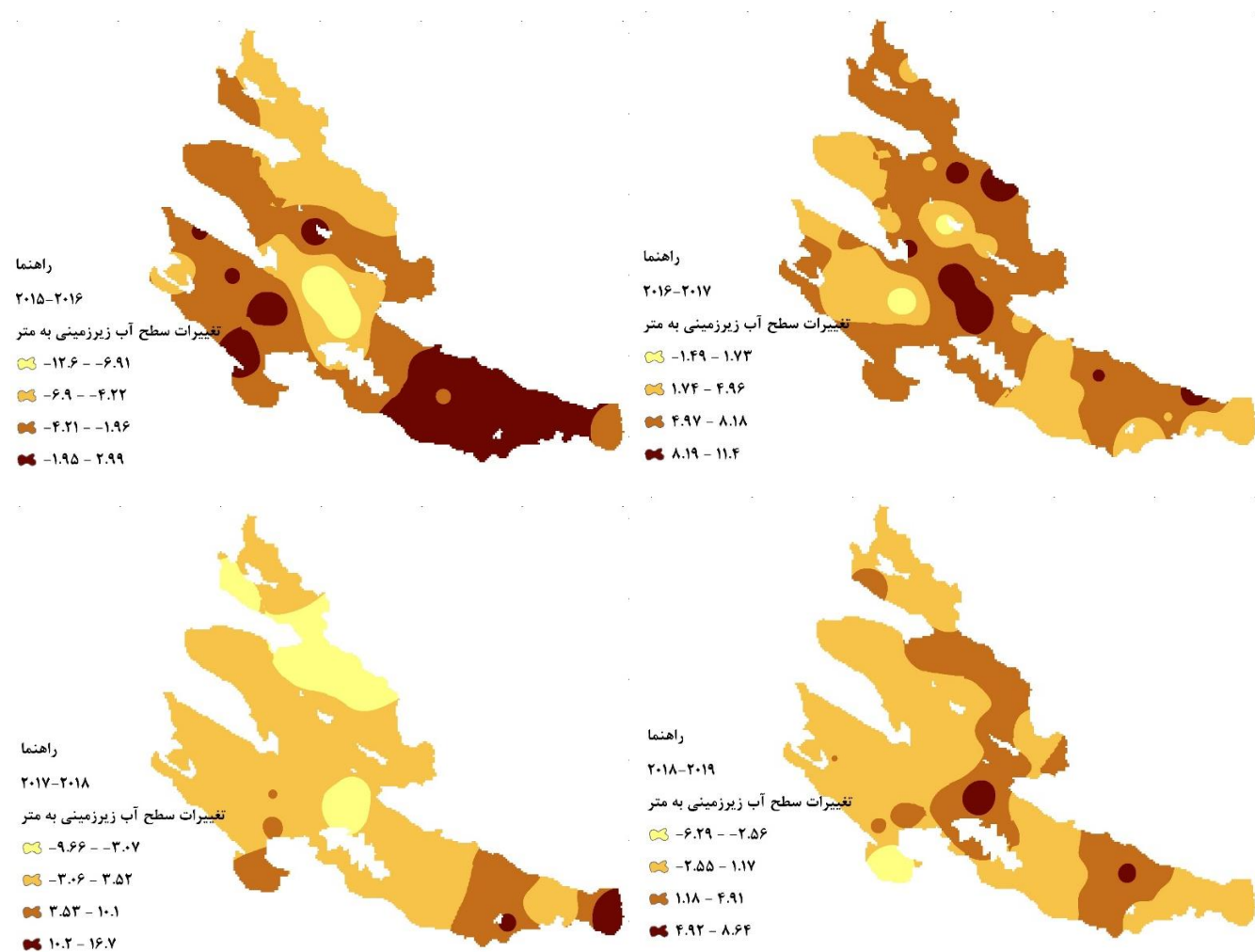


شکل ۴- نرخ فرونشست سالانه آبخوان کرمانشاه از ۲۰۱۵ - ۲۰۲۱

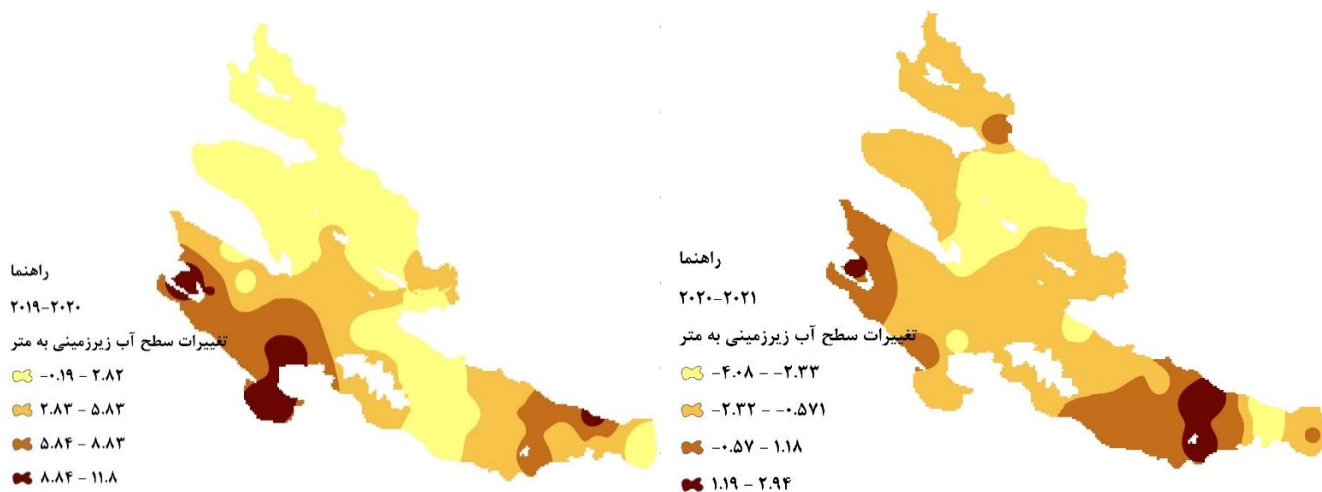
Fig 4. The annual subsidence rate of the Kermanshah aquifer from 2015-2021



