

بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت سمنان)

لیلا هلالی^۱، رحیم باقری^{۲*}، علی‌اکبر مومنی^۳

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲- دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۳- دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

* نویسنده مسئول: rahim.bagheri86@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

چکیده

افزایش جمعیت و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و صنعتی باعث کاهش سطح آب‌های زیرزمینی شده است و یکی از علل فرونشست می‌باشد. در این پژوهش، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مناطق دارای فرونشست در دشت سمنان ارزیابی گردید. در مرحله اول تصاویر ماهواره سنتینل-۱ در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۱ اخذ گردید و برای پردازش تصاویر راداری از نرم افزار SNAP استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده، بیشینه نرخ فرونشست ۶ سانتی‌متر برای بازه زمانی مورد مطالعه بدست آمد که در دو منطقه شامل بخش مرکزی دشت و جنوب- جنوب شرق سمنان و بخش جنوب غربی دشت و جنوب صوفی‌آباد می‌باشد. در مرحله بعد، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از ۲۳ حلقه چاه پیژومتری دشت، نقشه هم‌افت در بازه هفت ساله، ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. کمینه افت سطح ایستابی طی دوره ۷ ساله ۰/۱۵ متر در پیژومتر جعفرآباد و بیشینه آن ۸/۴ متر در پیژومتر شهرک افغانه می‌باشد. همچنین جهت ارزیابی نقشه فرونشست بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری، نقشه پتانسیل فرونشست با استفاده از دولاپه وزن‌دهی شده، شامل نقشه هم‌افت سطح ایستابی و پتانسیل وجود لایه‌های مستعد فرونشست تهیه گردید. مقایسه این دو نقشه نشان می‌دهد که آن‌ها تطابق مناسبی با یکدیگر را دارند. همچنین از شواهد مورفولوژیکی نظیر مقدار رشد لوله جدار پیژومتر جهت ارزیابی نرخ فرونشست بدست آمده با مقدار فرونشست واقعی رخ داده استفاده گردید. مقایسه آن‌ها نشان می‌دهد که نرخ بدست آمده منطبق با مقادیر فرونشست رخ داده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، تداخل‌سنجی، دشت سمنان، فرونشست.

مقدمه

کارستی و معدن‌کاری ایجاد می‌شود (Jelini et al., 2017). ۲- در خاک‌های درشت دانه اتفاق می‌افتد و به صورت الاستیک می‌باشد و مقدار آن به اندازه بار اعمال شده و جنس زمین بستگی دارد (Moarefvand and Shamsadin, 2013). ۳- نشست به صورت پلاستیک که در خاک‌های ریز دانه بر اثر افت سطح آب زیرزمینی رخ می‌دهد که تدریجی و برگشت‌ناپذیر است (Thomas et al., 2005; Conway, 2015). فرونشست با مخاطرات زیادی همراه می‌باشد و ممکن است ضرر اقتصادی

طبق تعاریف بین‌المللی، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست تدریجی رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندک باشد. به عبارتی فرونشست زمین جابه‌جایی رو به پایین سطح زمین به دلیل تغییرات تنش در خاک می‌باشد (رحمانی، ۱۴۰۱). فرونشست اشکال مختلفی دارد: ۱- نشست‌های موضعی و طبیعی که در اثر وجود فضاهای خالی در زیرزمین، مناطق کارستی یا شبه

شناسایی تغییرات سطح زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پژوهش‌های در حیطه علوم زمین در جهان صورت گرفته که می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد: دلارام و همکاران (۱۴۰۳)، با استفاده از روش DInSAR، میزان فرونشست در دشت مشهد-توس را بررسی کردند. نتایج آنالیز تصاویر مربوط به سال ۲۰۱۹ نیز نشان می‌دهد که فرونشست به میزان ۳۶ سانتی‌متر رخ داده است. قربانی محمدآبادی و همکاران (۱۴۰۲)، با استفاده از تحلیل تصاویر راداری و ماهواره‌ای، عوامل مؤثر در وقوع فرونشست دشت قهاوند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که طی دوره دو ساله، از سال ۱۵ تا ۷۸ میلی‌متر فرونشست در این دشت اتفاق افتاده است. صدیقی (۱۴۰۱)، پایش فرونشست زمین با تحلیل سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی و تغییرات تراز آب زیرزمینی در دشت سراب با استفاده از تصاویر Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ که بیشینه نرخ فرونشست را حدود ۴۵- میلی‌متر در سال را بدست آورد. اسدی و همکاران (۱۴۰۰)، در پژوهش خود، ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر راداری را ارزیابی کردند. با استفاده از ۲۷ تصویر راداری سنتینل و روش سری زمانی SBAS در طی دوره زمانی ۳ ساله میزان فرونشست منطقه بین ۰/۹ تا ۳۳/۲- سانتی‌متر و میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی در حد فاصل سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۴ بین ۰/۸۵ تا ۲/۰۱ سانتی‌متر در سال بوده است. چتر سیماب و همکاران (۱۳۹۹)، تأثیر جنس آبخوان و افت تراز آب زیرزمینی در میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل-سنجی راداری و داده‌های صحرایی در آبخوان تهران- کرج- شهریار را بررسی کرده‌اند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ENVISATASAR در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ میزان فرونشست حدود ۱۷ سانتی‌متر در قسمت مرکزی آبخوان و افت متوسط ۴۲ سانتی‌متر در سال در تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شد. شفیع و همکاران (۱۳۹۹)، فرونشست آبخوان دشت نورآباد را با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری بررسی کردند. میزان افت سطح آب در بازه زمانی ۱۲ ساله حدود ۲۲ متر در بخش شرقی، جنوبی و مرکزی آبخوان بوده و نرخ نشست طی بازه زمانی ۴ ساله، در هر سال میانگین ۴ سانتی‌متر می‌باشد. شریفی‌کیا (۱۳۹۱)، به تعیین میزان و

چشمگیری و خسارت‌های گسترده‌ای در ساختمان‌ها، جاده‌ها و سایر زیر ساخت‌ها ایجاد کند (Alipour et al., 2008; Chatterjee et al., 2015). افزایش روز افزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به ویژه در حوزه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی تحکیم نیافته انباشته شده اند، توسط بسیاری از محققین مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در بسیاری از دشت‌های ایران از جمله یزد، مشهد، نیشابور، کرمان، کاشمر، گزارش و مشاهده شده است (آمیغ پی و همکاران، ۱۳۸۶). طبق بررسی‌های صورت گرفته در مقیاس جهانی، خطر فرونشست زمین بر اثر افت سطح آب در بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ همزمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی به اوج خود رسیده است (Waltham, 1989). یکی از فرونشست‌های مهم در بین سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۹۴ در ایالت کالیفرنیا در امریکا گزارش شده است که سطح آب زیرزمینی حدود ۵۰ متر افت داشته است که این افت باعث ایجاد نشست‌های برابر با ۸ متر شده است (Poland, 1981; Galloway et al., 1999). ایران به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه خشک با نزولات جوی بسیار اندک است که آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین نیازهای کشاورزی، شرب و نیز صنعتی است و در زمره کشورهای مواجه با بحران کمبود آب قلمداد می‌شود (Asadzadeh et al., 2016). این پدیده نخستین بار در ایران در سال ۱۳۴۶ در دشت رفسنجان رخ داد که همراه با پدیده لوله‌زایی در چاه‌های کشاورزی گزارش شده است (حسینی میلانی، ۱۳۷۳). منطقه مورد مطالعه دشت سمنان است که استفاده بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی باعث افت سطح آب در دشت سمنان و همچنین فرونشست منطقه شده است. با توجه به اهمیت این موضوع در این پژوهش برای ارزیابی میزان فرونشست زمین در دشت سمنان از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل از تاریخ ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ استفاده شده است. برای بررسی مناطق دارای فرونشست از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. روش تداخل‌سنجی راداری از نظر صرفه‌جویی در هزینه و زمان و انجام مشاهدات پیوسته بر روی زمین با مقایسه روش‌های دیگر قابلیت بالایی دارد. روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی زمین به کار می‌رود. این روش تغییر شکل سطح زمین را با دقتی در حد سانتی‌متر تا میلی‌متر نشان می‌دهد (Ferretti et al., 2007). در دهه‌های اخیر، برای

تا ۲۰۱۸ به ۲۹ سانتی‌متر در سال رسیده است. ElGharbawi, (2023)، نظارت بر فرونشست زمین در ساحل شمال غربی مصر با استفاده از تداخل‌سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ انجام داده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرونشست سطح زمین در منطقه شهر Marsa Matruh بین ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر در سال است. (Qiao et al., (2023)، ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از داده‌های Sentinel-1 InSAR در امتداد ساحل خلیج تگزاس بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد، که نرخ فرونشست در مناطق ساحلی تقریباً ۰/۱- میلی‌متر در سال بوده است، در حالی که مناطق داخلی به تدریج شاهد افزایش نرخ فرونشست هستند.

