

بررسی فروریزش دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری

موسی عابدینی^۱

الهامه عبادی^۲

احسان قلعه^۳

چکیده

پدیده فروریزش زمین یکی از مخاطراتی است که در طی سال‌های اخیر در بسیاری از مناطق رخ داده و معضلات زیادی را برای زمین‌های کشاورزی، مناطق مسکونی و جاده‌ها را در برخی از دشتهای کشور به وجود آورده است. دشت ماهیدشت واقع در استان کرمانشاه یکی از این مناطق می‌باشد که در طی سال‌های گذشته برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در این دشت روند صعودی داشته است. بنابراین هدف از این پژوهش برآورد میزان فروریزش در دشت ماهیدشت می‌باشد. در این تحقیق جهت تعیین میزان افت سطح آب زیرزمینی و تهیه نقشه از نرم‌افزار GS^+ و GIS و نیز مدل‌های مختلف روش کریجینگ (روش زمین آمار) استفاده شد. همچنین به منظور تعیین محدوده تحت تأثیر و نهایتاً برآورد میزان فروریزش دشت از روش تداخل سنجی راداری به عنوان روشی قابل اطمینان و با دقت بسیار بالا، پوشش وسیع و توان تفکیک مکانی بالا استفاده گردید. نتایج نشان داد که بیشترین نرخ فروریزش در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۰، ۱۵ سانتی‌متر محاسبه گردید که این مقدار به سمت غرب و مرکز دشت کاهش یافته به صورتی که در قسمت غرب دشت، کمترین مقدار فروریزش مشاهده می‌گردد. همچنین با توجه به نقشه‌های استخراج شده از پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی، عمق آب زیرزمینی در دشت ماهیدشت از حداکثر ۲۱/۶۲ متر در سال ۲۰۱۵ تا حداکثر ۲۳/۹۰ متر در سال ۲۰۲۰ متفاوت است. به طوری که میزان افت آب‌های زیرزمینی در طی سال‌های مطالعاتی (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰)، به ۲/۲۸ متر رسیده است که پیامد این افت سطح آب زیرزمینی منجر به ایجاد فروریزش در منطقه گردیده است.

واژگان کلیدی: آب‌های زیرزمینی، تداخل سنجی راداری، دشت ماهیدشت کرمانشاه، فروریزش

مقدمه

فروریزش زمین عبارت است از فروریزش ناگهانی یا تدریجی سطح زمین به سمت پایین که با جابجایی‌های ناچیز افقی نیز همراه باشد. عامل این پدیده را می‌توان به فعالیت‌های انسانی از جمله برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و فعالیت‌های طبیعی مانند زمین‌لرزه نسبت داد (گیو و همکاران^۴، ۲۰۱۶: ۹۱۵). فروریزش همچنین یکی از مخاطرات اصلی زمین‌شناسی منطقه‌ای محسوب می‌شود که باعث ایجاد خسارت‌های جدی به ساختمان‌ها، راه‌های ارتباطی، زیرساخت‌ها و پل‌ها می‌شود (پل‌اند، ۱۹۸۲: ۲۴۰). طبق تعریف سازمان زمین‌شناسی آمریکا، فروریزش زمین، شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین می‌باشد که می‌تواند دارای بردار جابجایی اندکی باشد. هر چند رخداد پدیده فروریزش از فرکانس و توالی به نسبت زیادی برخوردار است، به واسطه‌ی حرکت بسیار کند و بطئی زمین در اغلب مواقع درک و اندازه‌گیری آن به درستی میسر نمی‌باشد (خورشیددوست و همکاران، ۱۳۹۶: ۸۲). به همین منظور، وقوع این پدیده

^۱ استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (نویسنده مسئول)

Email : abedini@uma.ac.ir-Tel: 09143555226

^۲ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۳ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

در اغلب مناطق فقط زمانی شناسایی می‌شود که در مرفولوژی سطحی و به ویژه تأسیسات و تجهیزات انسانی تأثیرگذار باشد و موجب تخریب و خسارت زیادی گردد (شریفی‌کیا، ۱۳۹۰: ۸۶). در ایران پدیده فرونشست زمین سابقه بیش از چند دهه دارد. به علت شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های بیش از حد صنعتی، کشاورزی و مصارف آب شرب بر منابع آب زیرزمینی، بستر مناسبی را برای وقوع پدیده فرونشست به وجود آورده است (امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۲: ۲). علاوه بر عوامل موثر ذکر شده در رخداد پدیده فرونشست، بهره‌برداری غیراصولی از منابع نفت و گاز در نواحی از جنوب غرب کشور و همچنین بهره‌برداری بیش از حد منابع آب زیرزمینی عامل به وجود آمدن پدیده فرونشست بوده است (محمدی، ۱۳۸۹). بنابراین شناسایی و رصد پدیده فرونشست یکی از مسائل مهم و امر حیاتی برای حفظ پایداری این مناطق است. به این منظور، پژوهشگران برای مطالعه و رصد این پدیده از روش‌های گوناگونی استفاده می‌کنند که آنها را بر اساس موقعیت ابزارهای مورد استفاده، به سه دسته روش‌های زیرسطحی^۱، روش‌های زمین‌پایه^۲، و روش‌های سنجش از دور^۳، تقسیم می‌نمایند (گوتیرز^۴، ۲۰۱۹: ۲۸۳). از مهمترین این روش‌ها، روش‌های سنجش از دور می‌باشد که با استفاده از ماهواره‌ها، هواپیما یا وسایل نقلیه بدون سرنشین و بالن، داده‌ها را از هوا یا فضا گردآوری می‌کنند. روش تداخل‌سنجی راداری یا InSAR به عنوان یکی از روش‌های پردازش تصاویر راداری در سنجش از دور فعال، یکی از دقیق‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌هایی است که امکان آشکارسازی و تشخیص اختلاف ارتفاع‌های ایجاد شده در سطح زمین را در کوتاه‌ترین زمان و برای مناطق بزرگ را فراهم می‌کند (اسلان و همکاران، ۲۰۱۸: ۸۲). همچنین تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی داده‌های راداری دارای مزیت‌ها و ویژگی‌های منحصر به فردی نسبت به تمامی روش‌ها می‌باشد، که می‌توان به وسعت زیاد منطقه‌ای که مورد بررسی قرار می‌دهد، مدت زمان بسیار کمی که نسبت به سایر روش‌ها اندازه‌گیری مورد نیاز است و به دقت خوب آن اشاره کرد (چترجی^۵، ۲۰۰۶: ۱۷۸). به خاطر اهمیت موضوع پدیده فرونشست، مقالات متعددی در ارتباط با این موضوع توسط پژوهشگران داخلی و خارجی به رشته تحریر درآمده است که چند مورد از آنها عبارت‌اند از:

