

تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست در دشت سبزوار

منیژه قهرودی تالی^۱

خدیدجه علی نوری^۲

هما ریوندی^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۱۹

چکیده

مخاطره فرونشست زمین به صورت خزنده از حدود پنج دهه قبل در حال شدت گرفتن است و همه دشت‌ها و مناطق شهری ایران را تحت تأثیر قرار داده است. دشت سبزوار از جمله مناطقی است که با پدیده فرونشست مواجه است. در این پژوهش ضمن پهنه‌بندی فرونشست، عوامل پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی، پراکنش قنات‌ها، چاه‌ها و گسل‌ها بررسی شد. به منظور مطالعه میزان فرونشست از شش تصویر SLC باند C ماهواره انویست سنجنده ASAR در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ استفاده شد. همچنین سطح تراز آب‌های زیرزمینی طی دوره‌ی ۱۳۹۲ - ۱۳۵۲ با داده‌های مکانی چاه‌ها و قنات‌های منطقه اندازه‌گیری شد. از تصاویر راداری؛ اینترفروگرام تفاضلی، کوه‌رنسی، کاهش اثرات توپوگرافی، فیلترینگ و در نهایت میزان جابه‌جایی استخراج شد. برای برآورد میزان افت آب‌های زیرزمینی و فرونشست حاصل از آن، سطح آب چاه‌های پیزومتری درون‌یابی شد. برای بررسی رابطه بین پراکنش فضایی فرونشست و موقعیت چاه‌ها، قنات‌ها و گسل‌ها نیز از روش‌های همپوشانی استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین فرونشست در شمال شرق منطقه رخ داده و جهت فرونشست جنوب‌غربی و شمال‌شرقی است. شهرهای داخل دشت سبزوار از جمله شهر سبزوار با میانگین نشست حدود ۱۰ سانتی‌متر در یک دوره ۵ ساله مواجه است. روند گسل‌ها عمود بر جهت فرونشست است که بیانگر نقش آن‌ها در جابه‌جایی عمودی رو به پایین است. نتایج تحلیل آمار درازمدت سطح پیزومتری نشان داده که در پهنه هموار دشت سبزوار، پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی به سمت شرق رو به افزایش است؛ بنابراین عوامل مهم در رخداد فرونشست در این منطقه در مرحله اول کاهش سطح آب‌های زیرزمینی است. آمار درازمدت سطح پیزومتری نیز تأکیدی بر این رخداد است. گسل‌ها به دلیل عمود بودن سطح فرونشست با جهت آن‌ها می‌توانند نقش تشدیدکنندگی داشته باشند؛ به عبارت دیگر هرچقدر سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه کاهش یابد با یک ضریب افزایشی، با تشدید پدیده فرونشست مواجه خواهیم بود.

واژه‌های کلیدی: تداخل سنجی تفاضلی راداری، فرونشست، آب‌های زیرزمینی، دشت سبزوار.

۱- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) m-ghahroudi@sbu.ac.ir

۲- دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران khadijehalinoori@gmail.com

۳- کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران hr.persis70@yahoo.com

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر در ایران با افزایش میزان فرونشست‌ها، به پی ساختمان‌ها، باند فرودگاه‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، خیابان‌ها، خطوط حمل و نقل ریلی و جاده‌ای، تأسیسات کشاورزی، تغییر در مسیر و جهت حرکت رودخانه‌ها و کانال‌ها و حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی آسیب‌هایی وارد شده است و همچنین فرونشست‌ها سبب تخریب در الگوی جریان هیدرولوژی، کج‌شدگی و انحراف دکل‌های برق و ... شده‌اند. در این میان سازه‌هایی که دارای وسعت زیادتر و ارتفاع بیشتری هستند آسیب‌پذیری بیشتری دارند. به عنوان نمونه خطوط راه‌آهن، سدهای خاکی، کانال‌ها، دکل‌های برق و مخابراتی از آسیب‌پذیری زیادتری برخوردار هستند. پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه شود، به عنوان مثال، در این مناطق ممکن است سیلاب‌های عظیم و مخربی به وقوع بپیوندد در حالی که قبل از ایجاد فرونشست از هیچ سابقه‌ای از وقوع سیلاب برخوردار نبوده است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۱: ۹۴). فرونشست باعث ایجاد ترک و شکاف‌هایی در زمین، تغییر در الگوی جریان‌های زیرزمینی و سطحی، تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی، تغییر شکل سطح زمین، سیل‌خیزی منطقه و ... می‌شود، به‌طوری‌که این تغییرات و عوامل خسارت جدی و جبران‌ناپذیری به مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی وارد می‌کند. این پدیده به‌ویژه آسیب‌های جدی به سیستم‌های آبیاری مزارع و تجهیزات آب‌رسانی و چاه‌ها وارد می‌آورد. (ملک و برنا، ۱۳۹۷). فرونشست در میدان‌های نفتی می‌تواند تأثیرات مخربی از جمله شکستگی چاه‌ها، مچاله‌شدگی لوله‌های جداری و خسارات سرچاهی را به دنبال داشته باشد و در نتیجه فرآیند تولید از مخازن نفتی را با مشکل جدی مواجه کند (فتح‌اللهی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۴).

استان فارس از جمله استان‌های پهناور واقع در جنوب کشور است که چند سال است با پدیده فرونشست زمین مواجه شده، به‌طوری‌که ۷۰ درصد از دشت‌هایش در معرض این پدیده قرار گرفته‌اند. ظهور این پدیده با خشک شدن

دریاچه‌های موجود در این استان از جمله پریشان، بختگان، کافت، فروچاله‌های متعدد در سطح زمین تشدید شده است طبق گفته‌های مدیر کل سازمان زمین‌شناسی کل کشور اکنون براساس جدیدترین بررسی‌ها، استان فارس نشستی سالانه به میزان ۵۶ سانتی‌متر، به ثبت رسانده است. در سال‌های اخیر میزان ترک‌ها در زمین‌های کشاورزی و ساختمان‌های مسکونی، خیابان‌ها و زیرساخت‌ها به وفور نمایان شده است به‌گونه‌ای که در بخش کشاورزی سبب تحلیل و ازبین‌رفتن بخشی از زمین‌ها شده و در بخش مسکونی سبب ریزش‌های پیاپی در ساختمان‌ها گردیده و خسارات‌های جبران‌ناپذیری را در بر گرفته است. ترک‌ها در سطح خیابان‌ها هزینه‌های بهسازی را در سطح شهر چندین برابر نموده و افزایش میزان سیلاب‌ها با خشک شدن قنات‌ها و تبدیل مسیر قنات‌ها به جدول‌های هدایت آب که زمانی به عنوان یک عامل مثبت در جلوگیری از سیلاب بوده امروزه به یک خطر جبران‌ناپذیر در سطح مناطق شهری تبدیل شده است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۱: ۹۴). همچنین سطح آب چاه‌ها در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ در دشت‌های فسا و داراب این استان به بیشترین حد کاهش خود رسیده‌اند؛ که می‌تواند متأثر از سیاست‌های خودکفایی تولید محصول استراتژیک گندم در این استان و فشار بیش از حد به منابع آب‌های زیرزمینی در این سال‌ها باشد (گلی و همکاران، ۱۳۹۱: ۹۱). در سال‌های اخیر در دشت گرگان نیز همانند سایر نقاط ایران، کاهش بارش باعث برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی شده است. شواهد مختلف در دشت گرگان حاکی از بروز پدیده فرونشست در آن است؛ در برخی نقاط در دشت پدیده لوله‌زایی مشاهده شده که خود شاهی بر وجود فرونشست در این دشت می‌باشد (تورانی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۱۷). نمونه آشکار این پدیده در دشت تهران نیز به چشم می‌خورد. در این راستا بررسی‌های انجام شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، مشخص کرد که کاهش تراز سطح زمین در رابطه با رخداد پدیده فرونشست در امتداد جاده کمربندی تهران (بزرگراه آزادگان و همچنین حدفاصل سهراب آذری تا

میزان فرونشست در طی زمان‌های مشخص، تصاویر راداری در سال‌های اخیر برای مطالعه در خصوص مسائل دینامیکی از جمله جابه‌جایی‌های عمودی پوسته زمین مطرح است که از جمله می‌توان به پژوهش‌های متعدد اشاره نمود.

آمیغ‌پی و همکاران با مطالعه ده تصویر ENVISAT میزان فرونشست دشت مہیار جنوبی را ۲/۸ میلی‌متر در سال تعیین کردند (آمیغ‌پی و همکاران، ۱۳۸۱). در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ پهنه‌های متعددی در ایران از جمله یزد، دشت کرج - شهریار، دشت نوفق بهرمان، محدوده مناطق بیست‌ودوگانه شهر تهران از نظر فرونشست با به‌کارگیری تصاویر راداری مورد مطالعه قرار گرفتند، همچنین وضعیت افت سطح آب‌های زیرزمینی و مخاطره فرونشست دشت خوی و میدان نفتی بزرگ مارون واقع در جنوب غرب ایران بررسی شدند (صفاری و همکاران، ۱۳۹۵: ۸۲، شریفی‌کیا، ۱۳۹۳: ۱۹۰). در سال ۱۳۹۶ میزان جابه‌جایی عمودی سطح زمین شهر تهران و دشت دشتیاری چابهار با استفاده از تصاویر راداری ASAR و SAR از ماهواره ENVISAT و TERA اندازه‌گیری شد (زارع‌کمالی و همکاران، ۱۳۹۶، باقرمنش و همکاران، ۱۳۹۵).