دشت سمنان به دلیل وجود راه‌آهن سراسری تهران مشهد، فرودگاه سمنان، شهرک صنعتی سمنان و زمین‌های کشاورزی یکی از دشت‌های مهم استان سمنان است. هدف از این پژوهش برآورد نرخ فرونشست دشت سمنان با روش تداخل-سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱، زون‌بندی منطقه از منظر میزان فرونشست و تحلیل ارتباط بین افت آب‌های زیرزمینی با میزان فرونشست منطقه است. استفاده از این روش سریع و ارزان بوده و پژوهش‌ها انجام شده با این روش، از دقت مناسب آن حکایت دارند. این در حالی است که استفاده از سایر روش‌های ارزیابی فرونشست، زمان بر و گران بوده، بنابراین وسعت مورد سنجش با آن‌ها محدودتر می‌باشد. انتظار می‌رود که نتایج میزان فرونشست به دست آمده از این تحقیق با شواهد صحرایی فرونشست موجود، همخوانی مناسبی داشته باشد و بتوان از این روش برای ارزیابی سایر دشت‌های ایران که عمدتاً در شرایط بحرانی هستند استفاده نمود.

موقعیت جغرافیایی، اقلیم و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه دشت سمنان در استان سمنان که در محدوده ۵۳ درجه و ۳ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. شهرستان سمنان دارای مساحتی حدود ۲۲۱۲۰ کیلومتر مربع بوده که از غرب به شهرستان گرمسار و بخش فیروزکوه، از شرق به شهرستان دامغان، از جنوب به کویر مرکزی و به شهرستان نائین (استان اصفهان) و از شمال به شهرستان کیاسر (استان مازندران) محدود می‌گردد. منطقه

دامنه فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در دشت نوق-بهرمان پرداخته است. در این پژوهش از روش تداخل‌سنجی تفاضلی داده‌های راداری (DInSAR) بر روی داده‌های ماهواره‌ای در دو باند C و L در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داده است که این منطقه سالانه حدود ۳۰ سانتی‌متر فرونشست دارد.

(Agustan et al., (2016)، به ارزیابی جابه‌جایی زمین در جاکارتا از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های راداری پرداختند. در این تحقیق از تصاویر راداری SAR به منظور تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این منطقه از ماه نوامبر ۲۰۱۵ تا سپتامبر ۲۰۱۶ حدود ۱۲ سانتی‌متر فرونشست داشته است. (Sowter et al., (2016)، در مقاله خود فرونشست زمین در مکزیکوسیتی را با تصاویر سنتینل در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۵ به روش تداخل‌سنجی، بررسی کردند و نرخ فرونشست در این منطقه را ۴۰ سانتی‌متر در سال برآورد کردند. (Zhu et al., (2020)، فرونشست زمین را در امتداد راه-آهن سریع‌السیر Rizhao-Lankao در Heze، چین، بین سال-های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹ با داده‌های سنتینل-۱ ارزیابی کردند و متوجه شدند که فرونشست در دو منطقه اصلی می‌باشد: یکی در شرق منطقه Heze با نرخ حدود ۱- تا ۴- سانتی‌متر در سال و دیگری در میدان ذغال سنگ با نرخ‌های متغیر ۲ تا ۸- سانتی‌متر در سال می‌باشد. (Hakim et al. (2020)، در پژوهش خود به اندازه‌گیری فرونشست منطقه ساحلی جاکارتا با استفاده از تداخل‌سنجی سری زمانی با داده‌های SAR ۱- Sentinel پرداختند. نرخ فرونشست در این منطقه را بین ۳۰ میلی‌متر در سال تا ۴۰ میلی‌متر در سال برآورد کردند. (Rafiei et al., (2022)، تعامل آبخوان و فرونشست زمین با استفاده از داده‌های سنتینل-۱ و روش DIn SAR ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که یکی از علل فرونشست در دشت سملقان، بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی می‌باشد و بیشترین نرخ فرونشست زمین در سال ۲۰۱۹ (۳۴ سانتی‌متر) و کمترین نرخ در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ (۱۸ سانتی‌متر) می‌باشد. (Imamoglu et al., (2022)، فرونشست سریع زمین را در کوچوک مندرس‌گراين (غرب ترکیه) که توسط داده‌های SAR Sentinel-۱ بررسی کردند. نرخ فرونشست در سال‌های ۲۰۱۵

میزان ارتباط این دو مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نتایج تحقیق با پیمایش میدانی و بررسی شواهد صحرایی فرونشست مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. فلوجارت روش تحقیق به کار برده شده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

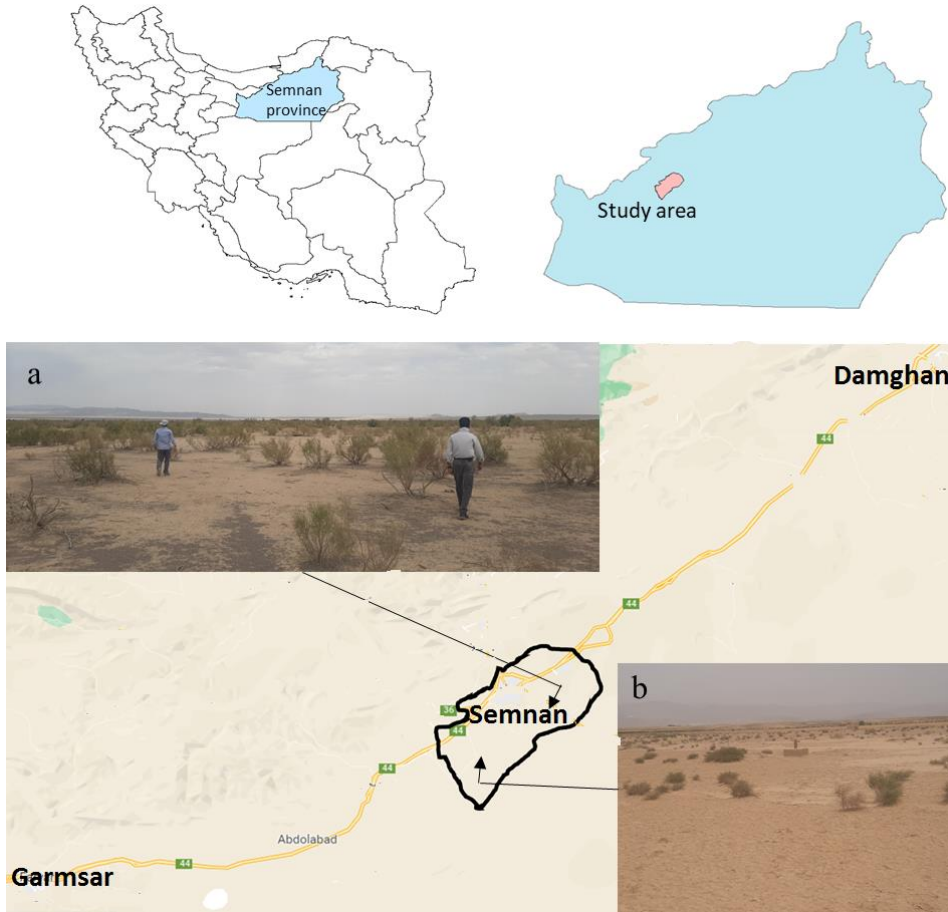
داده‌های پیژومتری

با توجه به داده‌های آب منطقه‌ای، برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تغییرات سطح آب زیرزمینی در دوره ۷ ساله (۱۳۹۲ تا ۱۳۹۹) از ۲۳ حلقه چاه پیژومتری استفاده گردید تا نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت سمنان در این بازه زمانی که مطابق با بازه زمانی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل است، ارزیابی گردد (جدول ۱). موقعیت جغرافیایی چاه‌های پیژومتری بر روی تصویر گوگل ارث نشان داده شده است (شکل ۳).

