



مقاله
پژوهشی

ارزیابی رفتار متقابل آبخوان با فرونشست زمین و ارتباط آن با سطح آب زیرزمینی و تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی

راداری

فاطمه رفیعی^۱، سعید قره چلو^{۲*}، سعید گلپان^۳

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵ / پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

چکیده

تغییرات اقلیمی جهانی و رشد جمعیت، منجر به افزایش تقاضای آب و منابع آب زیرزمینی به عنوان منبعی اساسی برای آب‌های شیرین شده است. خطر فرونشست زمین به دلیل پمپاژ آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب از جمله خطرات زیست محیطی است که خسارات زیادی به جوامع وارد می‌کند. این تحقیق در دشت سملقان یکی از دشت‌های کشاورزی در استان خراسان شمالی به صورت موردی انجام شده است که بر اساس اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای این استان، بیشترین منابع آب زیرزمینی از چاه‌های عمیق این دشت استخراج شده و در شرایط بحرانی قرار دارد. در این مطالعه به منظور

بررسی فرونشست زمین در اثر افت آب‌های زیرزمینی از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری از داده‌های پایین گذر ماهواره‌ی Sentinel-1 در بازه‌ی ۲۰۲۰-۲۰۱۴ استفاده شد و همچنین برای پایش تغییرات پوشش گیاهی از داده‌های ماهواره لندست-۸ در دشت سملقان و بررسی رفتار متقابل آبخوان بکار گرفته شد. با استفاده از داده‌های پیرومتری دشت نقشه‌های هم‌افت آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شده و ارتباط افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست تحلیل گردید. نقشه‌های حاصله نشان‌دهنده‌ی ارتباط مستقیم افت آب با فرونشست در آبخوان سملقان در بازه زمانی مورد مطالعه بود. حداکثر فرونشست در این دشت در سال ۲۰۱۹ مقدار بیشینه‌ی ۳۴ سانتی‌متر داشته و حداقل ۱۸ سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ برآورد شد. در نهایت ارتباط افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست منطقه مورد مطالعه قرار گرفت و رفتار آبخوان بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی رفتار الاستیک زمین در آبخوان سملقان و اطراف شهرستان چمن بید بود. همچنین با پردازش تصاویر لندست-۸ برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۵ ارتباط زمانی-مکانی تغییرات پوشش گیاهی با فرونشست مطالعه شد. بررسی نتایج نشان‌دهنده‌ی تخریب پوشش گیاهی به میزان ۵.۹٪ در مناطقی از دشت که تماماً با افت سطح آب‌های زیرزمینی مواجه بوده

فاطمه رفیعی^۱، سعید قره چلو^{۲*} (✉)، سعید گلپان^۳

۱. کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲. استادیار، گروه ژئوتکنیک- راه و نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳. دانشیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

DOI: 10.30495/girs.2023.689174

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: sgharachelo@shahroodut.ac.ir

و در پی آن فرونشست در منطقه رخ داده و همبستگی زمانی-مکانی بالایی را آشکار ساخت.

طرح مسئله:

رشد جمعیت و افزایش نیاز به آب‌های زیرزمینی موجب استخراج بی‌رویه این منابع شده است. فرونشست دشت‌های زیادی در ایران و سایر نقاط جهان از جمله چین، ژاپن و آمریکا را تحت تأثیر قرار داده و خسارات زیادی به آن‌ها وارد نموده است. امروزه از روش‌های مختلفی به منظور پایش فرونشست استفاده می‌شود که تداخل‌سنجی راداری یکی از سریع‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها بوده که علاوه بر دقت بالا، امکان پایش فرونشست را در بازه زمانی طولانی فراهم آورده است. جابه‌جایی عمودی زمین می‌تواند قابل بازگشت یا غیرقابل بازگشت باشد و متناسب با لایه آبخوان و تغییرات هد آب زیرزمینی است. با وقوع پدیده‌ی فرونشست در منطقه امکان تخریب و یا تغییر پوشش گیاهی در منطقه وجود دارد. همچنین با ایجاد شکاف در سطح زمین الگوی خطی پوشش گیاهی در این نواحی مشاهده می‌شود. به علاوه، تغییرات سطح آب زیرزمینی منجر به ایجاد تغییر در تراکم گیاهان منطقه می‌گردد.

دشت سملقان یکی از مهم‌ترین دشت‌های استان خراسان شمالی است که دچار بیلان منفی آب بوده و فرونشست‌های متعددی در آن مشاهده شده است. فرونشست زمین به آهستگی اتفاق می‌افتد اما در طولانی‌مدت خسارات زیادی به راه‌ها، مناطق مسکونی، ساختمان چاه‌ها و... وارد می‌کند؛ بنابراین مطالعه‌ی فرونشست در این دشت از اهمیت بالایی برخوردار است.

هدف:

در پژوهش حاضر با استفاده از پردازش داده‌های ماهواره‌های راداری و ارتباط سنجی تغییرات زمین و رفتار متقابل آبخوان در دشت سملقان، راهکارهای اجرایی مناسبی را جهت بازگشت‌پذیری یا کنترل فرایند فرونشست پیشنهاد خواهد شد. به علاوه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست-۸ تغییرات پوشش گیاهی منطقه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

روش تحقیق:

محدوده‌ی مورد مطالعه در این مطالعه دشت سملقان در نیمه غربی استان خراسان شمالی است. به منظور مطالعه‌ی فرونشست در این منطقه از تصاویر مسیر پایین گذر ماهواره سنتینل ۱ از سال ۲۰۱۴ تا

۲۰۲۰ و روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری استفاده شد. پس از انتخاب تصاویر پایه و پیرو، تداخل نگارها تهیه گردید و پردازش‌های لازم بر روی تداخل نگارها انجام شد. در نهایت نقشه‌های فرونشست تجمعی در سال‌های مورد بررسی تهیه شد. پس از آن، از داده‌های ۱۷ چاه پیزومتر در بازه‌ی ۱۳۹۷-۱۳۸۷ برای تهیه نقشه هم‌افت آب‌های زیرزمینی بهره‌گیری شد. نقشه آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش وزن دهی معکوس در سیستم اطلاعات جغرافیایی ترسیم گردید. همچنین به منظور بررسی تغییرات پوشش گیاهی در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۸ تصویر لندست-۸ در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ تهیه و پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، نقشه پوشش گیاهی منطقه ترسیم شد. در نهایت میان نتایج حاصل ارتباط برقرار گردید.

نتایج و بحث:

نتایج پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری و بررسی نقشه‌ی تجمعی الگوی رفتاری فرونشست را در طی زمان بر روی منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داد. فرونشست در دشت سملقان در سال ۲۰۱۵ در تمامی نقاط شمالی منطقه به میزان حداکثر ۱۸ سانتی‌متر مشاهده شد. در سال ۲۰۱۶ نیز فرونشست الگوی مشابه سال پیشین را دنبال نمود و بیشینه آن به میزان ۵ سانتی‌متر افزایش یافت. در سال ۲۰۱۷، فرونشست تقریباً در تمامی دشت مشاهده شده است. در شمال آشنخانه، در راستای شمال شرق-جنوب غرب بالآمدگی سطح زمین مشاهده شد. پس از آن در سال ۲۰۱۸، الگوی فرونشست مشابه سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ تکرار گردید و افت سطح زمین در شمال، شمال غرب و آبخوان سملقان مشاهده شد. پیشروی فرونشست در طول دوران مورد مطالعه مؤید پیشروی افت سطح زمین به سمت چمن بید به خصوص در انتهای بازه‌ی مورد مطالعه است. با به دنبال نمودن روند تغییرات سطح زمین، می‌توان بالآمدگی سطح زمین را پس از فرونشست آن در بعضی نقاط مشاهده نمود.

روند تغییرات سطح آب هر چاه و روند تغییرات میانگین سطح آب در دشت مورد بررسی قرار گرفته و نمودار آن‌ها ترسیم شدند. پس از آن داده‌ها به سیستم اطلاعات جغرافیایی وارد شده و با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه‌های هم‌افت آب زیرزمینی تهیه شدند. در بعضی مناطق دشت سملقان افت سطح آب زیرزمینی تا ۲۶ متر نیز مشاهده شد. به منظور بررسی بهتر ارتباط میان افت سطح آب با فرونشست، تغییرات سطح آب در چاه‌های پیزومتری در بازه

۱۳۹۹-۱۳۹۳ با فرونشست روی هم گذاری شد. در تمام نقاطی که چاه‌های پیژومتری افت داشته‌اند، فرونشست نیز رخ داده است. همچنین در قسمت‌هایی که افت آب کم بوده شعاع فرونشست در نواحی اطراف چاه کمتر بوده و در اطراف چاه‌های با افت بیشتر، با شعاع بیشتری گسترده شده است. فرونشست بخش‌های کم ارتفاع سملقان که در آن تمرکز زمین‌های کشاورزی زیاد بوده و برداشت آب در آن مناطق زیاد انجام می‌گردد را کاملاً تحت تأثیر قرار داده است. با افت کمتر سطح آب میزان فرونشست نیز کاهش یافته است. پس از محاسبه‌ی ضریب ذخیره تقریبی آبخوان با استفاده از نمودار تغییرات سطح زمین بر حسب تغییرات سطح آب زیرزمینی، نقشه تغییرات ضریب ذخیره‌ی آبخوان دشت سملقان با استفاده از روش درون‌یابی IDW ترسیم شد. کمترین مقدار ضریب ذخیره‌ی محاسبه‌شده، برابر با ۰.۰۴ و بیشترین مقدار برابر با ۰.۳۶ به دست آمد. هرچه مقدار ضریب ذخیره‌ی محاسباتی بیشتر باشد، جابه‌جایی سطح زمین حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات سطح آب دارد. با استفاده از نقشه‌ی حاصله، میزان تقریبی تغییرات سطح زمین را می‌توان با استفاده از سطح آب زیرزمینی در نقشه‌ی موردنظر تخمین زد. به فاصله‌ی شعاعی ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ متر از چاه‌های مشاهداتی، تمامی نقشه‌های جابه‌جایی تولیدشده در جهت پایین گذر با استفاده از نرم‌افزار GIS برش داده شدند. سپس میانگین داده‌های برداشت‌شده برای هر سال در فاصله ۲۵۰ متری از هر چاه در یک نمودار ترسیم شد. همچنین یک خط بر روی نمودار برآزش داده شد که نماینده‌ی رفتار غیر الاستیک در منطقه است. با توجه به روند تغییرات سطح زمین در بازه‌ی مورد مطالعه، کل بازه به ۴ دوره تقسیم شد که شامل هر دو رفتار بالآمدگی و فرونشست زمین بودند. پس از انتخاب دوره‌های زمانی، نسبت مقدار بالآمدگی به فرونشست و نسبت بازه‌ی زمانی آن‌ها در هر دوره محاسبه و رابطه میان طول دوره هر بازه فرونشست-بالآمدگی نیز بررسی شد. بیشترین نسبت بالآمدگی به فرونشست در دوره‌ی چهارم است. به‌منظور دستیابی به مدیریت بهینه‌ی آبخوان، بهترین میزان نسبت زمانی بین ۲-۴ است. طول دوره آماری انتخاب‌شده با توجه به روند رفتار زمین، اولین دوره بهترین فاصله زمانی را دارا است که در آن طول دوره بازیابی ۲۷۷ روز و طول دوره افت ۱۹۳ روز بوده است.

