



بررسی روند توسعه فرونشست دشت مشهد- چناران با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی

جواد دولتی^۱، غلامرضا لشکری پور^{۲*}، ناصر حافظی مقدس^۳، یاسر مقصودی مهرانی^۳

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹ / پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۲ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

چکیده

بهره‌برداری گسترده از منابع آب زیرزمینی در آبخوان مشهد- چناران در ۵۰ سال گذشته (۱۴۰۰-۱۳۵۰) منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی شده است. آثار منفی فرونشست ناشی از توسعه شدید منابع آب زیرزمینی از اواخر دهه ۱۳۶۰ در برخی نقاط دشت بروز کرده و در سال‌های اخیر بیشتر نقاط دشت را درگرفته است. در این تحقیق فرونشست دشت مشهد- چناران با استفاده از داده ماهواره راداری سنتینل-۱ بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ با استفاده از تکنیک تداخل سنجی سری زمانی به روش طول خط مبنای کوتاه (SBAS) بررسی شده است.

بررسی نقشه‌های فرونشست تهیه‌شده نشان می‌دهد که سه ناحیه فرونشستی در جنوب شرق شهر مشهد، شمال غرب شهر مشهد و شمال غرب دشت وجود دارد. حداکثر نرخ نشست سالانه در ناحیه دو فرونشستی در شمال غرب شهر مشهد برابر ۱۹ سانتی‌متر در سال بوده و در دو ناحیه فرونشستی ۱ و ۳ به ترتیب ۸/۹ و ۱۲/۱ سانتی‌متر در سال است. نتایج نرخ سری زمانی برآورد شده با استفاده از پردازش تصاویر راداری در محل ایستگاه‌های ثابت GPS گلمکان و نیروگاه طوس با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی نشان‌دهنده انطباق بالای این دو سری زمانی باهم است. انطباق منحنی‌های هم افت ۳۰ ساله سطح آب زیرزمینی و نقشه فرونشست نشان می‌دهد که زون‌های فرونشست سه‌گانه منطبق بر مناطق دارای افت سطح آب زیرزمینی بیش از ۳۰ متر است. همچنین برای بررسی ارتباط فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی، با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی و فرونشست در محل چاه‌های مشاهده‌ای منتخب ضرایب همبستگی و تعیین برای هر چاه محاسبه شده است. بر اساس بررسی ضرایب همبستگی به‌دست‌آمده چاه‌های انتخابی به دو گروه دارای ضریب همبستگی بیش از ۰/۸ (۷۵ درصد چاه‌ها) و بین ۰/۴۶ تا ۰/۸ تقسیم می‌شوند که نشان‌دهنده وجود رابطه همبستگی بسیار قوی و قوی بین نرخ فرونشست - افت سطح آب زیرزمینی در اغلب چاه‌های مشاهده‌ای است.

جواد دولتی^۱، غلامرضا لشکری پور^{۲*} (✉)، ناصر حافظی مقدس^۳، یاسر مقصودی مهرانی^۳

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳. دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

DOI: 10.30495/girs.2022.691565

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: lashkaripour@um.ac.ir

پیشینه و هدف:

محدوده مطالعاتی مشهد- چناران از نظر منابع آب، سیاسی و اجتماعی مهم‌ترین زیر حوضه، حوضه آبریز قره قوم و استان خراسان رضوی است. بهره‌برداری گسترده از منابع آب زیرزمینی در آبخوان مشهد- چناران در ۵۰ سال گذشته (۱۴۰۰-۱۳۵۰) منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی شده است. آثار منفی فرونشست ناشی از توسعه شدید منابع آب زیرزمینی از اواخر دهه ۱۳۶۰ در برخی نقاط دشت بروز کرده و در سال‌های اخیر کل دشت را درگرفته است. علی‌رغم انجام کارهای پژوهشی متعدد در ۲۰ ساله گذشته تاکنون تحقیق جامعی که فرونشست کل دشت مشهد- چناران را شامل شود، انجام نشده و تقریباً در تمامی موارد پژوهش‌های قبلی بخش مرکزی و جنوب شرقی دشت مشهد- چناران مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق برای اولین بار نقشه فرونشست کل دشت مشهد- چناران با استفاده از داده ماهواره راداری سنتینل تهیه و ارتباط آن با افت آب‌های زیرزمینی از منظر آماری بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق بررسی روند و میزان فرونشست مرتبط با برداشت بیش‌ازحد آب زیرزمینی در دشت مشهد- چناران بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری است.

مواد و روش‌ها:

برای تحقق هدف تحقیق، ۱۰۶ تصویر راداری Sentinel-1A، در بازه زمانی مهر ۱۳۹۳ تا خرداد ۱۳۹۹ دریافتی از سایت آرژانس فضای اروپا برای بررسی فرونشست مورداستفاده قرار گرفته است. همچنین اطلاعات مسیرهای ترازیبی موجود برای دوره زمانی ۱۳۸۴-۱۳۷۱ و سری زمانی ایستگاه‌های GPS گلمکان و نیروگاه طوس از سازمان نقشه‌برداری کشور و سطح آب اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای دشت مشهد- چناران از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت شده است. تصاویر راداری مورداستفاده با استفاده از روش SBAS توسط نرم‌افزار متن‌باز GMTSAR پردازش شده و نقشه‌های فرونشست تهیه و سری زمانی فرونشست برای کل دشت محاسبه شده است. جهت صحت سنجی اطلاعات حاصله، نتایج حاصل از پردازش با اطلاعات ترازیبی موجود برای دوره زمانی ۱۳۷۱-۱۳۸۴ و ایستگاه‌های GPS گلمکان و نیروگاه طوس مقایسه شده است.

نتایج و بحث:

بررسی نقشه‌های فرونشست تهیه شده برای دوره‌های زمانی مهر ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۵ و مرداد ۱۳۹۵ تا خرداد ۱۳۹۹ نشان می‌دهد که سه ناحیه فرونشستی در جنوب شرق شهر مشهد، شمال غرب شهر مشهد (بین شهر مشهد - چناران) و در شمال غرب دشت (شهر چناران) وجود دارد. در دوره زمانی مهر ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۵، حداکثر نرخ فرونشست سالانه در ناحیه ۱ فرونشستی، برابر ۱۶/۳ سانتی‌متر در سال بوده و در دو ناحیه فرونشستی ۱ و ۳ به ترتیب ۸ و ۹/۳ سانتی‌متر در سال است. در دوره زمانی مردادماه ۱۳۹۵ تا خرداد ۱۳۹۹، حداکثر نرخ نشست سالانه در ناحیه دو فرونشستی برابر ۱۹ سانتی‌متر در سال بوده و در دو ناحیه فرونشستی ۱ و ۳ به ترتیب ۸/۹ و ۱۲/۱ سانتی‌متر در سال است. به‌طورکلی نرخ فرونشست در دوره زمانی مهرماه ۱۳۹۳ تا خرداد ۱۳۹۹ روند افزایشی داشته است.

صحت سنجی نتایج نرخ فرونشست برآورد شده با استفاده از پردازش تصاویر راداری در محل نقاط نشانه مسیرهای ترازیبی با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی در سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۴ نشان‌دهنده این است که علی‌رغم عدم انطباق زمانی این داده‌ها باهم، این نرخ‌ها از نظر شدت و روند تغییرات باهم همخوانی دارند. انطباق بالای این نتایج نشان‌دهنده درستی مراحل پردازش است. همچنین، صحت سنجی نتایج نرخ سری زمانی برآورد شده با استفاده از پردازش تصاویر راداری در محل ایستگاه‌های GPS گلمکان و نیروگاه طوس با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی نشان‌دهنده انطباق بالای این دو سری زمانی و انطباق منحنی‌های هم افت ۳۰ ساله دشت مشهد- چناران و نقشه فرونشست تهیه شده برای دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴ است. قابل‌ذکر است، زون‌های فرونشست سه‌گانه منطبق بر مناطقی است که افت سطح آب زیرزمینی در آن‌ها بیش از ۳۰ متر است.

همچنین برای بررسی ارتباط فرونشست با افت سطح آب زیرزمینی، سری زمانی تغییرات سطح آب و فرونشست در محل چاه‌های مشاهده‌ای باهم مقایسه شده است. برای این منظور در بیست حلقه چاه مشاهده‌ای انتخابی ضرایب همبستگی و تعیین برای هر چاه محاسبه شده است. بر اساس بررسی ضرایب همبستگی به‌دست‌آمده می‌توان چاه‌های انتخابی را به دو گروه دسته‌بندی نمود. در گروه اول که بخش اعظم چاه‌های انتخابی (۷۵ درصد) را شامل می‌شود ضریب همبستگی بیش از ۰/۸ است که نشان‌دهنده وجود رابطه

نواحی فرونشستی وجود دارد ولی در برخی از مناطق دشت این همبستگی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. در این مناطق علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی عوامل دیگری مانند درصد رسوبات دانه ریز، وجود لایه های رسی و میزان تخلیه آب زیرزمینی نقش پررنگ تری دارند. همچنین گسل های موجود در این دشت نحوه گسترش نواحی فرونشستی را کنترل می نماید. این مطالعه نشان داد که استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری علاوه بر این که می تواند ابزار کارآمدی در برآورد میزان نرخ فرونشست و حدود گسترش آن قلمداد گردد، با استفاده از نتایج سری زمانی استخراج شده می توان تغییرات زمانی فرونشست را بررسی نمود.

واژه های کلیدی: فرونشست زمین، تداخل سنجی راداری، آب زیرزمینی، ضریب همبستگی، دشت مشهد-چناران.

همبستگی بسیار قوی و قوی بین نرخ فرونشست - افت سطح آب زیرزمینی در آن ها است. در چاه های گروه دوم که شامل چاه قلعه ساختمان در ناحیه ۱ فرونشستی و چاه های حسن آباد ویرانی، جوی پایین، تخم مرز و بحرآباد در ناحیه ۲ فرونشستی می شود، ضریب همبستگی بین ۰/۴۶ تا ۰/۰۸ تغییر می کند. رابطه همبستگی نرخ فرونشست- افت سطح آب زیرزمینی در این چاه ها متوسط (چاه حسن آباد ویرانی با ضریب ۰/۴۶)، اندک (چاه های جوی پائین و تخم مرز با ضریب ۰/۳۹) و فاقد رابطه (چاه های تخم مرز و بحرآباد) است.

نتیجه گیری:

نتایج پردازش تصاویر راداری سنتینل نشان می دهد که فرونشست زمین ناشی از بهره برداری بیش از حد منابع آب زیرزمینی در بخش وسیعی از دشت مشهد-چناران گسترش یافته به طوری که سه ناحیه فرونشستی مشخص در آن قابل تفکیک است. هرچند همبستگی بالایی بین نرخ فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی در این

مقدمه

بهره‌برداری گسترده از منابع آب زیرزمینی باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در اکثر آبخوان‌ها شده است. افت سطح آب زیرزمینی باعث به هم خوردن تعادل بین نیروهای حاکم بر سیستم آب زیرزمینی شده و با کاهش فشار آب منفذی موجود در بین رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان، وجود لایه‌های رسوبی دارای قابلیت فشردگی (لایه‌های ریزدانه سیلتی و رسی تحکیم نیافته یا نیمه تحکیمی) و تراکم آن‌ها، باعث فرونشست زمین می‌شود. فرونشست زمین که در حقیقت حرکت رو به پایین و غیرقابل‌بازگشت سطح زمین است، خسارت‌های جبران‌ناپذیر اقتصادی در سطح جامعه و محیط‌زیست به وجود آورده و باعث تخریب اراضی و تغییر وضعیت توپوگرافی و هیدرولوژیکی دشت‌ها شده و شریان‌های حیاتی (جاده‌ها، خطوط ریلی و مترو، خطوط انتقال آب، نفت، نیرو... و سازه‌های وابسته) ساختمان‌های مسکونی و صنعتی) را تخریب می‌کند (۲۶). در ایران با افزایش بهره‌برداری آبخوان‌ها و افت شدید سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌ها فرونشست زمین رخ داده است. بررسی وضعیت ۶۰۹ محدوده مطالعاتی کشور نشان می‌دهد که تا انتهای سال ۱۴۰۰، از نظر توسعه بهره‌برداری ۴۲۱ محدوده مطالعاتی ممنوعه یا ممنوعه بحرانی اعلام شده است. یکی از دلایل عمده ممنوعه بحرانی اعلام شدن آبخوان‌ها، وجود آثار فرونشست در آن‌ها است. در حال حاضر ۱۳۵ آبخوان کشور از نظر توسعه بهره‌برداری ممنوعه-بحرانی است (۱۸).