شریفی‌کیا (۱۳۹۱)، در موضوعی با عنوان تعیین میزان فرونشست زمین به کمک تداخل‌سنجی راداری در دشت نومق و بهرمان، میزان فرونشست به دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری در دشت نومق - بهرمان واقع در استان کرمان را با تغییرات تراز آبی مستخرج از چاه‌های پیژومتری مقایسه نموده و پی به ارتباط عددی بین آنها برده است. نرخ و محدوده فرونشست در دشت رفسنجان با پردازش تصاویر ماهواره‌های ALOS, ENVISAT, Sentinel 1 S1 در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ محاسبه شده است. دهقانی (۱۳۹۴)، در پژوهشی با عنوان ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل‌سنجی راداری به منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی، فرونشست‌های ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در مشهد را با استفاده از تصاویر ENVISAT ASAR در طول زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ مورد بررسی قرار داد. طبق این بررسی، بیشترین مقدار فرونشست زمین در منطقه ۲۳ سانتی‌متر در سال و روند مکانی فرونشست در جهت شمال - غرب و جنوب - شرق تشخیص داده شد. حاجب و همکاران (۱۳۹۷)، نیز در تحقیقی با عنوان بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی، میزان فرونشست سالانه را دشت‌های جعفرآباد و قنات استان قم را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از تغییرات تراز آب چاه‌های پیژومتری و مشاهده نمودارهای هیدروگراف واحد دشت‌ها، به این نتیجه رسیدند که بین میزان فرونشست در منطقه و برداشت از آب‌های زیرزمینی ارتباط وجود دارد. احمدی و همکاران (۱۳۹۷)، به نوشتن تحقیقی با موضوع فرونشست زمین در دشت خرم دره با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداختند و ضمن تأیید مقدار فرونشست در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از لایه‌های کاربری اراضی و چاه‌های منطقه، بیشترین مقدار فرونشست را در جاهایی تشخیص دادند که منطبق بر اراضی کشاورزی و چاه‌های منطقه می‌باشد. آروین و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین در

¹ Subsurface

² Ground Based

³ Remote Sensing

⁴ Gutiérrez

⁵ Chatterjee



جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به این نتیجه رسیدند که در طی سال‌های مطالعاتی، جنوب حوزه آبخیز میناب حدود ۱۳ سانتی‌متر فرونشست داشته است.

ژئو و همکاران^۱ (۲۰۱۵)، پژوهشی با عنوان بررسی پدیده فرونشست در آبخوان شهر پکن را به رشته تحریر درآوردند. هدف از این مطالعه تعیین کمیت فرونشست زمین در طول دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و درک روند این پدیده و بررسی رابطه آن با عوامل محرک در منطقه بود که با جمع‌آوری داده‌های منابع آب و بررسی سطح آب‌های زیرزمینی و همچنین بررسی ضخامت لایه‌های متراکم، انجام گرفت و نتایج نشان داد که فرونشست زمین به طور یکنواخت و به طور مداوم در دوره‌های زمانی مورد مطالعه افزایش یافته است که متوسط فرونشست در طول پایش، ۹۲ میلی‌متر بوده است. در واقع لایه‌های رسی-سیلتی در گسترش فرونشست نقش موثری داشته‌اند. آن^۲ (۲۰۱۵)، در تحقیق خود با عنوان بررسی ارتباط بین فرونشست زمین و افت آب‌های زیرزمینی در دشت شمال چین، نشان داد که میزان افت آب‌های زیرزمینی در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۴ به میزان ۲/۰۳- سانتی‌متر در سال می‌باشد در حالی که تغییرات ارتفاعی فرونشست زمین ۵-۸ سانتی‌متر در سال است و عنوان کرد که الگوهای فضایی افت آب‌های زیرزمینی و فرونشست آن مطابق پیش‌بینی‌ها نیستند. اسمیت و همکاران^۳ (۲۰۱۷)، در تحقیق خود با عنوان برآورد از دست دادن دائمی ذخایر آب زیرزمینی در دره سن ژوآکون کالیفرنیا به این نتیجه رسیدند که اگر آب بیش از حد از آبخوان‌ها استخراج شود، مخصوصاً در نواحی که لایه‌های خاک رس دارند، متراکم شدن لایه‌های خاک به دلیل افت فشار آب باعث ایجاد حالت غیرقابل برگشت می‌شود و توانایی خاک برای حفظ و نفوذ آب از دست می‌رود، از این رو آبخوان ظرفیت دریافت آب خود را به طور دائم از دست می‌دهد. اسمیت و همکاران در تحقیقات خود کاهش حجم آبخوان را ۴۱۴ تا ۷۴۷ میلیون مترمکعب برآورد کردند.

در پژوهش حاضر در نظر است با استفاده از علم سنجش از دور و به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری وضعیت فرونشست در دشت ماهیدشت کرمانشاه و تأثیر نوسانات آب‌های زیرزمینی بر تغییرات سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گیرد.