در مناطق پوشش گیاهی پرتراکم افزایش پوشش رؤیت شده است. با توجه به نقشه‌های آب زیرزمینی، در جنوب شرق، شمال و شمال غرب دشت سملقان بیشترین افت سطح آب برآورد شد که در این مناطق نیز تغییر پوشش گیاهی پرتراکم به متوسط و متوسط به ضعیف و یا فاقد پوشش گیاهی مشاهده شدند. همچنین در بخش جنوب و جنوب غرب دشت سملقان نیز تغییرات پوشش گیاهی زیادی رخ داده که در این مناطق افت سطح آب تا ۴ متر برآورد شده است.

نتیجه‌گیری:

نتایج نشان داده که فرونشست در دشت سملقان الگوی تقریباً ثابتی در طول زمان داشته و اگرچه در بخش میانی دشت سملقان فرونشست هر ساله رخ داده است، در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، در برخی مناطق بالآمدگی مشاهده شده است. با توجه به نقشه‌های جابه‌جایی سالیانه، مشاهده شد که در برخی قسمت‌های منطقه‌ی مورد مطالعه شامل شمال آبخوان سملقان، شمال و شمال غرب این دشت فرونشست به میزان زیادی رخ داده که این مناطق باید مورد توجه قرار گیرند. با بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت سملقان، می‌توان گفت فرونشست صورت گرفته در این دشت تحت تأثیر تغییرات آب زیرزمینی و استخراج بی‌رویه از آبخوان این دشت بوده است. مطالعه رفتار متقابل آبخوان نسبت به تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان‌دهنده‌ی رفتار الاستیک زمین در آبخوان سملقان و اطراف چمن بید و رفتار غیرقابل بازگشت سطح زمین در سایر نقاط دشت سملقان است. شناخت رفتار زمین به‌منظور کاهش خسارات و دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب امری ضروری است. پیشنهاد می‌شود به‌منظور کاهش خسارات ناشی از فرونشست، به ازای هر سال برداشت بی‌رویه از منابع دشت، دو سال دشت را وارد فاز بازیابی نمود.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی؛ تداخل سنجی تفاضلی راداری؛ رفتار متقابل آبخوان؛ فرونشست؛ پوشش گیاهی

لطفاً به این مقاله استناد کنید: طاهرمنش، س.، اصغری بیرامی، ب.، مختارزاده، م. بررسی کارایی شبکه یادگیری عمیق در شناسایی تغییرات اراضی با استفاده از تصاویر دو زمانه لندست-۸. نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۴(۲): ۷۳-۵۳.

مقدمه

سفره‌های آب زیرزمینی یکی از منابع پراهمیت هر کشور می‌باشند. با توجه به رشد جمعیت و افزایش نیاز به این منابع بارزش، استخراج بی‌رویه از آن به صورت قابل توجهی افزایش یافته است (۳). فرونشست یکی از مشکلات زیست محیطی است که در اثر استخراج آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد (۶). فرونشست شهرها و مناطق زیادی را در جهان تحت تأثیر قرار داده و خسارات زیادی به آن‌ها وارد کرده است (۲۰). به طور مثال در دره‌ی سن جاکوین کالیفرنیا در ۵۰ سال گذشته ۸.۵ متر فرونشست ایجاد شده است (۲۱). ایالت‌های آریزونا و کالیفرنیا، آمریکا، توکیو در ژاپن، بانکوک در تایلند و مکزیکوسیتی در مکزیک از جمله مناطق مهم در جهان می‌باشند که با این پدیده مواجه هستند (۱۶). در ایران نیز به علت شرایط اقلیمی خشک حاکم بر اغلب نواحی داخلی و تمرکز بر منابع آبی زیرزمینی، پدیده‌ی فرونشست سابقه‌ای به نسبت طولانی دارد و احتمال می‌رود بیش از ششصد دشت ایران در معرض پدیده‌ی فرونشست باشند (۵).

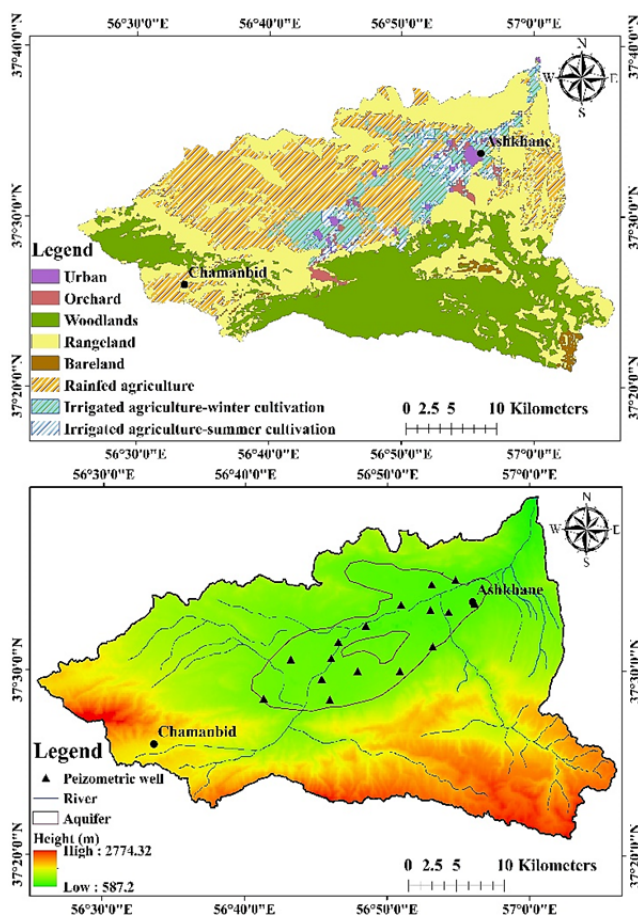
امروزه با پیشرفت تکنولوژی از سه روش اصلی به منظور اندازه‌گیری دامنه‌ی فرونشست استفاده می‌شود که شامل ترازبندی دقیق، ایستگاه‌های دائمی سامانه موقعیت‌یاب جهانی و تداخل سنجی راداری هستند (۱۳). یکی از روش‌های سنجش از دور که تاکنون مورد بهره‌برداری قرار گرفته تداخل سنجی راداری است. این روش از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های پایش فرونشست است که پایش فرونشست در تمام محدوده‌ی مورد بررسی را برای تمام نقاط محدوده در دوره‌های زمانی مختلف فراهم می‌آورد (۱۱). یکی از دقیق‌ترین روش‌های تداخل سنجی راداری، تداخل سنجی تفاضلی راداری است که برای شناسایی حرکات زمین با دقت و توان تفکیک مکانی مناسب در بازه‌ی زمانی مورد نظر استفاده می‌شود (۱۴). فرونشست زمین در اثر افت آب‌های زیرزمینی در مناطق حاوی خاک ریزدانه و در آبخوان‌های محصور به میزان بیشتری رخ می‌دهد (۱۸). چیدمان جدید ایجاد شده در لایه‌ی خاک، حجم آن را کاهش داده و موجب تغییرات در ضخامت عمودی

آن می‌گردد. در برخی موارد در صورت برگشت سطح آب، بازگشت تراکم در لایه‌های خاک امکان‌پذیر است. جابجایی عمودی زمین ممکن است در اثر فشردگی قابل بازگشت (elastic) یا غیرقابل بازگشت (inelastic) باشد (۱). اگر سطح آب زیرزمینی بالاتر از پایین‌ترین سطح قبلی (تنش قبل از تحکیم) باقی بماند، تغییر شکل الاستیک رخ می‌دهد. هنگامی که سطح آب زیرزمینی به زیر پایین‌ترین سطح قبلی می‌رسد، جابجایی برگشت‌ناپذیر و کاهش تداخل در سیستم آب زیرزمینی رخ می‌دهد (۶). اگر میزان تغذیه در یک آبخوان بیش از میزان استخراج از آن باشد، افت زمین تا حدی جبران می‌شود. مدیریت مناسب استخراج از آبخوان، مقدار بارش کافی در سال آماری مورد نظر و نفوذ به میزان مناسب به آبخوان، تغذیه‌ی مصنوعی آبخوان و تراکم سازی از طریق تزریق دوغاب یا بتن خود متراکم به زمین، از جمله عواملی هستند که سرعت فرونشست را بهبود بخشیده و می‌توانند خسارات ناشی از آن را تا حد قابل قبولی کاهش دهند (۱۰) و (۱۲).

خسروپناه و همکاران (۹) پیامدهای تأثیرات بی‌رویه‌ی افت آب‌های زیرزمینی را در دشت سملقان بررسی کردند. این محققان پس از بررسی تغییرات ۱۰ ساله‌ی تراز آب زیرزمینی، جهت حرکت و بیشترین افت آب را تعیین نمودند. شکاف‌های طولی کششی در امتداد تقریباً شمالی-جنوبی در شمال غرب دشت به دلیل افت سطح آب و زهکشی از لایه‌های ریزدانه هم‌راستای گسل منطقه ایجاد شده‌اند که در زمین‌های کشاورزی قابل رؤیت هستند. گائو و همکاران (۴) فرونشست در پکن پایتخت چین را با استفاده از روش تداخل سنجی و داده‌های چاه‌های مشاهداتی مورد مطالعه قراردادند و رابطه‌ی میان داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل از تداخل سنجی برقرار کردند. در نواحی شمالی منطقه مورد مطالعه، در اثر استخراج و افت هد هیدرولیکی، تراکم غیرقابل بازگشت مشاهده شد. در برخی مناطق رفتاری قابل برگشت فصلی مشاهده شده که در اثر تغییرات آب سطحی اتفاق افتاده است. میلر و همکاران (۱۲) فرونشست دره‌ی مرکزی کالیفرنیا را با استفاده از داده‌های

کاربری اراضی در شکل ۱ نشان داده شده است.

دشت سملقان از دشت‌های متنوعی حفر چاه در استان خراسان شمالی با ۱۸۲ چاه با میزان تخلیه‌ی ۳۲.۵ میلیون مترمکعب است. از رشته‌قنات‌های موجود در این دشت سالانه ۱.۲ میلیون مترمکعب برداشت انجام می‌شود. توان تغذیه‌ی آبخوان آن ۵ میلیون مترمکعب در سال است که این عدم جبران میزان استخراج، تعادل آبخوان را به هم زده است (۱۹).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقشه‌ی کاربری اراضی
 Fig. 1. Location map of the study area and land use

داده‌های مورد استفاده

به منظور تهیه و بررسی نقشه‌ی هم افت آب زیرزمینی داده‌های ۱۷ چاه مشاهداتی دشت سملقان در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۷ از سامانه‌ی آمار و گزارش مدیریت منابع آب ایران تهیه شد. بازه‌ی انتخابی این داده‌ها به علت وجود کمترین داده‌ی

UAVSAR، تراز آب زیرزمینی، تراز یابی دقیق، تصاویر Sentinel-1، لاگ چاه‌ها و شرایط محیطی مورد مطالعه قراردادند. در این مطالعه در بخشی از منطقه فرونشست الاستیک تشخیص داده شد. رضایی و موسوی (۱۸) از تکنیک InSAR برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل زمین در دشت گرگان، استفاده کردند. در این مطالعه از داده‌های فصلی سطح آب و تصاویر Sentinel-1 استفاده شد؛ که جابه‌جایی عمودی الاستیک فصلی در سیستم آبخوان بسته گرگان را نشان داد.