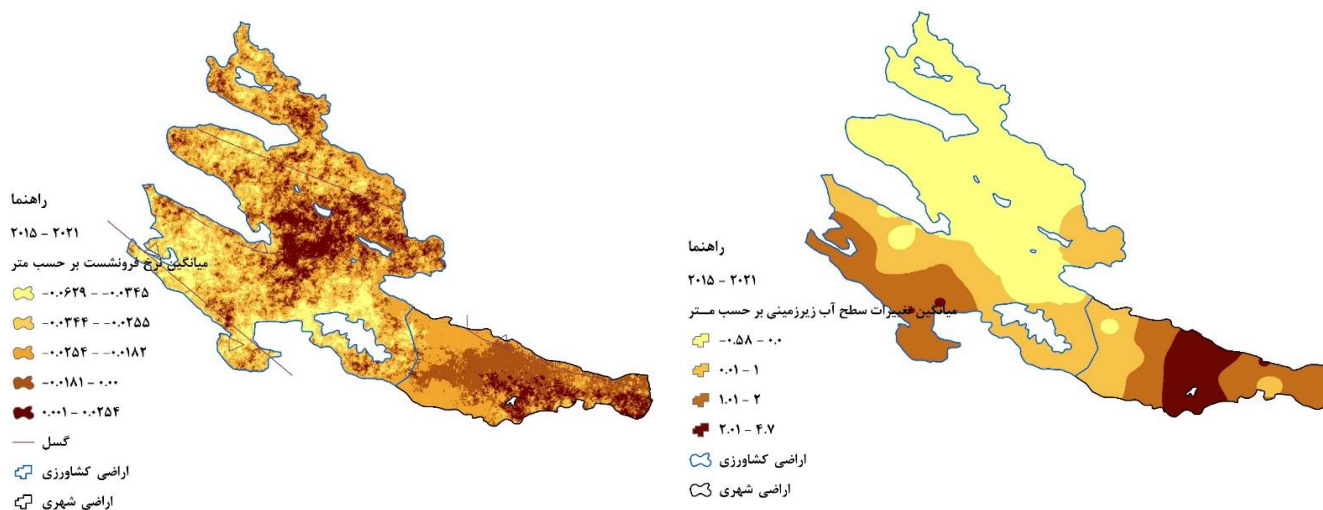
ادامه شکل ۴- نرخ فرونشست سالانه آبخوان کرمانشاه از ۲۰۱۵ - ۲۰۲۱
Fig 4. The annual subsidence rate of the Kermanshah aquifer from 2015-2021