بررسی روند توسعه فرونشست در ایران نشان می‌دهد که این پدیده در سال ۱۳۵۶ اولین بار در دشت‌های رفسنجان، کرمان و سیرجان گزارش شده (۲۷) و در حال حاضر در بسیاری از آبخوان‌های کشور گسترش یافته و آثار و عوارض ناشی از آن مشاهده شده است. از سال ۱۳۶۰ تاکنون مطالعات فراوانی در مورد فرونشست در ایران صورت گرفته از جمله می‌توان به مطالعات انجام شده توسط مهرابی و غضنفر پور در کرمان (۲۰)، سعیدی و همکاران در دشت کاشمر (۲۹)، صالحی و همکاران (۳۰) و قره چلو و همکاران (۱۱) در دشت

مشهد، رکنی و همکاران (۲۸) در دشت نیشابور (معتق و همکاران (۲۴) در رفسنجان، حق‌شناس حقیقی و معتق (۱۳) و محمود پور و همکاران (۱۹) در تهران، بابایی و همکاران (۶) در قزوین، میرزاده و همکاران (۲۱) در یزد (و آروین و همکاران (۵) در میناب اشاره کرد. بررسی این مطالعات نشان می‌دهد که در برخی از آن‌ها وضعیت فرونشست و خصوصیات آن توصیف شده و در بسیاری دیگر روند توسعه فرونشست با استفاده از روش‌های ژئودتیکی (ترازیابی (levelling))، ایستگاه‌های GPS (Global Positioning System) یا پردازش تصاویر راداری و یا تلفیق آن‌ها بررسی شده است. برای پایش فرونشست و تعیین نرخ و روند توسعه آن، روش‌های مختلفی توسعه داده شده است. این روش‌ها به دو گروه عمده نقطه‌ای (ژئودتیکی) و غیر نقطه‌ای تقسیم می‌شوند. ترازیابی و ایستگاه‌های GPS از جمله روش‌های نقطه‌ای هستند. ترازیابی به‌عنوان قدیمی‌ترین روش، از اوایل سال ۱۹۰۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفته و عمدتاً در امتداد یک مسیر خاص یا شبکه طراحی شده بسته به صورت رفت و برگشتی صورت می‌گیرد. در محل ایستگاه‌های GPS مؤلفه‌های مختلف حرکت زمین (قائم، شرقی- غربی و جنوبی- شمالی) اندازه‌گیری می‌شود. این دو روش علی‌رغم داشتن دقت بالا، به دلیل هزینه‌بر و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری و محدودیت ثبت اطلاعات در محل نقاط نشانه (Bench Marks) کارایی بالایی برای استخراج الگوهای زمانی و مکانی فرونشست زمین در سطح مناطق وسیع را ندارند (۲۶).

توسعه سنجنده‌های راداری در دهه ۱۹۹۰ میلادی و ابداع روش‌های مختلف برای پردازش تصاویر راداری ابزار کارآمدی برای مطالعات تغییرات سطح زمین و پایش جابجایی‌های ناشی از پدیده‌های مختلف (زلزله، آتش‌فشان، زمین‌لغزش و فرونشست) در سطح وسیع را فراهم نموده است (۲۰). این روش‌ها توسط محققین متعددی در بسیاری از نقاط دنیا مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن منتشر شده است.

بررسی مطالعات فرونشست صورت گرفته در دشت مشهد - چناران نشان می‌دهد که از دهه ۶۰ شمسی تاکنون این

۱۲ سانتی‌متر و بر اساس تداخل نمای ۳۸۵ روزه که از نظر زمانی ۲/۵ برابر تداخل نمای ۱۴۱ روزه است، حداکثر فرونشست ۲۷ سانتی‌متر برآورد گردید (۲۲). همچنین اکبری و همکاران در سال ۲۰۰۸ این دشت را مورد بررسی مجدد قرار دادند. در این مطالعه نقشه فرونشست از تجمیع ۱۴ تداخل نما به دست آمده و مساحت ناحیه فرونشست ۷۱ کیلومتر مربع تعیین شد که تا شمال غرب شهر مشهد گسترش دارد. نتایج این مطالعه با مقایسه با داده‌های ترازیبی و ایستگاه‌های GPS را تأیید شد (۱).

دهقانی در سال ۱۳۸۸ در راستای طرح بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین استان خراسان رضوی با استفاده از ۱۴ تصویر راداری Envisat در بازه‌های زمانی دی‌ماه ۱۳۸۲ تا آبان ماه ۱۳۸۴، نقشه نرخ فرونشست سالانه دشت مشهد- چناران را تهیه و بر اساس آن حداکثر نرخ فرونشست سالانه را ۲۳ سانتی‌متر در سال برآورد کرد (۸). وی همچنین در بررسی مجدد تصاویر Envisat این دشت در دوره زمانی ۱۳۸۲-۱۳۸۵، در سال ۱۳۹۴، این نرخ فرونشست سالانه را تأیید کرد (۹).

صالحی و همکاران با استفاده از تصاویر ماهواره راداری Envisat نقشه‌های فرونشست دشت مشهد- چناران برای دوره‌های زمانی ۱۳۸۲-۱۳۸۵ و ۱۳۸۸-۱۳۸۹ تهیه نمودند. بررسی این نقشه‌ها نشان می‌دهد که بیشترین نرخ فرونشست در دوره زمانی ۱۳۸۵-۱۳۸۲ به میزان ۲۹ سانتی‌متر در سال و در بازه زمانی ۱۳۸۹-۱۳۸۸، ۳۲ سانتی‌متر در سال برآورد گردید. این مطالعات نشان داد که در این دشت دو کاسه فرونشستی یکی در شمال غرب (بین شهرهای مشهد- چناران) و دیگری در جنوب شرق شهر مشهد وجود دارد (۳۰). سازمان زمین‌شناسی در سال ۱۳۹۸ با استفاده از تصاویر راداری Sentinel برای دوره زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۷، فرونشست دشت مشهد- چناران را مورد بررسی قرارداد و نرخ فرونشست در این دشت را ۱۲ سانتی‌متر در سال اعلام نمود (۱۰).

پدیده با استفاده از روش‌های ترازیبی، ایستگاه‌های GPS و تداخل سنجی راداری توسط محققین مختلف بررسی شده است. از اواخر دهه شصت شمسی گزارش‌ها متعددی در مورد لوله زایی چاه‌ها، تخریب لوله‌های (مچالیدگی) چاه‌های آب شرب به‌ویژه در منطقه توس دشت مشهد ارائه شد (۳۱).

سازمان نقشه‌برداری کشور در دوره زمانی ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۱ در قالب طرح ترازیبی سراسری در سه محور مشهد- قوچان (BCBD)، مشهد- کلات (BDBE) و مشهد- سرخس (BEBN) دشت مشهد، ترازیبی دقیق انجام داده و با توجه به نتایج حاصله وجود فرونشست و نرخ آن را در این مسیرها گزارش نمود. همچنین در دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۴، بخشی از مسیر ترازیبی مشهد- قوچان که دارای نرخ نشست بالایی بوده، مجدداً مورد بررسی ترازیبی قرار داد. بررسی داده‌های ترازیبی نشان می‌دهد که در این دشت حداقل از اوایل دهه ۷۰ در برخی مناطق فرونشست رخ داده است (همچنین توسط این سازمان در دوره زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸، شش ایستگاه GPS در این دشت نصب شد که مؤلفه‌های قائم، شمالی- جنوبی و شرقی- غربی حرکت زمین در آن‌ها ثبت می‌شود (۲).

در دوره زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۰، توسط محققین مختلف فرونشست این دشت با استفاده از تصاویر راداری ERS-1 و ERS-2 (Envisat) و Sentinel-1A روش‌های مختلف پردازش (تداخل‌سنجی) مورد بررسی قرار گرفت که خلاصه نتایج آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. بررسی این مطالعات نشان می‌دهد که به جزء مطالعه صورت گرفته توسط سازمان زمین‌شناسی در سال ۱۳۹۷، که تمامی دشت را پوشش داده، در سایر مطالعات بخش شرقی و مرکزی دشت (محدوده بین مشهد تا چناران) بررسی شده است.

معتق و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از تصاویر راداری Envisat در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ برای اولین بار فرونشست دشت مشهد- چناران را بررسی نمود. در این تحقیق بر اساس تداخل نمای ۱۴۱ روزه، حداکثر فرونشست

جدول ۱. خلاصه نتایج مطالعات تداخل سنجی راداری انجام شده در دشت مشهد- چناران

Table 1. Summary of studies that have used the InSAR for Mashhad-Chenaran Plain

منبع	بازه زمانی	نرم افزار	سنجده	حداکثر نرخ فرونشست (cm/year)
اکبری و همکاران (۱)	۱۹۹۸-۱۹۹۹	Doris		۲۲
معتق و همکاران (۲۲)	۲۰۰۳-۲۰۰۵	Doris		۲۸-۳۰
معتق و همکاران (۲۳)	۲۰۰۳-۲۰۰۶	GAMMA	ENVISAT	۲۴
اکبری و همکاران (۱)	۲۰۰۴-۲۰۰۷	Doris		۲۵
صالحی متعهد و همکاران (۳۰)	۲۰۰۳-۲۰۰۵	SARscape		۲۹
صالحی متعهد و همکاران (۳۰)	۲۰۰۹-۲۰۱۰	SARscape		۳۲
قره چلو و همکاران (۱۱)	۲۰۰۷-۲۰۰۸	SARscape	ALOS	۱۸/۲ (برای ۲۳۰ روز)
خرمی و همکاران (۱۵)	۲۰۱۴-۲۰۱۷	SARPROZ		۱۷/۹
سازمان نقشه برداری کشور (۲۵)	۲۰۱۴-۲۰۱۷	GAMMA	Sentinel-IA	۲۲
سازمان زمین شناسی کشور (۱۰)	۲۰۱۴-۲۰۱۷	GAMMA		۱۲
قره چلو و همکاران (۱۱)	۲۰۱۵-۲۰۱۸	SARscape		۱۸ (متوسط سه ساله)

کل دشت مشهد- چناران را در بر بگیرد، انجام نشده و تقریباً در تمامی موارد پژوهش‌های قبلی فرونشست در بخش مرکزی و جنوب شرقی این دشت مورد بررسی قرار گرفته است در تحقیق حاضر، ضمن مرور نتایج مطالعات قبلی فرونشست در دشت مشهد - چناران، روند توسعه و الگوی فرونشست زمین (نقشه‌های هم نرخ) و سری زمانی آن، با استفاده از تصاویر Sentinel-IA و روش تداخل سنجی خط مبنای کوتاه (Small Baseline Subset: SBAS) در دوره زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ بررسی شده است. همچنین با استفاده از سری زمانی فرونشست زمین در محل چاه‌های مشاهده‌ای، ارتباط افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست با استفاده از روابط آماری بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

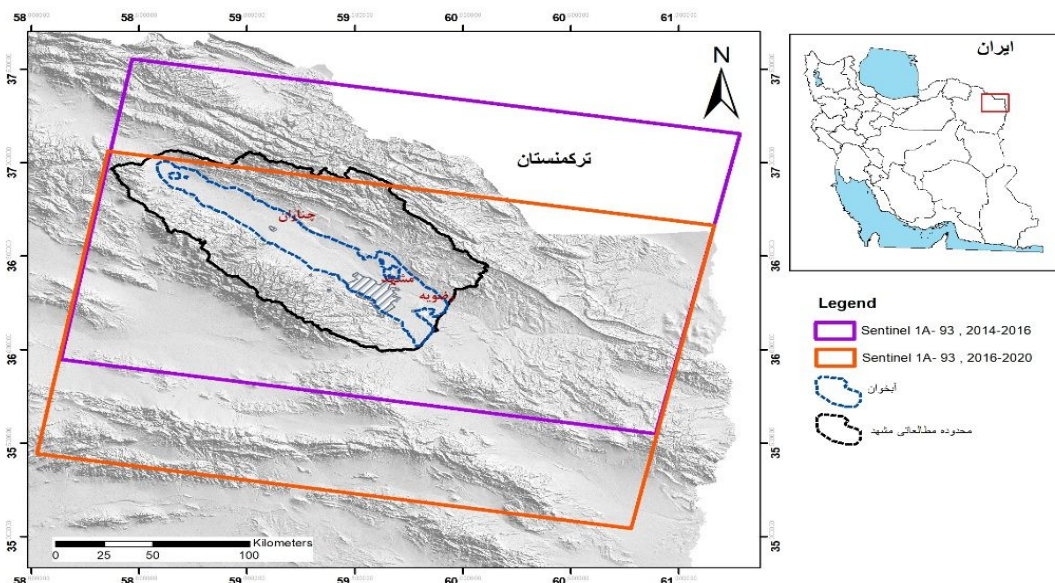
دشت مشهد - چناران با مساحت حدود ۳۳۵۰ کیلومتر مربع مهم‌ترین دشت حوضه آبریز قره قوم است. این دشت حوضه فروافتاده‌ای با کشیدگی شمال غرب - جنوب شرق بوده

خرمی و همکاران با استفاده از تصاویر Sentinel در دوره زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶، فرونشست شهر مشهد را با استفاده از روش PS InSAR بررسی و نرخ فرونشست را ۱۷ سانتی‌متر در سال برآورد نمودند (۱۵). در این تحقیق از هر دو نوع تصویر پایین گذر و بالا گذر برای پردازش استفاده شده است. سازمان نقشه برداری در سال ۱۳۹۸ اطلس فرونشست دشت مشهد- چناران را که حاصل پردازش ۵۵ تصویر ماهواره Sentinel از آبان ۱۳۹۳ تا آذر ۱۳۹۶ به روش تداخل سنجی راداری است، منتشر نمود که در آن، منطقه‌ای با مساحت ۱۲۰۰ کیلومتر مربع بررسی و بیشترین نرخ فرونشست ۲۲ سانتی‌متر در سال برآورد شده است (۲۵).