مورد مطالعه در بخش جنوبی تا شرقی شهرستان سمنان قرار دارد (شکل ۱). استان سمنان در دامنه‌های جنوبی بلندی‌های البرز (مرکزی-خاوری) و در حاشیه شمالی کویر بزرگ قرار دارد و از نظر زمین‌شناسی به دو پهنه ساختاری البرز (مرکزی) و ایران مرکزی تعلق دارد. بخش شمالی دشت را کوه‌های البرز شرقی احاطه کرده که عمدتاً متعلق به سازند کرج بوده و از سنگ‌های ولکانیکی و آذرآواری ائوسن تشکیل شده‌اند. بخش جنوبی دشت به لحاظ ساختاری متعلق به ایران مرکزی بوده و رخنمون‌های سنگی آن غالباً از سازندهای قرمز بالایی و قم می‌باشد (اکبری اریمی و همکاران، ۱۳۹۸). منطقه سمنان به دلیل مجاورت با کویر مرکزی ایران و دامنه جنوبی البرز، دارای تنوع آب و هوایی زیادی است. این منطقه، با کاهش ارتفاع از شمال به جنوب، دما افزایش و بارش کاهش می‌یابد. با توجه به تغییرات دمایی و بارشی، اقلیم این ناحیه را می‌توان خشک و نیمه خشک دانست. آب و هوای این منطقه گرم و در زمستان نسبتاً سرد است. بارندگی‌ها معمولاً در فصل سرد سال صورت می‌گیرد و میزان متوسط بارندگی سالانه آن ۱۴۰ میلی‌متر است. متوسط درجه حرارت سالانه حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد بوده و تعداد روزهای یخبندان در طول سال حدود ۴۸ روز است (دوست محمدیان، ۱۳۹۷).

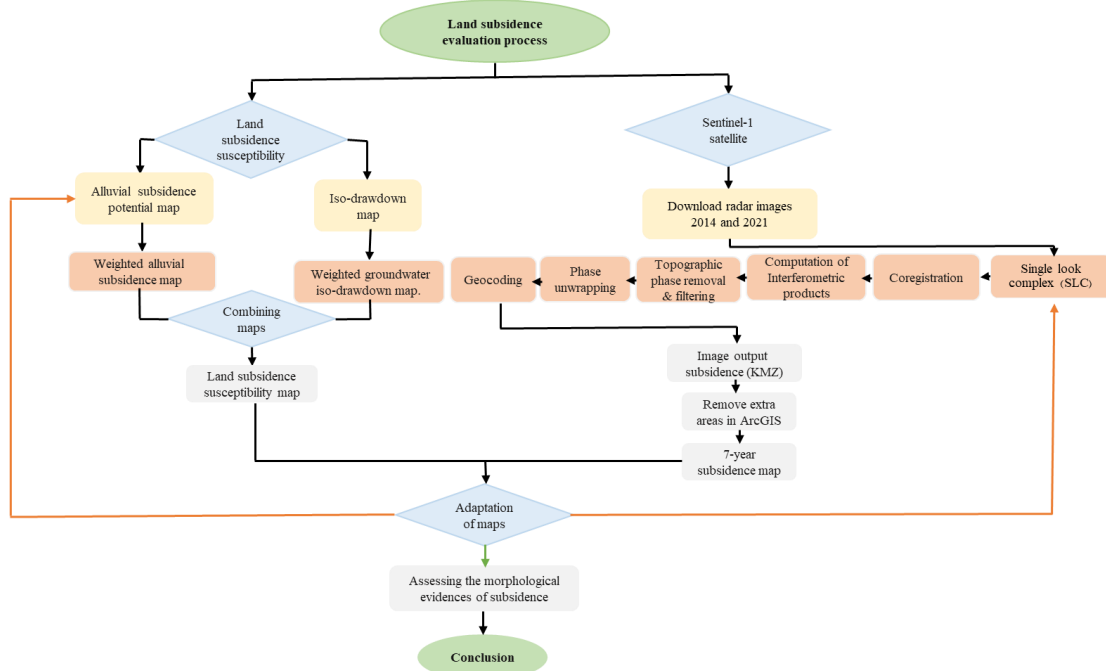
مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی میزان فرونشست دشت سمنان و ترسیم نقشه نشست زمین با روش تداخل‌سنجی راداری، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ از منطقه مورد مطالعه تهیه و توسط نرم‌افزار SNAP پردازش شد. برای بررسی ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و پدیده فرونشست از داده‌های ۲۳ حلقه چاه پیژومتری در بازه زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۹ استفاده شده و نقشه هم‌افت ترسیم گردید. همچنین نقشه پتانسیل فرونشست با توجه به مکانیسم آن تهیه گردید. بدین منظور نقشه هم‌افت تهیه شده در نرم‌افزار ArcGIS وزن‌دهی گردید. نقشه لیتولوژی یا ضخامت خاک ریزدانه زیر سطح ایستایی که بیانگر استعداد فرونشست از نظر زمین‌شناسی بوده، از کارهای قبلی اقتباس شده و پس از وزن‌دهی با نقشه هم‌افت تلفیق گردید تا نقشه پتانسیل فرونشست زمین تهیه گردد. با مطابقت دادن نقشه‌های نشست زمین با نقشه پتانسیل فرونشست



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی دشت سمنان به همراه دو تصویر واقعی از دشت. a: دید به سمت جنوب غرب دشت، تصویر پایین. b: دید به سمت شمال شرق دشت.

Figure 1- Geographical location and access roads of the Semnan plain with two pictures of the plain. a: south west view direction, b: north east view direction.



شکل ۲- فلوچارت روش تحقیق استفاده شده.

Figure 2- Flowchart representing methodology of the used research.

جدول ۱- افت سطح ایستابی (متر) در پیزومترهای دشت سمنان.

Table 1- Water table drawdown (meters) in piezometers of the Semnan plain.

Piezometer number	Piezometer name	UTM		Water table level (April 2013)	Water table level (March 2021)	Water table drop (m)
1	Saadat abad biabank	707375	3922633	1026.11	1024.43	1.68
2	Jadeh ghadim biabank	706752	3928073	1036.85	1034.5	2.35
3	Shargh Mahdi abad	709231	3920635	987.66	985.28	2.38
4	Gharb sofi abad	709478	3924658	1036.33	1028.79	2.54
5	Jangaldari	710449	3934980	1028.19	1026.77	1.42
6	Javad abad1	711205	3918818	974.72	970.56	4.16
7	Serah momen abad1	711646	3936433	1018.68	1014.94	3.74
8	Marhamat abad	712289	3931779	1033.83	1027.94	5.89
9	Jafar abad	712548	3921260	987.86	982.71	0.15
10	Jonob shargh sofi abad	713079	3923927	1010.33	1010.04	0.29
11	Ab pakhshe Golrudbar1	713817	3939608	1011.69	1007.44	4.25
12	Shomal Hassan abad	714492	3934355	1041.34	1039.7	1.64
13	Hassan abad	716351	3932368	1040.25	1036.42	3.83
14	silo	716784	3936262	1066.69	1063.87	2.82
15	Anarky 1	716830	3928280	1012.05	1009.6	2.45
16	Khoram Abad1	718004	3930237	1033.46	1031.88	1.58
17	Rahahan matrokeh1	718174	3943425	1024.94	1020.75	4.19
18	Istgah pezoeheshi	720372	3941914	1018.21	1012.81	5.4
19	Mohammad Abad Ala	722559	3937742	1067.01	1061.61	5.4
20	Jadeh peggambaran	722754	3944779	1032.66	1024.72	7.94
21	Khorian	725212	3932211	1051.28	1043.94	7.34
22	Shargh forodgah1	726312	3943078	1035.81	1028.47	7.34
23	ShahrakAfaghaneh1	729819	3942221	1043.95	1035.55	8.4

همکاران، ۱۳۹۰؛ روستایی، ۱۳۹۲). روش تداخل‌سنجی می‌تواند حرکات کوچک زمین در حد میلی‌متر را اندازه‌گیری کند (Gabriel et al., 1989).