شکل ۵- تغییرات سطح آب آبخوان کرمانشاه از ۲۰۱۵-۲۰۲۱
Fig 5. Changes in the water level of the Kermanshah aquifer from 2015-2021



ادامه شکل ۵- تغییرات سطح آب آبخوان کرمانشاه از ۲۰۲۱-۲۰۱۵
Fig 5. Changes in the water level of the Kermanshah aquifer from 2015-2021



شکل ۶- میانگین نرخ فرونشست (الف) و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی (ب) سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۱۵
Fig 6. The average subsidence rate (a) and the average changes in the groundwater (b) of 2015-2021

است. شکل ۶-ب نیز نشان می‌دهد که در بخش‌های شمالی اراضی کشاورزی، سطح آب زیرزمینی به طور میانگین ۰/۵ متر در سال کاهش یافته است. در مقابل، میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در مناطق غربی اراضی کشاورزی حداکثر دو متر در سال افزایش داشته است. این در حالی است که میانگین تغییرات سطح آب در اراضی شهری مثبت بوده و بین یک تا چهار متر در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ متغیر بوده است. بررسی ضرایب تعیین بین میانگین نرخ فرونشست و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در اراضی شهری و کشاورزی نشان می‌دهد که این دو پارامتر فاقد همبستگی قوی بوده و ضرایب تعیین برابر ۰/۱۳ و ۰/۰۷۴ است. این عدم همبستگی برای کل سطح آبخوان نیز با ضریب تعیین ۰/۰۸۲ تأیید می‌شود. این مشاهدات بیانگر پیچیدگی و ناهمگنی فرایندهای حاکم بر تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در این آبخوان است.

تغییرات میانگین نرخ فرونشست و سطح آب زیرزمینی
بررسی نتایج حاصل از مطالعات در آبخوان کرمانشاه نمایانگر الگوی پیچیده و متنوعی از تغییرات در سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست این آبخوان است. بر اساس شکل ۶-الف، حداکثر نرخ فرونشست در مناطق شمالی و غربی آبخوان بین ۶/۳- تا ۳/۴- سانتی‌متر در سال متغیر است، در حالی که کمترین مقادیر میانگین شش ساله نرخ فرونشست در قسمت مرکزی و انتهایی آبخوان بین ۱/۸- تا ۰/۰- سانتی‌متر در سال ثبت شده است. در شکل ۶-الف، نتایج بررسی نشان می‌دهد که در مناطق شناسایی شده دارای گسل، الگوی مکانی فرونشست زمین دارای تغییرات قابل توجهی بوده است. در برخی نقاط، علاوه بر فرونشست، بالاآمدگی سطح زمین نیز در کنار گسل‌ها مشاهده شد. به ویژه در بخش مرکزی اراضی کشاورزی، مقادیر بالاآمدگی سطح زمین به وضوح قابل مشاهده