قره چلو و همکاران (۱۱) با استفاده از تصاویر ALOS و Sentinel فرونشست بخش مرکزی دشت را برای دوره زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۷ و ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ بررسی نموده و نرخ فرونشست را برای دوره ۲۳۰ روز (۱۳۸۶ تا ۱۳۸۷) ۱۳/۷ سانتی‌متر و برای سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵، ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۶ و ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷ به ترتیب ۱۶/۱، ۱۷/۴ و ۲۰/۳ سانتی‌متر برآورد کردند. علی‌رغم انجام کارهای پژوهشی متعدد بررسی شده در ۲۰ ساله گذشته، تاکنون تحقیق جامعی که بررسی فرونشست

تکتونیکی دشت مشهد- چناران بیان کرد که دشت مشهد- ناودیسی باز است که توسط گسل‌های طولی متعدد بریده شده است. در جنوب این دشت سامانه گسلی جنوب مشهد متشکل از چند گسل به موازات هم با مکانیسم امتدادلغز نرمال قرار داشته و در شمال دشت گسل معکوس کشف رود و ادامه آن توس سبب بالاآمدگی سنگ کف مارنی شده است. در مرکز دشت حدفاصل بین دو گسل کشف رود و F2 نهشته‌های مارنی پلیستوسن با ضخامت زیاد قرار دارد (۱۲).

و مهم‌ترین مناطق مسکونی آن شهرهای مشهد، چناران و رضویه است. رودخانه کشف رود و سرشاخه‌های آن (طرقبه، رادکان، جاغرق، زشک، گلستان، کارده) زهکش اصلی این دشت بوده و تغذیه‌کننده آبخوان آن می‌باشند. موقعیت این دشت در استان خراسان رضوی و کشور در شکل ۱ نشان داده شده است. از نظر زمین‌شناسی ارتفاعات شمالی (کپه داغ) از سنگ‌های رسوبی و ارتفاعات جنوبی (بینالود) از سنگ‌های آذرین - دگرگونی (بخش شرق آن) و رسوبی (بخش غرب آن) تشکیل شده است. حافظی و همکاران با بررسی وضعیت



شکل (۱): موقعیت محدوده مطالعاتی و آبخوان مشهد-چناران در کشور
Fig. 1: Location of study area and Mashhad-Chenaran aquifer in Iran

خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان، ضخامت، جنس و مورفولوژی آبرفت مشاهده می‌شود (۳).

جنس سنگ کف آبخوان در بخش جنوب شرقی و شمال غربی تا محدوده شهر چناران از رسوبات نئوژن، در حاشیه شمالی دشت سازندهای شوربچه و تیرگان و در بخش جنوبی دشت از سنگ‌های آذرین و دگرگونی است (۱۴). عمق برخورد به آب زیرزمینی از دامنه ارتفاعات جنوبی به سمت بلندی‌های شمالی کاهش یافته و این روند بیشتر از تغییرات عمق سنگ کف

هیدروژئولوژی

آبخوان مشهد - چناران با مساحت ۲۵۲۷ کیلومترمربع با طول ۱۵۰ کیلومتر و عرض متغیر بین ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر، مهم‌ترین آبخوان آبرفتی (از نظر وسعت و میزان بهره‌برداری) استان خراسان رضوی است (۱۴). این آبخوان از نوع آزاد بوده و توپوگرافی سنگ کف آن تحت تأثیر عملکرد سیستم‌های گسل طولی و عرضی دشت و واحدهای زمین‌شناسی حاشیه شمالی و جنوبی آبخوان است و تغییرات قابل‌توجهی در

Arc GIS 10.3 و Excel2016 ترسیم شده است. GMTSAR انجام و نقشه‌ها و نمودارها در نرم‌افزارهای Arc

روش تحقیق

تصاویر راداری سنتینل در حالت IW با استفاده از روش TOPSAR تهیه می‌شوند. TOPSAR یک روش تصویربرداری SAR است که در آن تصویر در بخش‌های متوالی با هدایت الکترونیکی آنتن SAR بین نوارهای (Swath) مجاور برداشت می‌شود. با توجه به نحوه برداشت تصاویر سنتینل، هر تصویر SLC، دارای سه نوار فرعی IW1، IW2، IW3 بوده و هر نوار فرعی از ۹ تا ۱۱، زیر بخش (burst) تشکیل شده است. نوارها و زیر بخش‌ها در تصویر خام در لبه‌ها برای چند متر هم‌پوشانی دارند. برای تهیه نقشه‌های فرونشست مراحل زیر طی شده است.

پیش‌پردازش تصاویر راداری

با توجه به ساختار تصاویر خام دریافتی قبل از پردازش و تهیه تداخل نماها (Interferogram)، هر تصویر نیاز به آماده‌سازی دارد. در این مرحله ابتدا تفکیک هر تصویر به سه نوار تشکیل‌دهنده انجام شده و زیر بخش‌های موجود در هر نوار باهم ادغام می‌شود. با توجه به این‌که دشت مشهد - چناران در محدوده دو نوار IW2 و IW3 قرار دارد، این دو نوار باهم ادغام شده و تصاویر موردنیاز برای مرحله پردازش تهیه می‌شود.

مراحل پردازش تصاویر راداری

پس از آماده‌سازی تصاویر خام، مراحل پردازش تصاویر راداری و تهیه نقشه فرونشست طبق نمودار جریان کار ارائه شده در شکل ۲، انجام شده است. با در نظر گرفتن وجود دو شرط خط منبای مکانی (فاصله مکانی مرکز دو تصویر اخذ شده) و زمانی کم‌تر از ۱۰۰ متر و کم‌تر از ۷۵ روز (فاصله زمانی تاریخ دریافت دو تصویر استفاده شده)، تصویر پایه (Master) و پیرو (Slave) هر زوج تصویر تعیین و ازتداخل

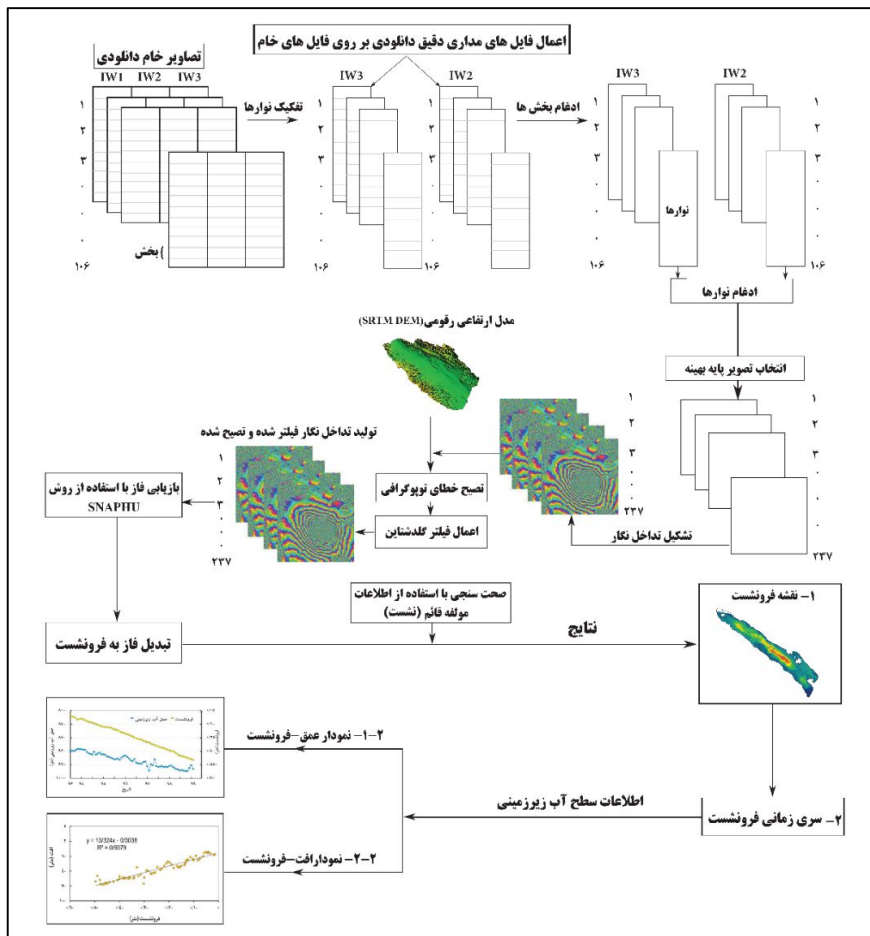
در محدوده پیروی می‌کند. جهت جریان آب زیرزمینی نیز علاوه بر پیروی از شیب توپوگرافی منطقه، توسط زمین‌شناسی و مورفولوژی سنگ کف کنترل می‌شود. تغذیه آبخوان، به‌طور عمده از طریق مخروط افکنه‌های حاشیه ارتفاعات بینالود صورت می‌گیرد. مخروط افکنه‌های حاشیه شمالی دشت که از نهشته‌های آبرفتی دانه‌ریز تا دانه‌متوسط تشکیل شده‌اند، به دلیل جنس و ضخامت کم نقش کمتری در تغذیه آبخوان دارند (۳۰ و ۱۷).

داده‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق ۱۰۶ تصویر راداری Sentinel-1A در قالب فرمت SLC (Single Look Complex) دریافتی از آژانس فضایی اروپا (European Space Agency:ESA) دارای حالت IW (Interferometric Wide swath) و پلاریزاسیون VV، در مسیر (Track) پائین‌گذر (Decsending) ۹۳، در بازه زمانی مهر ۱۳۹۳ تا خرداد ۱۳۹۹ برای بررسی فرونشست مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری SRTM، در زمان پردازش تصاویر راداری برای حذف اثر خطای توپوگرافی استفاده شده است. پس از تهیه نقشه فرونشست، سری زمانی فرونشست برای هر یک از پیکسل‌های تصویر با استفاده از روش خط منبای کوتاه (SBAS) تهیه شده است. با استفاده از اطلاعات سری زمانی ایستگاه‌های GPS گلمکان (GLOM) و نیروگاه طوس (NFRD) صحت سنجی نقشه‌های فرونشست انجام شده و از اطلاعات ترازبایی دوره‌های زمانی مختلف (۱۳۸۱ - ۱۳۷۳ و ۱۳۸۴ - ۱۳۸۱) جهت بررسی انطباق مکانی زون‌های فرونشست در زمان‌های مختلف استفاده شده است. با استفاده از اطلاعات تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای انتخابی در دشت مشهد-چناران عوامل مؤثر توزیع زمانی و مکانی فرونشست بررسی شده است. فرآیند پردازش و تجزیه و تحلیل تداخل سنجی در شکل (۲) ارائه شده است. پردازش تصاویر راداری با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز (Open Source)

تداخل نما حاصل ضرب خارجی تصویر مینا در مجموعه توأم تصویر پیرو است، جهت تشکیل تداخل نما مقادیر اختلاف فاز میان دو تصویر باید محاسبه شود. اختلاف فاز بین دو تصویر $(\Delta\varphi)$ شامل ۵ مؤلفه زیر است.

نماهای ممکن تهیه شد. پس از انتخاب زوج تصویر، هر دو تصویر SLC باید با دقت بسیار بالایی نسبت به هم در هر دو مؤلفه فاز و دامنه ثابت هم مرجع (منطبق) شوند. در این مرحله که ثبت هندسی (Coregistration) نیز نامیده می شود تصویر پیرو نسبت به تصویر پایه هم مرجع می گردد. با توجه به این که



شکل ۲. نمودار جریان مراحل پیش پردازش تصاویر تا تولید تداخل نما و نقشه های فرونشست

Fig 2. Flowchart of Sentinel-1 image pre-processing to produce interferograms and subsidence maps

در این رابطه: $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{erthflat} + \Delta\varphi_{elevation} + \Delta\varphi_{displacoment} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{noise}$ [۱]

در این رابطه: اختلاف فاز زمین مسطح، ناشی از انحناى سطح زمین: $\Delta\varphi_{erthflat}$

اختلاف فاز ناشی تأثیر توپوگرافی مرجع: $\Delta\varphi_{elevation}$

اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل سطح زمین: $\Delta\varphi_{displacoment}$

اختلاف فاز ناشی از تأثیر اتمسفر (تغییرات رطوبت، دما و فشار اتمسفر): $\Delta\varphi_{atmosphere}$

ذکر شده، از روش خط مبنای کوتاه استفاده شده است. در این روش تنها تداخل نماهایی که از زوج تصاویری که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کم‌تر از مقدار بحرانی خط مبنا (۱۰۰ متر) بوده و خط مبنای زمانی آن‌ها کمینه (کم‌تر از ۷۵ روز) است، برای تهیه سری زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. پس از تشکیل تداخل نماها، در شبکه ایجاد شده از تصاویر، سری زمانی مقدار جابجایی هر پیکسل، با استفاده از روش کمترین مربعات برآورد شده است. لازم به ذکر است که در نقشه‌ها و سری زمانی فرونشست حاصل، مقادیر فرونشست در جهت دید ماهواره (Line of Sight: LoS) به مقادیر در جهت قائم تبدیل شده است.

با توجه به عدم انطباق کامل تصاویر راداری دریافتی برای منطقه مورد مطالعه به دلیل تغییرات در مسیر و تجهیزات سنجنده‌های ماهواره و جابجایی بیش از ۲۰ درصد مرکز تصاویر دریافتی نسبت به هم (شکل ۱)، پردازش تصاویر دریافتی در دو مرحله برای دوره‌های زمانی مهر ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۵ و مرداد ۱۳۹۵ تا خرداد ۱۳۹۹ صورت گرفته و نقشه‌های هم‌نرخ و سری زمانی فرونشست برای هر مرحله تهیه شده است. از ادغام دو سری زمانی حاصله، سری زمانی کل فرونشست تهیه شده است.