داده و روش‌ها

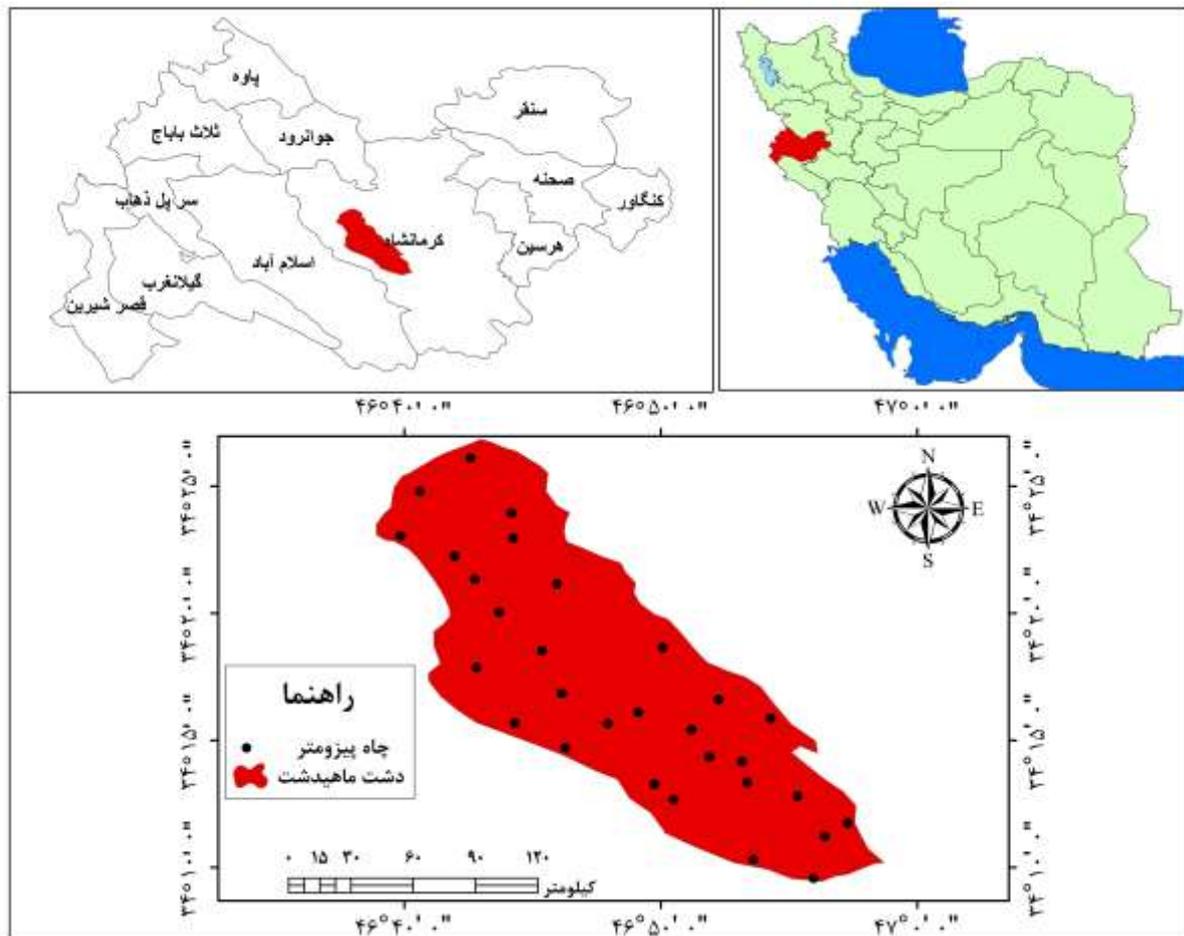
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در غرب ایران قرار گرفته است و یکی از بخش‌های شهرستان کرمانشاه واقع در استان کرمانشاه در ناحیه‌ای بین عرض‌های جغرافیایی ۴۲ درجه و ۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲ دقیقه شرقی واقع شده است. پست‌ترین نقطه ارتفاعی در محدوده مورد مطالعه در مرز شمال شرقی و خروجی دشت با ارتفاع ۱۳۴۰ متر و بلندترین آن در جنوب و ورودی دشت به میزان ۱۴۶۰ متر از سطح دریا واقع شده است. این منطقه از شمال به حومه کرمانشاه مرکزی و از جنوب به بخش سر فیروزآباد و از غرب به شهرستان اسلام‌آباد محدود می‌گردد. مساحت دشت ماهیدشت ۴۵۹ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط دشت برابر ۱۸۰۰ متر می‌باشد (شکل ۱).

¹ Zhu et al

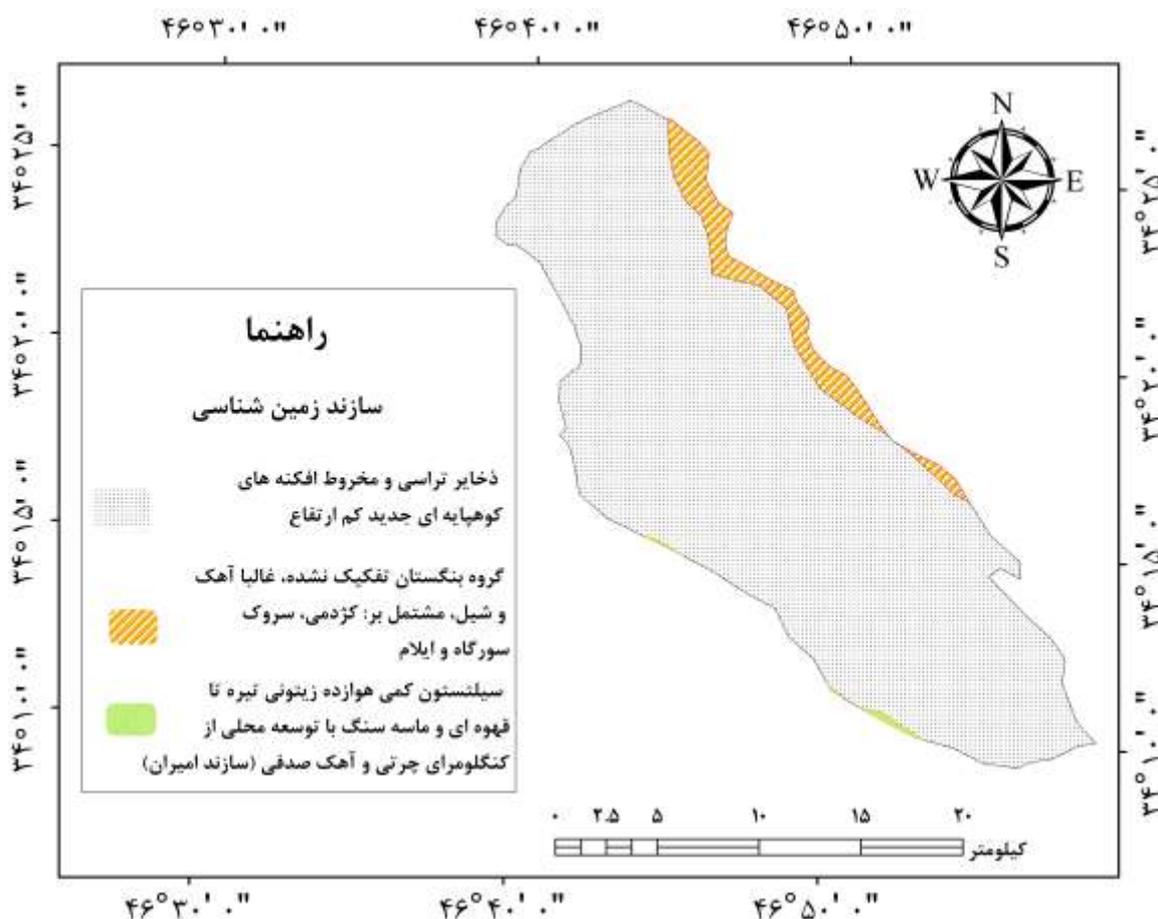
² An

³ Smith et al



شکل (۱). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه ماهیدشت از نظر ساختاری جزو زاگرس محسوب می‌شود. زاگرس به پهنه‌ای از ایران گفته می‌شود که با روند شمال غربی- جنوب شرقی از حوالی مریوان تا تنگه هرمز ادامه یافته است. منطقه زاگرس به علت ساختار قابل توجه زمین‌شناسی و فرآیندهای مختلف زمین‌ساختی همواره مورد توجه زمین‌شناسان و ریخت‌شناسان بوده است. فرارگیری زون‌های فعال تکتونیکی، سازندهای آهکی و ... اهمیت مطالعه این منطقه را افزون‌تر کرده است (آروین و همکاران، ۱۳۹۸). دشت ماهیدشت حاصل رسوبات آبرفتی رودخانه مرگ در یک بستر ناودیسی نسبتاً طولانی و با روند شمال غربی و جنوب شرقی است. ضخامت آبرفت در دشت ماهیدشت از حداقل ۱۰ متر تا حداکثر ۲۰۰ متر آن هم در قسمت‌های مرکزی دشت متغیر است. عناصر تشکیل‌دهنده آبرفت مخلوطی از شن و ماسه به همراه سیلت می‌باشد که بین لایه‌های رسی قرار گرفته است. سنگ کف دشت از نوع سنگ‌های آهکی می‌باشد (مرادی مطلق، ۱۳۸۷) (شکل ۲).