فرونشست یکی از مهم ترین پدیده های مخاطره آمیزی است که خسارت های زیادی را به بار می آورد. استفاده روش تداخل سنجی داده های راداری به عنوان روشی مناسب و کم هزینه در مناطقی که فاقد نقطه ترازبایی بوده، بسیار کارآمد است. نتایج این پژوهش نشان داد که آبخوان کرمانشاه در سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ با پدیده فرونشست مواجه بوده است. حداکثر نرخ فرونشست در سال های ۲۰۱۵-۲۰۱۶ رخ داده و به بیش از ۱۴ سانتی متر در سال رسیده است. میانگین نرخ فرونشست در طول ۶ سال بررسی شده، بین ۳/۴ تا ۶/۳ سانتی متر در سال بوده که بیش ترین مقادیر در بخش های شمالی و غربی آبخوان مشاهده شده است. همچنین، کاهش سطح آب زیرزمینی در ماه مهر، در بخش شمالی آبخوان به میزان ۵۰ سانتی متر در سال بوده اما در بخش های غربی و انتهایی آبخوان کاهش چشمگیری مشاهده نشده است. با این وجود، ضرایب تعیین بین میانگین نرخ فرونشست و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در اراضی شهری و کشاورزی فاقد همبستگی قوی بوده و ضرایب تعیین برابر ۰/۱۳ و ۰/۷۴ بوده است. ضرایب تعیین برای کل سطح آبخوان نیز ۰/۸۲ برآورد شده است که نشان از عدم همبستگی معنی داری بین نرخ فرونشست و کاهش سطح آب زیرزمینی در آبخوان دارد. اگرچه کم ترین نرخ فرونشست در بخش شهری و بیش ترین آن در بخش کشاورزی آبخوان رخ داده است اما ضریب تعیین بسیار پایینی بین این دو پارامتر وجود دارد. این بدان معنی است که عوامل دیگری نیز در وقوع و شدت فرونشست در آبخوان کرمانشاه نقش دارند. وجود ساختارهای زمین شناسی پیچیده مانند گسل ها و شکستگی ها، در کنار تغییرات در ضخامت و ویژگی های لایه های رسوبی آبخوان، می تواند بر الگوی فرونشست اثر بگذارد و همبستگی آن را با تغییرات سطح آب زیرزمینی کاهش دهد. نتایج این پژوهش با تحقیقات انجام شده توسط حسین زاده و همکاران [۱۲]، صدرکیا و همکاران [۲۵] و پاپی و همکاران [۲۰] که به بررسی همبستگی بین مقادیر فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در نقاط محدود پرداخته بودند، مطابقت نداشته است. از سوی دیگر اگرچه در آبخوان کرمانشاه افت شدید سطح آب زیرزمینی مشاهده شده است اما بالآمدگی سطح زمین در برخی نواحی به ویژه اراضی کشاورزی مناطق شمالی آبخوان را می توان به وجود گسل ها، خصوصیات ژئوروشی منطقه و ویژگی های ژئوروشی خاک نسبت داد. خاک های سیلتی و رسی در این مناطق دارای پتانسیل تورم و انبساط بالایی هستند و در اثر برداشت بیش از حد آب های زیرزمینی، واکنش شدیدتری نسبت به سایر خاک ها نشان داده و موجب تورم و بالآمدگی نسبی سطح زمین می شوند. همچنین نتایج نشان می دهد که بیش ترین نرخ فرونشست در آبخوان کرمانشاه در مناطق کشاورزی (شمالی آبخوان) و کم ترین آن در بخش انتهایی آبخوان که مناطق مسکونی و شهری هستند، رخ داده است که با نتایج تحقیقات انجام شده توسط اصغری سراسکانرود و شیشه گران [۲] مطابقت دارد. این موضوع می تواند بیانگر وجود رابطه مستقیم

بین تراکم تعداد چاه های بهره برداری و به تبع آن نقش بهره برداری از آب های زیرزمینی با نرخ فرونشست در آبخوان کرمانشاه باشد. بنابراین پژوهش حاضر با استفاده از روش های نوآورانه و تحلیل های جامع، به دنبال ارائه دیدگاهی دقیق و علمی از تغییرات سطحی و زیرزمینی در آبخوان کرمانشاه است. نتایج این پژوهش می تواند به تصمیم گیران و مدیران محلی در برنامه ریزی های زیرساختی و توسعه ای منطقه یاری رسانده و درک بهتری از چالش های مدیریت آب زیرزمینی ارائه دهد. همچنین، این یافته ها می تواند راه کارهای مناسبی را برای کنترل فرونشست و حفاظت از منابع آب در این محدوده پیشنهاد کنند. در مجموع، این پژوهش با بهره گیری از دانش و فناوری های پیشرفته، می تواند به حفظ و مدیریت پایدار محیط زیست و منابع طبیعی در کرمانشاه کمک شایانی نماید.

سپاسگزاری

از شرکت منابع آب ایران به دلیل در اختیار قرار دادن داده های پیژومتری استان کرمانشاه سپاسگزاریم.

تضاد منافع نویسندگان

“نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند”.