پس از تهیه نقشه فرونشست دشت مشهد جهت بررسی ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست، سری زمانی سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای منتخب دشت (تهیه شده براساس اطلاعات سطح آب زیرزمینی دریافتی از دفنر مطالعات پایه آب منطقه ای خراسان رضوی) با سری زمانی نشست زمین در این نقطه با هم مقایسه شده است. جهت بررسی ارتباط این دو متغیر از ضریب همبستگی (Correlation Coefficient) و ضریب تعیین یا ضریب تشخیص (R-squared Correlation) R که میزان ارتباط خطی دو متغیر را بیان می‌کند استفاده شده است. با توجه به دوره زمانی تصاویر بررسی شده، سری زمانی دو متغیر در محدوده زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ با هم مقایسه شده و برای بررسی دقیق تر نیاز به پردازش تصاویر راداری موجود در دوره زمانی ۱۳۸۲

در طی ساخت تداخل نما، اختلاف فاز ناشی از زمین مسطح با استفاده از اطلاعات موجود در فایل‌های مداری دریافتی محاسبه و برآورد شده است. اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل سطح زمین با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (SRTM) برداشت می‌شود. با اعمال فیلتر گلدشتاین بر روی هر یک از پیکسل‌های تصاویر، نویز ناشی از اتمسفر کاهش یافته و اثر اتمسفر تصحیح شده است. در این مرحله نسبت سیگنال به نویز افزایش یافته و بازیابی مناسب فاز صورت گرفته است. به دلیل ماهیت خاص تصویربرداری راداری، این تصاویر اطلاعات مربوط به مقدار مطلق فاز را نداشته و داده‌های فاز موجود در بازه تا ۳۶۰ درجه ثبت می‌شود. در این مرحله مقدار فاز با استفاده از فاز نهایی شده، بازیابی می‌شود (۳۰). فرآیند تبدیل مقادیر گسسته و مبهم فاز ثبت شده در تصاویر راداری به مقادیر پیوسته و مطلق، اصطلاحاً بازیابی فاز (Phase Unwrapping) نامیده می‌شود. در این مرحله فاز به فاصله تبدیل شده و یک شرط نرم‌کنندگی به مسئله معکوس سازی کم‌ترین مربعات اضافه شده است. لازم به ذکر است واحد اندازه گیری کمیت‌ها در رابطه ۱، در مراحل اولیه پردازش رادیاں بوده و پس از مرحله بازیابی فاز واحدهای متریک (سانتی متر یا میلی متر) است. جهت بررسی رفتار سنجی زمین از تحلیل سری زمانی داده‌های تداخل سنجی استفاده شده است. هر تداخل نما معرف تغییر شکل بین دو تاریخ اخذ تصویر است. برای مجموعه‌ای از تصاویر که امکان ایجاد تداخل نما میان هر دو اخذ تصویر کنار هم وجود دارد، با شروع از اولین تداخل نما و افزون تداخل نماهای بعدی می‌توان سری زمانی کل تغییر شکل میان زمان شروع و تاریخ اخذ هر تصویر را به دست آورد (۷). با استفاده از تجزیه و تحلیل سری زمانی فرونشست می‌توان تغییرات متوسط سطح زمین در درازمدت را بررسی نمود. دو شرط مهم تجزیه و تحلیل سری زمانی برای برآورد مقادیر جابجایی این است که تعداد تداخل نماهای تولیدی حداقل برابر تعداد تصاویر راداری مورد استفاده بوده و زنجیره تداخل نماها درجایی (زمانی) گسسته نباشد. جهت تهیه سری زمانی فرونشست زمین دشت مشهد با در نظر گرفتن دو شرط

تا ۱۴۰۰ (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰) و تهیه سری زمانی درازمدت فرونشست می‌باشد.

صحت سنجی داده‌های حاصل از پردازش تصاویر

راداری

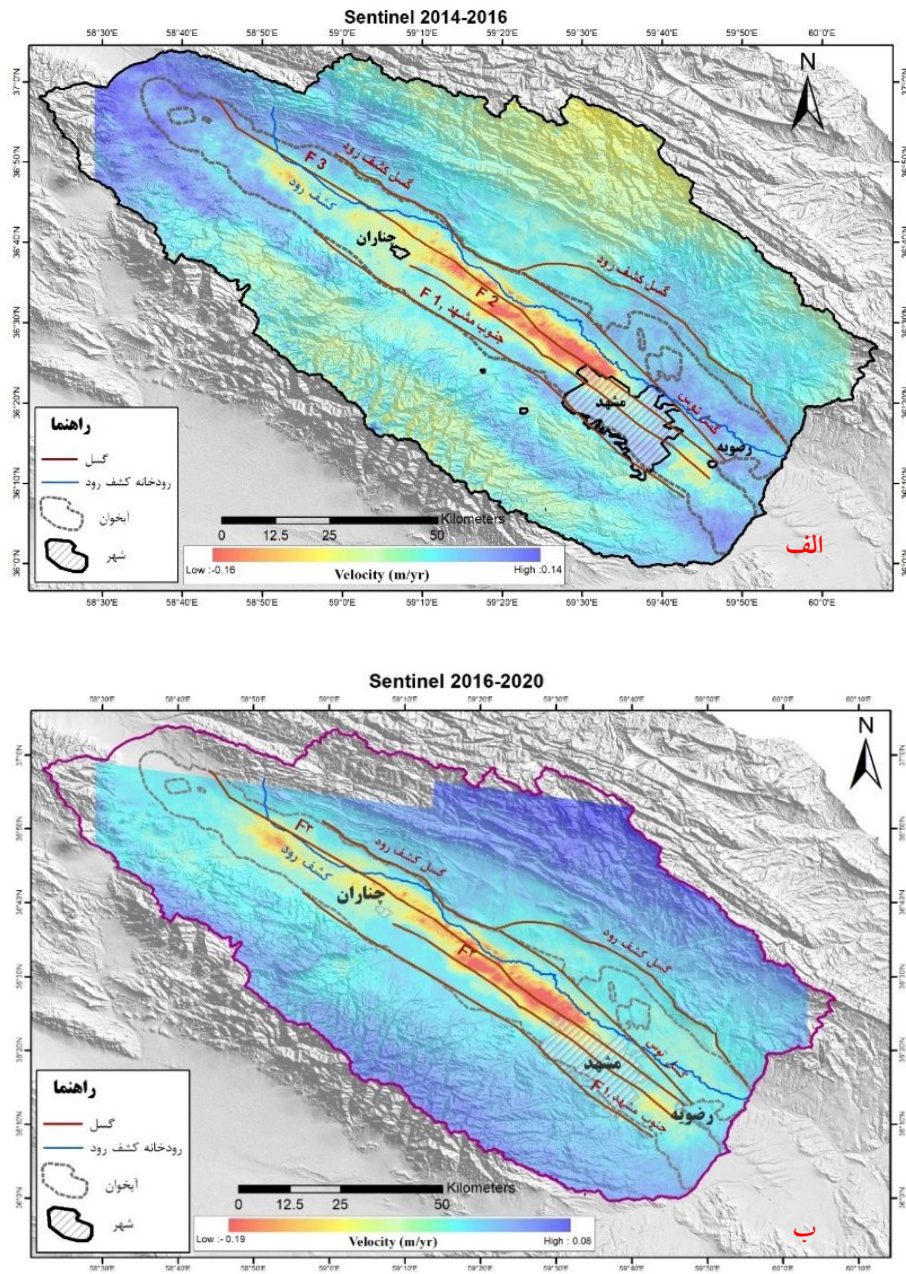
برای بررسی صحت سنجی و دقت روش تداخل‌سنجی راداری و نقشه‌های هم‌نرخ فرونشست تولیدی، نتایج سری زمانی فرونشست به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر راداری با نتایج فرونشست اندازه‌گیری شده در محل نقاط نشانه مسیرهای ترازیبی و ایستگاه‌های GPS مقایسه گردید. در دشت مشهد- چناران در دوره زمانی ۳۷۳ تا ۱۳۸۱ در سه مسیر مشهد-قوچان (BCBD)، مشهد-کلات (BDBE) و مشهد- سرخس (BEBN) عملیات ترازیبی درجه ۱، صورت گرفته است. همچنین در دشت مشهد- چناران ۶ ایستگاه دائم GPS در دوره زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ نصب شده و در آن‌ها اطلاعات مؤلفه قائم (فرونشست) ثبت شده است. موقعیت مسیرهای ترازیبی انجام‌شده و ایستگاه‌های GPS دشت مشهد- چناران در شکل ۵ ارائه شده است.

بررسی برداشت‌های صورت گرفته در مسیر BCBD نشان می‌دهد که حداکثر نشست تجمعی این مسیر در دوره زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۱ معادل ۵۸ سانتی‌متر (شکل ۶-الف) و در دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ حدود ۵۰ سانتی‌متر (شکل ۶-ب) بوده که در منطقه توس رخ داده است. مقایسه نتایج ترازیبی صورت گرفته در بخشی از این مسیر به طول تقریبی ۵۳ کیلومتری در دو دوره زمانی ۱۳۸۲-۱۳۷۳ و ۱۳۸۵-۱۳۸۲ نشان می‌دهد که مقدار فرونشست در دوره ۱۳۸۱-۱۳۷۴ در ایستگاه توس (BM50) حداکثر بوده ولی در دوره ۱۳۸۵-۱۳۸۲، حداکثر فرونشست در ۱۰ کیلومتری غرب ایستگاه توس (BM54) اندازه‌گیری شده است. موقعیت این بخش موردبررسی و نقاط نشانه دارای بیشترین نشست در شکل ۶ نشان داده شده است. حداکثر نشست سالانه در محور مشهد- سرخس، ۸/۲ سانتی‌متر (نشست تجمعی ۷۴ سانتی‌متر در ۹ سال) در شهرک باهنر (قلعه ساختمان) و در محور مشهد- کلات، ۳/۴ سانتی‌متر (نشست تجمعی ۳۱ سانتی‌متر در ۹ سال) اندازه‌گیری شده است.

نتایج

با استفاده از تصاویر راداری بر اساس روش خط مبنای کوتاه، نقشه‌های فرونشست دشت مشهد - چناران برای دوره‌های زمانی مهر ۱۳۹۳ - فروردین ۱۳۹۵ و مرداد ۱۳۹۵ - خرداد ۱۳۹۹ تهیه شده که در شکل ۳ الف و ب ارائه شده است. بررسی این نقشه‌ها نشان می‌دهد که سه ناحیه فرونشستی در دشت وجود دارد به طوری که ناحیه ۱، در جنوب شرق شهر مشهد، ناحیه ۲ در شمال غرب شهر مشهد (بین شهر مشهد - چناران) و ناحیه ۳ در شمال غرب دشت (شهر چناران) گسترش یافته است. در شکل (۴) نقشه‌های تفکیک شده هریک از این سه ناحیه بحرانی فرونشست ارائه شده است. در دوره زمانی مهر ۱۳۹۳ - فروردین ۱۳۹۵، حداکثر نرخ فرونشست سالانه در ناحیه دو فرونشستی برابر ۱۶/۳ سانتی‌متر در سال بوده و در دو ناحیه فرونشستی ۱ و ۳ به ترتیب ۸ و ۹/۳ سانتی‌متر در سال است. در دوره زمانی مرداد ۱۳۹۵ تا خرداد ۱۳۹۹، حداکثر نرخ نشست سالانه در ناحیه دو برابر ۱۹ سانتی‌متر در سال بوده و در دو ناحیه ۱ و ۳ به ترتیب ۸/۹ و ۱۲/۱ سانتی‌متر در سال است. بررسی دو نقشه تهیه شده نشان می‌دهد که نرخ فرونشست در دوره زمانی مهر ۱۳۹۳ تا خرداد ۱۳۹۹ روند افزایشی داشته است.

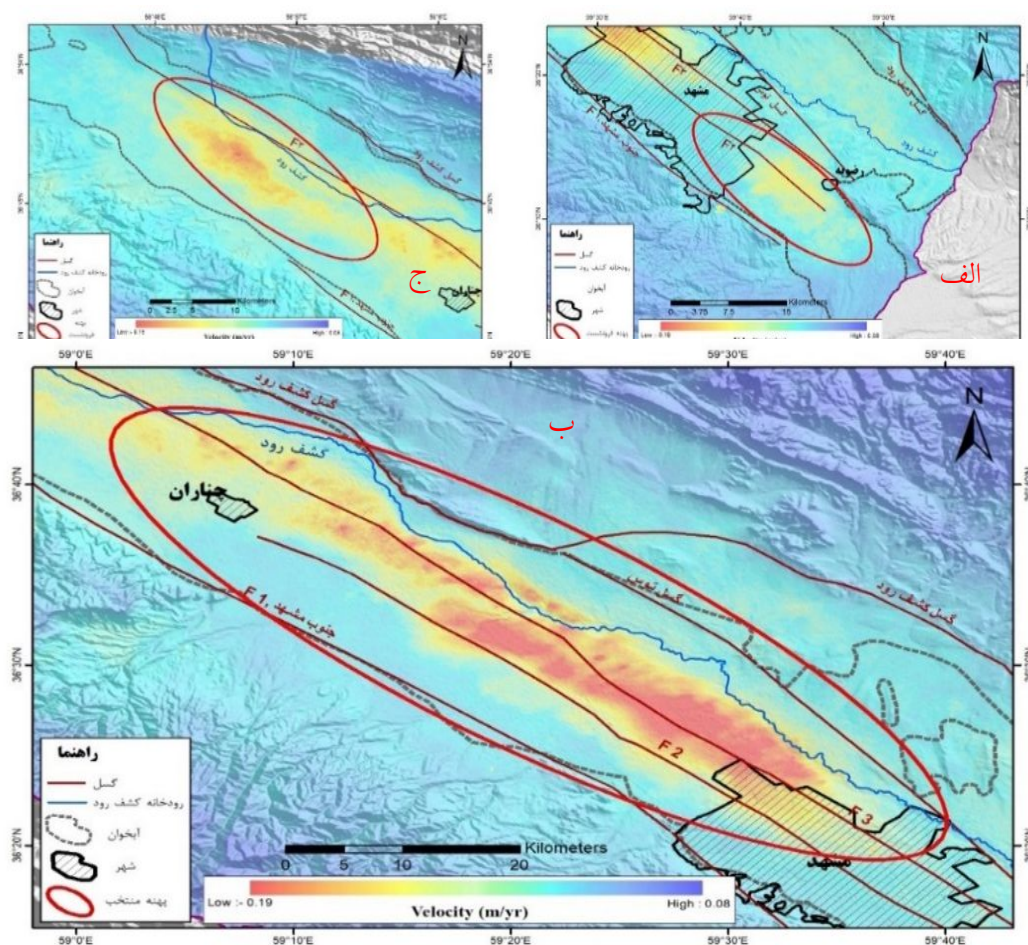
بررسی موقعیت نواحی فرونشست در دشت مشهد- چناران نسبت به گسل‌های موجود نشان می‌دهد که در ناحیه دو و ۳ فرونشستی (محدوده بین شهر مشهد تا چناران) گسل‌ها به دلیل تغییر ضخامت و دانه‌بندی رسوبات در طرفین آن‌ها نقش محدودکننده مرزی داشته و ناحیه ۲ فرونشستی بین دو گسل F2 و کشف رود (شکل ۴-ب) و ناحیه ۳ فرونشستی به گسل F2 (شکل ۴-ج) محدود شده است.