برای انجام این پژوهش از تصاویر ماهواره سنتینل سال ۲۰۱۴ و ۲۰۲۱ میلادی در حالت نزولی با قطبش VV استفاده شده است. مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. این تصاویر از وب سایت مرکز دسترسی آزاد کوپرنیک (۲۰۲۲) اخذ گردید. ابتدا تصاویر راداری در نرم افزار SNAP که توسط آژانس فضایی اروپا ارائه شده است، فراخوانی شد. با توجه به اینکه در این پژوهش هدف، محاسبه میزان فرونشست می‌باشد، مراحل تداخل‌سنجی راداری انجام شد و در نهایت نرخ دامنه و فرونشست زمین در دشت مورد نظر بدست آمده و مورد ارزیابی قرار گرفت.

تحلیل و پردازش داده‌ها پس از فراخوانی داده‌های خام به نرم افزار در ۶ گام انجام می‌شود. گام اول ورود داده‌ها، که به صورت تصاویر خام یا با داده‌های مختلط منفردنگر^۱ می‌باشد، در این مطالعه داده‌ها به صورت خام می‌باشد. گام دوم ثبت هندسی تصاویر، در این مرحله یک تصویر فرعی نسبت به تصویر مرجع

روش تداخل‌سنجی

امروزه روش تداخل‌سنجی راداری یک روش متداول برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین می‌باشد. پوشش سراسری و قدرت تفکیک خوب تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش را به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون فرونشست زمین، زلزله، زمین لغزش و ... مطرح کرده است. ماهواره سنتینل ۱- به عنوان یک مجموعه دو ماهواره‌ای که هر یک با فاصله ۱۸۰ درجه از یکدیگر قرار دارند، تمام کره زمین را در هر ۶ روز تصویربرداری می‌کنند، که اولین ماهواره در سوم آوریل ۲۰۱۴ و پرتاب ماهواره دوم در سال ۲۰۱۶ صورت گرفت. به این ترتیب هر ۱۲ روز، تصویربرداری کاملی از زمین انجام می‌شود (زندى و همکاران، ۱۳۹۸). روش تداخل‌سنجی راداری قابلیت کار در تمام شرایط جوی و طول مدت شب و روز دارد. این روش با پوشش زمینی وسیع و قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد، به روش مهم و قابل توجه تبدیل شده است (واجیدیان و

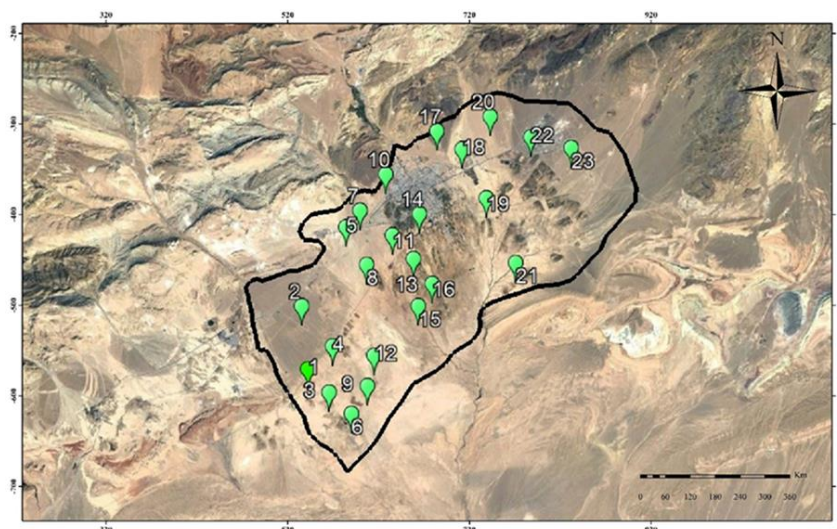
^۱ SLC

در اثر افت سطح ایستابی تنش مؤثر بر لایه‌های زیرین زیاد شده و این تنش در خاک‌های ریزدانه رسی که دارای ساختار ورقه‌ای هستند، باعث آرایش مجدد شده و صفحات به موازات یکدیگر و عمود بر راستای تنش آرایش می‌یابند. خارج شدن از حالت غوطه‌وری، زیاد شده و فشار بیشتری به لایه‌های زیرین وارد می‌کند. عملاً می‌توان گفت که به ازای هر متر افت سطح ایستابی یک تن بر متر مربع به فشار وارد بر لایه اضافه می‌شود.

توپوگرافی و جابه‌جایی است. برای بدست آوردن میزان جابه‌جایی باید اثر توپوگرافی را حذف کرد. گام پنجم بازیابی فاز، به دلیل طبیعت تصویربرداری رادار با دریچه مصنوعی، این تصاویر راداری اطلاعات مربوط به مقدار مطلق فاز نمی‌باشد و داده‌های فاز موجود به صورت نهان شده در بازه ۰ تا ۳۶۰ درجه است. در این مرحله بازیابی مقدار مطلق فاز با استفاده از فاز نهان شده که بازیابی فاز نامیده می‌شود، انجام می‌گیرد. گام ششم زمین مرجع کردن، در این مرحله فازبازیابی شده در مرحله قبل توسط مدل ارتفاعی رقومی، زمین مرجع می‌شود (زندی و همکاران، ۱۳۹۸).

توجیه می‌گردد، که شامل دو مرحله می‌باشد. مرحله اول تغییر موقعیت هر پیکسل در تصویر فرعی نسبت به تصویر اصلی و مرحله بعد محاسبه دامنه و فاز پیکسل‌ها برای هر پیکسل در تصویر فرعی می‌باشد. گام سوم تهیه تداخل‌نما، تصاویر SLC، تصاویر مختلطی هستند که شامل اطلاعات دامنه و فازی می‌باشند. نتیجه حاصل از ضرب مختلط دو تصویر راداری یک تداخل‌نما می‌باشد. برای بدست آوردن تداخل‌نما معمولاً هر سیگنال پیکسل تصویر اول در مزدوج مختلط تصویر دوم ضرب می‌شود. گام چهارم حذف اثر توپوگرافی و فیلترگذاری، هر تداخل‌نما شامل اطلاعات فازی است که مستقیماً مرتبط با در اثر این آرایش ضخامت لایه ریزدانه به دلیل از بین رفتن تخلخل کم می‌شود که این کاهش ضخامت لایه ریز دانه در اثر پدیده تحکیم، در سطح زمین خود را به صورت فرونشست نشان می‌دهد (شکل ۴). در واقع وزن بخشی از لایه‌های بالایی که قبلاً اشباع بوده و به دلیل غوطه‌وری در آب سبک بوده است، به دلیل افت سطح ایستابی و

مکانیسم فرونشست



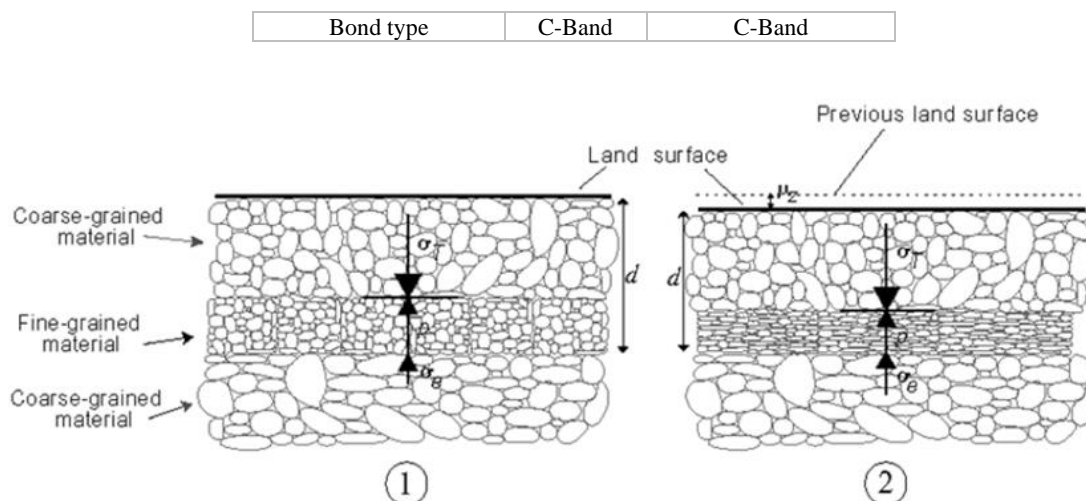
شکل ۳- موقعیت چاه‌های پیزومتری در دشت سمنان بر روی تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث.

Figure 3- The location of piezometric wells in the Semnan plain on the Google Earth satellite image.

جدول ۲- مشخصات تصاویر استفاده شده در روش تداخل‌سنجی.

Table 2- Characteristics of the used images in the interferometry method.