شکل (۲). نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در تحقیق حاضر ارتباط افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست دشت ماهیدشت مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور از داده‌های عمق آب زیرزمینی ۳۰ حلقه چاه پیژومتر در سطح دشت ماهیدشت استفاده شد. به لحاظ زمانی با در نظر گرفتن آمار دقیق و در دسترس، به آمار سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ استناد شد. مراحل انجام تحقیق بدین ترتیب بود که پس از آماده‌سازی آمار چاه‌های پیژومتری جهت برطرف کردن نواقص موجود در داده‌های مطالعاتی از روش بازسازی داده‌ها استفاده گردید. روش بازسازی استفاده شده که صرفاً برای برطرف کردن نواقص در داده‌ها استفاده شد، روش میان‌یابی می‌باشد که توسط نرم‌افزار Neural Power (بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی) انجام گرفت. جهت نرمال سازی داده‌ها از تبدیل‌های لگاریتمی در نرم‌افزار SPSS 16 استفاده شد و از نرم‌افزار GS+ برای تحلیل‌های زمین آماری استفاده گردید. مطالعات تداخل‌سنجی راداری در این تحقیق توسط تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و از باند C گرفته شده است. از مهمترین محدودیت‌های بکارگیری از تصاویری راداری به خصوص تصاویر سنتینل ۱ توزیع نامناسب داده‌ها به لحاظ زمانی است. بنابراین در این مطالعه از داده‌های ماهواره سنتینل ۱ در نوار C استفاده گردید. با استفاده از پردازش تصاویر با افزونه SARscape 5.2 در پلتفرم نرم‌افزار ENVI 5.3 و به کارگیری روش تداخل‌سنجی، مناطق در معرض فرونشست و میزان فرونشست در هر یک از مناطق تعیین شد.

روش تداخل سنجی راداری (InSAR) امکان تولید مدل رقومی ناهمواری‌های زمین را فراهم می‌آورد که دقت ارتفاع بهینه آن برای داده‌های نوار C با طول موج ۵/۶ سانتی‌متر حدود پنج متر است (چترجی و همکاران^۱، ۲۰۰۶). این روش را برای اولین بار گولدشتاین و زبکر در سال ۱۹۸۹ ارائه کردند. این اصطلاح به روش اندازه‌گیری پاره‌ای پارامترها از قبیل توپوگرافی، تغییرات و جابجایی سطح زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصاویر راداری با روزه مجازی (SAR) اخذ شده از منطقه مشابه اطلاق شده است. این روش قادر است با استفاده از دست کم دو تصویر DEM یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت‌های میلی‌متری آشکارسازی می‌کند. سنجنده تصویر نخست (Master) این فضا را در T0 ثبت و مقدار فاز را (Φ_m) آن را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار نشست عبارت‌اند از فاصله P تا P1 که طی زمان مشخصی صورت گرفته است (Dt). برای اندازه‌گیری این مقدار، سنجنده تصویر دومی (Slave) در زمان t و با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز (Φ_m) را برای آن اندازه‌گیری می‌کند. روش تداخل سنجی تفاضلی، تفاضل فاز Φ_s و Φ_m را در فرم تداخل نگار فازی نمایش می‌دهد ($\Delta\Phi_{int}$). در صورت ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده و مقدار آن به کمک رابطه (۱) به دست می‌آید (هوپر^۲، ۲۰۰۶).

$$\Delta\Phi_{int} = 4\pi \frac{SP-MP}{\lambda} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن SP فاز تصویر اول، MP فاز تصویر دوم، عدد پی با مقدار ثابت $3/14$ ، λ طول موج می‌باشد. در اندازه‌گیری مقدار فرونشست در این روش، سطح ناپایدار تصور شده، به طوری که سطح از P به P1 تنزل یافته است. تعیین مقدار نشست در فاصله زمانی دو تصویر (Dt) تابع اختلاف فاز دو تصویر ($\Delta\Phi_{int}$) به همراه فاز به همراه فاز ناشی از توپوگرافی (Φ_{Top}) و فاز ناشی از اتمسفر خواهد (دینگ و همکاران^۳، ۲۰۰۴).

$$\Delta\Phi_{int} = 4\pi \frac{SP-MP}{\lambda} = \Phi_{Top} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این روش در صورت در اختیار نداشتن تصویر سوم به کمک مدل رقومی زمین و تبدیل ارتفاع به فاز یک تداخل نگار مصنوعی تولید می‌شود و از این طریق به کمک معکوس اطلاعات DEM اثر فاز ناشی از توپوگرافی محاسبه و از مقادیر اختلاف باقی مانده به اثر جابجایی سطح و اتمسفر تعلق دارد. در نهایت، با نادیده انگاشتن اثر اتمسفر در جابجایی‌های به میزان بالا (چند سانتی‌متر) و یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی اختلاف فاز دو تداخل نگار فقط بیان کننده مقادیر جابجایی سطح (فرونشست) خواهد بود (دنیل و همکاران^۴، ۲۰۰۳). تکنیک مورد استفاده در این پژوهش به منظور تعیین میزان فرونشست، روش تداخل سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر و یا غیر مکرر می‌باشد. از اساسی‌ترین مراحل در پردازش تداخل سنجی راداری انتخاب مناسب زوج تصویر مناسب است که چند عامل همچون فرکانس سنجنده، خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی و همچنین همپوشانی فضایی در راستای حرکت سنجنده در انتخاب زوج تصاویر موثر می‌باشند. در این پژوهش از دو تصویر سنتینل ۱ استفاده شده است و بر مبنای آن محاسبات مربوط به خط مبنای عمودی و دیگر عوامل ذکر شده در انتخاب زوج تصویر انجام شد (جدول ۱).