شکل ۳. نقشه‌های فرونشست دشت مشهد- چناران

الف: دوره زمانی ۱۳۹۳/۱۰ تا ۱۳۹۵/۲ ب: دوره زمانی ۱۳۹۵/۵ تا ۱۳۹۹/۲

Fig 3. Subsidence map of Mashhad-Chenaran plain
A. 2014.10 -2016.4 periods B. 2016.8 -2020.5periods



شکل ۴. نواحی بحرانی فرونشست در دشت مشهد- چناران

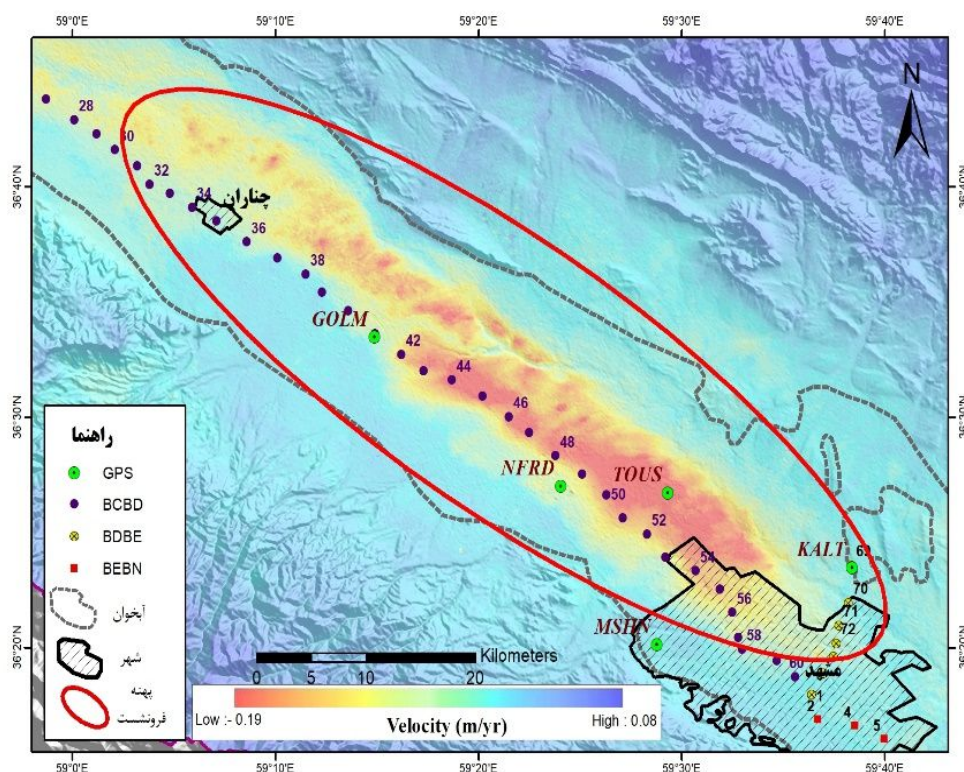
الف: ناحیه ۱-زون جنوب شرقی ب: ناحیه ۲- زون مرکزی ج: ناحیه ۳- زون شمال غربی

Fig 4. Critical subsidence zone map of Mashhad-Chenaran plain
A. zone 1: south-east area, B. zone 2: central area, zone 3: north-west area

چناران نشان‌دهنده وجود فرونشست زمین در ایستگاه‌های گلمکان (GLOM) و نیروگاه طوس (NFRD) در دوره زمانی تحقیق است. مقایسه سری زمانی فرونشست اندازه‌گیری شده در این دو ایستگاه با سری زمانی فرونشست استخراج‌شده برای این نقطه از تصاویر راداری (شکل ۷) نشان‌دهنده انطباق بالای دو سری داده است.

مقایسه متوسط نرخ سالانه فرونشست

اندازه‌گیری شده در مسیر BCBD در دوره زمانی ۸۴-۱۳۸۱ (۲) با نرخ فرونشست به‌دست‌آمده از تصاویر راداری در دوره زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ نشان می‌دهد که علی‌رغم عدم انطباق زمانی این داده‌ها باهم، این نرخ‌ها از نظر شدت و روند تغییرات باهم همخوانی دارند. بررسی اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در ایستگاه‌های GPS موجود در دشت مشهد -

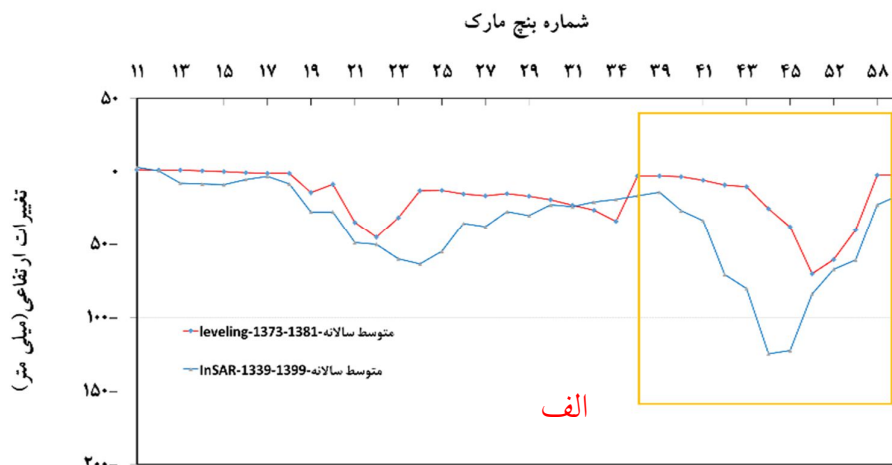


شکل ۴. نواحی بحرانی فرورانشست در دشت مشهد- چناران

الف: ناحیه ۱-زون جنوب شرقی ب: ناحیه ۲- زون مرکزی ج: ناحیه ۳- زون شمال غربی

Fig 4. Critical subsidence zone map of Mashhad-Chenaran plain

A. zone 1: south-east area, B. zone 2: central area., zone 3: north-west area

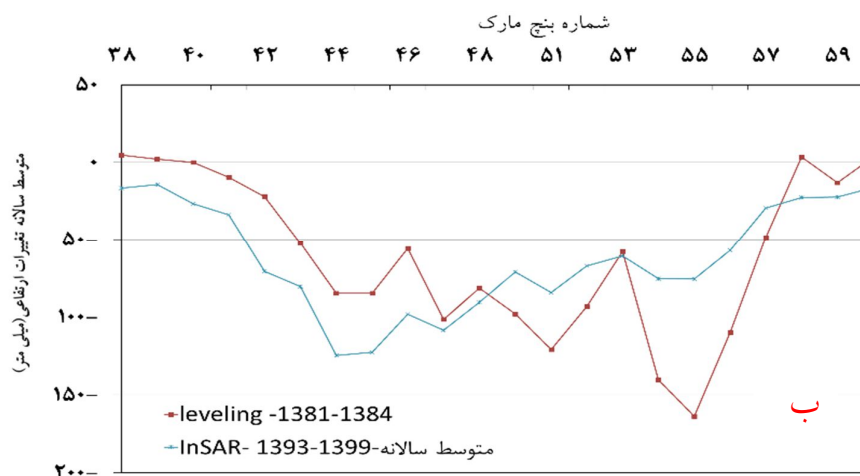


شکل ۵. موقعیت مسیرهای ترازیبی و ایستگاه‌های GPS در دشت مشهد- چناران

Fig 5. Location of leveling routes and GPS stations in Mashhad-Chenaran plain

محاسبه شده نشان دهنده دقت قابل قبول پردازش است. اختلاف کم میزان فرونشست محاسبه شده و اندازه گیری شده در دو ایستگاه نشان دهنده این نکته است که خطاهای موجود در روش تداخل سنجی راداری از جمله خطای اتمسفر و خطای بازتابی فاز تا حد زیادی تعدیل شده است.

جهت مقایسه فرونشست محاسبه شده از ایستگاه های دائم ژئودینامیک و تصاویر راداری از کمیت آماری مجذور میانگین مربعات خطا (Root Mean Squared Error: RMSE) استفاده می شود. در دوره زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ مقدار خطای محاسبه شده برای ایستگاه گلکان، ۰/۶۳ cm و برای ایستگاه نیروگاه طوس، ۰/۶ سانتی متر است. مقدار خطای میانگین



شکل ۶. مقایسه متوسط نرخ سالانه فرونشست اندازه گیری شده در مسیر ترازبایی مشهد-قوچان (BCBD) بر اساس ترازبایی و اطلاعات InSAR الف: ترازبایی در دوره زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۱، ب: ترازبایی مجدد در دوره زمانی ۱۳۸۲-۱۳۸۴ (بخش نارنجی رنگ تصویر الف) موقعیت مسیر ترازبایی در شکل ۵ با علامت بیضی مشخص شده است.

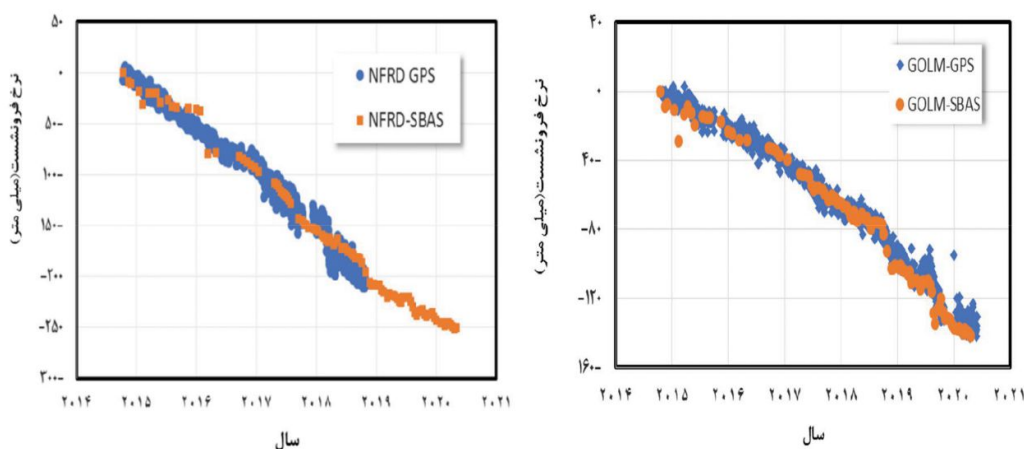
Fig 6. Comparison between mean subsidence rate computed from leveling projected on the InSAR data in the BCBD path of leveling, A:Leveling period 1994-2002, B: re-Leveling period 2002-2005(rectangle in image A)

فرونشست تهیه شده برای دوره زمانی ۲۰۱۶-۲۰۲۰ در شکل (۸) نشان می دهد که تقریباً در بخش اعظم دشت میزان افت ۳۰ ساله بیش از ۲۰ متر بوده و زون های فرونشست سه گانه منطبق بر مناطقی است که افت سطح آب زیرزمینی در آنها بیش از ۳۰ متر است. سری های زمانی متغیرهای قابل اندازه گیری آب زیرزمینی، به دو گروه پیوسته یا گسسته (ناپیوسته) تقسیم می شوند. با توجه به تغییرات مداوم و دوره ای سطح آب زیرزمینی و همچنین ماهیت فرونشست زمین، می توان این دو متغیر را به عنوان سری زمانی ناپیوسته در نظر گرفت. دو متغیر، زمانی مرتبط در نظر گرفته می شوند که توزیع مقادیر یکی از آنها برحسب مقادیر متغیر دیگر تغییر کند (۴).

بررسی ارتباط افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست صحت و دقت نتایج به دست آمده از روش های تداخل سنجی راداری، توسط داده های دیگر از جمله داده های افت آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به صورت آماری (همبستگی رگرسیون) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. ارتباط بین فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلفی از دنیا به وسیله محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. در دشت مشهد- چناران بهره برداری گسترده از منابع آب زیرزمینی در طی ۵۰ سال گذشته باعث افت شدید آب زیرزمینی شده است. انطباق منحنی های هم افت ۳۰ ساله (مهر ۱۳۶۶ تا شهریور ۱۳۹۶) دشت مشهد- چناران و نقشه

است. ضریب همبستگی، قدرت و جهت یک رابطه خطی را بین دو متغیر را بیان کرده و مقدار آن بین $1+$ تا $1-$ تغییر می‌کند. علامت‌های مثبت و منفی نشان‌دهنده وجود همبستگی خطی مثبت و منفی است.