دسترسی به داده ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

محسن کاظمی: نگارش نسخه اولیه مقاله، مفهوم سازی، انجام

تحلیل های نرم افزاری

حسن خسروی: ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

علی سلاجقه: راهنمایی، مفهوم سازی، بازبینی متن مقاله، کنترل

نتایج

شهرام خلیقی سیگارودی: بازبینی مقاله، کنترل نتایج

شیرین محمد خان: مشاوره، ویرایش و بازبینی متن مقاله، کنترل

نتایج

منابع مورد استفاده

1. Abdollahi, S. Pourghasemi, HR. Ghanbarian, GA. and Safaeian, R. 2019. Prioritization of effective factors in the occurrence of land subsidence and its susceptibility mapping using an SVM model and their different kernel functions. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(6):4017-4034.
2. Asghari Sarasekanrood, S. Mohamadzadeh Shishegaran, M. 2023. Estimation of subsidence using radar interferometry technique and groundwater parameters and land use (Case study: Pakdasht plain). Adv. Appl. Geol, 13(1): 320-336. (In Persian)
3. Azizi, K. Azari, A. Farhadi Bansoule, B. 2023. Simulation and determination of hydrodynamic coefficients and aquifer balance

Technique: Saveh basin. Iran. Environmental Earth Sciences, 75, 1-10.

14. Khan, S.D. Faiz, M.I. Gadea, O.C. and Ahmad, L. 2023. Study of land subsidence by radar interferometry and hot spot analysis techniques in the Peshawar Basin, Pakistan. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 26(1):173-184.

15. Karimi, S. Por khosravani, M. and Ramezani, A. 2023. Monitoring of subsidence phenomenon using differential radar interferometric method (case study: Khanmirza plain, Chaharmahal and Bakhtiari province). Natural geography, 15(59). 43-62. (In Persian)

16. Khorrami, M. Abrishami, S. Maghsoudi, Y. Alizadeh, B. and Perissin, D. 2020. Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. Scientific Reports, 10(1)11357:

17. Liu, J. Li, J. and Fan, C. 2020. A bibliometric study of pool fire related publications. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 63. 104030.

18. Liu, X. Wang, Y. and Yan, S. 2017. Ground deformation associated with exploitation of deep Ground water in Cangzhou City measured by multi-sensor synthetic aperture radar images. Environmental Earth Sciences, 76:6.

19. Mohammad hassani, M. and Shikh Shariate Kermani, B. 2021. Determining the Rate of Land Subsidence using Radar Interferometry Technique (Case Study: Industrial Area West of Kerman). Scientific Quarterly Journal of Transportation Research, 18(3): 79-90. (In Persian)

20. Papi, R. Attarchi, S. and Solimani, M. 1399. Time series analysis of land subsidence in the west of Tehran province (Shahriyar plain) and its relationship with groundwater withdrawal using radar interferometry technique. Geography and environmental sustainability (geographic research paper), 10(33): 109-128. (In Persian)

21. Qasemi, A. Bahmani, O. Akhavan, S. and Por Qasemi, H.R. 2023. Investigating the subsidence of Kobodar Ahang plain based on radar interferometric technique and changes in underground water level. Journal of Water and Soil Science, 33 (2): 201-183. (In Persian)

22. U.S, Department of the Interior. U.S, Geological Survey. 2000. USGS Fact, 165, <http://water.usgs.gov/ogw>.

23. Shafiai, N. Goli Mokhtari, L. Amir ahmadi, A. and Zandi, R. 2021. Spatial analysis of ground subsidence and groundwater loss using GWR model (case study: Noorabad Mamsani aquifer). Scientific Journal of Geography and Planning, 25(76): 171-159. (In

with Modflow mathematical model (Case study: Kermanshah Plain). Advanced Technologies in Water Efficiency, 2(4): 68. -87. (In Persian)

4. Barati, Kh. Darvishi, E. Azari, A. and Abedi Kopaei, J. 2018. Groundwater Modeling to Determine Hydrodynamic Coefficients in Unconfined Aquifer (Case Study: Kermanshah Plain). Iranian Journal of Soil and Water Research, 50 (3):687-700. (In Persian)

5. Bateson, L. Novellino, A. Hussain, E. Arnhardt, R. and Nguyen, HK. 2023. Urban development induced subsidence in deltaic environments: A case study in Hanoi, Vietnam. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 125.103585.