دشت سملقان یکی از مهم‌ترین دشت‌های استان خراسان شمالی است که دچار بیابان منفی آب بوده و فرونشست‌های متعددی در آن مشاهده شده است (۱۷). فرونشست زمین به آهستگی اتفاق می‌افتد اما در طولانی مدت خسارات زیادی به راه‌ها، مناطق مسکونی، ساختمان چاه‌ها و... وارد می‌کند؛ بنابراین مطالعه‌ی فرونشست در این دشت از اهمیت بالایی برخوردار است. در مطالعه‌ی پیشین که در سال ۱۳۹۰ بر روی دشت سملقان انجام شده، فرونشست در این منطقه اندازه‌گیری نشده و ارتباط آن با میزان افت سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار نگرفته است. به عامل ایجاد این پژوهش بر آن است تا از طریق پردازش داده‌های ماهواره‌های راداری و تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری و ارتباط سنجی تغییرات زمین و رفتار متقابل آبخوان در دشت سملقان، راهکارهای مناسبی را جهت بازگشت‌پذیری یا کنترل فرایند فرونشست پیشنهاد نماید.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه، در نیمه‌ی غربی استان، شمال غرب بجنورد قرار دارد و یکی از زیر حوضه‌های حوضه آبخیز اترک و از توابع شهرستان آشنخانه است. در سال‌های گذشته در شمال غرب دشت سملقان شکاف‌هایی ایجاد شده که در حال توسعه اند (۱۷). محدوده‌ی مورد مطالعه با مساحتی برابر با ۱۱۴۸ کیلومتر مربع در منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار گرفته است (۱۹). موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقشه

فرونشست در دشت سملقان تداخل سنجی تفاضلی راداری به علت دقت و سرعت پایش بالا و همچنین عدم استفاده در مطالعات پیشین این منطقه بوده است. هدف این تکنیک، جداسازی سهم فاز توپوگرافی سطح زمین و سهم فاز جابجایی آن برای نشان دادن میزان جابجایی آن است. به منظور حذف سهم فاز توپوگرافی از یک تداخل نگار دیگر و یا مدل رقومی زمین استفاده می‌شود. با این تکنیک به صحت در حد میلی‌متر یا سانتی‌متر برای سرعت تغییر شکل زمین می‌توان دست‌یافت (۲۵). یکی از مهم‌ترین کاربردهای تداخل سنجی راداری، کم کردن دو جفت (Pair) تداخل نگار (Interferogram) از هم بوده که به آن تداخل سنجی تفاضلی گفته می‌شود. هرچه کیفیت تداخل نگارها بیشتر باشد نتایج دقیق‌تری در اختیار قرار خواهند گرفت.

یک پارامتر کلیدی در محاسبه‌ی جابه‌جایی فاز تداخل سنجی است. بدین منظور طی چند فرآیند همبستگی پیکسل‌ها بهبود داده‌شده و کیفیت تداخل نگار افزایش می‌یابد. به منظور پردازش داده‌های دریاچه رادار مصنوعی در مطالعه‌ی حاضر، از نرم‌افزار رایگان SNAP (Sentinel Application Platform, <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>) استفاده شده است. مراحل انجام پردازش‌های این نرم‌افزار در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور کاهش عدم هم‌دوسی (coherence) و خطاهای ناشی از آن تصاویر به گونه‌ای انتخاب شد که اختلاف زمانی و مکانی کمی داشته باشند. برای تصاویر پایین گذر از تصویری که ثبت آن پس از انجام واقعه انجام گرفته است (در این مطالعه سال ۲۰۲۰) به عنوان تصویر اصلی بهره‌گیری شد. به منظور انجام پردازش‌های تداخل سنجی، دو یا تعداد بیشتری تصویر به صورت یک پشته (Stack) هم مرجع شدند. در مطالعه‌ی حاضر، به منظور تهیه‌ی تداخل نگارها، تصویر اول به عنوان تصویر اصلی و سایر تصاویر به عنوان تصویر پیرو در نظر گرفته شدند. به منظور هم مرجع کردن تصاویر، پیکسل‌های تصاویر پیرو نسبت به تصویر اصلی هم‌تراز شد تا هر هدف زمینی در هر دو تصویر در موقعیت مشابه شناخته شود (۲۴).

مفقود و همچنین روند یابی سطح آب در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ بوده است. نقشه‌های تولیدشده با استفاده از این داده‌ها در نرم‌افزار GIS و با استفاده از روش وزن دهی معکوس فاصله در نرم‌افزار (Inverse Distance Weighted, IDW) تهیه شده‌اند.

داده‌های ماهواره‌ای راداری از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ به منظور پردازش‌های تداخل سنجی راداری از ماهواره‌ی Sentinel-1، از سنجنده‌ی SAR-C (Synthetic Aperture Radar- Band C) از طریق سایت <https://asf.alaska.edu> تهیه شد. این ماهواره دارای پلاریزاسیون‌های (Polarization) مختلف VV, HH, VH و HV است. به منظور افزایش دقت پردازش از پلاریزاسیون‌های VV بهره‌گیری شده است. تصاویر (Single Look Complex) SLC مربوط به این ماهواره از سال ۲۰۱۴ موجود است. در پژوهش حاضر از ۲۵ تصویر در بازه ۲۰۲۰-۲۰۱۴ مسیر پایین گذر (Descending) ماهواره‌ی Sentinel-1 در حالت IW (Interferometric Wide) استفاده شده است. داده‌های تهیه شده به منظور انجام پردازش‌های تداخل سنجی، با کمترین اختلاف خط مبنای عمودی و تمامی فصول سال را شامل می‌شوند. مدل رقومی (Digital Elevation Model-DEM) مورد استفاده در پژوهش حاضر مدل رقومی ۳۰ متری سال ۲۰۱۴ بوده که از طریق سایت <https://earthexplorer.usgs.gov> تهیه شده است.

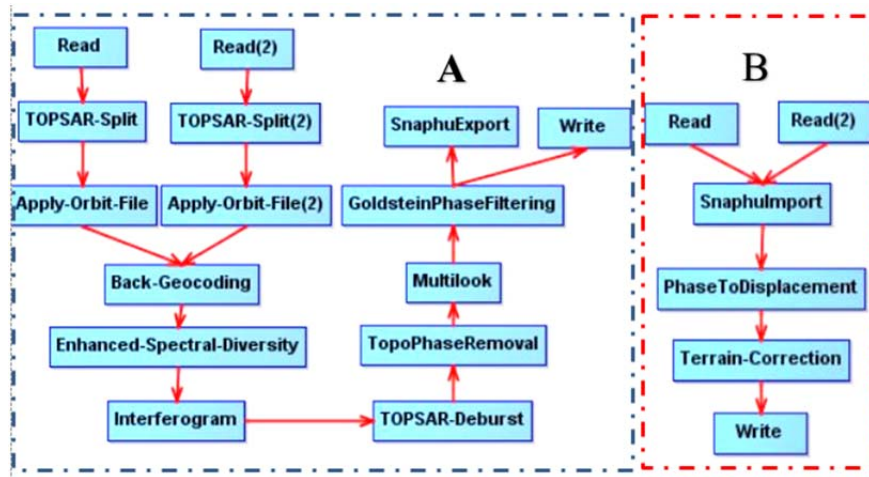
نقشه‌های پوشش گیاهی مظهر تغییرات عوامل مختلف بر روی منطقه‌ی مورد مطالعه‌اند. عوامل مختلفی از قبیل اقلیم، خاک و رطوبت بر روی تراکم پوشش گیاهی منطقه تأثیر می‌گذارند که سطح آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین این عوامل است (۸). به علاوه، مطالعه پوشش گیاهی در این منطقه جنبه‌ی دیگری نیز دارد که بررسی ارتباط تغییرات آن با فرونشست بوده و در قسمت بحث و نتیجه‌گیری به آن پرداخته شده است. برای مطالعه‌ی پوشش گیاهی در دشت سملقان، از ۸ تصویر ماهواره‌ی لندست ۸ در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ و از نرم‌افزار Envi جهت پردازش داده‌ها بهره‌گیری شده است.

روش انجام پژوهش

همانگونه که گفته شد، روش مورد استفاده به منظور پایش

جابه‌جایی عمودی زمین تهیه و زمین مرجع شدند.

به‌منظور تصحیح تخمین‌های آزمون و دامنه از Enhanced Spectral Diversity استفاده شد (۱۶). سپس نقشه‌های



شکل ۲. مراحل انجام پردازش‌های تداخل سنج تفاضلی راداری

Fig. 2. DInSAR Processing flowchart

از جمله درختکاری و تغییر کاربری اراضی اشاره نمود. تغییرات مراتع در یک منطقه ممکن است در یک بازه ۱ الی ۲ ساله نمایان شود و یا اثر تغییرات تراز آب با تأخیر به وقوع بپیوندد. به همین جهت، تصویر تهیه‌شده پوشش گیاهی، دو سال پس از آخرین داده‌های آماری آب‌های زیرزمینی تهیه شد. این داده‌ها با ابتدای بازه مطالعه‌ی تداخل سنجی هم‌پوشانی دارند. افزایش مقدار NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) به معنی افزایش فراوانی و تراکم پوشش گیاهی است. این شاخص در بازه ۱ و ۱- بوده که ۱- معرف آب و مناطق فاقد پوشش گیاهی، مقادیر بالاتر از صفر نشان‌دهنده‌ی وجود پوشش گیاهی و افزایش این مقادیر تا ۱ نمایانگر پوشش گیاهی متراکم است. کاهش NDVI معرف آب، فضای باز، خاک لخت، ساخت‌وساز و از این قبیل فعالیت‌ها است (۲۶).