Satellite type	Sentinel-1	Sentinel-1
Date	14.12.2014	13.12.2021
Beam mode	IW	IW
Frame	137	137
Product type	SLC	SLC
Ascending/Descending	Descending	Descending
Polarisation	VV	VV



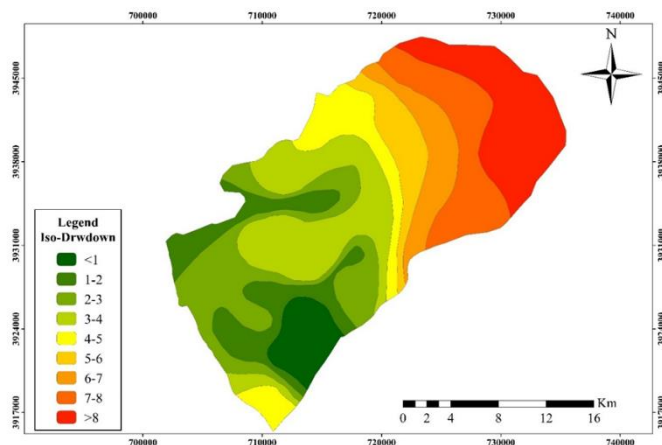
شکل ۴- ۱) وضعیت آرایش خاک ریزدانه قبل از افت سطح آب زیرزمینی ۲) فرونشست سطح زمین به دلیل افت سطح آب زیرزمینی.
Figure 4- 1) Fine grained soil array before groundwater table drawdown; 2) land subsidence due to the groundwater table drawdown.

سمنان در حدود ۵ تا ۷ متر بوده که مقدار نشست نیز در این بخش زیاد می‌باشد. افت قابل توجه در این بخش و وجود رسوبات ریزدانه دلیل اصلی این میزان نشست می‌باشد. همچنین در بخش جنوب غربی دشت سمنان نیز نشست بیشینه می‌باشد. با بررسی نقشه هم‌افت در این بخش میزان افت به سرعت افزایش یافته و خطوط هم‌افت به هم نزدیک شده‌اند و مقدار افت در بازه ۷ ساله به سرعت از کمتر از یک متر به بیشتر از ۴ متر افزایش داشته است. در مناطقی که افت زیاد بوده، زمین‌های کشاورزی توسعه یافته‌اند. علت اصلی افت در این منطقه برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی می‌باشد و خشکسالی تأثیر زیادی ندارد. در بخش جنوب شرقی صوفی-آباد به دلیل کیفیت پایین آب زیرزمینی ناشی از وجود سازند قرمز بالایی، برداشتی صورت نگرفته و مقدار افت ۷ ساله سطح ایستابی کمتر از یک متر بوده است.

نتایج و بحث

بررسی وضعیت افت آب زیرزمینی

نقشه هم‌افت آب زیرزمینی ابتدا به صورت دستی و سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS رسم گردید (شکل ۵). با توجه به بررسی‌های انجام شده در سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۹، بیش-ترین افت سطح آب زیرزمینی در بخش شمال شرقی دشت با افت بیش از ۸ متر می‌باشد و کمترین افت سطح آب زیرزمینی در بخش جنوب غربی دشت در حاشیه شرقی و جنوب شرقی روستای صوفی‌آباد است. علی‌رغم افت سطح ایستابی بالای ۸ متر در بخش شمال شرقی، در این بخش نشست صورت نگرفته است. این بخش از دشت در دامنه کوه قرار گرفته و سنگ بستر در این بخش بالا می‌باشد، همچنین رسوبات در این بخش درشت دانه است و تحت تأثیر نشست تحکیمی نمی‌باشد. افت سطح ایستابی در بخش جنوب-جنوب شرق

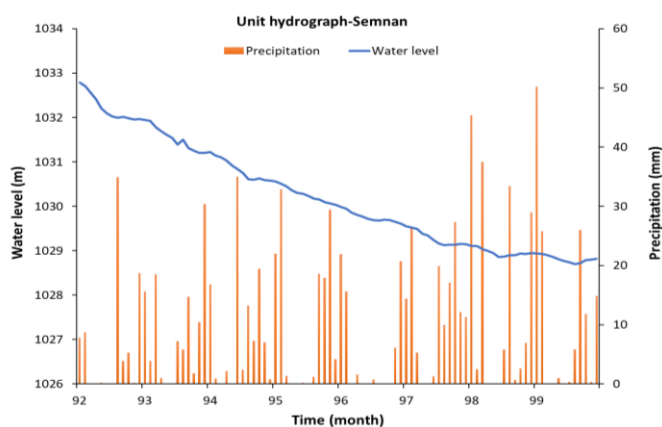


شکل ۵- نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی.

Figure 5- Iso-drawdown map of the groundwater.

هیدروگراف معرف دشت سمنان

هیدروگراف معرف نشان‌دهنده تغییرات کلی سطح آب زیرزمینی دشت در بازه زمانی مشخص می‌باشد. هیدروگراف دشت سمنان براساس داده‌های پیژومتری و شبکه تیسن طی دوره ۷ساله ترسیم شد (شکل ۶). برای بررسی ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی و بارندگی، میزان بارندگی دشت بر روی هیدروگراف نشان داده شده است. با توجه به هیدروگراف معرف دشت سمنان، سطح آب زیرزمینی دشت نسبت به بارندگی نوسان داشته و سیر نزولی نسبت به زمان دارد که نشان‌دهنده افت پیوسته سطح آب زیرزمینی می‌باشد. در واقع علی‌رغم تأثیر خشکسالی، بخش قابل توجه‌ای از این افت ناشی از برداشت بی‌رویه از آبخوان می‌باشد. ارتفاع تراز سطح آب در سال ۱۳۹۲ برابر با ۱۰۳۳ متر بوده که پس از گذشت ۷ سال در سال ۱۳۹۹ برابر با ۱۰۲۹ متر رسیده است. به عبارت دیگر تراز سطح آب زیرزمینی طی دوره ۷ساله به مقدار ۶ متر افت داشته که به این ترتیب افت متوسط سالانه در دشت کمتر از ۱ متر می‌باشد. کاهش تغذیه و برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی عامل اصلی افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت سمنان است.



شکل ۶- هیدروگراف معرف دشت سمنان (۱۳۹۹ تا ۱۳۹۲).
Figure 6- Unit hydrograph of the Semnan plain (2012-2019).

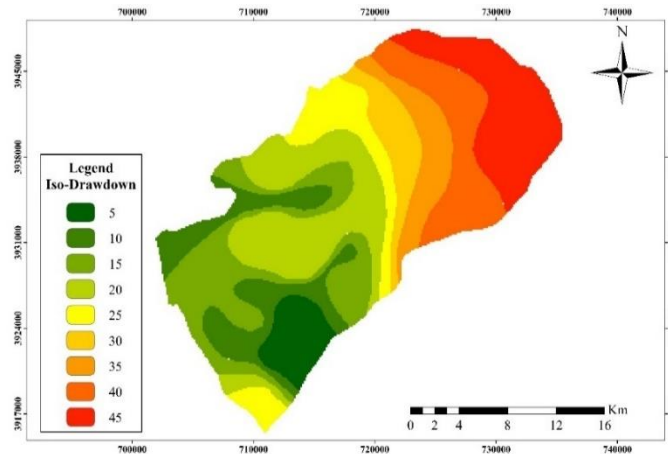
نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین دشت سمنان

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل فرونشست زمین از دو لایه هم‌افت سطح آب زیرزمینی و دانه‌بندی رسوبات دشت