همچنین کردوانی و همکاران در سال ۱۳۹۶ از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری استفاده نمودند تا در محدوده سد گتوند علیا به بررسی تغییرات زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت فرونشست بپردازند؛ و به این نتیجه رسیدند که حداکثر میزان فرونشست در محدوده مورد مطالعه حدود سه‌ونیم سانتی‌متر در سال و حداکثر نرخ فرونشست در سازند گچساران و در محدوده معدن نمک عنبل است (هاشمی‌فرد و همکاران، ۱۳۹۶).

فتح‌الهی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی در میدان نفتی مارون با استفاده از روش تداخل‌سنجی رادار پرداختند. در این تحقیق از ده تصویر سنجنده‌ی Envisat در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر کارایی مناسب این روش به‌منظور بررسی جابه‌جایی ناشی از فرونشست در میدان مذکور بود (فتح‌الهی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۳). محمدخان

تقاطع بزرگراه آزادگان با آیت‌... سعیدی) جاده قدیم ساوه روی داده است. بررسی‌های صورت‌گرفته افت سطح آب زیرزمینی در منطقه را عامل اصلی این پدیده اعلام کرده است (انگوریانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۱۱). همچنین در سطح دشت نیشابور شکاف‌های عدیده‌ای که در مناطقی چون مرکز دشت (بشرو و کاریزک) شرق (کلاته قنبر) غرب (بازوبند) ناشی از فرونشست زمین ایجاد شده مشکلات عدیده‌ای برای ساکنین و زمین‌های کشاورزی به‌وجود آورده است. شکاف‌های غرب منطقه به‌دلیل نشست آب به درون آن‌ها و همچنین به‌دلیل تغییر شیب زمین مشکلات زیادی را برای کشاورزان به‌وجود آورده. در مرکز دشت شکاف‌هایی به عمق ۱۰ متر عرض ۸ متر و طول یک کیلومتر قابل مشاهده است که به‌دلیل عمق زیاد خطر سقوط انسان و دام را به‌وجود آورده است. وجود این شکاف‌ها باعث ایجاد خطر برای خطوط گاز و لوله‌های انتقال آب و خطوط ریلی خطر شده است (جلینی و همکاران ۱۳۹۶: ۶۴). در خصوص رابطه دوگانه تکتونیک و عوامل دیگر با فرونشست نیز پژوهشگران مطالبی را مطرح ساختند. از جمله: شایان و همکاران در سال ۱۳۹۵ با پهنه‌بندی فرونشست در حوضه قره‌چای همدان از طریق بررسی خصوصیات شبکه زهکشی و زمین‌شناسی به این نتیجه رسیدند که تغییرات ناهمسان در داده‌های مورفومتری شبکه زهکشی، عوامل لیتولوژیکی و انسانی به‌ترتیب از عوامل مؤثر در تشدید افت آب‌های زیرزمینی و وقوع فرونشست در حوضه قره‌چای همدان بوده است (شایان و همکاران، ۱۳۹۶).

همچنین فرزین‌کیا و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی ارتباط فعالیت‌های تکتونیک و تأثیر آن بر فرونشست زمین در حوضه آبریز دشت جویین با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و تداخل‌سنجی راداری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که پهنه‌هایی که میزان ۶ سانتی‌متر در سال فرونشست دارند در راستای ارتفاعات به‌صورت شرقی غربی قرار دارند (فرزین‌کیا و همکاران، ۱۳۹۸). در راستای ابزارهای مورد استفاده در تعیین پهنه‌ها و اندازه‌گیری دقیق

داده‌های ماهواره JERSI انجام شده‌اند (چن^۷ و همکاران، ۲۰۱۲؛ دامواه افاری^۸ و همکاران، ۲۰۰۸؛ جی^۹ و همکاران، ۲۰۱۰).

در ایراپواتا سیتی^{۱۰}، مکزیک تعداد زیادی چاه‌های کشاورزی و شهری وجود دارد که برداشت بیش از حد از این چاه‌ها موجب فرونشست منطقه شده است. هجده سیستم شکستی ناشی از فرونشست با طول کلی ۲۷ کیلومتر در منطقه یافت شده که به بیش از ۲۰۰ خانه خسارت وارد کرده است. به منظور تعیین میزان توزیع مکانی مزارع بر روی چاه‌ها بهره‌برداری از روش تجزیه و تحلیل تصاویر دیجیتالی از یک حسگر تراستر استفاده شد. این روش رابطه مکانی بین مزارع چاه‌ها و شکستگی‌های ناشی از فرونشست را نشان داد (رودریگز^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۵۷).

در مکزیک، بررسی الگوی مکانی و زمانی فرونشست زمین در موریلیا^{۱۲}، وضعیت فرونشست در شهر مکزیکوسیتی (سیگنا^{۱۳} و سوتر^{۱۴}؛ ۲۰۱۷؛ عثمان اغلو^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۰)، شهر تپیک^{۱۶} در سال ۲۰۱۴ توسط لئون^{۱۷} و همکارانش بررسی و با مطالعه روند فرونشست و عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر این پدیده و تأثیر فرونشست بر مناطق شهری، به این نتیجه رسیدند که با اینکه منطقه مورد مطالعه با فرونشستی با نرخ ۷/۷ سانتی‌متر در سال مواجه است اما هنوز به زیرساخت‌ها خسارتی وارد نشده است (لئون و همکاران، ۲۰۱۸).

از سال ۱۹۲۱ فرونشست در شانگ‌های چین گزارش شده است. از سال ۱۹۹۰ با افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی در این شهر فرونشست به تهدیدی برای زیرساخت‌هایی همچون پایه ساختمان‌های بلند تونل‌های مترو شهری بدل شد (لیو و همکاران، ۲۰۱۹). باهدف ایجاد سیستمی مؤثر برای

و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست در دشت قروه با استفاده از روش SBAS پرداختند که برای این منظور از تصاویر سنتینل ۱ در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ استفاده کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده از روش SBAS بالاترین میزان فرونشست (۲۱۶ میلی‌متر) مربوط به مناطق حاشیه‌ای شرق و غرب دشت قروه بوده است (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸).

حق‌شناس حقیقی و همکار به بررسی فرونشست در دشت تهران در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۷ پرداختند. بررسی‌ها نشان‌داد حداکثر میزان فرونشست ۲۵ سانتی‌متر در سال، ۵ سانتی‌متر در نزدیکی فرودگاه IKA و ۲۲ سانتی‌متر در سال در شهرستان ورامین بود. تجزیه و تحلیل جابه‌جایی‌های مشاهده‌شده همراه با اطلاعات به‌دست‌آمده از نقشه‌برداری زمین‌شناسی و بررسی سطح آب زیرزمینی در منطقه نشان داد که برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی اصلی‌ترین علت تغییر شکل سطح زمین در منطقه مورد مطالعه است (حق‌شناس حقیقی و مطاق، ۲۰۱۹).

در سایر کشورها نیز تصاویر راداری در زمینه جابه‌جایی پوسته زمین مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله در کشور اسپانیا بررسی و اندازه‌گیری تغییر شکل زمین در مقطعی از رودخانه ابرو^۱ (کاستانیدا^۲ و همکاران، ۲۰۰۹) و در هند با مطالعه روند توسعه فیزیکی شهر جاکارتا میزان فرونشست این شهر ۱۵ سانتی‌متر در سال در محدوده زمانی ۱۹۹۷ (آبیدین^۳، ۲۰۰۹) اندازه‌گیری شده است. در کشور چین پژوهش‌هایی مانند بررسی حرکات سطحی در مسیر راه‌آهن چینگ‌های^۴ تبت با استفاده از تصاویر (Alos PALSAR) و (Envisat ASAR)، بررسی تغییر شکل زمین در نزدیکی راه‌آهن پکن-تیانجین^۵ از تصاویر ماهواره ENVISAT، ALOS و DEM (SRTM) و psInSAR مطالعه فرونشست در شانگ‌های^۶ با استفاده از