NDVI یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها به‌منظور پایش تغییرات پوشش گیاهی است. برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی در این پژوهش، در نرم‌افزار Envi، تصحیح هندسی، اتمسفری و پیش‌پردازش‌های اولیه موردنیاز به‌منظور کاهش خطا صورت گرفت. پس از محاسبه شاخص پوشش گیاهی نرمال شده با استفاده از رابطه ۱ (۱۵)، پس از تهیه ۴ نقشه

در مطالعات مرتبط با تغییرات سطح زمین می‌توان از دو جنبه پوشش گیاهی را بررسی نمود: اولاً با نشست و جابه‌جایی سطح زمین و همچنین فروریزش سطح آن امکان تخریب و یا تغییر پوشش گیاهی وجود دارد (۱۵)؛ ثانیاً با ایجاد شکاف‌های سطح زمین، الگوی خطی پوشش گیاهی در این شکاف‌ها مشاهده می‌گردد. با وقوع فرونشست و تغییرات سطح زمین امکان تغییر تراکم و تغییرات تیپ گیاهی وجود دارد (۷). به‌طور مثال با حرکت رواناب به سمت شکاف‌ها، الگوی خطی پوشش گیاهی در این مناطق مشاهده می‌شود. بررسی پوشش گیاهی این منطقه جنبه دیگری نیز دارد و آن بررسی ارتباط با تغییرات سطح آب زیرزمینی است. افت شدید سطح آب می‌تواند منجر به کاهش تراکم گیاهان در مراتع شود (۸). پوشش گیاهی عاملی مهم برای بررسی روند تغییرات سطح تراز آبخوان در نظر گرفته می‌شود. البته، تغییرات پوشش گیاهی می‌تواند با باران بهاره اتفاق بیفتد و یا با تغییرات بارش فصلی گیاهان یک‌ساله در منطقه رویش یابند و تغییری در نتایج مورد انتظار ایجاد کنند ولیکن منظور بیشتر مربوط به گیاهان چندساله است. از عوامل دیگری که باعث تغییر در نتایج مورد انتظار می‌شود، می‌توان به دخالت‌های انسانی

غرب منطقه فرونشستی مشاهده نشده است، این رفتار زمین در سال ۲۰۱۶ نیز تکرار شده و بیشینه فرونشست تا ۲۳ سانتی‌متر افزایش یافته است. در سال ۲۰۱۷، الگوی فرونشست زمین کمی تغییر کرده و تقریباً در تمام دشت گسترده شده است. در شمال آشنخانه، سطح زمین در راستای شمال شرق-جنوب غرب کمی بالا آمدگی داشته است. در سال ۲۰۱۸، مجدداً الگوی پیشین فرونشست در دشت سملقان تکرار شده و به سمت مرکز دشت منتقل شده است. تحقیقات میدانی در شهر آشنخانه و اطراف آن نشان‌دهنده ترک دیوارها، ایجاد فرو چاله، ترک در دیوارها و لوله زایی چاه‌ها بود. بررسی نقشه‌ها نشان‌دهنده تکرار وقوع پدیده فرونشست در شمال و شمال غرب دشت سملقان، بخشی مرکزی آن که آبخوان در آنجا وجود دارد در تمامی بازه زمانی مورد مطالعه و بخش غربی آن در نزدیکی چمن بید در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ است. پیشروی افت زمین غرب به سمت چمن بید است که در صورت عدم مدیریت صحیح منجر به خساراتی در مناطق مسکونی خواهد شد.

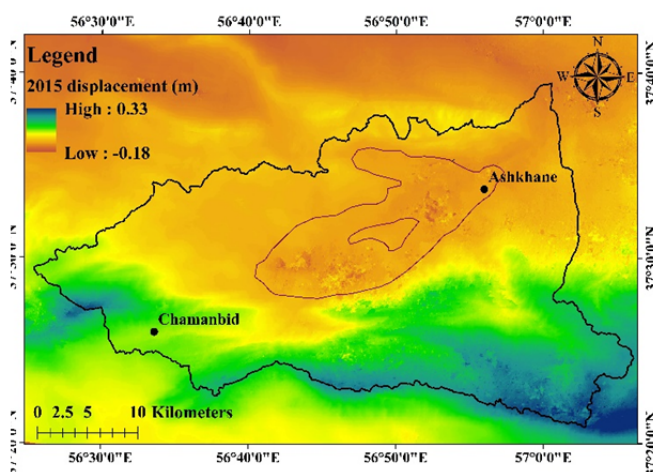
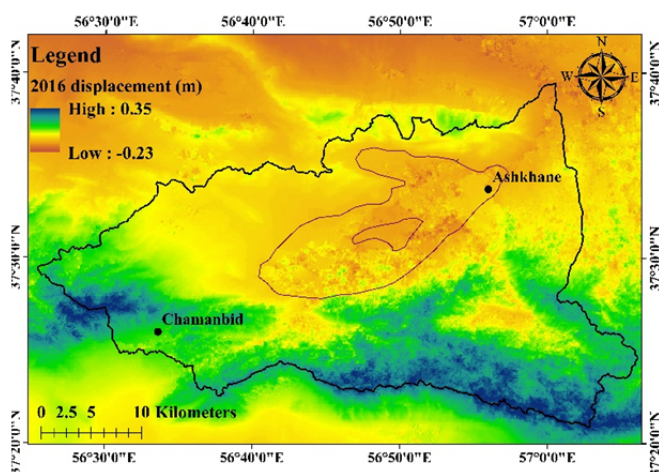
NDVI شامل ۴ فصل مختلف برای هر سال و میانگین‌گیری آن‌ها در سال مورد نظر، اقدام به تحلیل تغییرات پوشش گیاهی گردید.

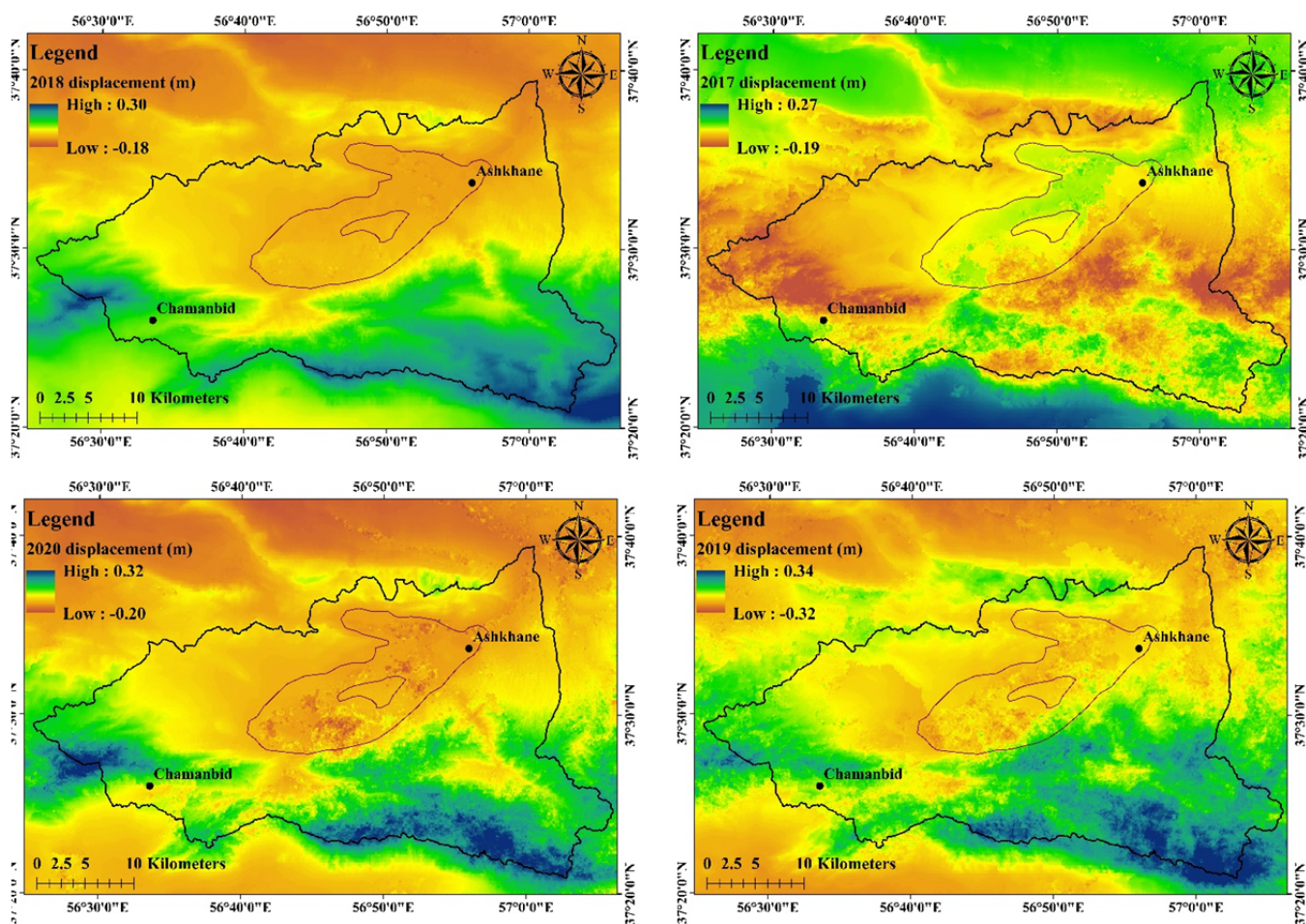
$$DVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad [۱]$$

نتایج

بررسی نقشه‌های جابه‌جایی

نتایج پردازش‌های تداخل سنجی راداری و بررسی نقشه‌ی تجمعی الگوی رفتاری فرونشست را در طی زمان بر روی منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داد که در شکل ۳ قابل مشاهده است. بررسی نقشه‌ی فرونشست در منطقه در سال ۲۰۱۵ نشان‌دهنده فرونشست زمین در تمامی نقاط شمالی دشت سملقان است (شکل ۳). شایان ذکر است مقادیر منفی که در نقشه‌های تولید شده بارنگ‌های زرد تا قرمز قابل مشاهده هستند نشان‌دهنده افت سطح زمین، فرونشست، در منطقه هستند. به همین ترتیب مقادیر مثبت که با استفاده از رنگ‌های سبز و آبی نشان داده شده‌اند نمایانگر بالا آمدگی سطح زمین در منطقه‌ی مورد مطالعه‌اند. در سال ۲۰۱۵ در جنوب و جنوب



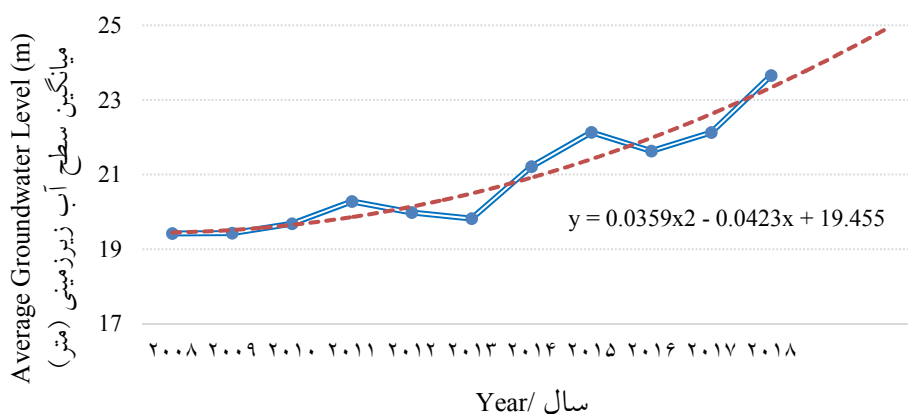


شکل ۳. نقشه‌های جابه‌جایی تجمعی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۵ در سری پایین‌گذر داده سنتینل-۱
 Fig. 3. Cumulative displacement maps for 2015-2020 on Sentinel-1 descending mode

بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی

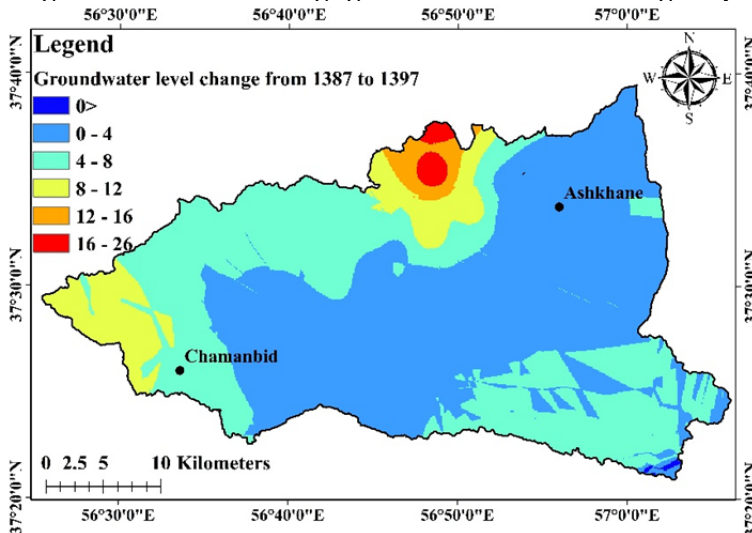
به‌منظور انجام این پژوهش، آمار ۱۷ چاه مشاهده‌ای در بازه ۱۳۸۷-۱۳۹۷ بررسی شد. در ابتدا داده‌های آماری جمع‌آوری و مرتب شدند، سپس روند تغییرات سطح آب هر چاه و روند تغییرات میانگین سطح آب در دشت مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای آن‌ها ترسیم شد. پس از آن داده‌ها با استفاده از روش درون‌یابی IDW و نقشه‌ی هم‌افت آب زیرزمینی تهیه شد. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه‌ی مورد مطالعه ترسیم شده و بهترین خط از میان آن برازش داده شده که شکل ۴ قابل مشاهده است.