سمنان استفاده شد. وزن مربوط به هر دو لایه یکسان در نظر گرفته شد تا عملاً تأثیر افت سطح ایستایی و وجود رسوبات ریزدانه در فرونشست، برابر لحاظ گردد. پس از ترسیم نقشه افت سطح آب زیرزمینی، این نقشه از طریق ابزار طبقه‌بندی^۲ به ۹ رده تقسیم و به هر بازه ۵ امتیاز داده شد به طوری که به مناطقی با افت سطح آب زیرزمینی بیش از ۸ متر که در رده ۹ قرار می‌گیرند، امتیاز ۴۵ تعلق گرفت (شکل ۷). برای تهیه لایه دانه‌بندی از مطالعات قبلی اکبری اریمی و همکاران (۱۳۹۸)، استفاده شد که بر مبنای ضخامت لایه‌های ریز دانه زیر سطح ایستایی امتیازدهی شده بود. اطلاعات این لایه‌ها از تلفیق سونداژ ژئوالکتریکی و لاگ پیژومترها حاصل شده است. پس از پردازش و وزن‌دهی به این لایه‌ها در نرم افزار ArcGIS (شکل ۸)، در نهایت با استفاده از ابزار جمع وزنی^۳، وزن این دو لایه با یکدیگر جمع شده و نقشه پتانسیل فرونشست بدست آمد. با توجه به شکل ۹، بیش‌ترین پتانسیل فرونشست در بخش جنوب شرقی شهر سمنان و در حوالی روستای اعلا و پیژومتر ایستگاه پژوهشی می‌باشد. در اطراف پیژومترهای شهرک افغانه، شرق فرودگاه و جاده پیغمبران مؤمن‌آباد خطر پتانسیل بالایی وجود دارد. مقایسه این نقشه پتانسیل فرونشست با نقشه فرونشست تهیه شده از روش تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که این دو نقشه انطباق خوبی با یکدیگر دارند. اندک تفاوت مشاهده شده در این دو نقشه می‌تواند از عدم دقت لایه دانه‌بندی به دلیل برداشت غیر مستقیم داده‌ها (روش ژئوفیزیکی) بوده و یا به دلیل تأثیر میان لایه‌های درشت دانه باشد. در واقع نقشه پهنه‌بندی پتانسیل فرونشست بیان‌کننده پتانسیل بوده و ایده‌ای از زمان وقوع آن ندارد در صورتی که نقشه فرونشست به روش تداخل‌سنجی عملاً نرخ فرونشست اتفاق افتاده را نشان می‌دهد. لذا مناطقی که ضخامت لایه ریزدانه زیاد بوده علی‌رغم پتانسیل فرونشست بیشتر، به دلیل طولانی‌تر بودن مسیر زهکشی دارای نرخ فرونشست کمتری نسبت به مناطقی باشد که ضخامت لایه ریزدانه کمتر بوده ولی این لایه‌های ریزدانه دارای بین لایه درشت دانه بوده و مسیر زهکشی آن کوتاه‌تر است.

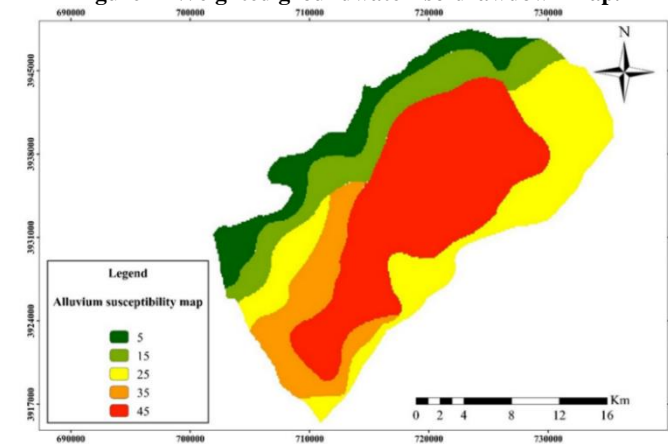
³ Weighted sum

² Reclassify



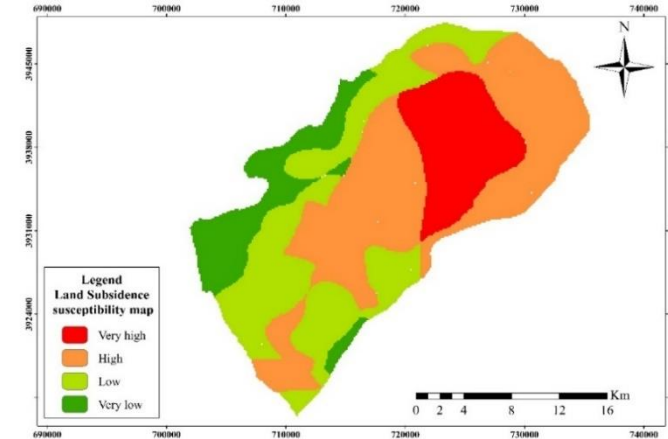
شکل ۷- نقشه وزن دهی شده هم افت سطح آب زیرزمینی.

Figure 7- Weighted groundwater iso-drawdown map.



شکل ۸- نقشه وزن دهی شده آبرفت.

Figure 8- Weighted map of alluvial aquifer.



شکل ۹- نقشه پهنه‌بندی پتانسیل فرونشست زمین.

Figure 9- Land subsidence susceptibility map.

زمانی و مکانی مناسب برای تهیه اطلاعات به‌روز از فرونشست دشتهای بحرانی روش قابل قبولی است. در این پژوهش تمامی مراحل پردازشی از قبیل انتخاب تصاویر تا بازیابی فاز جا به جایی سطح دشت سمنان انجام شد. نتایج بدست آمده

تعیین نرخ فرونشست در دشت سمنان به روش تداخل‌سنجی
اطلاعات دقیق و در سطح وسیع یکی از ملزومات جلوگیری از پدیده فرونشست در دشتهای می‌باشد. روش تداخل‌سنجی راداری به‌دلیل پوشش گسترده و توان تفکیک

موقعیت سطح ایستابی و موقعیت قرارگیری لایه‌های ریز دانه (اکبری و همکاران، ۱۳۹۸) نشست برای بازه ۷ ساله هم‌خوانی مناسبی با نشست مشاهده شده در محل پیزومتر دارد.

۴- پیزومتر غرب صوفی‌آباد در نقشه فرونشست در بازه ۷ ساله پیزومتر صوفی‌آباد نشست حدود ۳۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل b- ۱۱ مشاهده می‌شود بتن اطراف پیزومتر بازسازی شده است و احتمالاً پیزومتر معلق بوده و دچار فرونشست شده است.

۶- پیزومتر جوادآباد میزان نشست بدست آمده در نقشه فرونشست در بازه ۷ ساله ۵ سانتی‌متر بوده است. شواهد صحرایی نشان می‌دهد که لوله جدار این پیزومتر ۷ سانتی‌متر نشست داشته است. با توجه به بالا بودن سطح ایستابی (عمق ۶/۴ متر) پیزومتر تا سنگ کف حفاری نشده و معلق بوده است لذا نسبت میزان نشست بدست آمده توسط روش تداخل‌سنجی کمتر از میزان شواهد صحرایی مورد انتظار برای نشست این پیزومتر می‌باشد.

۳- پیزومتر شرق مهدی‌آباد در نقشه فرونشست نشست حدود ۶ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. در بازدید صحرایی نشست حدود ۶ سانتی‌متر می‌باشد این پیزومتر با فاصله ۲۶۵ متر با پیزومتر جوادآباد قرار دارد و شرایط مشابه دارند. بنابراین با بالا بودن سطح ایستابی و معلق بودن پیزومتر باعث شده که لوله جدار بخشی از میزان فرونشست رخ داده را نشان دهد.

۱- پیزومتر سعادت‌آباد بیابانک براساس شکل ۱۰، پیزومتر سعادت‌آباد نشست حدود ۲ میلی-متر (برای بازه ۷ ساله) را نشان می‌دهد که با همین روند، برای بازه ۳۰ ساله نشست کمتر از ۱ سانتی‌متر خواهد بود و در بازدید صحرایی نیز نشست قابل اندازه‌گیری برای این پیزومتر مشاهده نگردید (شکل d-۱۱) که متناسب با نتیجه بدست آمده در شکل ۱۰ می‌باشد.