7- Chen

8- Damoah-Afari

9- Ge

10 - Irapuato City

11- Rodríguez

12- Morelia

13- Cigna

14- Sowter

15- Osmanoglu

16 - Tepic

17- Leon

1- Ebro

2- Castañeda

3- Abidin

4- Qinghai

5- Beijing-Tianjin

6- Shanghai

۱۰ میلی متر افزایش داشته ولی همچنان منطقه با خشک سالی مواجه است^۵. عدم برنامه ریزی صحیح، در استفاده از منابع آب زیرزمینی موجب شده است که در سال های اخیر با برداشت های بی رویه از آب های زیرزمینی در این دشت به عنوان یکی از مناطق بحرانی استان خراسان رضوی مطرح گردد (صالح آبادی، ۱۳۹۲). در چند سال اخیر مسئله فرونشینی زمین در برخی نقاط شهر سبزوار به ویژه مرکز شهر به معضل بزرگ مدیریت شهری سبزوار مبدل شده است. - بررسی نقشه طرح جامع شهر سبزوار و انطباق آن با نقشه مسیر قنات ها و پدیده فرونشست و بالآمدگی آب نشان می دهد که بخش های مرکزی و بافت فرسوده شهر سبزوار که ۱۸۶ هکتار (۷٪) از کل مساحت شهر را شامل می شوند، بیشترین فرونشست را داشته اند، به عبارتی ۸۵ درصد نشست ها در این بافت رخ داده است. شبکه حمل و نقل که بخش وسیعی از سطح شهر را پس از کاربری مسکونی به خود اختصاص می دهد، در پهنه خطر مستقیم واقع است. بررسی ها نشان می دهد که ۲۵ درصد از شبکه ارتباطی در امتداد و یا مجاورت مسیر طولی قنات های سطح شهر احداث شده اند. تردد شبانه روزی وسایل نقلیه به ویژه در روز بر روی رسوبات سست ریزدانه و ناپایدار زیرین خطر فرونشست را تشدید می کند (رحیمی ۱۳۹۶). افت سطح آب زیرزمینی باعث تراکم برگشت ناپذیر رسوبات ریزدانه و ایجاد شکاف ها در قسمت های جنوب غربی تا غرب دشت سبزوار شده است. این شکاف های کششی طولی در نتیجه افزایش خطی فرونشست از حاشیه ارتفاعات به سمت مرکز دشت به وجود آمده است عرض شکاف ها از چند سانتی متر تا حداکثر ۱/۵ متر متغیر بوده و دارای عمق حداکثر ۳ متر می باشند. بزرگ ترین شکاف حدود ۸۰۰ متر طول دارد و بازشدگی حداکثر ۱/۵ متر در فاصله ۶ کیلومتری جنوب غربی روستای روداب واقع است. در انتهای این شکاف ها، ترک ها کوچک تر و سوراخ های متعدد با عمق زیاد وجود دارد (باقریان کلات و همکاران ۱۳۹۲: ۲۱۲۶). شواهد میدانی آثار فرونشست را

تشخیص شکستگی های ناشی از فرونشست، پاول روتر^۱ و مورو^۲ به بررسی فرونشست ناشی از استخراج زغال سنگ با استفاده از سیستم های عصبی پیچیده پرداختند و برای این منظور از روش تداخل سنجی راداری استفاده کردند (روترو و مورو، ۲۰۲۰). سیگنا^۳ و تاپت^۴ به تغییر شکل زمین در چین (ژنگژو)، ژاپن (کیوتو و اوزاکا)، کلمبیا (بوگاتا) و تونس پرداختند. در این پژوهش از تصاویر Landsat روش P-SBAS استفاده و علت این پدیده را پمپاژ آب های زیرزمینی برای مصارف شهری دانستند (سیگنا و تاپت ۲۰۲۰). فرونشست از پدیده هایی است که بخش اعظم دشت ها و شهرهای ایران در مناطق خشک و نیمه خشک با آن مواجه می باشند. اکثریت محققین علت آن را برداشت بی رویه آب های زیرزمینی به دلیل استفاده در بخش های صنعت، کشاورزی و شرب می دانند. در چند دهه اخیر توسعه سریع کشاورزی و افزایش نیاز آبی باعث برداشت بی رویه و افت سطح آب زیرزمینی در دشت سبزوار شده است. در این راستا پدیده فرونشست سطح زمین در بخش های غربی دشت به طور محسوس به ویژه در جنوب غربی آن مشاهده می گردد. در پژوهش های متعدد علت فرونشست در سبزوار، افت شدید آب های زیرزمینی، عوامل تکتونیکی، وجود آبرفت ریزدانه در بستر آن، افزایش جمعیت شهری، برداشت بی رویه آب چاه های عمیق منطقه، گسترش شهرها بر روی قنات ها و افزایش نوسازی و بهسازی در منطقه ذکر شده است (باقریان کلات و همکاران، ۱۳۹۲). در چند دهه اخیر آب زیرزمینی این دشت حدود ۴۰۰ میلیون مترمکعب بوده که سالانه با حدود ۳۰ میلیون مترمکعب کسری مخزن مواجه است. متوسط افت سالانه سطح آب زیرزمینی دشت نزدیک به یک متر است (باقریان کلات، ۱۳۹۲: ۲۱۲۱). براساس تحلیل مقایسه ای بارش توسط اداره کل هواشناسی خراسان رضوی، در دو سال اخیر بارندگی در ایستگاه سبزوار