¹ Chatterjee et al

² Hooper

³ Ding et al

⁴ Daniel et al



جدول (۱). مشخصات تصاویر مورد استفاده ماهواره سنتینل ۱

ردیف	سال	نام	گذر	تصویر فرعی	تصویر اصلی
۱	۲۰۱۵	Sentinel 1	صعودی	S1A_OPER_AUX_20151101	S1A_IW_SLC__1SDV_20151031
۲	۲۰۲۰	Sentinel 1	صعودی	S1A_OPER_AUX_20200127	S1A_IW_SLC__1SDV_20200126

بحث

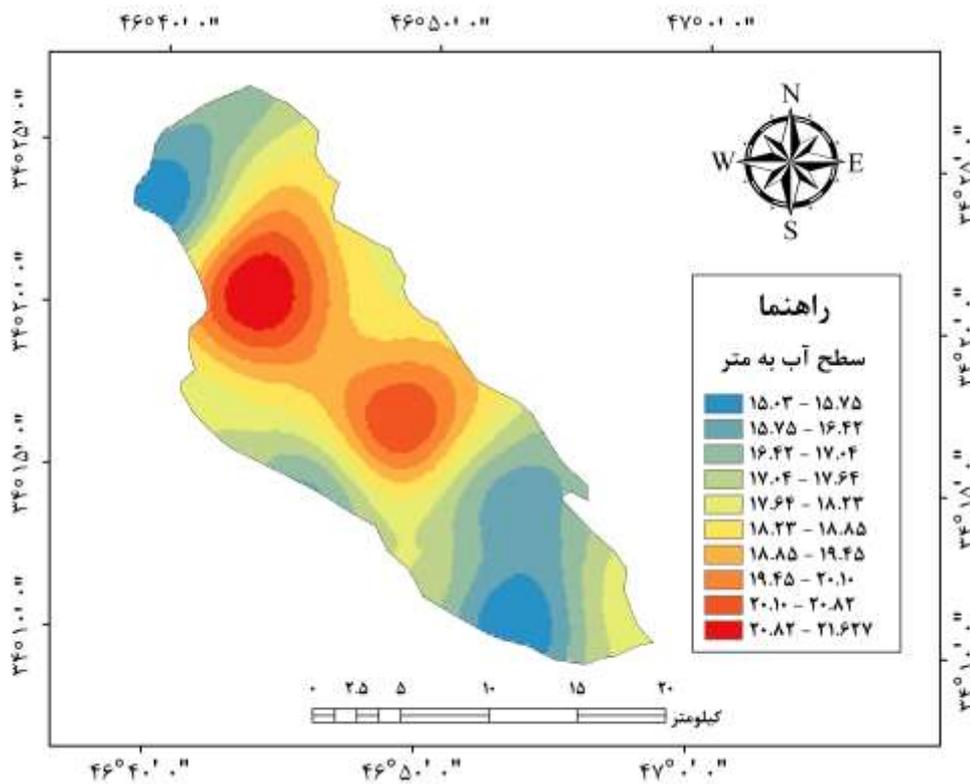
جهت مطالعه فرونشست و پی بردن به علت آن، بررسی نوسانات سطح زمین نقش بسیار مهمی دارد. به همین منظور افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های مورد مطالعه (۱۳۹۴ و ۱۳۹۸)، و ارتباط آن با فرونشست دشت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با استفاده از نرم‌افزار GS^+ مدل‌های مختلف روش کریجینگ مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. از میان روش‌های مختلف مدل کریجینگ، روش گوسی (Gaussian) برای هر دو سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸ به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۸۹ و ۰/۹۸۴ به عنوان بهترین مدل انتخاب شده و با استفاده از این مدل، عمل درون‌یابی برای هر دو سال انجام شد (جدول ۲).

جدول (۲). پارامترهای مربوط به مدل‌های واریوگرامی تراز آب

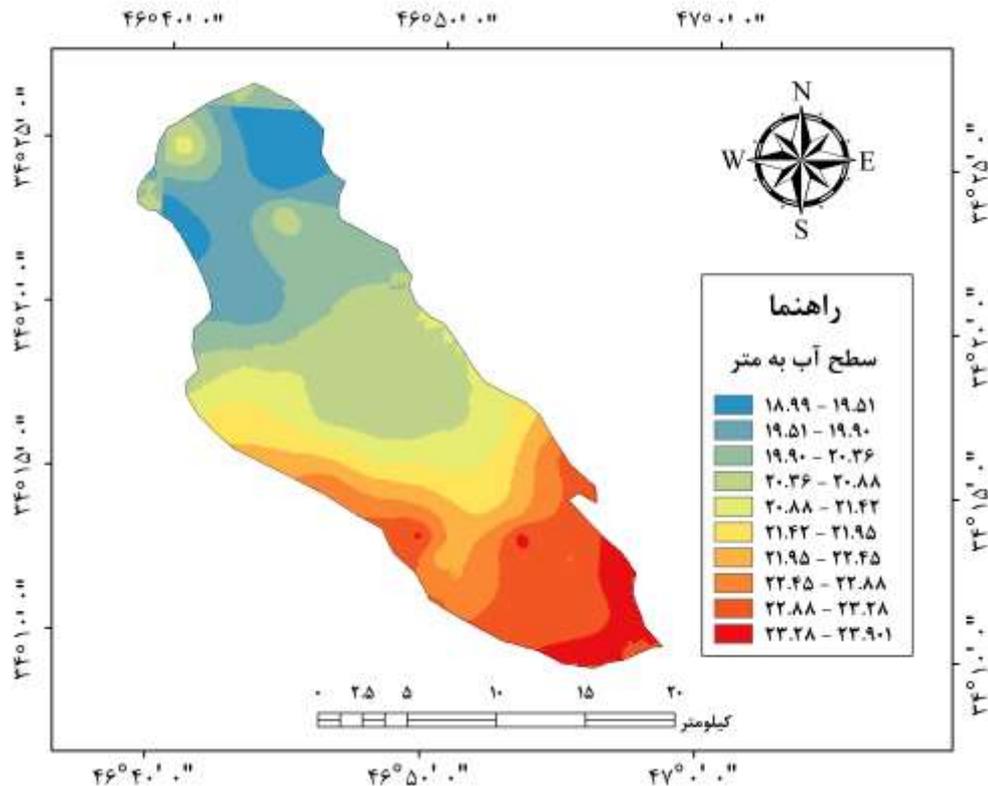
متغیر	سال	مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	دامنه تأثیر	تناسب مکانی	ضریب تبیین	مجموع مربعات باقیمانده
تراز آب	۱۳۹۴	کروی	۰/۰۳۵	۰/۲۷۸	۶۸۱۰۰	۰/۸۷۳	۰/۹۷۴	۵/۲۶۱
		نمایی	۰/۰۳۳	۰/۴۷۱	۱۳۳۰۰	۰/۹۳۰	۰/۹۶۷	۶/۷۸۰
		خطی	۰/۰۳۶	۰/۱۸۶	۲۹۵۴۵	۰/۸۰۳	۰/۹۷	۰/۰۸۴
		خطی آستانه‌ای	۰/۰۳۷	۰/۳۵۵	۶۲۶۷۰	۰/۸۹۶	۰/۹۷۶	۴/۱۷
		گوسی	۰/۰۵۸	۰/۲۷۸	۵۲۷۴۰	۰/۷۸۹	۰/۹۸۹	۲/۱۶۷
	۱۳۹۸	کروی	۰/۰۳۱	۰/۵۱۱	۶۴۵۶۰	۰/۹۳۹	۰/۹۵	۲/۴۱
		نمایی	۰/۰۲۴	۰/۹۲۴	۹۷۰۰	۰/۹۷۴	۰/۹۴۹	۲/۴۹
		خطی	۰/۰۳۵	۰/۳۴۲	۲۹۵۲۹	۰/۸۹۶	۰/۹۴۶	۰/۳۵۶
		خطی آستانه‌ای	۰/۰۳۷	۰/۶۸۵	۶۲۷۰۰	۰/۹۴۶	۰/۹۶۸	۲/۷۳
		گوسی	۰/۰۶۱	۰/۳۵۴	۳۳۰۹۹	۰/۸۲۷	۰/۹۸۴	۱/۳۶۹