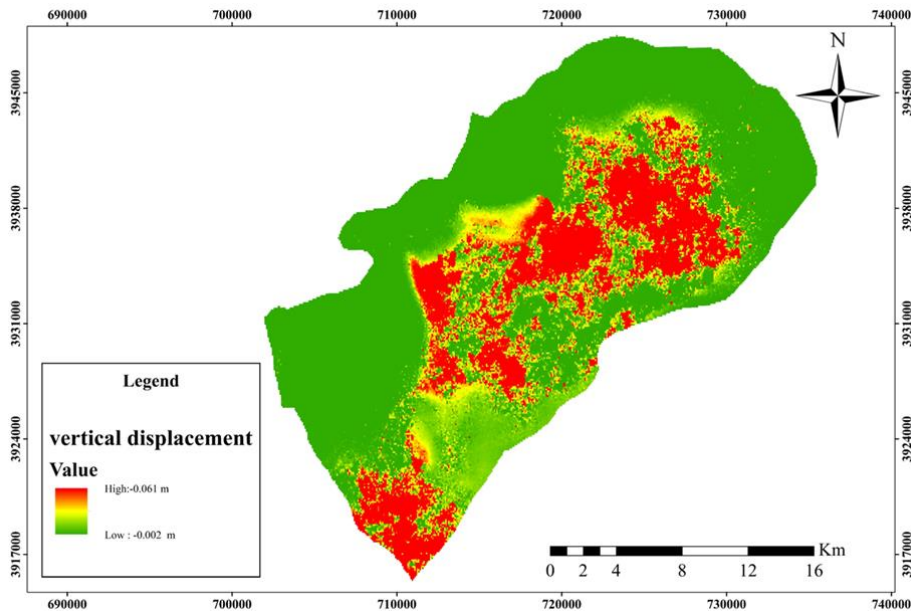
۱۱- پیزومتر آب‌پخش گلرودبار در روش تداخل‌سنجی نشست در پیزومتر آب‌پخش گلرودبار خیلی کم (حدود ۳ میلی‌متر) می‌باشد. در بازدید صحرایی نشست قابل اندازه‌گیری مشاهده نشده است.

نشان می‌دهد که بخش مرکزی دشت وضعیت بحرانی دارد (شکل ۱۰). بیش‌ترین میزان فرونشست در دو زون دشت سمنان اتفاق افتاده است که شامل بخش مرکزی دشت و جنوب-جنوب شرق سمنان و زون دوم جنوب غربی دشت و جنوب صوفی‌آباد می‌باشد. حداکثر نرخ فرونشست در این مناطق به اندازه ۶ سانتی‌متر محاسبه گردید و نرخ متوسط فرونشست سالانه دشت سمنان ۸/۵ میلی‌متر در سال می‌باشد.

اعتبارسنجی نتایج

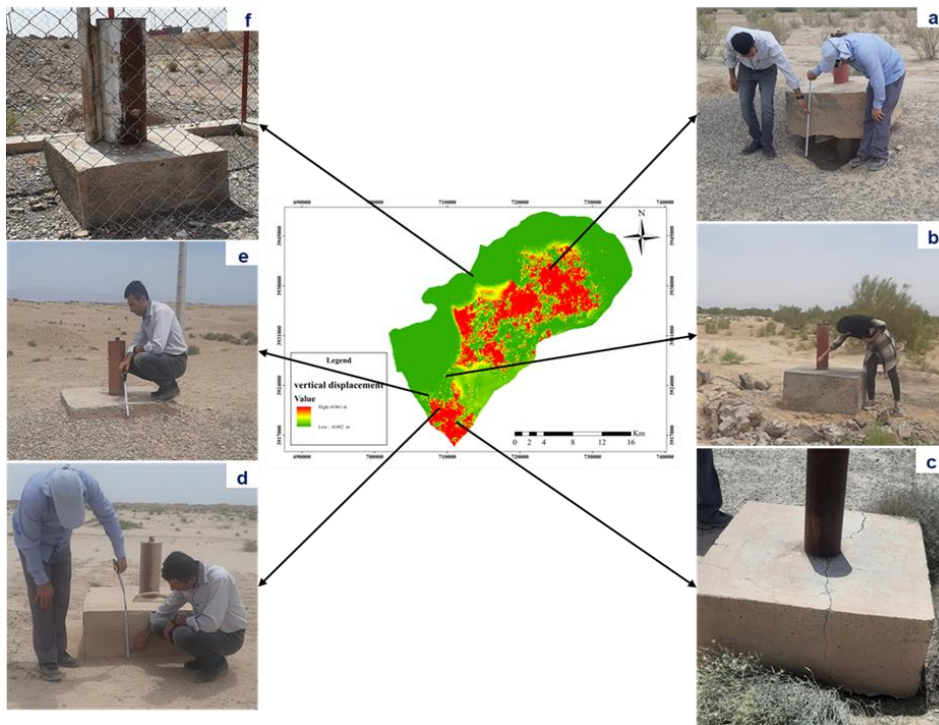
اعتبارسنجی یافته‌ها از طریق بازدید میدانی یک فرایند ضروری در نتایج مطالعات سنجش از دور می‌باشد. در این پژوهش به منظور بررسی میدانی پدیده فرونشست براساس نقشه‌های بدست آمده از منطقه فرونشست یافته پیزومترهای انتخاب و مورد بازدید قرار گرفت که رنج مختلفی از فرونشست را نشان می‌دهند (شکل ۱۱). ملاک ارزیابی صحرایی فرونشست معلق ماندن بتن پیزومتر، تغییر رنگ موجود در پیزومتر و لوله جدار بوده است. لازم به ذکر است که میزان فرونشست اندازه‌گیری شده در صحرا در بازه طولانی‌تر (حدود ۴۰ سال) از بازه ۷ ساله ارزیابی توسط روش تداخل‌سنجی بوده است. همچنین به دلیل اینکه تمامی پیزومترها تا سنگ کف حفاری نشده‌اند الزاماً تمامی فرونشست رخ داده را نشان نداده چرا که عملاً حالت معلق داشتند. علی‌رغم وجود این نقاط ضعف، ولی روند کلی میزان فرونشست رخ داده در پیزومترها در صورت صحت نقشه فرونشست بدست آمده در روش تداخل‌سنجی، می‌بایستی با این نقشه هم‌خوانی داشته باشند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که میزان نشست بدست آمده در روش تداخل‌سنجی هم‌خوانی خوبی با شواهد صحرایی پیزومترها نشان می‌دهد و حکایت از قابل قبول بودن دقت نشست‌های بدست آمده دارد در ادامه پیزومترهای مورد بررسی آورده شده است:

۱۹- پیزومتر اعلا همانطور که در شکل a-۱۱ مشاهده می‌شود، این پیزومتر نشستی حدود ۴۵ سانتی‌متر دارد. با توجه به بازه ۳۰ ساله شروع افت سطح ایستابی و شرایط زمین‌شناسی محل (تغییر



شکل ۱۰- نقشه جابجایی قائم سطح زمین به روش تداخل سنجی راداری.

Figure 10- Land Surface vertical displacement map using radar interferometry method.



شکل ۱۱- رشد لوله جدار پیزومتر در دشت سمنان.

Figure 11- Casing grow of the piezometer in the Semnan plain.

نتیجه گیری

۲- بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در این دشت در بازه زمانی ۷ ساله نشان می‌دهد که بیشینه افت سطح آب زیرزمینی در بخش شمال شرقی با افت بیش‌تر از ۸ متر و کمترین افت در بخش جنوب غربی دشت (افت کمتر از ۱ متر) رخ داده است.
۳- نقشه پتانسیل فرونشست دشت که بر اساس مکانیسم رخداد فرونشست و حاصل تلفیق نقشه‌های وزن‌دهی شده افت

در این پژوهش، با استفاده از روش تداخل سنجی راداری در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۱ فرونشست زمین در دشت سمنان بررسی و نتایج زیر بدست آمده است:
۱- با توجه به نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای حداکثر فرونشست دشت سمنان در بازه ۷ ساله ۶ سانتی‌متر بدست آمد که نشان‌دهنده نرخ بیشینه ۸/۵ میلی‌متر در سال می‌باشد.

اسدی، م، گنجائیان، ح، جاودانی، م، قادری حسب، م، ۱۴۰۰. ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر رادار. هیدروژئولوژی، ۱۳(۱): ۲۲-۱۳.

چترسیماب، ز، آل شیخ، ع، وثوقی، ب، بهزادی، س، مدیری، م، ۱۳۹۹. بررسی تأثیر جنس آبخوان و افت تراز آب زیرزمینی در میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل-سنجی راداری و داده‌های صحرایی (مطالعه موردی: حوزه آبخوان تهران-کرج-شهریار). زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۴(۱): ۶۸۹-۶۸۳.

حسینی میلانی، م، ۱۳۷۳. اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی و اثرات آن، مجموعه مقالات کنفرانس ملی منابع آب زیرزمینی سیرجان، ۹۱-۹۸.

رحمانی، غ، چیت‌سازان، م، غفوری، ح، ۱۴۰۱. تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست زمین با استفاده از مدل WALPSRFT و روش تحلیل سلسله مراتبی- فازی (مطالعه موردی: دشت دامنه- داران در غرب استان اصفهان). هیدروژئولوژی، ۱۳(۱): ۱۳۱-۱۵۰.