1- Rotter

2- Muron

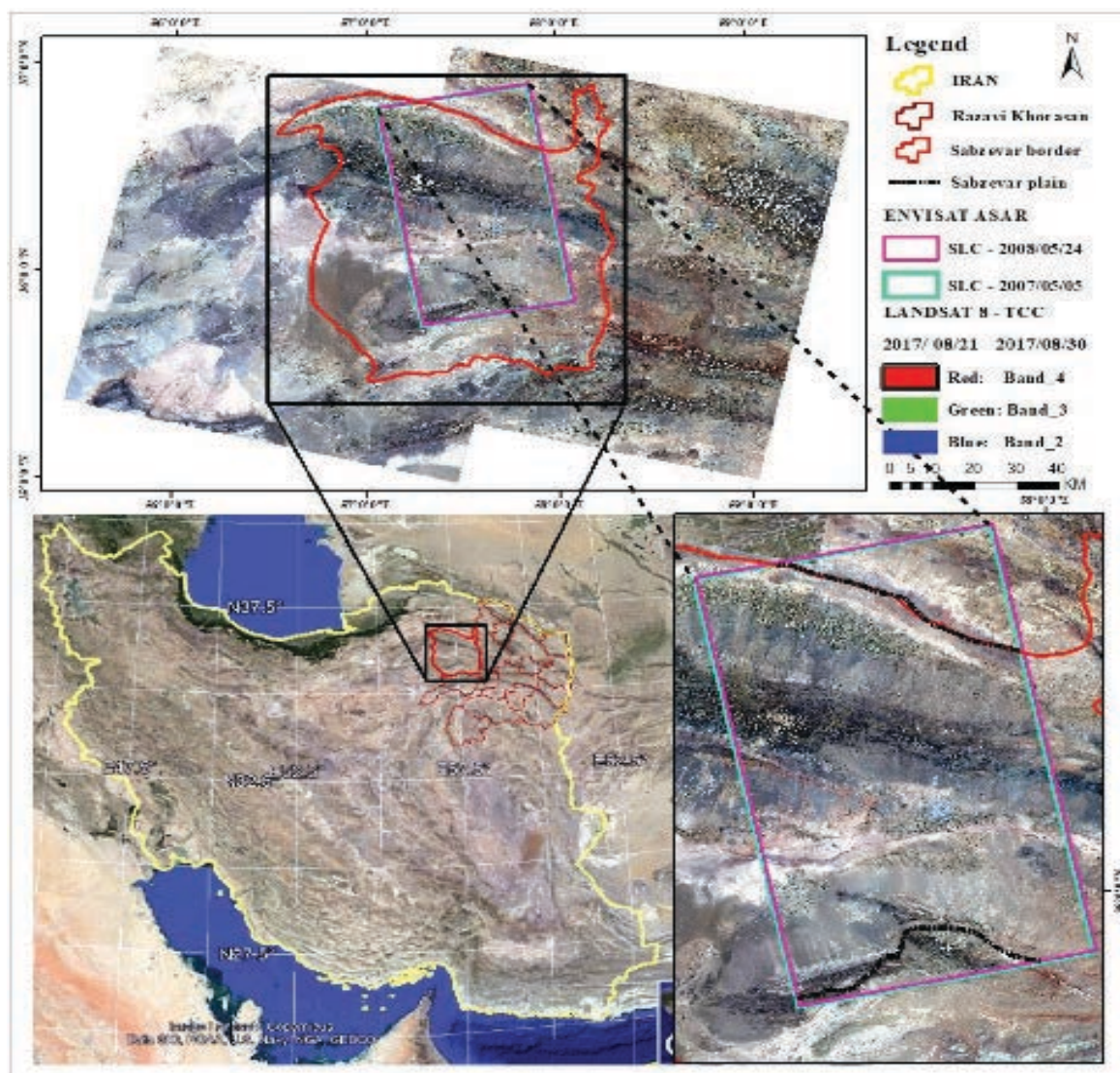
3- Cigna

4- Tapete

۲- منطقه مورد مطالعه

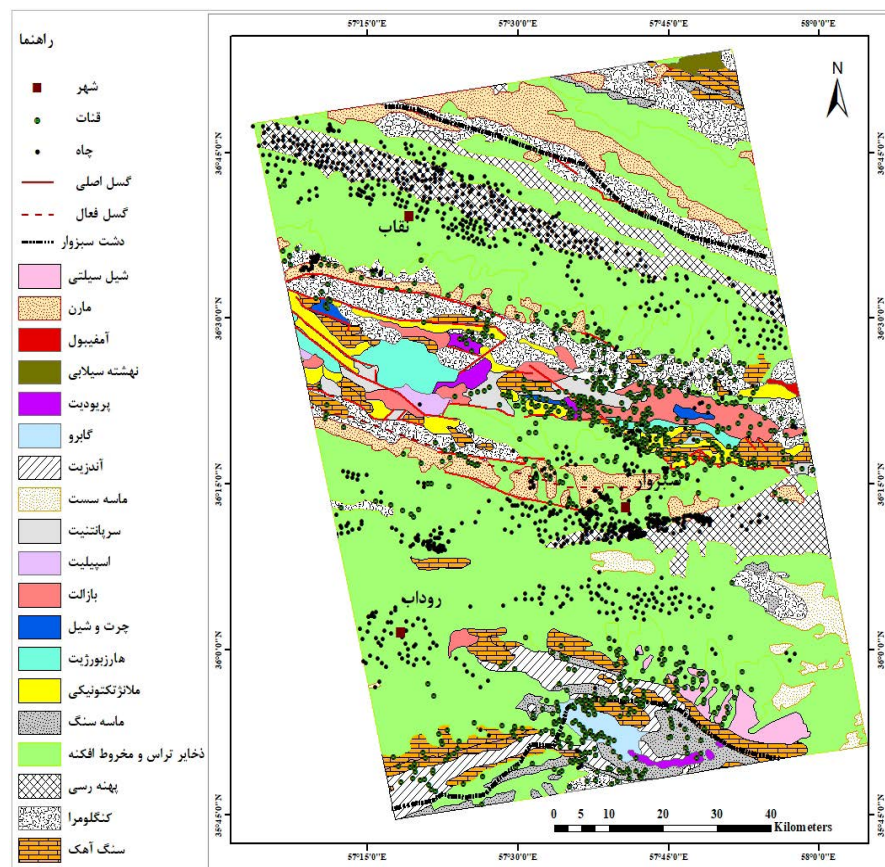
محدوده مورد مطالعه بین طول‌های غربی ۵۸ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۵۴ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه قرار دارد. از نظر سیاسی شامل بخش‌هایی از شهرستان سبزوار است که قسمت‌هایی از بخش‌های خوشاب مرکزی (سبزوار) ششتمد روداب داورزن جغتای و جوین را شامل است. در شمال با کوه‌های جغتای و در جنوب با کوه‌های کوه میش که امتداد کوه‌های هومس سمنان است محدود می‌شود (نگاره ۱). در مرکز

نشان می‌دهند. بررسی عوامل، ابعاد و علت ایجاد این پدیده هدف پژوهش حاضر است. به منظور بررسی عوامل ایجاد فرونشست در بازه زمانی (۲۰۰۴-۲۰۰۸) اطلاعات چاه‌های پیزومتری، قنات‌ها و گسل‌های منطقه و پراکندگی آن‌ها بررسی و برای پایش ابعاد و میزان فرونشست سالانه دشت سبزوار در این بازه و تعیین محدوده فرونشست، از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد؛ که با تحلیل ارتباط بین این عوامل و ابعاد و میزان فرونشست عوامل تأثیرگذار در ایجاد این پدیده تعیین گردید.



نگاره ۱: محدوده مورد مطالعه در شهرستان سبزوار

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سج)
تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست در دشت سبزوار ... / ۱۷۱



نگاره ۲: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

دریافت شده از سازمان فضایی اروپا (ESA)^۱ است. اطلاعات مداری از فایل حاوی اطلاعات برداشتی ماهواره DORIS از آرآنس فضایی اروپا DOR - VOR استفاده شد. مشخصات داده‌های راداری مورد استفاده در جدول ۱ قابل مشاهده است. پردازش تصاویر راداری شهرستان سبزوار با کمک نرم‌افزار SARSCAPE طی مراحل اصلی زیر انجام شد:

مرحله ۱- تبدیل تصاویر به فرمت استاندارد sarscape؛ پردازش. اطلاعات مداری با استفاده از فایل DOR - VOR که حاوی اطلاعات برداشتی ماهواره DORIS از آرآنس فضایی اروپا، جهت اصلاح اعوجاج تصاویر استفاده شد.

مرحله ۲- تطابق دو تصویر SLC نسبت به هم؛ در این مرحله خط مبنای تداخل‌سنجی محاسبه شد و تصاویر از نظر خط مبنای مکانی بررسی شدند. که در این مرحله خط مبنای زوج تصاویر مناسب بودند. بدین ترتیب دو

محدوده، رودخانه کال‌شور سبزوار با جهت شرق به غرب جریان دارد. از نظر اقلیمی دارای آب و هوای نیمه‌خشک تا خشک است و از لحاظ زمین‌شناسی در حدفاصل دو زون زمین‌شناسی البرز شرقی در شمال و ایران مرکزی در جنوب حدفاصل رشته‌کوه‌های البرز شرقی و گسل سبزوار واقع شده است. سازندها و واحدهای زمین‌شناسی مربوط به تمامی دوره‌ها از دوران اول تا دوران چهارم و آبرفت‌های عصر حاضر در گستره این حوضه مشاهده می‌شود (نگاره ۲).

۳- مواد و روش

۳-۱. تصاویر راداری ماهواره انویست سنجنده ASAR

داده‌های راداری مورد استفاده در این پژوهش شامل، شش تصویر SLC باند C ماهواره انویست سنجنده ASAR است. این تصاویر مربوط به ماه‌های ژوئن، می، اکتبر و دسامبر در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ با طول موج ۵/۶ سانتیمتر

جدول ۱: مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

Date	Track	Frame	Orbit	Pass	Polarization	Sensor
ASA_IMS_1PNESA20041002	471	711	13551	Ascending	VV	Asar
ASA_IMS_1PNESA20060624	471	711	22569	Ascending	VV	Asar
ASA_IMS_1PNESA20070505	471	711	27078	Ascending	VV	Asar
ASA_IMS_1PNESA20080524	471	711	32589	Ascending	VV	Asar

جدول ۲: مشخصات اینترفروگرام‌های پردازش شده در منطقه مطالعاتی

خط مبنای مکانی (m)	ابهام ارتفاعی (m)	تصویر قدیم (master)	تصویر جدید (slave)	کد اینترفروگرام
۵۳۵/۳۳۴	۳۴/۵۲۳	۲۰۰۴/۱۰/۰۲	۲۰۰۸/۰۵/۲۴	a
۴۷۱/۶۱۷	۳۹/۱۹۷	۲۰۰۶/۰۶/۲۴	۲۰۰۷/۰۵/۰۵	b
۱۵۸/۳۱۹	۱۱۶/۷۵۳	۲۰۰۷/۰۵/۰۵	۲۰۰۸/۰۵/۲۴	c

انتخابی است. به این ترتیب قسمت اعظم تأثیر توپوگرافی در ایجاد اختلاف فاز تصاویر حذف می‌شود. بدین منظور، اثر توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی (SRTM DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر از تصاویر حذف شد. در این مرحله با استفاده از مدل ارتفاعی از دو تصویر ورودی یک تداخل نمای مختلط و تصویر شدت سیگنال بازگشتی که با یکدیگر از نظر هندسی منطبق هستند تولید شد. اینترفروگرام همان تصویر حاصل از اختلاف فاز دو تصویر رادار است که بیانگر تغییرات می‌باشد. مسطح‌سازی اینترفروگرام‌ها؛ به منظور حذف مؤلفه فازی ناشی از اثرات توپوگرافی، با استفاده از این مدل ارتفاعی انجام شد.

مرحله ۴- سه اینترفروگرام حاصل از مرحله قبل، حاوی نویزهایی است که در نتیجه اختلاف زمانی^۶ دریافت دو تصویر و همچنین وجود اختلاف خط مبنای مکانی^۷ به وجود آمده است.

برای کاهش این نویزها بر روی تصاویر فیلتر اعمال شد که در این پژوهش از فیلتر آدابتیو^۸ استفاده شد. نگاره ۳، اینترفروگرام پردازش شده با فیلتر آدابت مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۸ - ۲۰۰۴ را نشان می‌دهد.

تصویر slc که از نظر هندسی با یکدیگر منطبق بودند آماده ورود به تشکیل تداخل نما شدند. به منظور ثبت هندسی^۱ تصاویر، یکی از آن‌ها به عنوان تصویر مرجع^۲ و سایر تصاویر به عنوان تصاویر تابع^۳ در نظر گرفته شد و تصاویر دوبه دو نسبت به هم به دقت ثبت هندسی^۴ شدند. از طریق ترکیب هر دو تصویری که نسبت به هم ثبت هندسی شده‌اند یک اینترفروگرام تهیه شد.