به منظور تبیین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی، روند کلی میزان سطح آب سالانه تمام چاه‌های مشاهده‌ای (۳۰ حلقه)، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نقشه‌های درون‌یابی سطح آب‌های زیرزمینی (شکل ۳ و ۴)، عمق آب زیرزمینی در دشت ماهیدشت از حداکثر ۲۱/۶۲ متر واقع در شرق و مرکز منطقه تا حداقل ۱۵ متر در قسمت‌های شمال و جنوب دشت در سال ۱۳۹۳ متغیر است. همچنین در سال ۱۳۹۸ عمق برخورد سطح آب زیرزمینی در دشت ماهیدشت کرمانشاه در قسمت‌های شمالی و شمال غرب حداقل ۱۸/۹۹ متر بوده و در بخش‌های جنوب و جنوب غرب منطقه به حداکثر ۲۳/۹۰ متر می‌رسد. عمق سطح آب در دشت ماهیدشت به سبب عواملی مانند شیب توپوگرافی، تعداد و میزان برداشت چاه‌های بهره‌برداری در نقاط مختلف دشت متفاوت می‌باشد. برداشت بیش از حد و عدم وجود تعادل بین تغذیه لایه‌های آبدار و تخلیه آنها باعث شده که سطح ایستابی در منطقه روند نزولی مداومی را دنبال کند. با خالی شدن آب موجود در حفره‌های لایه آبدار و جابجایی آب این حفره‌ها با هوا، باعث کاهش میزان فشار و تعادل بین لایه‌ها به هم می‌خورد. به دلیل برهم خوردن تعادل بین فشار و وزن لایه‌های فوقانی، در اثر نیروی وزن لایه‌های فوقانی، لایه‌های آبدار فشرده شده و کاهش سطح ایستابی پیدا می‌کند و چون این کاهش سطح با فرونشست رابطه‌ای مستقیم دارد، شاهد افزایش میزان فرونشست در منطقه هستیم. در واقع طبق نقشه‌های عمق آب زیرزمینی و نقشه فرونشست منطقه، توزیع مکانی نواحی دارای فرونشست با مکان‌هایی

که بیشترین کاهش سطح آب زیرزمینی را تجربه کرده‌اند تا حد زیادی مطابق است. توزیع مکانی فرونشست نشان می‌دهد که مقادیر فرونشست در قسمت‌های جنوب منطقه تا ۱۵ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. به همین ترتیب مقادیر افزایش عمق آب زیرزمینی در طول سال‌های مطالعاتی (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸)، به بیشترین میزان خود (۲۳/۹۰ متر) در سال ۱۳۹۸ در قسمت‌های جنوبی دشت ماهیدشت رسیده است. این موضوع نشان دهنده ارتباط مستقیم توزیع فضایی و شدت فرونشست با تغییرات آب زیرزمینی در دشت ماهیدشت کرمانشاه می‌باشد. در واقع بر اساس اطلاعات به دست آمده از نقشه فرونشست دشت ماهیدشت مشخص شد که در دوره مطالعه شده میزان فرونشست قابل توجهی را شاهد هستیم و مقایسه آن با اطلاعات به دست آمده از چاه‌های منطقه نشان می‌دهد که در طی سال‌های مطالعاتی (۲۰۱۵-۲۰۲۰)، سطح ایستابی چاه‌ها دارای روندی نزولی بوده و مقدار افت ۲ متر را در سال‌های مطالعاتی شاهد بودیم. اطلاعات به دست آمده درباره میزان و دامنه فرونشست و مقایسه آن با داده‌های به دست آمده از سطح ایستابی، پدیده فرونشست را تأیید می‌کند و بیان می‌دارد که کاهش سطح ایستابی در منطقه دلیل اصلی فرونشست است.



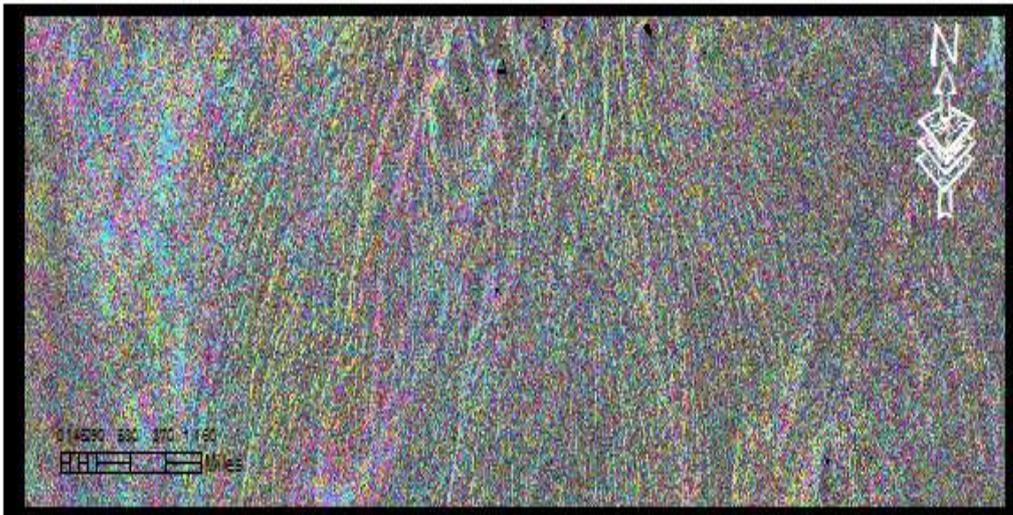
شکل (۳). نقشه درونیابی آب‌های زیرزمینی سال ۱۳۹۴