با به دنبال نمودن روند تغییرات سطح زمین، می‌توان بالاآمدگی سطح زمین را پس از فرونشست آن در بعضی نقاط مشاهده نمود. به‌طور مثال اطراف چمن بید، آشنخانه، برخی قسمت‌های جنوبی دشت و حتی شمال دشت در سال ۲۰۱۶ سطح زمین بعد از فرونشست پیشین آن در نقشه جابه‌جایی آپلیفت مشاهده شده است. همچنین در برخی مناطق آبخوان سملقان در غرب آشنخانه و شمال شرق دشت، غرب دشت سملقان در شمال غرب شهرستان چمن بید و جنوب آبخوان که در سال ۲۰۱۷ درگیر فرونشست بوده‌اند در سال‌های بعدی بالاآمدگی رؤیت شده است. در نتیجه احتمال الاستیک بودن رفتار زمین بالا است که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.



شکل ۴. نمودار تغییرات میانگین سطح آب زیرزمینی در دشت سملقان

Fig. 4. Variations in average groundwater level in Semalghan plain



شکل ۵. نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی

Fig. 5. Map of Groundwater level change

نقشه‌های هم‌سطح آب زیرزمینی ترسیم شده و پس از محاسبه اختلاف آن‌ها نقشه‌ی هم‌افت سطح آب زیرزمینی ترسیم گردید. نقشه حاصله در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل در بعضی مناطق دشت سملقان افت سطح آب زیرزمینی تا ۲۶ متر نیز رخ داده است. به‌طور عمومی تمامی نقاط دشت درگیر افت سطح آب زیرزمینی بوده‌اند.

بررسی ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با فرونشست به‌منظور بررسی بهتر ارتباط میان افت سطح آب با فرونشست، تغییرات سطح آب چاه‌های پیزومتری در بازه ۱۳۹۳-۱۳۹۹ با فرونشست روی هم گذاری شدند. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در تمام نقاطی که چاه‌های پیزومتری افت داشته‌اند، فرونشست نیز رخ داده است. همچنین در قسمت‌هایی که افت آب کم بوده شعاع فرونشست در نواحی اطراف چاه کمتر بوده و بالعکس، فرونشست در اطراف چاه‌های با افت بیشتر، با شعاع بیشتری گسترده شده است.

فرونشست بخش‌های کم ارتفاع سملقان که در آن تمرکز زمین‌های کشاورزی (شکل ۱) زیاد بوده و افت آب در آن مناطق زیاد بیشتر بوده (شکل ۵) را کاملاً تحت تأثیر قرار داده است. با افت کمتر سطح آب، میزان فرونشست نیز کاهش یافته

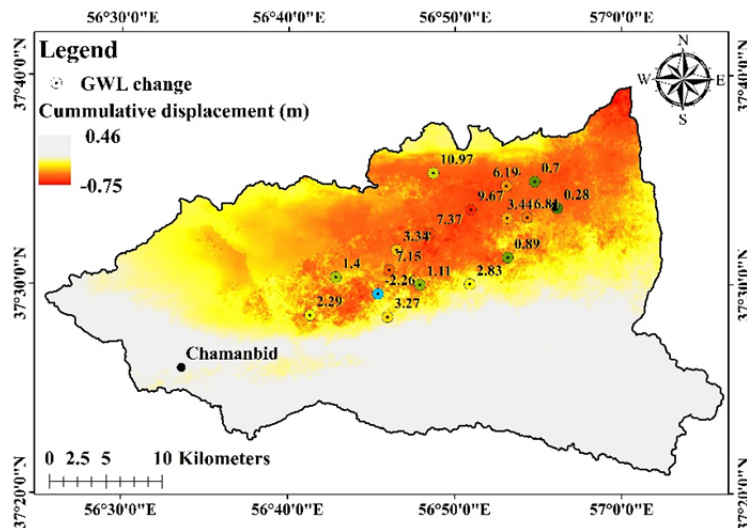
بررسی ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با فرونشست به‌منظور بررسی بهتر ارتباط میان افت سطح آب با فرونشست، تغییرات سطح آب چاه‌های پیزومتری در بازه ۱۳۹۳-۱۳۹۹ با فرونشست روی هم گذاری شدند. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در تمام نقاطی که چاه‌های پیزومتری افت داشته‌اند، فرونشست نیز رخ داده است. همچنین در قسمت‌هایی که افت آب کم بوده شعاع فرونشست در نواحی اطراف چاه کمتر بوده و بالعکس، فرونشست در اطراف چاه‌های با افت بیشتر، با شعاع بیشتری گسترده شده است.

بررسی ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با فرونشست

به‌منظور بررسی بهتر ارتباط میان افت سطح آب با فرونشست، تغییرات سطح آب چاه‌های پیزومتری در بازه

چاه‌ها با توجه به شکل ۷ و نسبت به زمان نیز در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

است. در ادامه در مورد فرونشست در موقعیت چاه‌های پیزومتری بحث خواهد شد که تغییرات فرونشست بافاصله از



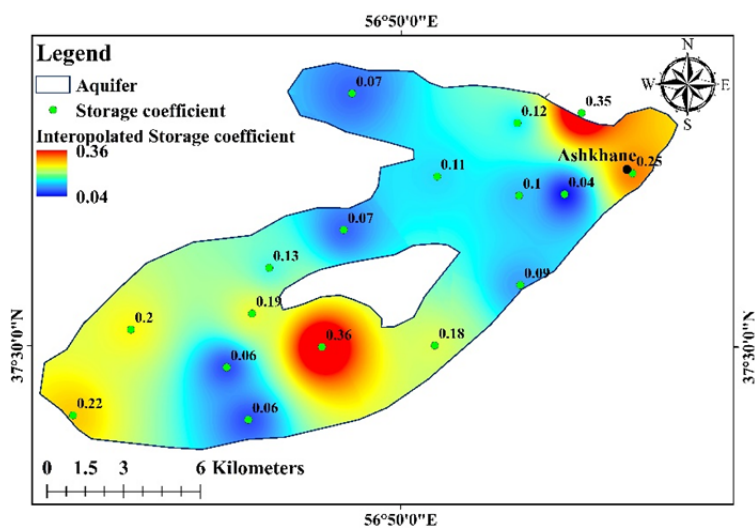
شکل ۶. موقعیت پیزومترهای موجود در دشت و افت سطح آب در آن‌ها نسبت به فرونشست رخ داده در منطقه مورد مطالعه

Fig. 6. Position of piezometers in the plain and water level decreasing of these wells in relation with subsidence in the test site

ذخیره‌ی سفره به دست می‌آید که ذخیره نمایانگر نفوذپذیرترین بخش آبخوان است و می‌تواند به ازای افت مقدار مشخصی از سطح آب، مقدار تقریبی فرونشست را برآورد نماید (۲۱). بدین ترتیب، در موقعیت تمامی چاه‌های پیزومتری ضریب ذخیره محاسبه شد. کمترین مقدار ضریب ذخیره‌ی محاسبه شده، برابر با ۰.۰۴ و بیشترین مقدار برابر با ۰.۳۶ به دست آمد.

بررسی رفتار متقابل آبخوان

یکی از روش‌های بررسی ارتباط میان تغییرات سطح آب زیرزمینی و تغییرات سطح زمین این است که این دو پارامتر بر روی نمودار تحلیل شوند تا تغییرات سطح آن‌ها با یکدیگر مقایسه شود. پس از آنکه تغییرات سطح آب بر روی ستون Y و تغییرات سطح زمین با استفاده از داده‌های تداخل سنجی بر روی محور X قرار گرفتند، بهترین خط از میان این داده‌ها برازش داده می‌شود و از معکوس شیب این خط، ضریب



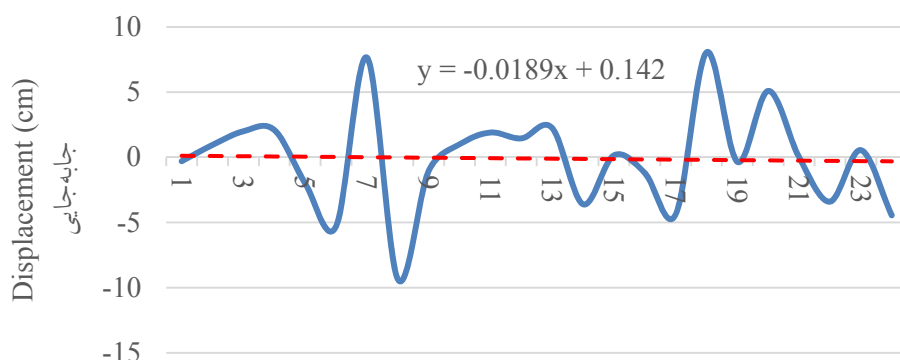
شکل ۷. مقدار ضریب ذخیره درون یابی شده آبخوان، با استفاده از روش IDW

Fig. 7. The value of the interpolated storage factor of the aquifer using the IDW method

برده شد. مشاهده شد که در فاصله‌ی ۴۰۰۰ متری نتایج مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و اختلاف قابل توجهی با مقادیر استخراج شده در فاصله شعاعی ۱۰۰۰ متری ندارند. در فاصله شعاعی ۱۰۰۰ متری نیز تأثیر چاه‌های مجاور تا حدی رؤیت شد. به همین دلیل مقادیر استخراج شده از فاصله شعاعی ۴۰۰۰ متر از تحلیل‌ها خارج شد. پس از آن میانگین داده‌های برداشت شده برای هر سال در فاصله ۲۵۰ متری که نزدیک‌تر به هر چاه بود یک نمودار ترسیم شد که در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به روند تغییرات سطح زمین در بازه‌ی مورد مطالعه، کل بازه به ۴ دوره تقسیم شد که شامل هر دو رفتار بالآمدگی و فرونشست زمین بودند. همچنین یک خط بر روی نمودار برآزش داده شد که نماینده‌ی رفتار غیر الاستیک در منطقه است. ترتیب قرارگیری داده‌ها در شکل ۸ به صورت صعودی است، به گونه‌ای که ۱ نماینده‌ی اولین تداخل نگار تولید شده در سال ۲۰۱۴ و ۲۴ آخرین تداخل نگار تولید شده مربوط به سال ۲۰۲۰ است.