جدول ۲، مشخصات اینترفروگرام‌ها را نشان می‌دهد. فاز تداخل سنجی شامل اثرات توپوگرافی (φ_{topo})، حرکت پوسته زمین (φ_{displ})، اثرات متغیر اتمسفر (φ_{atm}) بین مشاهدات و نویز (φ_{nois}) است (روستایی و همکاران، ۱۳۹۲) که آن را می‌توان به صورت رابطه ۱ نشان داد.

$$\varphi_{int} = \varphi_{topo} + \varphi_{displ} + \varphi_{atm} + \varphi_{nois} \quad \text{رابطه ۱:}$$

مرحله ۳- برای استخراج میزان جابه‌جایی سطح باید تمام اثرات دیگر از اینترفروگرام‌ها حذف شود. اولین قدم حذف مؤلفه توپوگرافی است و ساده‌ترین روش برای مقابله با آن، به حداقل رساندن خط مبنای عمودی^۵ زوج تصویر

1- Co-registration

2- Master

3- Slave

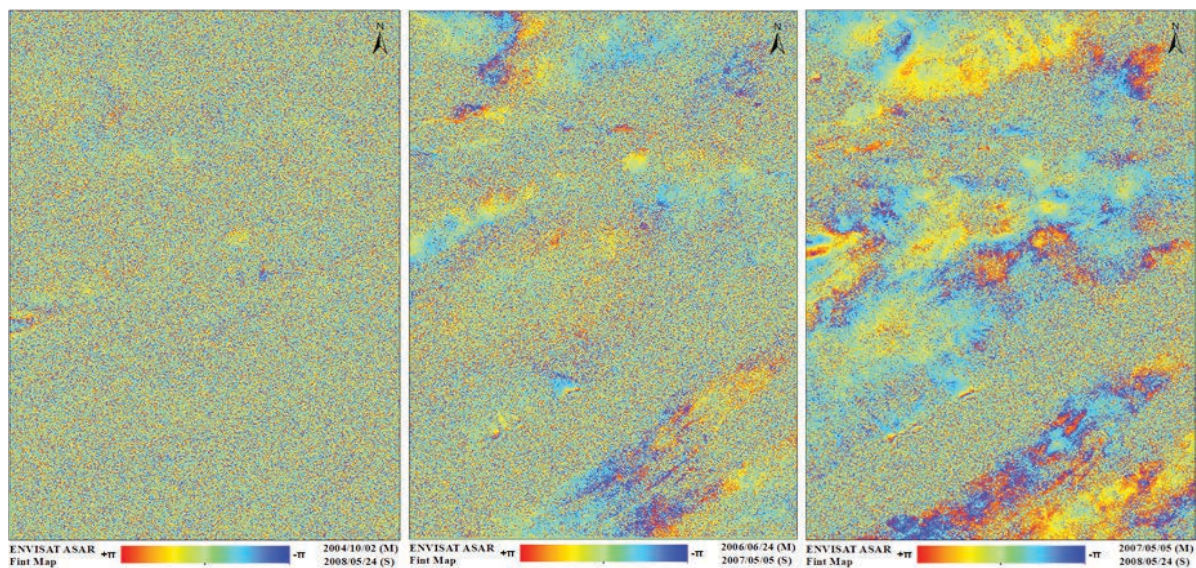
4- Co-Register

5- Perpendicular Baseline

6- temporal baselinre

7- spatial baseline

8- adaptive



نگاره ۳: اینترفروگرام‌های پردازش شده با فیلتر Adapt مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۴-۲۰۰۸ که به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: اینترفروگرام مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۴/۱۰/۰۲ تا ۲۰۰۸/۰۵/۲۴ (۱۳۱۱ روز)، اینترفروگرام مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۷/۰۵/۰۵ تا ۲۰۰۶/۰۶/۲۴ (۳۱۵ روز)، اینترفروگرام مربوط به زمان ۲۰۰۷/۰۵/۰۵ تا ۲۰۰۸/۰۵/۲۴ (۳۸۵ روز) است.

مرحله ۵- مرحله بازکردن فاز^۱، فاز کالیبراسیون مطلق و فازهای باز شده، دوباره با فازهای مصنوعی ترکیب شده به ارتفاع تبدیل شده و به نقشه کدگذاری شده تبدیل می‌شود. در نتیجه این مرحله، تصویر کوه‌رنسی نیز کدگذاری شد. در این مرحله، در کنار مدل ارتفاع دیجیتال و تصویر کوه‌رنسی کدگذاری شده، دو فایل؛ دقت، که از پارامترهایی مانند انسجام، پایه و طول موج حاصل می‌شود. این برآورد (مقدار انحراف استاندارد) از دقت اندازه‌گیری را فراهم می‌کند. هرچه این مقدار بیشتر باشد دقت اندازه‌گیری نیز کاهش می‌یابد. فایل دوم وضوح، که وضوح پیکسل را در محدوده زمین نشان می‌دهد (رابطه ۲) (هولکز^۲ و همکاران ۱۹۹۷).

مرحله ۷- مرحله اصلاح و تسطیح سازی دوباره^۳، این مرحله برای تبدیل صحیح اطلاعات فاز باز شده به مقادیر ارتفاع (یا جابه‌جایی) بسیار مهم است. این امکان را برای اصلاح مدارها (به‌عنوان مثال اصلاح خطاهای احتمالی) و محاسبه جابه‌جایی فاز (به‌دست آوردن مقادیر مطلق فاز) یا حذف رمپ‌های احتمالی فاز فراهم می‌کند. مرحله ۸- مرحله تبدیل فاز به تصویر جابه‌جایی؛ برای تولید نقشه جابه‌جایی مقادیر فاز به جابه‌جایی تبدیل شده و بر روی یک نقشه کدگذاری می‌شود. مرحله ۹- پهنه‌بندی تصویر جابه‌جایی، تصویر محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ پهنه‌بندی شده و میزان فرونشست مشخص شد.

$$\text{محدوده شیب فاصله پیکسل} \\ \sin(\text{زاویه برخورد محلی})$$

رابطه ۲:

۳-۲- سطح آب منطقه مطالعاتی

به منظور استخراج نقشه سطح آب منطقه، آمار سطح تراز آب‌های زیرزمینی از سازمان آب منطقه‌ای استان

مرحله ۶- مرحله ایجاد نقطه کنترل زمین^۳، (در قالب

xml یا شکل) که به‌عنوان ورودی برای فرآیند اصلاح و

1-Phase unwrapping

2- Holecz

3- Ground Control Point

4- Refinement and reflatening

بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۵/۲۴ - ۲۰۰۴/۱۰/۰۲ بافاصله زمانی ۱۳۱۱ روز، سطحی از هیستوگرام با میزان کوهرنسی در رنج ۰/۴ - ۰/۲ را دارا است. از طرفی خط مبنای مکانی آن (۵۳۵/۳۳۴ متر) است.

میزان کوهرنسی در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۵/۲۴ - ۲۰۰۷/۰۵/۰۵ بافاصله زمانی ۳۸۵ روز، در محدوده میزان کوهرنسی ۰/۶ - ۰/۲ بیشترین سطح (فراوانی پیکسل) را دارد. همچنین در بازه زمانی ۲۰۰۷/۰۵/۰۵ - ۲۰۰۶/۰۶/۲۴ بافاصله زمانی ۳۱۵ روز و خط مبنای مکانی (۴۷۱/۶۱۷)، در محدوده میزان کوهرنسی ۰/۶ - ۰/۲ بیشترین سطح (فراوانی پیکسل) را دارد (جدول ۳).

از ۳ اینترفروگرام استخراج شده در این پژوهش، در بازه‌های زمانی کمتر از یک سال، بازه زمانی بیشتر از یک سال و ۳/۵ سال، از ۲۰۰۸ - ۲۰۰۴ است. پس از بررسی تصاویر مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۵/۲۴ - ۲۰۰۴/۱۰/۰۲ مشخص شد که تصویر اخیر علاوه بر خط مبنای مکانی (۱۳۱۱ روز) زیاد، خط مبنای مکانی (۵۳۵/۳۳۴) بیشتری نسبت به تصاویر دیگر دارا بوده و از میزان هم‌دوسی کمتری نسبت به دو اینترفروگرام دیگر برخوردار است؛ بنابراین تصویر اخیر به منظور تجزیه تحلیل و میزان فرونشست در منطقه انتخاب شد. نقشه تغییر شکل تهیه شده مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۵/۲۴ - ۲۰۰۷/۰۵/۰۵ نشان داد، بیشترین فرونشست در شمال شرق منطقه رخ داده است.

نقشه تغییر شکل مربوط به این بازه زمانی نشان‌دهنده نرخ بالای فرونشست در این بازه زمانی کوتاه در منطقه است (نگاره ۴). همان‌گونه که نقشه اخیر نشان می‌دهد حداکثر فرونشست در سمت شمال شرقی محدوده مورد مطالعه قرار دارد و جهت فرونشست جنوب غربی و شمال شرقی است. درواقع از پای دامنه‌های کوهستان میش شروع می‌شود تا پای دامنه‌های کوه جغتای افزایش می‌یابد و شهرهای داخلی از جمله شهر سبزوار با میانگین نشست حدود ۱۰ سانتی‌متر مواجه است. با توجه به این‌که بازه فرونشست بخش‌هایی از سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ را شامل می‌شود، برای مقایسه نتایج

خراسان رضوی و همچنین اطلاعات آمار میزان عمق و سطح تراز آب زیرزمینی چاه‌های شهرستان سبزوار مطابق با سال‌های تصاویر راداری دوره آماری ۱۳۸۷-۱۳۸۲ تهیه شد. برای بررسی درازمدت، اطلاعات بازه زمانی ۱۳۹۲-۱۳۵۲ از وزارت نیرو شرکت آب منطقه‌ای استان تهیه شد. اطلاعات مربوط به چاه‌ها و قنات‌های منطقه برای بررسی میزان فرونشست، از شهرداری سبزوار تهیه شد.