شفیعی، ن، گلی مختاری، ل، امیر احمدی، ا، زندی، ر، ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۸): ۹۳-۱۱۱.

شریفی‌کیا، م، ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهرمان. مجله برنامه ریزی و آمایش فضا، ۱۶(۳): ۷۷-۵۵.

صدری‌کیا، م، ۱۴۰۱. پایش فرونشست زمین با تحلیل سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی و تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت سراب). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۸(۲): ۱-۱۸.

سطح ایستابی و لیتولوژی رسوبات زیرسطحی است نشان می‌دهد که مناطق دارای پتانسیل بالای فرونشست در این نقشه هم‌خوانی خوبی با نقشه مقدار فرونشست بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری دارد و به نوعی این نقشه را اعتبارسنجی می‌کند.

۴- زون‌های اصلی فرونشست در بخش جنوب و جنوب شرق شهر سمنان و جنوب غربی دشت و جنوب صوفی‌آباد می‌باشد. در این دو بخش هم افت سطح ایستابی بالا بوده و هم رسوبات زیر سطحی غالباً ریزدانه‌اند. در مناطقی که یکی از این دو عامل مقدار کمی دارد، علی‌رغم این که ممکن است عامل دیگر پتانسیل بالایی داشته باشد ولی میزان فرونشست اندک است.

به عنوان مثال در بخش شمال و شمال شرق دشت به دلیل درشت دانه بودن رسوبات، نشست صورت نگرفته است.

۵- مقایسه نرخ فرونشست بدست آمده با شواهد مورفولوژیکی فرونشست به دست آمده نظیر رشد لوله جدار پیژومترها کاملاً با یکدیگر هم‌خوان بوده و نرخ بیشینه‌ای در حدود ۱ سانتی‌متر در سال را می‌توان برای این دشت پیشنهاد داد.

۶- برای جلوگیری از افزایش فرونشست در این منطقه خشک و بحرانی، پیشنهاد می‌شود مدیریت بهره‌برداری و برداشت پایدار از منابع آب زیرزمینی در دستور کار قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه صنعتی شاهرود جهت فراهم آوردن شرایط انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از شرکت سهامی آب منطقه‌ای سمنان به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌های سطح آب پیژومترها، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

آمیغ پی، م، عربی، س، طالبی، ع، جمور، ج، ۱۳۸۶. بررسی مناطق فرونشست ایران بر اساس داده‌های ترازیابی. همایش ژئوماتیک، اردیبهشت ماه ۸۶، تهران، ایران.

اکبری اریمی، ح، مومنی، ع، خراسانی، ا، ۱۳۹۸. بررسی فرونشست دشت سمنان ناشی از برداشت آب زیرزمینی. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۲۶(۲): ۹۷-۹۸.

Coal field, Jharkhand, India by space borne differential interferometric SAR, GPS and precision levelling techniques. *Journal of Earth System Science*, 124(6): 1359-1376.

ElGharbawi, T., 2023. Monitoring land subsidence in Egypt's northern west coast using interferometric synthetic aperture radar. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1: 2-7.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2007. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1): 8-20.

Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., 1988. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIRB. *International Journal of Remote Sensing*, 9(5): 857-872.

Hakim, W.L.; Achmad, A.R.; Eom, J., Lee, C-W., 2020. Land subsidence measurement in Jakarta coastal area using time series interferometry with Sentinel-1 SAR data. In: Jung, H.S.; Lee, S.; Ryu, J.H., and Cui, T. (eds.), *Advances in Geospatial Research of Coastal Environments. Journal of Coastal Research, Special*, 102: 75-81.

Imamoglu, M., Blik Sanli, F., Cakir, Z., Kahramn, F., 2022. Rapid ground subsidence in the Küçük Menderes Graben (W. Turkey) captured by Sentinel-1 SAR data. *Environmental Warth Sciences*, 81(221).

Jelini, M., Sepehr, A., Lashkaripoor, A.R., Rashki, A.R., 2017. Morphometric correlation of land subsidence related fissures and edaphic variability over Neyshabour Plain. *Quantitative Geomorphological Research*, 20: 59-75.

Moarefvand, P., Shamsadin Saeid, M., 2013. The Effect of Surface Loading on Wastewater Pipes in Different Implementation Methods. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 5: 1-10.

Poland, J.F., 1981. The occurrence and control of land subsidence due to groundwater withdrawal with special reference to the San Joaquin and Santa Clara Valleys, California. PhD Dissertation, Stanford University, Palo Alto, California.

Qiao, X., Chu, T., Tissot, P., Seneca, S., 2023. Sentinel-1 InSAR-derived land subsidence assessment along the Texas Gulf Coast. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125.

Rafiei, F., Gharechelou, S., Golian, S., Johnson, B.A., 2022. Aquifer and Land Subsidence Interaction Assessment Using Sentinel-1 Data and Din SAR. *Technique, Geo- Information*, 11(9): 495.

زندى، ر.، فرزین کیا، ر.، شفیعی، ن.، ۱۳۹۸. فرونشست زمین و تداخل سنجی راداری. چاپ اول، انتشارات ماهواره، تهران، ۱۴۶ص.

محمد علیزاده رفیع، ب.، ۱۳۸۷. اصلاح خاک‌های رمبند به روش تزریق (مطالعه موردی راه آهن سمنان-تهران). پایان نامه کارشناسی ارشد خاک و پی، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین، ۱۲۲ ص.

دوست محمدیان، ا.، ۱۳۹۷. بررسی تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت سمنان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته بیابان‌زدایی دانشکده کویر شناسی، دانشگاه سمنان، ۷۵ ص.

دلارام، ر.، فتوحی، ص.، حمیدیان پور، م.، سالاری، م.، ۱۴۰۳. بررسی میزان فرونشست در محدوده‌ای از دشت مشهد-توس با استفاده از تکنیک DInSAR. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۷۲: ۳۶۱-۳۷۷.

قربانی محمدآبادی، ص.، نژاد حسینی، ر.، گنجائیان، ح.، ۱۴۰۲. تحلیل عوامل مؤثر در وقوع فرونشست دست قهاوند با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای. جغرافیا و روابط انسانی، ۲۰: ۵۴۲-۵۵۳.

Alipour, S., Motgah, M., Sharifi, M.A., Walter, T.R., 2008. InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. *Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas*, 1: 1-5.

Asadzadeh, F., Kaki, M., Shakiba, S., Raei, B., 2016. Impact of drought on groundwater quality and groundwater level in Qorveh-Chardoli Plain. *Water Resources Research*, 12(3): 153-165.

Agustan, A., Sulaiman, A., Ito, A., 2016. Measuring Deformation in Jakarta through Long Term Synthetic Aperture Radar (SAR) Data Analysis. *2nd International Conference of Indonesian Society for Remote Sensing (ICOIRS)*.

Conway, B.D., 2015. Land subsidence and earth fissures in south-central and southern Arizona. *USA. Hydrogeology Journal*, 24: 649-655.

Chatterjee, R.S., Shailaja Thapa, K.B., Singh, G., Varunakumar, E., Raju, V.R., 2015. Detecting mapping and monitoring of land subsidence in Jharia

Riley, F.S., (1998). Mechanics of aquifer systems- The scientific legacy of Joseph F. Poland, in Borchers, J., ed., Land Subsidence-Case Studies and Current Research: Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence, Association of Engineering Geologists Special Publication, 8: 13-27.

Sowter, A., Bin Che Amat, M., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A., Ashammari, L., 2016. Mexico City land subsidence in 2014-2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. Applied Earth Observation and Geoinformation, 52: 230-242.

Thomas, R., Marquez, Y., Lopez-Sanchez, M., Delgado, J., Blanco, P., Mallorqui, S., Monica, M., Gerardo, H., Joaquin, M., 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced differential SAR interferometry: Vega Media of Segura River (SE Spain) case study, Remote Sensing of Environment, 98: 269-283.

Zhu, C., Wu, W., Motagh, M., Zhang, L., Jiang, Z., Long, S., 2020. Assessments of land subsidence along the Rizhao-Lankao high-speed railway at Heze, China, between 2015 and 2019 with Sentinel-1 data, Nat. Hazards Earth System Sci, 20: 3399-3411.

Waltham, A-C., 1989. Ground subsidence. Blackie & Son Ltd, 202 p.