معمولی‌ترین روش اندازه‌گیری وابستگی بین دو متغیر کمی، محاسبه ضریب همبستگی پیرسون (R) است. اگر ضریب پیرسون بیش از $0/8$ باشد بیانگر وجود رابطه بسیار قوی و اگر کم‌تر از $0/2$ باشد بیانگر رابطه ناچیز و یا فقدان رابطه است. بین این مقادیر، شدت رابطه از رابطه ضعیف تا رابطه قوی در تغییر



شکل ۷. انطباق سری زمانی فرونشست ایستگاه‌های NFRD و GOLM با نتایج حاصل از InSAR

Fig 7. Comparative chart of NFRD and GLOM GPS stations times series vs. InSAR vertical measurement

فرونشست در محل این چاه‌های مشاهده‌ای استخراج شده و نمودارهای افت - فرونشست و افت - عمق سطح آب زیرزمینی در هریک از این چاه‌ها ترسیم شد. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای انتخابی بر روی نقشه فرونشست در شکل (۹) ارائه شده است. جهت بررسی رابطه بین فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای انتخابی ضرایب همبستگی و تعیین برای هر چاه محاسبه شده که نتایج حاصله در جدول (۲) ارائه شده است.

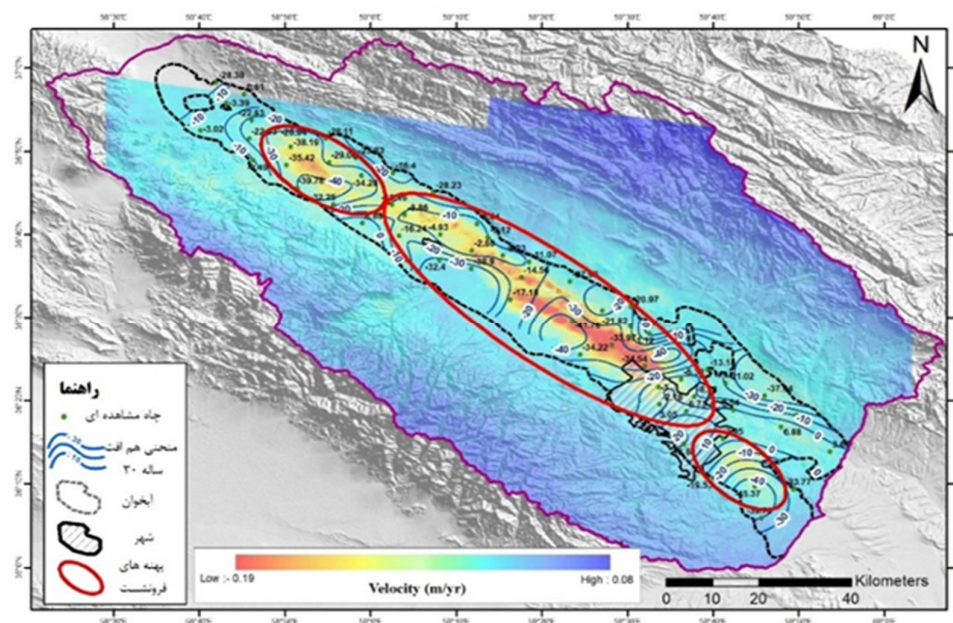
بر اساس بررسی ضرایب همبستگی به دست آمده می‌توان چاه‌های انتخابی را به دو گروه دسته‌بندی نمود. در گروه اول که بیش از ۷۵ درصد چاه‌های انتخابی را شامل می‌شود ضریب همبستگی بیش از $0/8$ است. این ضریب نشان‌دهنده وجود رابطه همبستگی بسیار قوی و قوی بین نرخ فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در این چاه‌ها است. در این چاه‌ها مقدار ضریب تعیین بین $0/65$ تا $0/95$ تغییر می‌کند. با توجه به

ضریب تعیین (R^2) نشان‌دهنده این است که چه مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت تأثیر متغیر مستقل بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل است و مقدار آن همیشه بین 0 و 100% است. مقدار 0% نشان می‌دهد که مدل هیچ‌یک از تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین نمی‌کند و 100% نشان می‌دهد که مدل همه تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌کند. در پژوهش حاضر این ضریب نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر نرخ فرونشست به وسیله افت سطح آب زیرزمینی تبیین می‌شود.

جهت بررسی ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت مشهد- چناران از نظر آماری، تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای در هریک از ناحیه‌های فرونشستی انتخاب شد. با استفاده از سری زمانی فرونشست به دست آمده از پردازش تصاویر راداری، سری زمانی

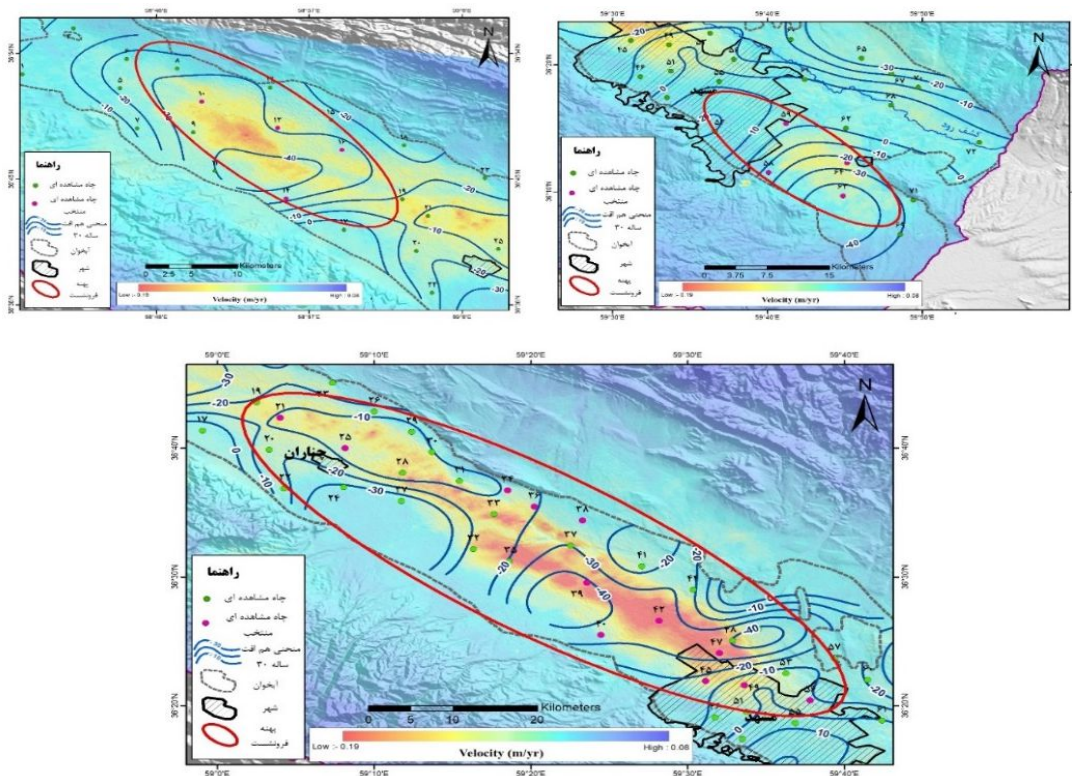
اندک (چاه‌های جوی پائین و تخم مرز با ضریب ۰/۳۹) و فاقد رابطه (چاه‌های تخم مرز و بحرآباد) است. در چاه‌های این گروه در طی دوره بررسی فرونشست (مهر ۱۳۹۳ تا اردیبهشت ۹۹) سطح آب زیرزمینی بالآمدگی داشته و یا ثابت بوده است. این چاه‌ها در داخل محدوده شهری و یا حاشیه نواحی فرونشستی ۱ و ۲ قرار دارند. تعدادی از نمودارهای عمق سطح آب زیرزمینی - فرونشست و افت - فرونشست ترسیمی در چاه‌های گروه اول در اشکال ۱۰ و ۱۱ و در چاه‌های گروه دوم در اشکال ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.

مقادیر ضریب تعیین به دست آمده در این چاه‌ها می‌توان گفت که عوامل مؤثری دیگری مانند ضخامت لایه‌های ریزدانه، درصد مواد ریزدانه و نرخ برداشت آب زیرزمینی در میزان نرخ فرونشست نیز تأثیر دارد. در چاه‌های گروه دوم که شامل چاه قلعه ساختمان در ناحیه ۱ فرونشستی و چاه‌های حسن‌آباد ویرانی، جوی پائین، تخم مرز و بحرآباد در ناحیه ۲ فرونشستی می‌شود، ضریب همبستگی بین ۰/۴۶ تا ۰/۰۸ تغییر می‌کند. رابطه همبستگی نرخ فرونشست - افت سطح آب زیرزمینی در این چاه‌ها متوسط (چاه حسن‌آباد ویرانی با ضریب ۰/۴۶)،

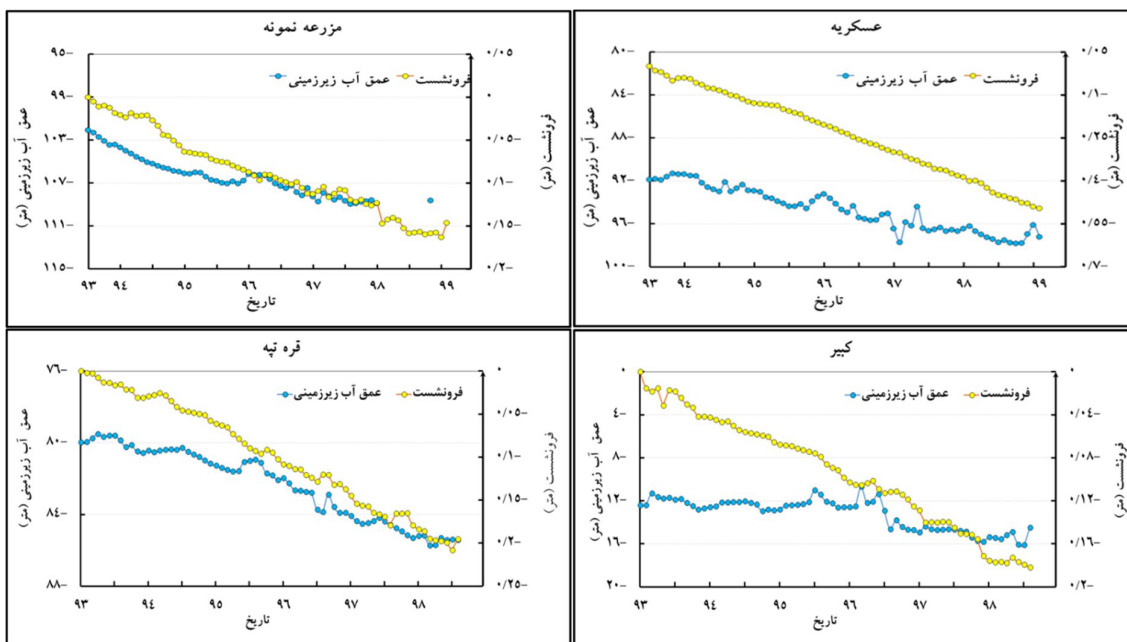


شکل ۸. انطباق نقشه‌های فرونشست و افت ۳۰ ساله

Fig8. combination of subsidence and groundwater level depletion(30 years) maps



شکل ۹. انطباق نقشه افت ۳۰ ساله بر روی نقشه‌های سه ناحیه بحرانی فرونشست
Fig9. Combination of subsidence and groundwater level depletion(30 years) maps



شکل ۱۰. نمودارهای عمق سطح آب زیرزمینی - فرونشست در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب گروه اول