به منظور برآورد میزان افت آب‌های زیرزمینی و مطالعه میزان فرونشست حاصل از آن، آمار میزان عمق و سطح تراز آب‌های زیرزمینی ۸۸ چاه پیزومتری سبزوار، در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۵۲ از شرکت آب منطقه‌ای استان تهیه شد. سپس برای پی بردن به سطح آب در دو دوره درازمدت ۱۳۹۳-۱۳۵۲ و هم‌زمان با دوره‌ای که تصاویر انویست موجود بود، نقشه سطح آب تهیه شده است. به این منظور داده‌های سطح آب زیرزمینی به صورت نقاط با مختصات (XYZ) مورد استفاده قرار گرفت؛ X و Y مختصات چاه‌های مشاهده‌ای و Z ارتفاع سطح ایستابی نسبت به یک سطح مبنا (معمولاً میانگین سطح دریا) در نظر گرفته شده است و سپس توسط روش IDW^۱ با محاسبه توان بهینه، سطح آب چاه‌های پیزومتری درون‌یابی شده است.

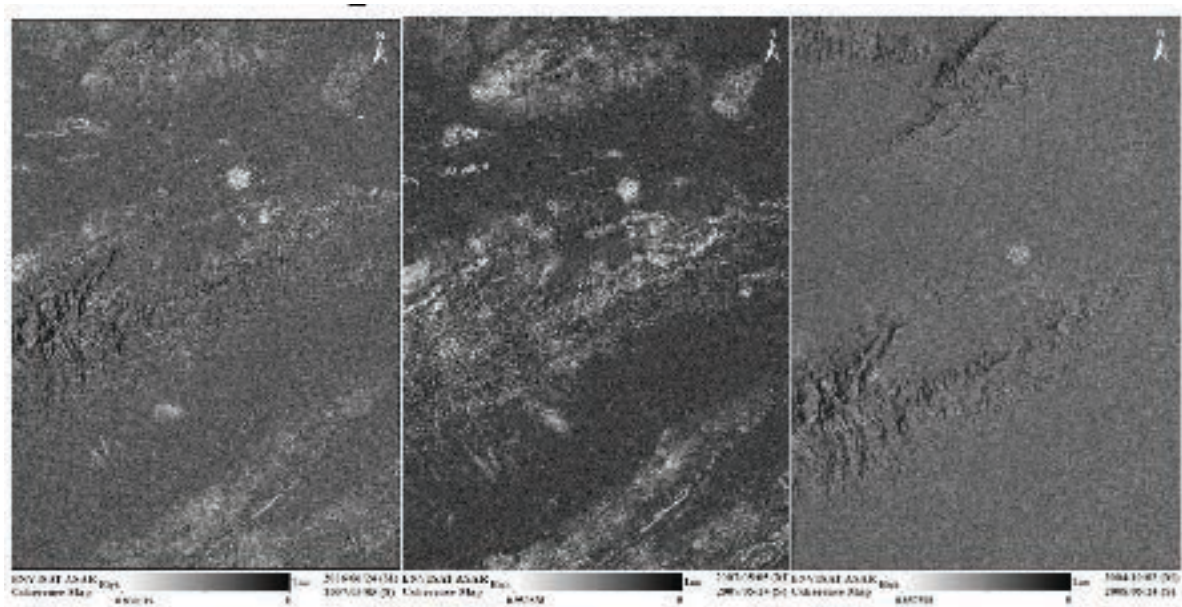
۳-۳. تطبیق سطوح پیزومتری و فرونشست

در پژوهش اخیر برای بررسی رابطه بین پراکنش فضایی فرونشست و موقعیت چاه‌ها، قنات‌ها و گسل‌ها نیز از روش‌های هم‌پوشانی استفاده شد. همچنین در مرحله بعد با هم‌پوشانی سطوح پیزومتری و فرونشست در منطقه مطالعاتی میزان تغییرات و عوامل مؤثر آن بررسی شده است.

۴- یافته‌ها

در این تحقیق تصاویر کوهرنسی که طی پردازش ایجاد شده‌اند، برای دوره‌های زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ مورد بررسی قرار گرفته‌اند (نگاره ۴). میزان کوهرنسی در

1- Inverse Distance Weighted



نگاره ۴: تصاویر کوهرنسی مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۸ - ۲۰۰۴ منطقه مطالعاتی

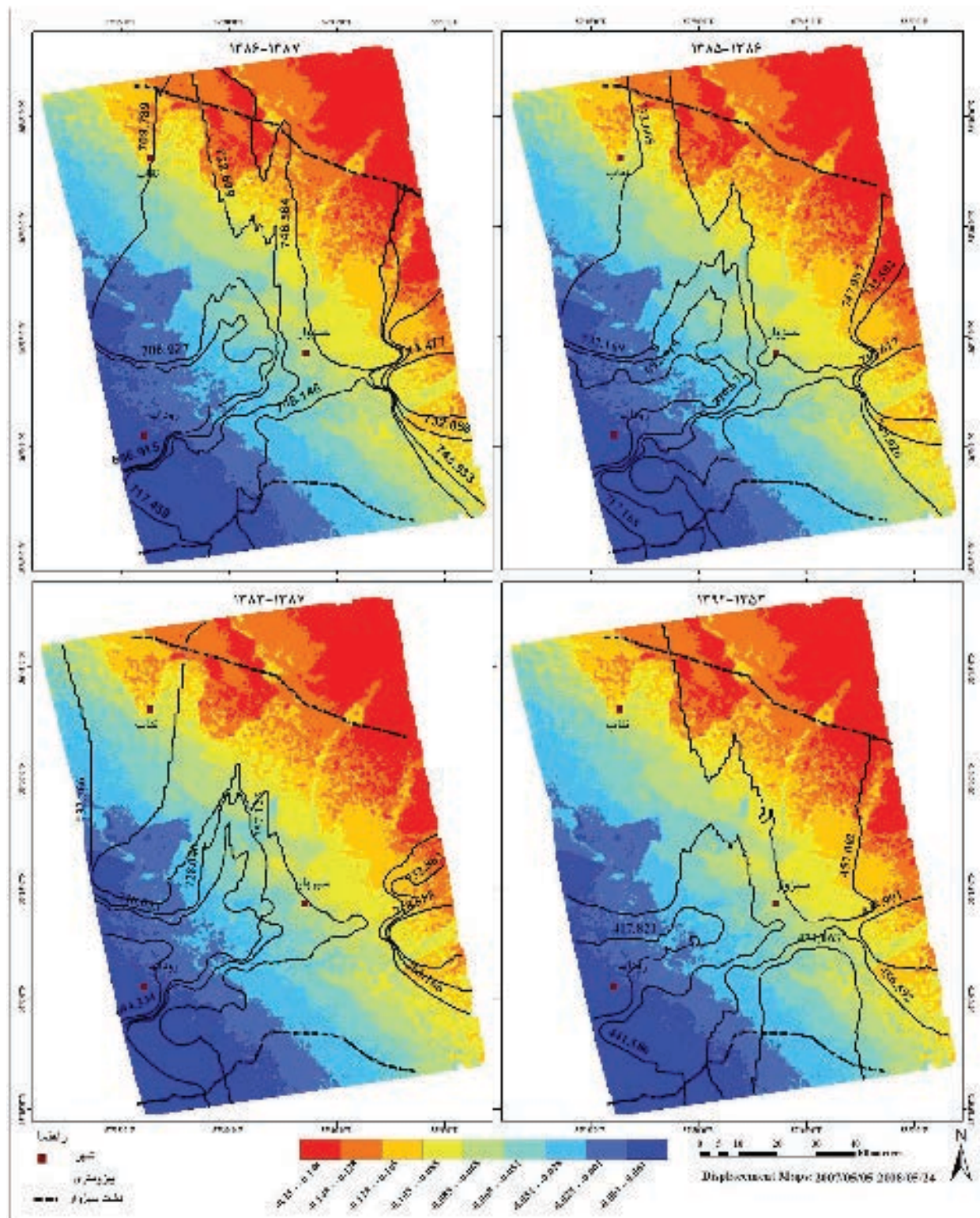
یک دهه دارد که می‌توان علت آن را در استفاده بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی جستجو نمود (نگاره ۵). برای بررسی رابطه فضایی قنات، چاه‌ها و گسله‌ها و تأثیر آن‌ها در میزان فرونشست از تصاویر جابه‌جایی حاصل از تداخل سنجی و همپوشانی آن‌ها با فرونشست در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است.

نگاره ۶، پراکنش فضایی گسله‌ها، چاه‌ها و مظهر قنات‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۰۸ میزان فرونشست از ۱ میلی‌متر تا ۱۴/۸ سانتی‌متر تغییر می‌کند. روند حرکت فرونشست از جنوب‌غرب به سمت شمال‌شرق است؛ و بخشی زیادی از چاه‌ها در ارتباط با فرونشست هستند.