6. Chen, J. Knight, R. Zebker, HA. and Schreüder, WA. 2016. Confined aquifer head measurements and storage properties in the San Luis Valley, Colorado, from spaceborne InSAR observations. Water Resources Research, 52 (5): 3623-3636.

7. Chai, JC. Shen, SL. Zhu, HH. and Zhang, XL. 2004. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai. Geotechnique, 54 (2): 143-147.

8. Chatterjee, R.S. Fruneau, B. Rudant, J.P. Roy, P.S. Frison, P.L. Lakhera, R.C. Dadhwal, V.K. and Saha, R. 2006. Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) technique. Remote sensing of environment, 102(1-2):176-185.

9. Gabriel, AK. Goldstein, R.M. and H.A. Zebker. 1989. Mapping small elevation changes over large areas - Differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research, 94(B7): 9183-9191.

10. Han, J. Gong, H. Guo, L. Li, X. Zhu, L. Chen, B. Zhang, Q. Wu, L. Lei, J. and Zhu, X. 2023. Mechanism the land subsidence from multiple spatial scales and hydrogeological conditions- a case study in Beijing-Tianjin-Heibei, China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 50.101531.

11. Hu, R.L. Yue, Z.Q. Wang, L.U. and Wang, S.J. 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. Engineering Geology, 76(1-2): 65-77.

12. Hosseinzadeh, S. R. Akbari, E. Javanshiri, M. and Mohammadpour, Z. 2023. Spatial analysis of ground subsidence using radar interferometry (Case study: Central plain of Ghaen city). Journal of Geography and Environmental Hazards, 11(4): 99-125. (In Persian)

13. Jafari, F. Javadi, S. Golmohammadi, G. Karimi, N. and Mohammadi, K. 2016. Numerical simulation of groundwater flow and aquifer-system compaction using simulation and InSAR

26. Zamanirad, M. Sarraf, A. Sedghi, H. Saremi, A. and Rezaee, P. 2019. Modeling the influence of groundwater exploitation on land subsidence susceptibility using Machine Learning Algorithms. *Natural Resources Research*, (29):1127–1141.
24. Ye, S. Xue, Y. Wu, J. Yan, X. and Yu, J. 2016. Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeology Journal*, 24 (3): 685-693.
25. Sadrkia, M. 2022. Monitoring Land Subsidence using Persistent Scatterer Interferometry Time Series Analysis and Groundwater Level Variations: (Case Study: Sarab Plain). *Iran-Water Resources Research*, 18(2): 1-18. (In Persian)

Monitoring Ground Subsidence Based on Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry and Changes in Groundwater Level (Case Study: Kermanshah Aquifer)

Mohsen Kazemi¹, Hassan Khosravi², Ali Salajegheh^{3*}, Shahram Khalighi Sigaroodi⁴,
Shirin Mohammad khan⁵

Received: 2024-05-30 Accepted: 2024-08-07

Extended Abstract

Introduction

Natural hazards cause significant human and financial losses worldwide each year. Land subsidence is one of these hazards, and its importance has increased in recent years due to the occurrence of droughts in cities, especially in metropolises. This phenomenon has occurred in many plains of Iran due to over-exploitation of groundwater resources. The rate and spatial patterns of subsidence can change over time. Therefore, accurate measurement and predictive tools for monitoring and studying it are necessary. Radar interferometry (InSAR) is one of the new and powerful tools for determining the extent of land subsidence. This method is very effective and useful as a suitable and cost-effective solution in areas lacking leveling infrastructure. In fact, by providing high-precision satellite images, this technique enables the monitoring of the destructive phenomenon of land subsidence and plays a vital role in managing and controlling land subsidence. Given that the amount of groundwater withdrawal strongly affects the extent and distribution of subsidence, this research aimed to monitor annual land subsidence and evaluate its relationship with changes in groundwater levels in the Kermanshah aquifer. For this purpose, the temporal trend of land subsidence and fluctuations in groundwater levels during the same period were investigated and analyzed.