10. Groundwater depth with subsidence graphs in group 1 of selected piezomete

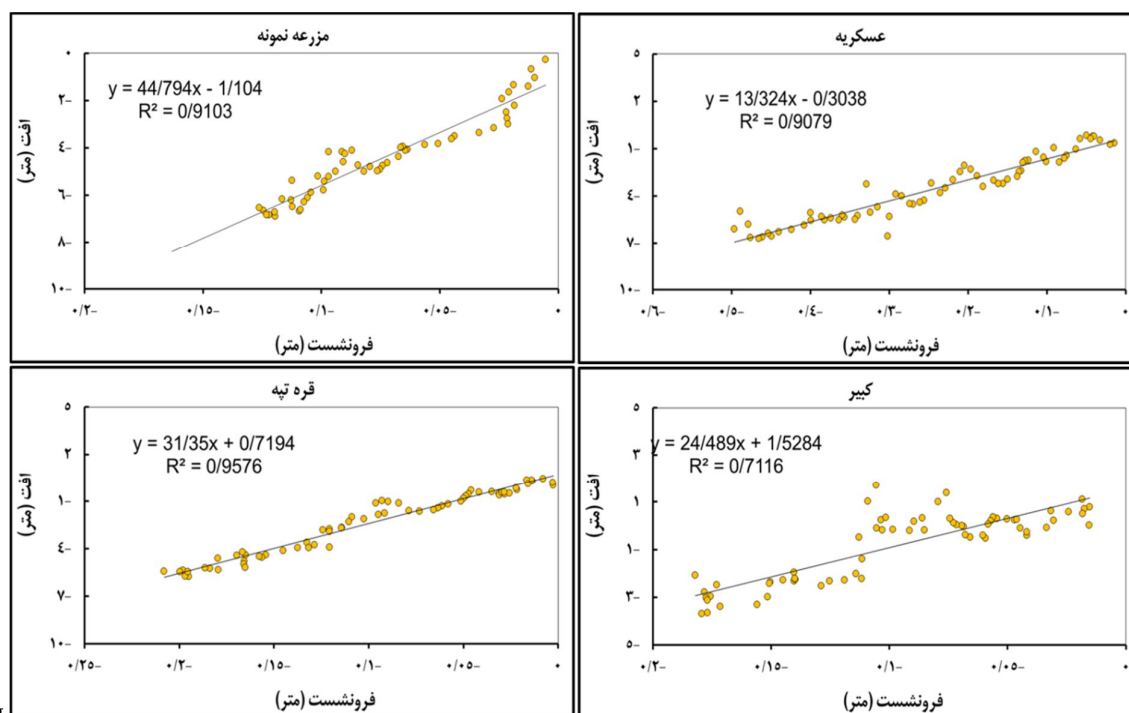
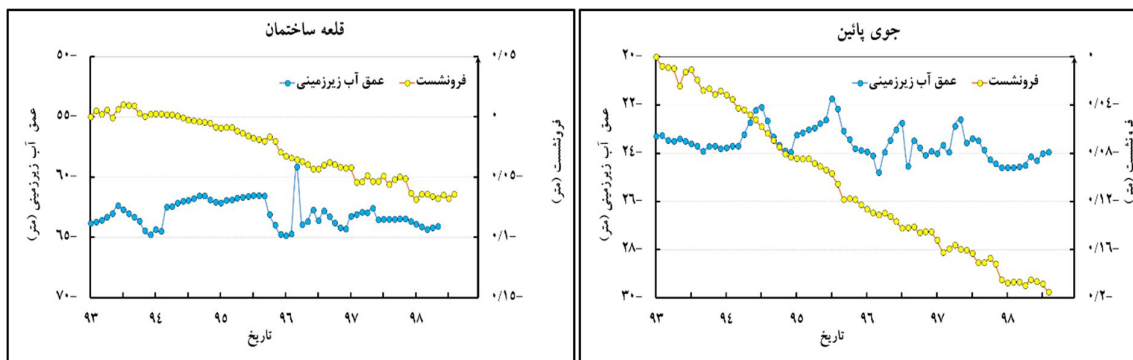


Fig.

شکل ۱۱. نمودارهای افت - فرورفتگی در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب گروه اول

Fig11. Groundwater level depletion with land subsidence scatter plot graphs in group 1 of selected piezometers



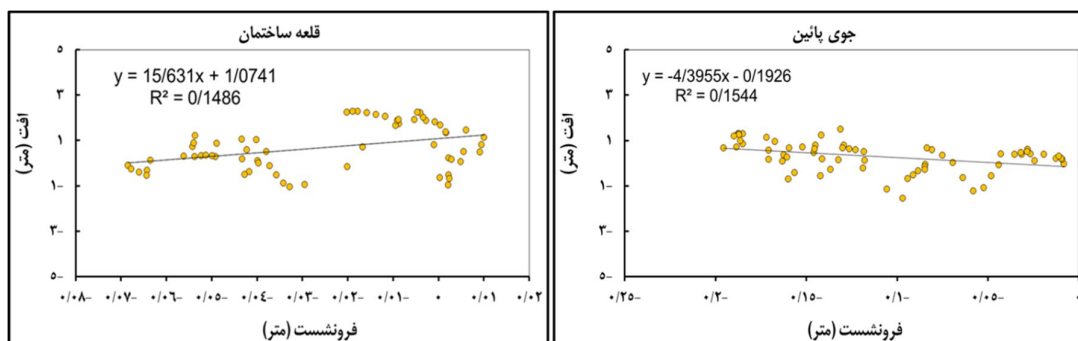
شکل ۱۲. نمودارهای عمق سطح آب زیرزمینی - فرورفتگی در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب گروه دوم

Fig. 12. Groundwater depth with subsidence graphs in group 2 of selected piezometers

جدول ۲. نتایج ضرایب همبستگی و تعیین افت - فرونشست محاسبه شده در چاه‌های مشاهده‌ای منتخب

Table 2. The correlation coefficients and Coefficients of Determination, groundwater level depletion with land subsidence in selected piezometers

ردیف	ناحیه	نام چاه مشاهده‌ای Piezometer name	نشست تجمعی (متر) Cumulative Subsidence(m)	افت سطح آب زیرزمینی (متر) Groundwater level depletion(m)	ضریب همبستگی Correlation coefficients	ضریب تعیین Coefficients of Determination ستون
۱		مزرعه نمونه	-۰/۱۴۶۲۴	-۷/۲۸	۰/۹۱	۰/۹۶
۲	ناحیه ۱ جنوب شرق	مزرعه نمونه- شهرک	-۰/۲۱۶۹۱	-۲/۲۶	۰/۷۹	۰/۸۹
۳	دشت	خواجه اباصلت	-۰/۰۶۹۹	-۲/۲۶	۰/۷۶	۰/۸۷
۴		قلعه ساختمان	-۰/۰۶۷۶۷	-۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۳۹
۵		خواجه ربیع	-۰/۱۰۳۵	-۹/۴۴	۰/۹۳	۰/۹۶
۶		عسکریه	-۰/۴۹۶۳	-۶/۰۶	۰/۹۱	۰/۹۵
۷		شیرحصار	-۰/۰۵۷	-۳/۷۷	۰/۸۹	۰/۹۴
۸		کلاً ته برفی	-۰/۶۰۴۸	-۴/۸	۰/۸۲	۰/۹۰
۹	ناحیه ۲	چچچه	-۰/۳۳۰۸	-۰/۲	۰/۷۴	۰/۸۶
۱۰	بین مشهد-	کبیر	۰/۱۸۲۰	-۲/۳	۰/۷۰	۰/۸۴
۱۱	چناران	اراضی قاسم‌آباد	-۰/۳۲۸۰	-۵/۳۳	۰/۶۸	۰/۸۲
۱۲		قره جنگل	-۰/۱۴۷۷	-۴/۹۷	۰/۶۶	۰/۸۱
۱۳		حسن‌آباد ویرانی	-۰/۰۹۰۶	-۰/۵۴	۰/۲۱	۰/۴۶
۱۴		جوی پائین	-۰/۱۹۵۴	-۰/۸۴	۰/۱۶	۰/۳۹
۱۵		تخم مرز	-۰/۵۵۴۲	۱/۴۴	۰/۰۱	۰/۱۱
۱۶		بحرآباد	-۰/۴۱۶۳	-۱/۷۳	۰/۰۰۶	۰/۰۸
۱۷	ناحیه ۳	قره تپه	-۰/۱۹۵۳	-۶	۰/۹۶	۰/۹۸
۱۸	شمال غرب	سیدآباد	-۰/۰۵۰۹	-۲/۹۵	۰/۸۵	۰/۹۲
۱۹	دشت	حاجی‌آباد	-۰/۱۶۸۱	-۱/۶۲	۰/۷۷	۰/۸۸
۲۰		افضل‌آباد	-۰/۱۳۷	-۱/۱۲	۰/۶۹	۰/۸۳



شکل ۱۳. نمودارهای افت - فرونشست در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب گروه اول

Fig.13. Groundwater level depletion with subsidence scatter plot graphs in group 2 of selected piezometers

بحث و نتیجه‌گیری

برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی، باعث ایجاد کسری مخزن و افت حدود ۰/۷ متر در سال سطح آب زیرزمینی در دشت و آبخوان مشهد - چناران طی ۵۰ سال گذشته شده است. فرونشست ناشی از اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی از اواخر دهه ۱۳۶۰ در برخی نقاط دشت رخ داده و در سال‌های اخیر بخش اعظم دشت را در بر گرفته است. علی‌رغم انجام کارهای پژوهشی متعدد در ۲۰ ساله گذشته، تاکنون تحقیق جامعی که بررسی فرونشست کل دشت مشهد - چناران را در بر بگیرد، انجام نشده و تقریباً در تمامی موارد پژوهش‌های قبلی فرونشست در بخش مرکزی و جنوب شرقی این دشت مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش جهت بررسی گسترش مکانی و زمانی، علل فرونشست زمین و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی در دشت مشهد - چناران ۱۰۶ تصویر راداری Sentinel-1A، از گذر نزولی ۹۳ در برگزیده دوره زمانی مهر ۱۳۹۳ تا خرداد ۱۳۹۹، با استفاده از تکنیک تداخل سنج راداری بر مبنای روش خط مبنای کوتاه (SBAS) پردازش شده و نقشه‌ها و سری زمانی فرونشست تهیه شده است. صحت سنجی نتایج نرخ فرونشست برآورد شده با استفاده از پردازش تصاویر راداری در محل نقاط نشانه مسیرهای ترازیبی با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی در سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۴ علی‌رغم عدم انطباق زمانی این داده‌ها باهم، نشان می‌دهد که این نرخ‌ها از نظر شدت و روند تغییرات باهم همخوانی دارند. همچنین صحت سنجی نتایج نرخ سری زمانی برآورد شده با استفاده از پردازش تصاویر راداری در محل ایستگاه‌های GPS گلمکان و نیروگاه طوس با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی نشان‌دهنده انطباق بالای این دو سری زمانی و درستی مراحل پردازش است. بررسی نقشه‌های فرونشست تهیه شده برای دوره‌های زمانی مهر ۱۳۹۳ تا فروردین ۱۳۹۵ و مرداد ۱۳۹۵ تا خرداد ۱۳۹۹ نشان می‌دهد که سه ناحیه فرونشستی در جنوب شرق شهر مشهد (ناحیه ۱)، در بخش مرکزی دشت مشهد - چناران (ناحیه ۲) - بین شهر مشهد - چناران) و در شمال غرب دشت (ناحیه ۳) وجود دارد.

حداکثر نرخ فرونشست سالانه در ناحیه ۲ فرونشستی، برابر ۱۹ سانتی‌متر در سال بوده و در دو ناحیه فرونشستی ۱ و ۳ به ترتیب ۸/۹ و ۱۲/۱ سانتی‌متر در سال است. به‌طور کلی نرخ فرونشست در دوره زمانی مهر ۱۳۹۳ تا خرداد ۱۳۹۹ روند افزایشی داشته است. انطباق منحنی‌های هم افت ۳۰ ساله دشت مشهد - چناران و نقشه فرونشست تهیه شده برای دوره زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ نشان می‌دهد که زون‌های فرونشست سه‌گانه منطبق بر مناطقی است که افت سطح آب زیرزمینی در آن‌ها بیش از ۳۰ متر است. بر اساس ضرایب همبستگی به‌دست آمده می‌توان چاه‌های انتخابی را به دو گروه دسته‌بندی نمود. در گروه اول که بیش از ۷۵ درصد چاه‌های انتخابی را شامل می‌شود ضریب همبستگی بیش از ۰/۸ نشان‌دهنده وجود رابطه همبستگی بسیار قوی و قوی بین نرخ فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی است. مقدار ضریب تعیین بین ۰/۶۵ تا ۰/۹۵ این چاه‌ها نشان می‌دهد که عوامل مؤثری دیگری مانند ضخامت لایه‌های ریزدانه، درصد مواد ریزدانه و نرخ برداشت آب زیرزمینی در میزان نرخ فرونشست نیز تأثیر دارد. در چاه‌های گروه دوم ضریب همبستگی بین ۰/۴۶ تا ۰/۰۸ تغییر کرده و رابطه همبستگی نرخ فرونشست - افت سطح آب زیرزمینی در این چاه‌ها متوسط، اندک و فاقد رابطه است. در چاه‌های این گروه در طی دوره بررسی فرونشست سطح آب زیرزمینی بالآمدگی داشته و یا ثابت بوده است. این چاه‌ها در داخل محدوده شهری و یا حاشیه نواحی فرونشستی ۱ و ۲ قرار دارند. هرچند همبستگی بالایی بین نرخ فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی در این نواحی فرونشستی وجود دارد ولی در برخی از مناطق دشت این همبستگی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. در این مناطق علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی عوامل دیگری مانند درصد رسوبات دانه‌ریز، وجود لایه‌های رسی و میزان تخلیه آب زیرزمینی نقش پررنگ‌تری دارند. همچنین روند گسترش فرونشست در این دشت توسط ساختارهای تکنونیکي فعال در دشت و سنگ کف کنترل می‌شود. با توجه به شروع پدیده فرونشست در دشت مشهد - چناران از دهه ۶۰ شمسی، این پژوهش فقط

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از سازمان نقشه برداری کشور و شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی که در تأمین داده‌های مورد استفاده در این تحقیق همکاری نمودند و اداره کل زمین‌شناسی شمال شرق کشور که شرایط و کد برنامه‌نویسی لازم برای پردازش اطلاعات راداری را فراهم نمودند و تالار محققان سازمان کتابخانه و موزه‌ها و مرکز اسناد آستان قدس که محیط مناسب تحقیق را فراهم نمودند سپاسگزاری می‌گردد.

بخشی از دوره زمانی وقوع فرونشست را مورد بررسی قرار داده و عدم بررسی کامل دوره زمانی فرونشست با توجه به اطلاعات موجود از جمله محدودیت‌های موجود پژوهش بوده است. جهت بررسی دقیق‌تر تاریخچه فرونشست دشت مشهد- چناران پیشنهاد می‌شود روند دراز مدت توسعه فرونشست در این دشت با استفاده از تصاویر Envisat و Sentinel-1A به طور هم‌زمان بررسی و مطالعه شود.