فرونشست با سطح آب‌های زیرزمینی از آمار دوره‌های ۱۳۸۵-۱۳۸۶، ۱۳۸۶-۱۳۸۷، برای مطالعه هم زمانی فرونشست و سطح آب‌های زیرزمینی، بازه ۱۳۸۳-۱۳۸۷ برای مقایسه دوره‌ای آب‌های زیرزمینی و فرونشست و برای مقایسه کل دوره آماری از بازه ۱۳۹۲-۱۳۵۳ استفاده شده است. نتایج حاصل از درون‌یابی نشان می‌دهد که در هر چهار بازه پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی از غرب به شرق رو به افزایش است. هنگامی که دوره آماری طولانی‌تر می‌شود این پدیده تشدید می‌شود که بیانگر این است که اولاً در پهنه هموار دشت سبزوار با افزایش میزان فرونشست، پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی رو به افزایش است و پدیده فرونشست در منطقه مورد مطالعه عمر بیش از

جدول ۳: اطلاعات آماری مورد بررسی هر یک از تصاویر از نظر کوهرنسی

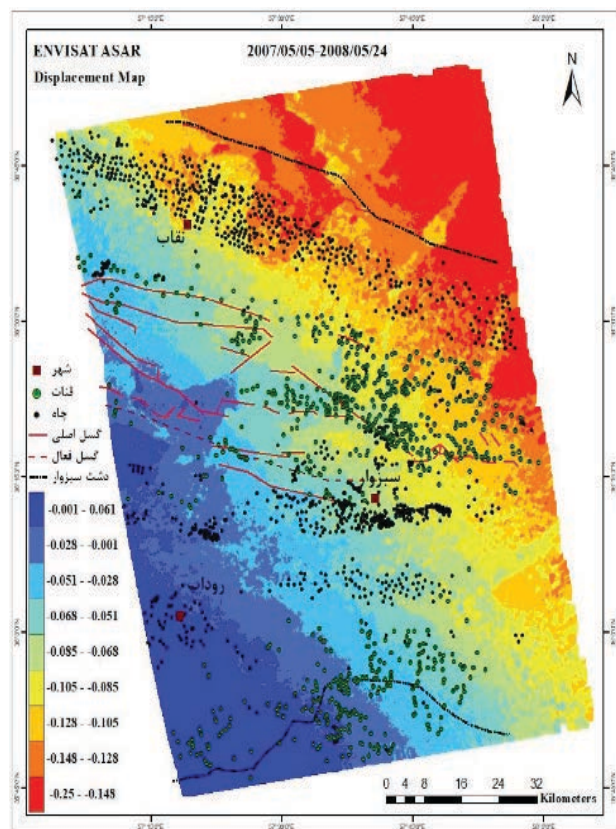
کد	تصاویر کوهرنسی بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۱۱	پیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	خط مبنای زمانی (روز)	خط مبنای مکانی (متر)	توزیع مقادیر کوهرنسی حداکثر فراوانی پیکسل‌ها	مقدار کوهرنسی بیشترین فراوانی
a	۲۰۰۴/۱۰/۰۲ - ۲۰۰۸/۰۵/۲۴	۰/۹۵	۰	۰/۱۴	۰/۰۷	۱۳۱۱	۵۳۵/۳۳۴	۰/۲ - ۰/۴	۰/۲ - ۰/۴
b	۲۰۰۶/۰۶/۲۴ - ۲۰۰۷/۰۵/۰۵	۰/۹۵	۰	۰/۱۷	۰/۰۷	۳۱۵	۴۷۱/۶۱۷	۰/۲ - ۰/۶	۰/۲ - ۰/۴
c	۲۰۰۷/۰۵/۰۵ - ۲۰۰۸/۰۵/۲۴	۰/۹۸	۰	۰/۲۰	۰/۰۹	۳۸۵	۱۵۸/۳۱۹	۰/۲ - ۰/۶	۰/۲ - ۰/۴



نگاره ۵: میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۸/۰۵/۲۴ - ۲۰۰۷/۰۵/۰۵ و تطابق با تراز آبهای زیرزمینی در دوره‌های آماری ۱۳۹۲-۱۳۵۲

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س) / تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست در دشت سبزوار ... ۱۷۷/

آن فیلتر آداپتو بر روی آن اعمال شد و پس از انجام سایر عملیات از جمله بازکردن فاز اصلاح، تسطیح‌سازی دوباره و تهیه نقشه جابه‌جایی، بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ به دلیل میزان همدوسی کمتر انتخاب شد و میزان فرونشست محاسبه شد. در این بازه زمانی یک‌ساله بیشترین فرونشست در سمت شمال‌شرقی در پای دامنه‌های کوه جغتای قرار دارد. با توجه به جهت شمال‌شرقی - جنوب‌غربی فرونشست این‌طور به نظر می‌رسد که منطقه پست بین کوهستان میش و جغتای در معرض خطر هستند. بیشتر شهرهای کوچک و بزرگ از جمله سبزوار نیز در این منطقه قرار دارند و درگیر پدیده فرونشست قرار دارند. ۱۰ سانتیمتر فرونشست برای یکسال میزان قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. با توجه به این‌که مقایسه همزمان یک‌ساله بین سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست نمی‌تواند گویای وضعیت منطقه باشد لذا برای بررسی دقیق‌تر رابطه فرونشست و برداشت آب‌های زیرزمینی، از آمار سطح تراز آب‌های زیرزمینی ۸۸ چاه پی‌زومتری در دوره‌های ۱۳۸۶-۱۳۸۷، ۱۳۸۵-۱۳۸۶، ۱۳۸۴-۱۳۸۵ و ۱۳۸۳-۱۳۸۴ استفاده شده است. نتایج حاصله بیانگر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی از غرب به شرق می‌باشد و هر چه بازه زمانی طولانی‌تر می‌شود این پدیده تشدید می‌شود و در نتیجه پدیده فرونشست در منطقه مورد مطالعه جدید نیست و قدمت بیش از یک دهه دارد. به‌طور کلی ارتباط بین فرونشست و سطح آب‌های زیرزمینی معنی‌دار است زیرا سطح آب‌های زیرزمینی به سمت شرق و تا حدودی شمال‌شرق که محدوده حداکثر فرونشست است، کاهش می‌یابد. مقایسه پراکنش چاه‌ها و فرونشست نشان می‌دهد که بیشترین تراکم چاه‌ها با حداکثر فرونشست تطابق دارد، بنابراین موقعیت چاه‌ها تا حدودی در فرونشست مؤثر است. بین پراکنش مظهر قنات‌ها و روند فرونشست ارتباطی نیست. احتمال دارد که دلیل آن متروک بودن قنات‌ها و عدم استفاده از آن‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از همپوشانی گسل‌ها و میزان فرونشست نشان می‌دهد که به دلیل عمود بودن روند گسل‌ها بر جهت فرونشست،



نگاره ۶: پراکنش فضایی گسل‌ها، چاه‌ها و مظهر قنات

محدوده‌های شهری بین ۸ الی ۱۰ سانتی‌متر پایین رفته‌اند. در نوار افیولیته شمال‌غرب - غرب دشت سبزوار با ترکیب سنگ‌شناسی آندزیت، گدازه‌های بازالتی، توف و مارن‌های حاوی گچ، گسل‌های اصلی منطقه قرار دارند. گسل‌های فعال نیز در قسمت غرب محدوده مورد مطالعه و بر روی سازندهایی چون کنگلومرا و ماسه‌سنگ، مارن قرمز و مارن حاوی گچ قرار دارد. روند گسل‌ها عمود بر جهت فرونشست بوده که بیانگر نقش آن‌ها در جابه‌جایی عمودی رو به پایین است که احتمالاً گسل‌ها به تغذیه آبخوان کمک می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نتایج اینترفروگرام‌ها که در بازه زمانی سه‌ساله تهیه شده بود دارای نویز زیادی بود و برای رفع

۵- تورانی، آق اتابای، روستایی؛ مرجان، مریم، مه آسا. (۱۳۹۷)، مطالعه فرونشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، مجله آمایش جغرافیایی فضا، فصلنامه علمی- پژوهشی دانشگاه گلستان، سال ۸، شماره ۲۷، ۱۱۷-۱۲۸.

۶- جلینی، سپهر، لشکری پور، راشکی؛ مریم، سپهر، غلامرضا، علیرضا. (۱۳۹۶)، بررسی همبستگی مورفومتری ترک‌های حاصل از فرونشست با تغییرپذیری ادافیک در دشت نیشابور، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۴، صص ۵۹-۷۵.

۷- زارع‌کمالی، حسینی‌مدرسی، نقدی؛ مجتبی، علی، کریم. (۱۳۹۶)، مقایسه میزان جابه‌جایی عمودی زمین با استفاده از الگوریتم SBAS در باندهای راداری X و C، مجله سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، سال ۸، شماره ۳، صص ۱۰۴-۱۲۰.

۸- شایان، یمانی، یادگاری؛ سیاوش، مجتبی، منیژه. (۱۳۹۵)، پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان، هیدرو ژئومورفولوژی، شماره ۹، صص ۱۳۹-۱۵۸.

۹- شریفی‌کیا، افضل‌ی، شایان؛ محمد، عباسعلی، سیاوش. (۱۳۹۴)، استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفیک ناشی از فرونشست در دشت دامغان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۲، صص ۶۰-۷۴.

۱۰- شفیعی، مختاری، امیر احمدی، زندی؛ نجمه، لیلیا، گلی، ابوالقاسم، رحمان. (۱۳۹۹)، بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۸، شماره ۴، صص ۱۱۱-۹۳.