Materials and Methods

In this research, the land subsidence rate in the Kermanshah aquifer was monitored and investigated using the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) method. For this purpose, seven series of Sentinel A-1 radar images were used to examine the subsidence rate during the 2015-2021 period. Image analysis was performed in the Windows operating system environment using the SNAP software. Then, to estimate the maximum groundwater level decline in the Kermanshah

1. Ph.D. student in desert management and control, Faculty of Natural Resources, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Region, University of Tehran, Tehran

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

3. Corresponding Author and Professor, Faculty of Natural Resources, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Region, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: salajegh@ut.ac.ir

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

5. Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

4

5

aquifer, data from 38 piezometric wells throughout October 2015-2021 were used. The spatial information and the average groundwater level of the observation wells were entered into the ArcGIS software, and groundwater level variation maps in the study area were calculated using the IDW interpolation method. Subsequently, using the land subsidence maps and the annual groundwater level changes, a map of the average seven-year land subsidence rate and groundwater level changes was prepared. These maps were used for a more detailed and comprehensive analysis of the trend of changes and the mutual effects between the annual subsidence rate and groundwater level changes. In the present study, the relationship and correlation between the annual subsidence rate and the groundwater level change trend, both in urban and agricultural areas and in the entire aquifer domain, were thoroughly investigated and evaluated.

Results

The results of the Kermanshah aquifer study in the period 2015 to 2021 indicate significant fluctuations in the subsidence rate and changes in groundwater levels. In the early years of the study period, the subsidence rate in the stress-prone areas of the aquifer increased sharply, so that in 2015-2016 this rate ranged from 5.6 to 14.4- cm/year. This amount of subsidence occurred simultaneously with an unprecedented decline in groundwater levels of up to 12.6 meters during the same year. However, from 2016 to 2021, a trend of improvement in the aquifer's condition was observed, so that the subsidence rate decreased to 6.2 to 11.9- cm/year, and the groundwater level changes were limited to 0.19- to 11.8 meters per year. Detailed examination shows that the northern and western parts of the aquifer experienced the highest subsidence rates, averaging 3.4- to 6.3- cm/year, while the central and southern regions faced a decrease of 0 to 1.8- cm/year. Additionally, in the agricultural lands in the north of the aquifer, the groundwater level decline reached an average of 50 cm per year. Data analysis showed that the coefficient of determination between the average subsidence rate and the average groundwater level changes in urban and agricultural lands were 0.13 and 0.074, respectively, and for the entire aquifer area, it was 0.082, indicating a lack of strong correlation between these two variables in both land uses.

Discussion and conclusion

Radar imagery studies of the Kermanshah aquifer from 2015 to 2021 have revealed serious challenges related to declining groundwater levels and land subsidence. The results show a decreasing trend in the subsidence rate, from -14.4 cm/year in 2015-2016 to -11.9 cm/year in 2020-2021, with the highest rates observed in the northwestern and western parts of the aquifer. Concurrently, groundwater levels declined, with a maximum drop of -12.6 m recorded in 2015-2016 and a minimum of -0.19 m in 2019-2020. The maximum groundwater level decline was seen in the central and northern parts, while the southern and urban areas experienced the least decline. However, the correlation between subsidence rates and groundwater changes in urban and agricultural areas was low, suggesting that various factors, including faults, aquifer characteristics, and past groundwater changes, may have contributed to the land subsidence. The differences in the trends of subsidence and groundwater decline across the aquifer indicate the complexity of the issue. The study aims to provide a comprehensive understanding of the surface and subsurface changes in the Kermanshah aquifer. The findings can assist decision-makers in infrastructure and regional development planning, as well as in better managing groundwater challenges and addressing the land subsidence phenomenon through appropriate solutions. The present study provides valuable insights into the hydrogeological dynamics of the Kermanshah

aquifer, which can help policymakers and water resource managers develop effective strategies to mitigate the impacts of groundwater depletion and land subsidence in the region.

Keywords: *Sentinel-1A images, Interferometry, Inverse distance weighted (IDW) model, Water Resources Management SNAP software*

Acknowledgement

We thank the Tamab organization for providing the piezometric data of Kermanshah province.

Conflicts of interest

“The authors of this article declare that they do not have any conflict of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research.”

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution:

Mohsen Kazemi: Writing the initial version of the article, conceptualization, software analysis, drawing maps

Hassan Khosravi: Editing and revising the article.

Ali Salajegheh: Guidance, conceptualization, consultation, revision of the text of the article, control of the results

Shahram Khalighi Sigaroodi: Review of the article, control of the results

Shirin Mohammad khan: Consultation, revision of the text of the article, control of the results