شکل (۴). نقشه درون‌یابی آب‌های زیرزمینی سال ۱۳۹۸

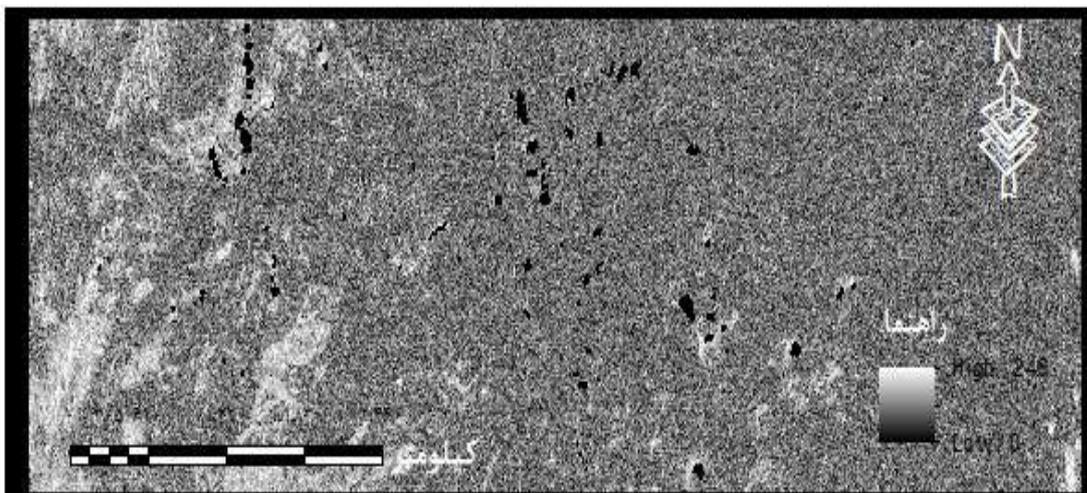
دشت ماهیدشت از مهمترین دشتهای کشاورزی استان کرمانشاه و کشور بوده و دارای تأسیسات قابل توجه صنعتی و تمرکز نسبتاً بالایی جمعیت می‌باشد و منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین آب بوده است. همچنین به علت شرایط آب و هوایی دشت، نوسانات اقلیمی و از طرف دیگر کاهش میزان آب سطحی یا خشک شدن آن در بعضی از فصول سال و برداشت بی‌رویه و بیش از ظرفیت از چاه آب و همچنین زمان نامناسب بارش برای کشاورزی باعث شده تا آب‌های زیرزمینی منطقه مورد توجه زیادی قرار بگیرد؛ به طوری که منبع اصلی تأمین آب این دشت را تشکیل می‌دهد. همین بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث شده است که هر دوره نسبت به دوره قبل سطح ایستابی چاه‌ها افت پیدا کند. نتیجه کاهش میزان سطح ایستابی کاهش فشار در لایه‌های آبدار و فشرده شدن این لایه‌ها در اثر نیروی وزن دار شده به وسیله‌ی لایه‌های فوقانی است. همین عامل باعث گردیده که محدوده مطالعاتی در اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در طی سال‌های مطالعاتی در حال فرونشست باشد. در سال‌های اخیر، پدیده فرونشست زمین در دشتهای زیادی از نقاط خشک و نیمه‌خشک ایران مرکزی و شرق ایران همراه با افت ممتد سطح آب زیرزمینی گزارش شده است و به عنوان یک بحران جدی در بسیاری از دشتهای کشور تبدیل شده است. به طوری که در حال حاضر دشتهای کشور که با این پدیده روبرو هستند به بالای ۲۰۰ مورد می‌رسد. بنابراین به خاطر اهمیت پدیده فرونشست، تحقیقات مشابهی توسط محققان به رشته تحریر درآمده است که از جمله: صفاری و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار به این نتیجه رسیدند که روند تغییرات ناشی از برداشت آب حدود ۵ تا ۱۵ سانتی مترمربع می‌باشد. میزان افت ۲۲ متر طی ۱۲ سال می‌باشد. صالحی و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که سطح زمین در محدوده خطر در نتیجه افت سطح ایستابی با سرعت ثابت در حال فرونشست است. پرهیزکار و همکاران (۱۳۹۴)، اقدام به بررسی پیش‌بینی افت سطح آب و ارزیابی فرونشست زمین در آبخوان دامغان با ترکیب مدل‌های جی‌ام‌اس و جی‌آی نمودند. نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که با افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۹۵ سانتیمتر و ۳۴۳ سانتیمتر، نشست زمین به ترتیب به میزان ۴/۳۵ و ۴/۳۹ سانتیمتر خواهد بود.

پس از اطمینان از درست بودن دو تصویر، فاز حاصل از دو تصویر SLC نسبت به هم تفاضل یافته، در نتیجه تداخل نگار تولید می‌شود (شکل ۵). با توجه به قدرت تفکیک متفاوت این سنجنده در امتداد برد و آزیموت و یک نگاه در جهت برد بر پایه رابطه ریاضی تعریف شده به منظور اصلاح جابجایی طیفی و اثر داپلر منظور شد. به دلیل اثرات تجمعی نویزهای موثر، تداخل نگارهای حاصل، فاقد هرگونه تعبیر و تفسیر از لحاظ بصری بوده و تشخیص فاز حاصل از جابجایی نیز مشکل و حتی در مواردی غیرممکن است.