۱۱- شیرانی، سیف، شریفی‌کیا؛ کورش، عبدالله، محمد. (۱۳۹۳)، ارزیابی کارایی سنجنده‌های PALSAR و ASAR به کمک تداخل‌سنجی تفاضلی در شناسایی و پایش زمین‌لغزش‌ها در زاگرس، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۶، شماره ۳، صص ۲۸۸-۳۰۱.

۱۲- صفاری، جعفری، توکلی صبور؛ امیر، فرهاد، محمد.

احتمالاً سبب جابه‌جایی عمودی رو به پایین می‌شود. بنابراین به طور کلی مهم‌ترین عامل در رخداد فرونشست در این منطقه کاهش سطح آب‌های زیرزمینی است. پراکنش چاه‌ها و گسل‌ها نیز به‌عنوان عوامل ثانوی در این پدیده مؤثر هستند. نقش گسل‌ها به‌دلیل عمود بودن سطح فرونشست با جهت آن‌ها می‌تواند نقش تشدیدکنندگی داشته باشد به‌عبارت دیگر هرچقدر سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه کاهش یابد با یک ضریب افزایشی، پدیده فرونشست رخ می‌دهد. محدوده فرونشست در پای کوه‌های جغتای قرار دارد و از مناطقی است که از نظر توسعه کشاورزی رشد داشته و سالانه با افزایش نیاز آبی مواجه است که احتمالاً با مشکلات بیشتری در آینده مواجه خواهد شد.

۶- منابع و مآخذ

- ۱- آمیغ پی، عربی؛ معصومه، سیاوش. (۱۳۸۸)، گزارش طرح پژوهشی بررسی فرونشست یزد با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و ترازبایی دقیق، سازمان نقشه‌برداری کشور، صص ۱۵۷-۱۶۴.
- ۲- انگورانی، معماریان، شریعت‌پناهی، بلورچی؛ سعید، حسین، مسعود، محمدجواد. (۱۳۹۴)، مدل‌سازی پویای فرونشست دشت تهران، علوم‌زمین، سال ۲۵، شماره ۹۷، صص ۲۱۱ تا ۲۲۲.
- ۳- باقریان کلات، لشکری پور، غفوری؛ پژمان، علی، غلامرضا محمد، حسین. (۱۳۹۲)، بررسی نشست زمین و ایجاد شکاف در دشت سبزواری، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، دانشگاه فردوسی، پانزده و شانزده آبان، صص ۲۱۲۱-۲۱۲۹.
- ۴- باقری‌منش، معتق، اکبری؛ شادی سادات، مهدی، بهمن. (۱۳۹۵)، بررسی فرونشست ناشی از پدیده فرسایش خندقی در دشت دشتیاری شهرستان چابهار با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و با به‌کارگیری تصاویر سنجنده ENVISAT، هشتمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران، صص ۱۴-۱۵.

شهرام، محمد، مه آسا. (۱۳۹۴)، شناسایی و پایش ناپایداری دامنه‌ای به روش پردازش اینترفرومتری تفاضلی مطالعه موردی: حوضه آبریز گرمی چای میانه، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۴، صص ۴۴-۵۹.

20- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Jamal, M., Fukuda, Y., & Deguchi, T. (2009). Land Subsidence and Urban Development in Jakarta (Indonesia). 7th FIG Regional Conference, Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity Hanoi, Vietnam, 19-22.

21- Aly, M. H., Klein, A. G., Zebker, H. A., & Giardino, J. R. (2012). Land subsidence in the Nile Delta of Egypt observed by persistent scatterer interferometry. Remote Sensing Letters, 3(7), 621-630.

22- Castaneda, C., Gutierrez, F., Michele, M., & Galve, J. (2009). DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain. Earth Surface Processes and Landforms, 34 (11), 1562-1574.

23- Castellazzi, P., Garfias, J., Martel, R., Brouard, C., & Rivera, A. (2017). InSAR to support sustainable urbanization over compacting aquifers: The case of Toluca Valley, Mexico. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 63, 33-44.

24- Chen, F., Lin, H. Li, Z., Chen, Q., & Zhou, J. (2012). Interaction between permafrost and infrastructure along the Qinghai-Tibet Railway detected via jointly analysis of C – and L- band small baseline SAR interferometry. Remote Sensing of Environment, 123, 532-540.

25- Cigna, F., & Sowter, A. (2017). The relationship between intermittent coherence and precision of ISBAS InSAR ground motion velocities: ERS-1/2 case studies in the UK. Remote Sensing of Environment, 202, 177-198.

26- Cigna, F., & Tapete, D. (2020). Mapping Land Subsidence in Urban Areas Using Esa's G-POD and the P-SBAS Insar Technique: Examples in Asia, South America and North Africa. 2020 Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS), 223-226.

27- Costantini, M., Ferretti, A., Minati, F., Falco, S., Trillo, F., Colombo, D., Novali, F., Malvarosa, F.,

(۱۳۹۴)، سنجش مقدار و پهنه خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۲، صص ۸۲-۹۳.

۱۳. فتح‌الهی، آخوندزاده هنزائی، بحرودی؛ نرگس، مهدی، عباس. (۱۳۹۷)، بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل سنجی رادار، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۷، شماره ۱۰۵، صص ۲۳-۳۴.

۱۴- فرزین‌کیا، زنگنه اسدی، امیر احمدی، زندی؛ ربابه، محمدعلی، ابوالقاسم، رحمان. (۱۳۹۸)، ارتباط فعالیت‌های تکتونیکی و تأثیر آن در فرونشست زمین در حوضه آبریز دشت جوبین، هیدرو ژئومورفولوژی، سال ۵، شماره ۲۰، صص ۱۶۵-۱۸۵.

۱۵- گلی، مرادی، دهقانی؛ علی، مریم، مریم. (۱۳۹۸)، ارزیابی آسیب پذیری سکونتگاه‌های روستایی ناشی از فرونشست زمین در استان فارس، پژوهش و برنامه‌ریزی روستایی، دوره ۸، شماره ۴ (پیاپی ۲۷)، صص ۹۱-۱۰۶.

۱۶- محمدخان، گنجائیان، گروسی، زنگنه‌تبار؛ شیرین، حمید، لیلا، زهرا. (۱۳۹۸)، ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ محدود مورد مطالعه: دشت قروه، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۸، شماره ۱۱۲، صص ۲۱۹-۲۳۰.

۱۷- ملک، برنا؛ سارا، رضا. (۱۳۹۷)، بررسی مخاطرات فرونشست زمین در جنوب شهر تهران؛ مطالعه موردی: منطقه ۲۰ تهران، چهارمین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین در علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، تهران، انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین.

۱۸- هاشمی‌فرد، کردوانی، اسدیان؛ اکبر، پرویز، فریده. (۱۳۹۶)، تغییرات ژئومورفولوژیکی سازند گچساران ناشی از آبگیری سد گوندعلیا، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی رادار، هیدرو ژئومورفولوژی، شماره ۱۵، صص ۵۳-۳۷.

۱۹- یاراحمدی، روستایی، شریفی‌کیا، روستایی؛ جمشید،

Subsidence risk due to groundwater extraction in urban areas using fractal analysis of satellite images. *Geofísica internacional*, 51(2), 157–167.

37- Rotter, P., & Muron, W. (2020). Automatic Detection of Subsidence Troughs in SAR Interferograms Based on Convolutional Neural Networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.

Mammone, C., & Vecchioli, F. (2017). Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data. *Remote Sensing of Environment*, 202, 250–275.

28- Damoah-Afari, P., Ding, X.L., & Lu, Z. (2008). Detecting ground settlement of shanghai using Interferometry synthetic Aperture Radar (InSAR) techniques. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, (B7), 117-124.

29- Du, Z., Ge, L., Li, X., & Ng, A. H.M. (2016). Subsidence monitoring in the Ordos basin using integrated SAR differential and time-series interferometry techniques. *Remote Sensing Letters*, 7(2), 180–189.

30- Ge, L., Li, X., Chang, H., Ng, A. H., Zhang, K., & Hu, Z. (2010). Impact of ground Subsidence on the Beijing-Tianjin high-speed railway as mapped by radar interferometry. *Annals of GIS*, 16(2), 91-102.

31- Haghighi, M. H., & 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 Sensing of Environment*, 221, 534–550.

32- Holecz F., J. Moreira, P. Pasquali, S. Voigt, E. Meier, D. Nuesch. (1997). Height Model Generation, Automatic Geocoding and Mosaicing using Airborne AeS-1 InSAR Data . *Proceedings of IGARSS'97 Symposium*

33- Leon, W. H., Martinez, J.P., Marin, M. H., Ceniceros, R. P., & Rea, M. D. (2018). Land subsidence and its effects on the urban area of Tepic city, México. *WIT Transactions on the Built Environment*, 179, 369-380.

34- Lyu, H.M., Shen S.L., Zhou, A., Yang, J. (2019). Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP, *Science of the Total Environment*.

35- Osmanoglu, B., Dixon T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 13(1), 1–12.

36- Rodriguez, R., Lira, J., & Rodríguez, I. (2012).