References

- Akbari V, Motagh M. 2011. Improved ground subsidence monitoring using small baseline SAR interferograms and a weighted least squares inversion algorithm. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(3): 437-441.
- Anwari, M. and H. Noorollahian (2007). A new approach to subsidence of Mashhad plain. *Geomatics Conference, National Cartographic Center of Iran(NCC)*:
- Arjmand Sharif, M., Jafari, H. 2021. Estimation of Groundwater Recharge Lag Time in Mashhad-Chenaran Aquifer Using Cross-Correlation Method. *Water and Soil*, 35(4): 489-504. (In Persian).
- Arjmand Sharif, M. and Jafari, H. 2022. "Groundwater Recharge Estimating in Mashhad-Chenaran Aquifer using water table fluctuations method (MRC algorithm)." *Hydrogeology* 6(2): 151-168.
- Arvin A, Vahabzadeh G, Mousavi SR, Bakhtyari Kia M. 2019. (Arvin, Vahabzadeh et al. 2019). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3): 19-34. http://girs.iaubushehr.ac.ir/article_668468_en.html(In Persian).
- Babae, S., Mousavi, Z., Masoumi, Z., Malekshah, A.H., Roostaei, M., & Aflaki, M. 2020. Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 41: 4780-4798
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E.2002. A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Int Geosci Remote Sens Symp* 2:2375–2383. doi: 10.1109/IGARSS.2002.1025900
- Dehghani M, Valadan Zouj MJ, Saatchi S, Biggs J, Parsons B, Wright T.2009. Radar interferometry time series analysis of Mashhad subsidence. *J Indian Soc Remote Sens.*, 37(1):147–156. <https://doi.org/10.1007/s12524-009-0006-x>
- Dehghani M.2014. An Enhanced Algorithm based on Radar Interferometry for Monitoring Land Subsidence Caused by Over-Exploitation of Groundwater. *jgit.*, 2 (2):61-73: <http://jgit.kntu.ac.ir/article-1-135-fa.html> (In Persian).
- Geological Survey of Iran.2018.The land subsidence study of Mashhad plain with InSAR: 80p. (In Persian).
- 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(In Persian).
- Hafezi Moghaddas N, Leo C, Rahimi B, Azadi A. 2018. Morpho-tectonics and Geoelectrical method applied to active faults characterization in South of Mashhad Plain, Northeast of Iran. *Geopersia*, 8(1): 13-26. doi:<https://dx.doi.org/10.22059/geope.2017.230489.648312>.
- Haghshenas Haghghi M, Motagh M. 2019. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sens. Environ.*, 221:534–550
- Khorasan Razavi Regional Water Authority. KRRWA.2015.Water Resources Budget of Ghareghum Basin .Vol. 7. Mashhad Sub basin,90 P. (In Persian).
- Khorrami, M., Abrishami, S., Maghsoudi, Y.2020. Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. *Sci Rep* 10(1): 1-16., 11357. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67989-1>
- Lashkaripoor G, Ghafoori M, Bagherpoor Moghadam B, Talebian S. 2007. Investigation of Groundwater Depletion on Land Subsidence case study. 1st International Applied Geological Congress May 2007, Mashhad, Iran.Vol 2:15-21 (In Persian).
- Lashkaripour GR, Ghafoori M, Maddah MM. 2014. An investigation on the mechanism of land subsidence in the Northwest of Mashhad city, NE Iran. *Journal*

- of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES), Vol, 5: 321-327.
- IWRMC (Iran Water Resources Management Company). 2021. The situation of the forbidden plains of the country Iran. Ministry of Energy, Iran, 90 P. (In Persian).
- Mahmoudpour, M., Khomehchiyan, M., Nikudel, M.R., Ghassemi, M.R. 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology*, 201:6-28.
- Mehrabi, A., Ghazanfarpour, H. 2019. Monitoring Surface Elevation Changes of Kerman City and Prediction of High-Risk Areas Using ASAR and SENTINEL 1 Radar Images. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 8(2):167-182. doi: 10.22067/geo.v0i0.77132 (In Persian).
- Mirzadeh, S. M. J., Jin, S., Parizi, E., Chaussard, E., Burgmann, R., Delgado Blasco, J. M., et al. 2021. Characterization of irreversible land subsidence in the Yazd-Ardakan Plain, Iran from 2003 to 2020 InSAR time series. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*. 126(11). <https://doi.org/10.1029/2021JB022258>
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzel, H. U., Zschau, J., Arabi, S. 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2): 518-526.
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., Zschau, J. 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16). doi:10.1029/2008gl033814
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas Haghghi, M., Wetzel, H.-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., Arabi, S. (2017): Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements.- *Engineering Geology*, 218, 134-151. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.011>
- National Cartographic Center of Iran (NCC). 2018. Atlas of Mashhad plain subsidence, 38 p. (In Persian). <https://www.ncc.gov.ir/images/docs/files/000001/nf00001461-2.pdf>
- Papi, R., Attarchi, S., Soleimani, M. 2020. Analysing Time Series of Land Subsidence in the West of Tehran Province (Shahriar Plain) and its Relation to Groundwater Discharge by InSAR Technique. *Geography and Environmental Sustainability*. 10(1): 109-128. doi:10.22126/ges.2020.4933.2182 (In Persian).
- Rahmanian, A. 1986. The land subsidence and earth fissure by groundwater depletion in Kerman. *Water*, 5:25-48 (In Persian)
- Rokni, J., HosseinZadeh, S., Lashkaripour, G.R., Velayati, S. 2019. Analysis of Spatial Distribution and Mechanism of Formation of Fissures due to Land Subsidence in Dasht-e-Neyshabur. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 12(3): 65-82.
- Saeidi, H., Lashkaripour, G.R., Ghafoori, M. 2020. Evaluation of land subsidence in Kashmar-Bardaskan plain, NE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 12(4): 280-291. doi: 10.30495/ijes.2020.677469
- Salehi Moteahd, F., Hafezi Moghaddas, N., Lashkaripour, G.R. 2019. Geological parameters affected land subsidence in Mashhad plain, north-east of Iran. *Environ Earth Sci*. 78:1-12 <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8413-y>
- Tarahhomi, A. 1997. The economic and social effects of ground water Decline and the land subsidence of mashhad plains, *Water and Development*. 5: 54-59.
- Water Resources Basic Studies Office (KRRWA). 2018. Prohibition Extension Report of Mashhad-Chenaran study area water resources., 90 P.. (In Persian)



Investigation of land subsidence development trend of Mashhad-Chenaran plain using Sentinel-1A radar images and its relationship with groundwater depletion

Javad Dowlati¹, Gholamreza Lashkaripour^{2*}, Naser Hafezi Moghaddas², Yaser Maghsoudi Mehrani³

Received: 2022-04-08 / Accepted: 2022-06-02 / Published: 2025-01-16

Abstract

Extensive exploitation of groundwater resources in the Mashhad-Chenaran aquifer in the last 50 years (1970-2021) has led to a sharp decline in groundwater levels. Negative effects of subsidence due to the severe development of groundwater resources have occurred in some parts of the plain since the late 1980s and in recent years has covered the entire plain. In this study, subsidence of the entire Mashhad-Chenaran plain has been investigated using Sentinel-1A radar image data between 2014 and 2020 using Small Baseline Subset (SBAS) Interferogrametry method. Examination of subsidence maps shows that there are three subsidence areas including area 1 in the southeast of Mashhad, area 2 in the northwest of Mashhad and area 3 in the northwest of the plain.

The maximum annual sitting rate in the two subsidence zones is equal to 19 cm per year and in the two subsidence zones 1 and 3 are 8.9 and 12.1 cm per year, respectively. The results of the time series rate estimated using radar image processing at the location of Golmakan GPS stations and Toos power plant with the actual measured values show the high compliance of these two time series. Adaptation of 30-year groundwater level drop curves and subsidence map shows that the triple subsidence zones correspond to areas with groundwater level drop of more than 30 meters. Also, to investigate the relationship between subsidence and groundwater level drop, correlation coefficients and determination coefficients for each well have been calculated using groundwater level and subsidence data at the location of selected observation wells. Based on the obtained correlation coefficients, the selected wells are divided into two groups with a correlation coefficient of more than 0.8 (75% of wells) and between 0.46 and 0.008, which indicates a good correlation between subsidence rate and groundwater level drop in the most observation wells.

Javad Dowlati¹, Gholamreza Lashkaripour^{2*}(✉), Naser Hafezi Moghaddas², Yaser Maghsoudi Mehrani³

1. PhD. Student of engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Ferdowsi Mashhad University, Iran

2. Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi Mashhad University, Iran

3. Associate Professor at photogrammetry and remote sensing department, K.N.Toosi University of technology, Iran

DOI: 10.30495/girs.2022.691565

e-mail: lashkaripour@um.ac.ir

Statement of the Problem: Mashhad-Chenaran study area, in terms of water, political and social resources, is the most important sub-basin in Qaraqoom catchment and Khorasan Razavi province. Extensive exploitation Intensive use of

groundwater resources in Mashhad-Chenaran aquifer in the last 50 years (1970-2021) has led to a huge decline in groundwater level. The negative implications of land subsidence due to the severe development of groundwater resources have occurred in some parts of the plain since the late 1980s, which has covered the entire plain in recent years. Despite numerous researches in the last 20 years, no comprehensive one has been conducted to cover the entire Mashhad-Chenaran plain. In fact, in the almost all previous studies, the central and southeastern parts of the plain have been included. In this study, for the first time, the subsidence map of the entire plain has been prepared using Sentinel-1A radar satellite data image and its relationship with groundwater decline has been statistically investigated.

The main purpose of this study is to investigate the trend and extent of land subsidence caused by groundwater overextraction in Mashhad-Chenaran plain within the period 2014 to 2020 using radar interferometry technique.

Materials and Methods

To achieve the purpose of the study, 106 Sentinel-1A radar images, in the period of October 2014 to May 2020, received from the European Space Agency, have been used. Moreover, the existing leveling routes data for the period 1992-2004 and the Golmakan and Toos power plant GPS stations data has been received from the National Cartographic Center and the groundwater level data received from Khorasan Razavi Regional Water Company. The radar images were processed using the SBAS method with GMTSAR open source software. The subsidence maps and time series were prepared and for the entire plain. In order to verify the obtained information, the results were compared with the existing leveling information for the period of 1994-2005 and Golmakan and Toos power plant GPS stations.

Results and Discussion:

According to the land subsidence maps prepared for the periods of October 2014 to April 2016 and August 2016 to June 2016 three main subsidence zones were identified in the southeast of Mashhad city (Zone 1), between Mashhad – Chenaran cities (Zone 2) and northwest of Chenaran city (Zone 3). In the period from October 2014 to April 2016, the maximum annual rate of subsidence in Zone 1, 2 and 3 is 16.3, 8 and 9.3 cm, respectively. In the period from August 2016 to June 2016, the maximum annual rate of

subsidence is equal to 19, 8.9 and 12.1 cm in Zones 2, 1 and 3, respectively. In general, the subsidence rate has increased from 2014 to 2020.

According to the validation of land subsidence rate estimated using radar image processing with the actual values along the leveling routes from 1994 to 2005 as well as the Golmakan and Toos power plant GPS stations for the period 2014-2020, despite the time mismatch, the rates are consistent in terms of intensity and trend of changes, which confirms the accuracy of the processing steps. Also, the comparison of the land subsidence and 30- year groundwater decline maps shows the adaptation of the three main subsidence zones with of areas of more than 30 m drop in groundwater level. To investigate the relationship between subsidence and groundwater level decline, the time series of groundwater level changes and subsidence at the location of observation wells were compared. For this purpose, correlation and determination coefficients for each well have been calculated in 20 selected observation wells. Based on the obtained correlation coefficients, the selected wells could be classified into two groups. In the first group, which includes the majority of selected wells (75%), the correlation coefficient is more than 0.8, which indicates a very strong correlation between the subsidence rate and groundwater level decline. In the second group, which includes Qalea-e-Sakhteman (Zone 1), Hassanabad Virani, Jooy-e-Paien, Tokhm Marz and Bahrabad wells (Zone 2), the correlation coefficients vary between 0.46 to 0.08, which indicates a medium and very small correlation between the subsidence rate and groundwater level decline.

Conclusion:

The results of Sentinel-1A radar image processing show that land subsidence due to groundwater over extraction has spread in a large part of the Mashhad-Chenaran plain so that three subsidence zones can be distinguished. Although there is a high correlation between land subsidence rate and groundwater level decline in these three zones, in some other areas this correlation has decreased significantly. In these areas, in addition to the drop in groundwater level, other factors such as the fine-grained sediments percentage, the presence of clay layers and the groundwater discharge amount play a more significant role. In addition, the structural geology of Mashhad plain such as the major faults control the expansion of subsidence areas.

This study showed that Radar Interferometry technique, in addition to being an efficient tool in estimating the rate of subsidence and its extent, enables the detection of the temporal changes in the subsidence rate.

Keywords: Land subsidence, Radar Interferometry, Groundwater, Correlation coefficient, Mashhad-Chenaran plain

Please cite this article as: Dowlati J, Lashkaripour Gh, Hafezi Moghaddas N, Maghsoudi Mehrani Y. Investigation of land subsidence development trend of Mashhad-Chenaran plain using Sentinel-1A radar images and its relationship with groundwater depletion. Journal of RS and GIS for Natural Resources, 15(3): 69-94