هرچه مقدار این ضریب بیشتر باشد، جابه‌جایی سطح زمین حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات سطح آب دارد. به دلیل نقطه‌ای بودن این داده‌ها نمی‌توان برای نقشه‌ی دیگری از آبخوان از ضریب ذخیره به منظور بررسی تغییرات سطح آب و زمین استفاده نمود، به همین دلیل با استفاده از GIS و درون‌یابی با روش IDW برای سایر نقاط آبخوان نقشه‌ی تغییرات ضریب ذخیره تقریبی آبخوان نسبت به مکان ترسیم شد که در شکل ۷ قابل مشاهده است. با استفاده از نقشه‌ی حاصله، می‌توان میزان تقریبی تغییرات سطح زمین را با استفاده از سطح آب زیرزمینی در نقشه‌ی مورد نظر تخمین زد.

یکی دیگر از جنبه‌های رفتار آبخوان که در این مطالعه بررسی شد بدین صورت بود که به فاصله‌ی شعاعی ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ متر از چاه‌های مشاهداتی، تمامی نقشه‌های جابه‌جایی تولید شده در جهت پایین گذر با استفاده از نرم‌افزار GIS برش داده شدند. میزان حداکثر و حداقل فرونشست برای داده‌های تولیدی برداشت شده و میانگین آن‌ها بر روی نمودار



Interferograms sorted by date
تداخل نگارها به ترتیب چیده شده بر اساس تاریخ

شکل ۸. نمودار میانگین تغییرات جابجایی سطح زمین در فاصله ۲۵۰ متری از چاه‌های مشاهده‌اتی منطقه

Fig. 8. Average of displacement changes at a distance of 250 meters from observation wells in the test site

آبخوان، بهترین میزان نسبت زمانی بین ۴-۲ است. با این تفاسیر، طول دوره آماری انتخاب‌شده با توجه به روند رفتار زمین، اولین دوره بهترین فاصله زمانی را دارا است که در آن طول دوره بازبایی ۲۷۷ روز و طول دوره افت ۱۹۳ روز بوده است. سومین دوره‌ی فرونشست-بالآمدگی نیز مقدار TR مناسبی دارد که در آن طول دوره بازبایی ۴۴۵ روز و طول دوره افت ۳۷۱ روز بوده است. با توجه به مقادیر SR، هرچه نسبت زمانی در هر دوره کوچک‌تر باشد، نسبت بالآمدگی پایش شده به فرونشست بیشتر می‌شود. با توجه به بهینه‌ترین عدد ذکر شده، به‌منظور کاهش خسارات ناشی از فرونشست، می‌توان با مدیریت مناسب منابع آب، به ازای هر سال برداشت بی‌رویه از منابع دشت، دو سال دشت را وارد فاز بازبایی نمود.

رفتار قابل‌انتظار غیر الاستیک در منطقه باید مطابق خط برازش داده‌شده در شکل ۸ باشد. با توجه به عدم پیروی سیستم آبخوان از این روند و یا در نزدیک‌ترین فاصله به آن، می‌توان گفت رفتار آبخوان سملقان الاستیک است.

پس از انتخاب دوره‌های زمانی مورد مطالعه، نسبت مقدار بالآمدگی به فرونشست (SR: Subsidence Ratio) و نسبت بازه‌ی زمانی آن‌ها در هر دوره (TR: Time Ratio) طبق جدول ۱ محاسبه و رابطه‌ی میان طول دوره‌ی هر بازه‌ی فرونشست-بالآمدگی محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی بیشترین مقدار میانگین فرونشست در دوره‌ی دوم و بیشترین مقدار بالآمدگی در همان دوره بود. بیشترین نسبت بالآمدگی به فرونشست در دوره‌ی چهارم است. به‌منظور دستیابی به مدیریت بهینه‌ی

جدول ۱. میانگین تغییرات جابه‌جایی در ۴ بازه‌ی انتخاب‌شده مورد مطالعه در فواصل مختلف از چاه‌های مشاهده‌اتی، نسبت میزان بالآمدگی به فرونشست و نسبت زمانی بالآمدگی به فرونشست

Table 1. Average changes of land displacement in the 4 selected wells, the ratio of uplift to subsidence and the ratio of uplift to subsidence

دوره	Phase	۲۵۰ متر فاصله از چاه	۵۰۰ متر فاصله از چاه	۱۰۰۰ متر فاصله از چاه
دوره ۱	بازبایی (۲۷۷ روز)	۱.۱۹	۰.۹۳	۱.۳۴
بازبایی:	استخراج (۱۹۳ روز)	-۳.۶۵	-۴.۴۵	-۳.۹۵
2014.11.3-2015.8.6	SR	۳۲٪	۲۰٪	۳۳٪
استخراج:	TR	۱.۴۳	۱.۴۳	۱.۴۳
2015.8.6-2016.2.14				
دوره ۲	بازبایی (۹۷ روز)	۷.۶۵	۸.۱۵	۹.۱۵

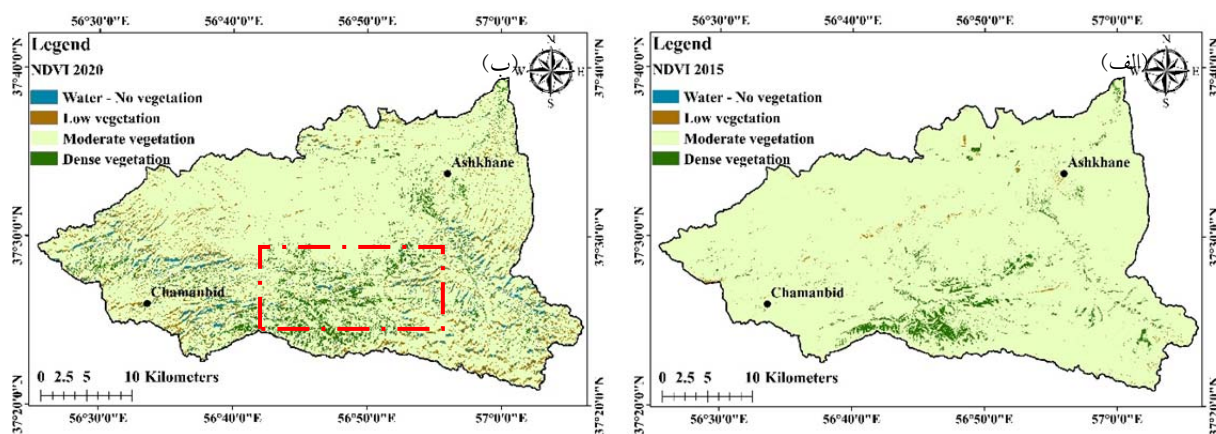
-۹.۳۵	-۹.۵۵	-۹.۳۵	استخراج (۹۷ روز)	بازیابی:
۹۷٪	۸۵٪	۸۱٪	SR	2016.2.14-2016.5.20
۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	TR	استخراج:
۱.۲۳	۰.۸۸	۰.۸۳	بازیابی (۴۴۵ روز)	2016.5.20-2016.8.24
-۲.۹۹	-۲.۴۵	-۲.۲۶	استخراج (۳۷۱ روز)	دوره ۳
۴۱٪	۳۵.۹٪	۳۳٪	SR	بازیابی:
۱.۱۹	۱.۱۹	۱.۱۹	TR	2016.8.24-2017.11.11
۳.۵۱	۳.۷۸	۴.۲۷	بازیابی (۲۸۹ روز)	استخراج:
-۲.۴۲	-۲.۰۵	-۱.۸۳	استخراج (۴۴۵ روز)	2017.11.11-2018.11.6
۱۴۵٪	۱۸۴٪	۲۳۳٪	SR	دوره ۴
۰.۶۵	۰.۶۵	۰.۶۵	TR	بازیابی:
				2018.11.6-2019.8.21
				استخراج:
				2019.8.21-2020.11.7

ارتباط تغییرات پوشش گیاهی با فرونشست

در شکل ۹ تصاویر میانگین پوشش گیاهی منطقه بر پایه شاخص NDVI در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ نشان داده شده است. در مناطق پوشش گیاهی پرتراکم افزایش پوشش رؤیت شده است. مساحت این طبقه پوشش گیاهی از ۳۷۱ هکتار به ۶۲۳ هکتار افزایش یافته است. مناطق پرتراکم که در جنوب دشت سملقان وجود دارند، شامل جنگل‌های ارس منطقه و جنگل‌کاری‌های اداره منابع طبیعی خراسان شمالی هستند، این مناطق در شکل ۹ (ب) در کادر مشخص شده‌اند. همچنین در این مناطق که در نقشه‌های جابه‌جایی بالآمَدگی سطح زمین رؤیت شده بود، می‌توان گفت باز پراکنش امواج ارسالی راداری ماهواره سنتینل-۱ در باند C است که از درختان بوده و رشد گیاهان به دلیل حساسیت باند C بر باز پراکنش سطحی بر روی نقشه‌های فرونشست ثبت شده است. این پوشش گیاهی در نزدیک روستاهای اطراف آشخانه نیز در قطعات

مستطیل شکل رؤیت شده که مربوط به اراضی باغات منطقه هستند.

شاخص NDVI در قسمت پوشش گیاهی با تراکم متوسط، ۱۳۱۶ هکتار کاهش یافته است که بخشی از آن به پوشش گیاهی پرتراکم و بخش زیادی از آن به پوشش فقیر تبدیل شده است. در شکل ۱۰، نمونه‌ای از تخریب پوشش گیاهی به دلیل ایجاد شکاف در زمین نشان داده شده است. با توجه به نقشه‌های پوشش گیاهی، می‌توان مشاهده نمود در بیشتر این بخش‌ها تخریب پوشش گیاهی رخ داده و یا در این مکان‌ها آب تجمع یافته که می‌تواند در موقعیت شکاف‌های دشت رخ داده باشد.



شکل ۹. نقشه پوشش گیاهی دشت سملقان (الف) سال ۲۰۱۵ و (ب) سال ۲۰۲۰ - منطقه مشخص شده با کادر قرمز رنگ نشان دهنده

جنگل کاری و افزایش پوشش گیاهی پرتراکم در منطقه

Fig 9. Vegetation cover map (a) year 2015 (b) year 2020 and rectangle on the map present the forestry and dense vegetation increasing



شکل ۱۰. شواهد تأثیر فرونشست در تغییر پوشش گیاهی در منطقه - آشخانه، ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱

Fig 10. Evidence of the effect of subsidence on vegetation change in the region - Ashkhaneh, January 25th, 2021

توجه به تغییرات این کلاس، ۵.۹٪ از مساحت دشت سملقان با تخریب پوشش گیاهی مواجه شده است. به بیان دیگر، سطح مناطقی که پوشش گیاهی فقیر داشتند از ۰.۵٪ به ۶.۴٪ افزایش یافته است. تغییرات پوشش گیاهی در شکل ۱۱ به صورت نمودار میله‌ای ترسیم شده است.

با توجه به نقشه‌های آب زیرزمینی، در جنوب شرق، شمال و شمال غرب دشت سملقان بیشترین افت سطح آب برآورد شده که در این مناطق نیز تغییر پوشش گیاهی پرتراکم به متوسط و متوسط به ضعیف و یا فاقد پوشش گیاهی را شاهد هستیم. همچنین در بخش جنوب و جنوب غرب دشت سملقان نیز تغییرات پوشش گیاهی زیادی رخ داده که در این

در برخی مناطق نیز افزایش پوشش گیاهی مشاهده شد که با توجه به الگوی برداشت شده از آن‌ها، به‌خصوص در اطراف شهر آشخانه، می‌توان گفت تغییرات کاربری اراضی به باغات به وقوع پیوسته است و مراتع تبدیل به این اراضی شده‌اند. طبقه پوشش گیاهی متوسط بیشترین مساحت دشت را در برمی‌گیرد. پوشش گیاهی فقیر که مقدار NDVI آن معادل بازه ۰.۰۸-۰ است، در سال ۲۰۱۵ در منطقه بخش کمی را شامل شده و بسیار پراکنده بوده است و همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود مساحت این طبقه تا حد قابل توجهی افزایش یافته است که در آبخوان سملقان، اطراف آشخانه و چمن بید و بخش‌هایی از شمال منطقه قابل رؤیت هستند. با

مناطق افت سطح آب تا ۴ متر محاسبه شده است.



شکل ۱۱. نمودار میله‌ای مساحت طبقات پوشش گیاهی برحسب هکتار در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۵

Fig 11. The bar chart for the vegetation classes area in 2015 and 2020

بحث و نتیجه‌گیری

استخراج بی‌رویه‌ی آب‌های زیرزمینی به‌منظور تأمین تقاضای جمعیت منجر به مشکلات زیادی از جمله فرونشست در مناطق زیادی از جهان شده است. دشت سملقان یکی از مهم‌ترین دشتهای استان خراسان شمالی است که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی این دشت موجب شده فرونشست‌های متعددی در آن گزارش شود. به‌منظور مطالعه‌ی فرونشست در این دشت از پردازش داده‌های ماهواره‌های راداری و تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری استفاده شد تا تغییرات زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی و رفتار متقابل آبخوان در دشت سملقان بررسی شود. به‌علاوه از تغییرات پوشش گیاهی نیز به‌عنوان مظهر تغییرات زمین تحت تأثیر فرونشست و افت آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که فرونشست در دشت سملقان الگوی تقریباً ثابتی در طول زمان داشته و اگرچه در بخش میانی دشت سملقان فرونشست هر ساله رخ داده است، در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، در برخی مناطق بالاآمدگی مشاهده شده است. نقشه‌های جابه‌جایی سالیانه نشان داد که در

برخی قسمت‌های منطقه‌ی مورد مطالعه شامل شمال آبخوان سملقان، شمال و شمال غرب این دشت فرونشست به میزان زیادی رخ داده که به‌منظور کاهش خسارات آبی باید مورد توجه قرار گیرند. همچنین باگذشت زمان فرونشست در شهرهای آبخانه و چمن بید نیز مشاهده شده است. بررسی زمانی نقشه‌های فرونشست در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ نشان‌دهنده‌ی بالاآمدگی زمین پس از فرونشست در برخی نقاط دشت سملقان به‌طور مثال در آبخوان منطقه‌ی مورد مطالعه بود. همان‌گونه که در بخش نتایج نیز ذکر شد، با توجه به شکل ۳، نقشه‌های جابه‌جایی در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ در این منطقه بالاآمدگی در بیشتر نقاط آبخوان رؤیت گردید. به‌علاوه، نقشه‌های جابه‌جایی در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹ در نواحی مرزی شمالی دشت سملقان نشان‌دهنده‌ی بالاآمدگی سطح زمین پس از فرونشست در سال‌های گذشته بودند. همچنین در بخش کوچکی این نواحی در سال ۲۰۲۰ بالاآمدگی تشخیص داده شد. با بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و افت سطح آب در دشت سملقان، می‌توان گفت فرونشست صورت گرفته در این دشت تحت تأثیر تغییرات آب زیرزمینی و

از فرونشست، به ازای هر سال برداشت بی‌رویه از منابع دشت، دو سال دشت را وارد فاز بازیابی نمود. در این مطالعه، تغییرات پوشش گیاهی نیز مورد مطالعه قرار گرفت و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی بررسی شد. افت آب زیرزمینی با کاهش پوشش گیاهی در این منطقه ارتباط مستقیم داشت. افت سطح آب زیرزمینی موجب کاهش NDVI به معنی کاهش تراکم پوشش گیاهی در دشت سملقان شده است. همچنین در جنوب دشت سملقان که سطح آب زیرزمینی با افت زیادی مواجه نبوده است تغییرات پوشش گیاهی در جهت افزایش تراکم بوده است. نتایج نشان داد در مناطقی که سطح آب زیرزمینی با افت مواجه شده پوشش گیاهی از متوسط به پوشش فقیر تبدیل شده است. تغییرات پوشش گیاهی در نواحی مرکزی دشت، نشان‌دهنده‌ی تغییر کاربری زمین به اراضی کشاورزی و افزایش مصرف آب‌های زمینی است. در منطقه‌ی مورد مطالعه، نواحی مرکزی و شمالی دشت که با تخریب پوشش گیاهی مواجه بوده‌اند با مناطقی که در طی زمان دچار فرونشست شده‌اند هم‌پوشانی دارند. در این نواحی الگوی خطی پوشش گیاهی نیز در نقشه‌ها قابل‌رؤیت است. نتایج تحقیقات میدانی نیز مؤید این الگو بوده است.

استخراج بی‌رویه از آبخوان این دشت بوده است. با توجه به نقشه‌ی فرونشست تجمعی (شکل ۶) می‌توان گفت به‌طور میانگین سالانه حداکثر ۱۵ سانتی‌متر فرونشست در برخی مناطق دشت رخ داده است. مطالعه‌ی آب‌های زیرزمینی در دشت سملقان نشان داد سطح آب زیرزمینی در این منطقه سالانه به‌طور میانگین نزدیک به ۵۰ سانتی‌متر افت دارد که در با توجه به تفاوت تمرکز زمین‌های کشاورزی در سطح دشت، این میزان متغیر است. بررسی افت میانگین سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت سملقان نشان می‌دهد به‌طور عمومی هر ۵۰ سانتی‌متر افت سطح آب حداکثر ۱۵ سانتی‌متر فرونشست به همراه دارد. با برآورد ضریب ذخیره با توجه به شکل ۷ این میزان در نقاط مختلف آبخوان تغییر می‌کند. مطالعه رفتار متقابل آبخوان نسبت به تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان‌دهنده‌ی رفتار الاستیک زمین در آبخوان سملقان و اطراف چمن بید و رفتار غیرقابل‌بازگشت سطح زمین در سایر نقاط دشت سملقان است. این رفتار زمین در مطالعات دیگری نیز در سایر نقاط دنیا مشاهده شده که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به آبخوان مادرید در اسپانیا اشاره نمود (۲). با توجه به جدول ۱ و وضعیت کنونی دشت، پیشنهاد می‌شود به‌منظور کاهش خسارات ناشی

منابع مورد استفاده

- Aggarwal A, Srivastava P.K, Gupta D.K, Chatterjee R.S. 2021. Estimating regional land subsidence in Mehsana urban block, Gujarat: Effect of groundwater induced aquifer compaction. *Journal of Materials Today: Proceedings*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.254>
- Béjar-Pizarro M, Ezquerro P, Herrera, G, Tomás R, Guardiola-Albert C, Hernández J.M.R, Merodo J.A.F, Marchamalo M., Martínez, R., 2017. Mapping groundwater level and aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, Central Spain. *Journal of Hydrology*, 547: 678-689. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.011>
- Bierkens M.F., Wada, Y. 2019. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. *Journal of Environmental Research Letters*, 14(6): 063002. Doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f>
- Gao M, Gong H, Chen B, Li X, Zhou C, Shi M, Si Y, Chen Z, Duan G. 2018. Regional land subsidence analysis in eastern Beijing plain by insar time series and wavelet transforms. *Journal of Remote Sensing*, 10(3): 365. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs10030365>
- Gharechelou S, Akbari Ghoochani H, Golian S, Ganji K. 2021. Evaluation of land subsidence relationship with groundwater depletion using Sentinel-1 and ALOS-1 radar data (Case study: Mashhad plain). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*. 12(3): 40 -61. http://girs.iaubushehr.ac.ir/article_680336_b55159905c1477503f2dab4965a8d047.pdf
- Guzy A, Malinowska A.A. 2020. State of the art and recent advancements in the modelling of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Journal of Water*, 12(7): 2051. Doi: <https://doi.org/10.3390/w12072051>
- He Y, He X, Liu Z, Zhao S, Bao L, Li Q, Yan L. 2017. Coal mine subsidence has limited impact on plant assemblages in an arid and semi-arid region of northwestern China. *Journal of Ecoscience*, 24(3-4):

- 91-103. Doi: <https://doi.org/10.1080/11956860.2017.1369620>
8. Huang F, Zhang Y, Zhang D, Chen X. 2019. Environmental groundwater depth for groundwater-dependent terrestrial ecosystems in arid/semiarid regions: A review. *International journal of environmental research and public health*, 16(5), 763. <https://doi.org/10.3390/ijerph16050763>
 9. Khosropanah E, Karami Gh, Jaihooni S. 2011. Effects of Irrigation on Groundwater and Subsidence Phenomena in Semalghan Plain. 7th Iranian Conference on Engineering Geology and Environment, Shahroud. (In Persian) <https://civilica.com/doc/224758/>
 10. Kleinhans I. Van Rooy J.L. 2016. Guidelines for sinkhole and subsidence rehabilitation based on generic geological models of a dolomite environment on the East Rand, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 117: 86-101. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.01.001>
 11. Liu Z, Mei G, Sun Y, Xu N. 2021. Investigating mining-induced surface subsidence and potential damages based on SBAS-InSAR monitoring and GIS techniques: a case study. *Journal of Environmental Earth Sciences*, 80(24): 1-17. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09726-z>
 12. Lyu M, Ke Y, Guo L, Li X, Zhu L, Gong H, Constantinos C. 2020. Change in regional land subsidence in Beijing after south-to-north water diversion project observed using satellite radar interferometry. *Journal of GIScience & Remote Sensing*, 57(1):140-156. Doi: <https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1676973>
 13. Masoumi Z, Mousavi Z, Hajeb, Z. 2021. Long-term investigation of subsidence rate and its environmental effects using the InSAR technique and geospatial analyses. *Journal of Geocarto International*: 1-25. Doi: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1964616>
 14. Miller M.M, Jones, C.E, Sangha S.S, Bekaert D.P. 2020. Rapid drought-induced land subsidence and its impact on the California aqueduct. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 251: 112063. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112063>
 15. Padmanaban R, Bhowmik A.K, Cabral P. 2017. A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area. *ISPRS international journal of geo-information*, 6(12): 401. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi6120401>
 16. Prats-Iraola P, Nannini M, Yague-Martinez N, Pinheiro M, Vechhioli F, Siniscalchi V. 2017. S1-TOPS InSAR. In *Fringe 2017 Workshop*.
 17. Rafiei F, Gharechelou S, Golian S. 2020. Evaluation of the effect of groundwater depletion on the subsidence of Semalghan plain using radar interferometry, The first national conference on data mining in earth sciences. <https://en.civilica.com/doc/1264862/>
 18. Rajabi A.M. 2018. A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom-Iran. *Journal of Natural Hazards*, 93(2): 1085-1103. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3448-z>
 19. Regional Water Authority Organization of North Khorasan province. 2016. Water resources rehabilitation and balancing plan. <http://www.nkhrw.ir/?l=EN>
 20. Rezaei A. Mousavi Z. 2019. Characterization of land deformation, hydraulic head, and aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, from InSAR observations. *Journal of Hydrology*, 579: 124196. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124196>
 21. Sadeghi Z., Valadan Zouj M.J., Dehghani M. 2012. Introduction and Comparison of Two Presented Persistent Scatterer Interferometry in Order to Land Subsidence Measurement (Case study: south western Tehran basin). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 4(1): 97.
 22. ŞİREÇİ N, ASLAN G, Cakir Z. 2021. Long-term spatiotemporal evolution of land subsidence in Konya metropolitan area (Turkey) based on multisensor SAR data. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(5): 681-697.
 23. Sneed M, Brandt J.T., Solt, M. 2018. Land subsidence along the California aqueduct in West-Central San Joaquin Valley, California. *US Geological Survey*, 2003-10 (2018-5144). Doi: <https://doi.org/10.3133/sir201851>
 24. Syahputri B.E.A, Anjasmara I.M, Widodo, A. 2021. Surface Deformation Detection due to Mud Volcanoes Manifestation in East Java Basin Area using Permanent Scatterer InSAR. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 731(1): 012008. Doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/731/1/012008/meta>
 25. Tolomei C, Caputo R, Polcari M, Famiglietti N.A, Maggini, M, Stramondo S. 2021. The Use of Interferometric Synthetic Aperture Radar for Isolating the Contribution of Major Shocks: The Case of the March 2021 Thessaly, Greece, Seismic Sequence. *Geosciences*, 11(5): 191. Doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences11050191>
 26. Zaitunah A, Ahmad A.G, Safitri R.A. 2018, March. Normalized difference vegetation index (ndvi) analysis for land cover types using landsat 8 oli in besitang watershed, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126(1): 012112. Doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/126/1/012112/me>



Evaluation of aquifer interaction behavior with land subsidence and its relation with groundwater level and vegetation changes using DInSAR technique

Fateme Rafiei¹, Saeid Gharechelou^{2*}, Saeed Golian³

Received: 2022-01-15 / Accepted: 2022-02-16 / Published: 2023-03-21

Abstract

Global climate change and overpopulation increased the need for groundwater resources. Land subsidence due to groundwater extraction and water depletion is one of the environmental hazards that threatens the communities. This research has been done as a case study in Semalghan plain, one of the agricultural plains in North Khorasan province. According to the information of the Regional Water Organization of this province, most of the groundwater resources have been extracted from the deep wells of this plain and groundwater resources are in a critical situation. In this study, to investigate land subsidence due to groundwater depletion in Semalghan plain radar differential interferometry technique of Sentinel-1 satellite Descending data from 2014 to 2020 have been produced and analyzed.

Also, to monitor vegetation changes Landsat-8 satellite images and study of aquifer interaction behavior was applied. Groundwater depletion maps have been produced using GIS and piezometric data of plain, and their relationship with subsidence was assessed. The result maps showed a direct relationship between water table head fall and subsidence in the Semalghan aquifer during the study period. The maximum subsidence which occurred in this plain in 2019 is equal to 34 cm and a minimum of 18 cm in 2015 and 2018 respectively. Finally, the relationship between groundwater level decline and land subsidence was studied and the behavior of the aquifer was investigated. The results showed the elastic behavior over the Semalghan aquifer and around Chamanbid city. Furthermore, by processing Landsat-8 images from 2015 to 2020, the temporal-spatial relationship of vegetation changes with subsidence was studied. The results showed that the destruction of vegetation has occurred by 5.9% in some areas in the plain due to groundwater level drop which has occurred all over the plain and subsidence in the region and revealed a high temporal-spatial correlation.

Fateme Rafiei¹, Saeid Gharechelou²(✉), Saeed Golian³

1. MSc of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2. Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3. Associate Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

DOI: 10.30495/girs.2023.689174

e-mail: sgharachelo@shahroodut.ac.ir

Statement of the Problem:

Population growth and the increasing demand for groundwater have led to the uncontrolled extraction of these resources. The subsidence occurring in many plains in Iran and other parts of the world, including China, Japan, and the United States, has affected and

caused great damage to them. Nowadays, various methods are used to monitor subsidence, and Interferometric synthetic aperture radar is one of the fastest and cheapest approaches, which is both highly accurate and able to monitor the subsidence over a long period. The vertical displacement of the earth can be reversible or irreversible and is proportional to the aquifer layer and groundwater head changes. With the occurrence of subsidence in the region, there is a possibility of destruction or change of vegetation in the region. Also, a linear pattern of vegetation is observed in these areas due to the land cracks. Furthermore, changes in groundwater levels will result in changes in plant density in the region.

Semalghan plain is one of the most important plains in North Khorasan province, which suffers from negative water balance and land subsidence. Land subsidence spreads slowly, but in the long term, it causes large numbers of damage to roads, residential areas, well buildings, etc. Therefore, the study of subsidence in this plain is of great importance.

Purpose:

In the present study, by processing satellite data and measuring the relation between land surface changes and aquifer interaction behavior in the Semalghan plain, adequate strategies for controlling the subsidence will be proposed. Also, vegetation changes in the area will examine using the Landsat-8 satellite imagery.

Methodology: The study area in the present study is Semalghan plain in the west of North Khorasan province. The Descending path images of the Sentinel-1 satellite from 2014 to 2020 and the DInSAR method were used To investigate subsidence in this region. After selecting the master and slave images, the interferograms were prepared and processed. Finally, cumulative subsidence maps were prepared in the studying period. Next, the statistics of 17 piezometric wells in the period 1387-1397 were used to prepare a groundwater depletion map using the IDW method in GIS. In addition, to study the changes in vegetation in the study area, Landsat-8 images in 2015 and 2020 were downloaded, and the vegetation map of the area was created after performing the necessary preprocessing. Finally, a correlation was made between the results.

Results and discussion:

The results of radar interferometric processing and cumulative subsidence maps showed the pattern of subsidence over time in the study area. Subsidence in Semalghan plain in 2015 was observed in all northern parts of the region with a maximum value of 18 cm. In 2016, the subsidence followed the same pattern as the previous year and its maximum increased by 5 cm. In 2017, subsidence has been observed in almost all parts over the plain. In the north of Ashkhaneh, uplift was recognized in the northeast-southwest direction. Then in 2018, the subsidence pattern similar to 2015 and 2016 was repeated, and it was detected in the north,

northwest, and Semalghan aquifer. The progression of subsidence during the study period confirms the progress of land subsidence towards Chamanbid, especially at the end of the study period. Following the trend of land surface changes, it is possible to observe the uplift of the land surface after its subsidence in some places.

The trend of changes in water level in each well and the average water level in the plain were studied and their diagram was drawn. The data were then imported to the GIS, and groundwater depletion maps were prepared using the IDW interpolation method. In some areas of Semalghan plain, the groundwater level dropped by 26 meters. To achieve a better investigation of the relationship between water level drop and subsidence, water level changes in piezometric wells in 1393-1398 were overlaid with subsidence. Subsidence has occurred at all points where water levels have decreased. Also, in the areas where water loss was low, the subsidence radius was less in the areas around the well. The subsidence of the low-elevated parts of Semalghan, where the concentration of agricultural lands is high, and water extraction is extreme, has been completely affected. With lower water levels, the rate of subsidence has also decreased.

After calculating the approximate storage coefficient of the aquifer using the diagram of land surface changes related to groundwater changes, the map of changes in the aquifer storage coefficient of Semalghan plain was drawn using the IDW interpolation method. The lowest calculated storage coefficient was obtained as 0.04 and the maximum value was derived as 0.36. The higher the computational storage coefficient, the more sensitive the ground surface to water level changes. Using the resulting map, the approximate amount of land surface changes can be estimated using the groundwater level at the desired point.

At a radial distance of 250, 500, 1000, and 4000 meters from the observation wells, all the displacement maps produced in the descending direction were clipped using GIS software. Then, the average of the collected data for each year at a distance of 250 meters from these wells was plotted in a graph. A trendline was also drawn on the graph representing inelastic behavior in the region. According to the trend of land surface changes in the study period, the whole period was divided into 4 periods, which included both uplift and subsidence behavior. After selecting the periods, the ratio of the amount of uplift to subsidence and the ratio of their period were calculated. Also, the relationship between the duration of each period of subsidence-uplift was investigated. The highest ratio of uplift to subsidence is in the fourth period. To achieve optimal aquifer management, the best time ratio is between 2 and 4. The length of the selected statistical period according to the trend of land behavior, the first period has the best time interval in which the recovery period was 277 days and the decline period was 193 days.

Increased vegetation has been observed in densely vegetated areas. According to groundwater maps, in the

southeast, north, and northwest of Semalghan plain, the highest drop in water level was estimated, which in these areas, changes in dense to medium vegetation and medium to weak or no vegetation were observed. Also, in the southern and southwestern parts of Semalghan plain, many vegetation changes have occurred, in which a water level drop of up to 4 meters is estimated.

Conclusion:

The results show that subsidence in Semalghan plain has an almost constant pattern over time. Although subsidence occurs in the central part of Semalghan plain every year, the uplift has been observed in some areas during the study period. According to the annual displacement maps, in some parts of the study area, including the north of Semalghan aquifer, northern parts, and northwest of this plain the subsidence occurred to a great extent that these areas should be under consideration. By examining the trend of

groundwater level changes in Semalghan plain, it is claimed that the subsidence in this plain could be affected by groundwater decline and uncontrolled extraction from the aquifer in this plain. The study of the interaction behavior of the aquifer affected by changes in groundwater level shows the elastic behavior of the ground in the Semalghan aquifer and around Chamanbid city. Also, it represents the inelastic behavior of the ground surface in other parts of the Semalghan plain. Understanding the behavior of land to reduce damage and achieve sustainable management of water resources is essential. In order to lessen the damage caused by subsidence, it is suggested that for each year of uncontrolled extraction from the plain resources, the plain should enter the recovery phase for two years.

Keywords: Subsidence, Semalghan plain, InSAR, Land vegetation

Please cite this article as: Rafiei F, Gharechelou S, Golian S. Evaluation of aquifer interaction behavior with land subsidence and its relation with groundwater level and vegetation changes using DInSAR technique. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 14(2): 53-73