شکل (۵). تداخل نگار حاصل از زوج تصویر ۲۰۱۵ - ۲۰۲۰

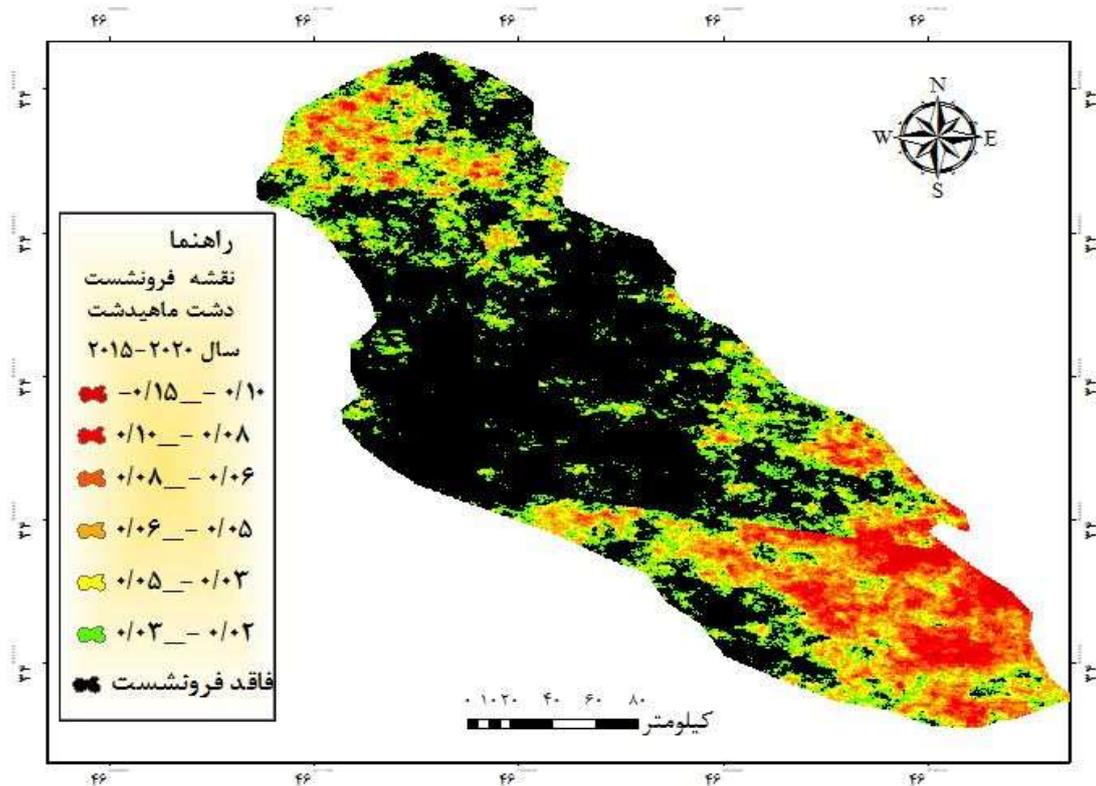
تداخل نگار تفاضلی حاصل از حذف اثرات توپوگرافی در مرحله پیشین حاوی نویزهایی است که در نتیجه اختلاف زمانی یا بازه زمانی دریافت دو تصویر راداری و یا در اثر تفاوت خط مبنای مکانی و همچنین ناشی از لکه‌های فاقد سیگنال پدید آمده، ممکن است باعث پایین آمدن کیفیت تداخل نگار شود. لذا لازم است تا با اجرای فیلترهای تطبیقی اثر نویزها را از روی تداخل نگارها حذف کرد. نتیجه این فرآیند ضمن حذف نویز از فاز مربوط به جابجایی و بهبود کیفیت بصری فرینج‌های تداخل نگار منجر به تولید تصویر همدوس نیز خواهد شد (شکل ۶). این تصویر بیانگر شاخص همبستگی مقادیر توان سیگنالی در دو تصویر اخذ شده در دو زمان متفاوت است که به نوبه خود شاخص مناسبی از کیفیت تداخل و مناسب بودن آن به منظور ادامه فرآیند پردازش تداخل سنجی خواهد بود.



شکل (۶). تصویر همدوسی برای زوج تصویر ۲۰۱۵ - ۲۰۲۰



نقشه خروجی حاصل از مقادیر مثبت، جابجایی مربوط به حرکت زمین به سمت دید راداری (بالا آمدگی) و مقادیر منفی بیانگر دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری (فرونشست) است. شکل ۷ تغییرات شکل زمین (فرونشست) در منطقه ماهیدشت کرمانشاه را که با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری در طول دو دوره زمانی مورد مطالعه (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸) به دست آمده است، نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است دشت ماهیدشت کرمانشاه در طول سال‌های مورد مطالعه، بیشینه فرونشست زمین ۱۵ سانتی‌متر را تجربه کرده است. کمترین میزان فرونشست نیز حداقل ۰/۰۲ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین مقادیر فرونشست در جنوب منطقه بیشتر از قسمت‌های دیگر می‌باشد. که این مقدار به سمت غرب دشت کاهش یافته به طوری که در قسمت غرب و مرکز دشت، کمترین مقدار فرونشست مشاهده می‌گردد. بیشترین میزان فرونشست با رنگ قرمز و حداقل فرونشست با رنگ سبز و قسمت‌هایی که با رنگ سیاه مشخص شده‌اند فاقد فرونشست می‌باشند.



شکل (۷). نقشه میزان فرونشست دشت ماهیدشت (به سانتی‌متر)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر ارتباط افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست دشت ماهیدشت مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی آمار مربوط به عمق چاه‌های مطالعاتی و همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی، افت سطح آب زیرزمینی تأیید می‌کنند. در واقع برداشت بیش از حد و عدم وجود تعادل بین تغذیه لایه‌های آبدار و تخلیه آنها باعث شده که سطح ایستابی در منطقه روند نزولی مداومی را دنبال کند، با خالی شدن آب موجود در حفره‌های لایه آبدار و جابجایی آب این حفره‌ها با هوا، باعث کاهش میزان فشار تعادل بین لایه‌ها به هم می‌خورد. به دلیل بر هم خوردن تعادل بین فشار و وزن لایه‌های فوقانی، در اثر نیروی وزن لایه‌های فوقانی لایه‌های آبدار فشرده شده و کاهش سطح ایستابی افزایش پیدا کند و چون این کاهش سطح با فرونشست رابطه‌ای مستقیم دارد شاهد افزایش میزان فرونشست در

منطقه هستیم. نتایج حاصل از مطالعات تداخل‌سنجی راداری و نقشه فرونشست منطقه، افزایش فرونشست دشت را در طی بازه زمانی مورد مطالعه را تأیید می‌کند و نرخ متوسط فرونشست در منطقه مورد مطالعه را در حدود ۱۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد. به طور خلاصه خروجی این مقاله نشان‌دهنده فرونشست و افت سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه می‌باشد که بیشترین میزان آن در قسمت‌های شرق و جنوب شرقی دشت ماهیدشت دیده می‌شود. به همین منظور جهت مقابله با این معضل زیست‌محیطی توصیه می‌گردد با مدیریت کاربری اراضی در محدوده فرونشست و همچنین نظارت کافی بر استخراج منابع زیرزمینی از روند توسعه فرونشست در منطقه جلوگیری کرد یا حداقل امکان سرعت وقوع این پدیده را به حداقل رساند.



منابع

- آروین، عبدالخالق، وهابزاده کبریا، قربان، موسوی، سیدرمضان، بختیارکیا، مسعود (۱۳۹۸) مدل سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، *مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. ۱۰(۳)، ۱۹-۳۴.
- احمدی، نعیمه، موسوی، زهرا، معصومی، زهره (۱۳۹۷) مطالعه تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن، فصلنامه سنجش ازدور و GIS ایران. ۱۰(۳)، ۳۳-۵۲.
- امیراحمدی، ابوالقاسم، معالی اهری، نسیم، احمدی، طیبه (۱۳۹۲) تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS، *نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی*، ۱۷(۴۶)، ۱-۲۳.
- پرهیزکار، سکینه، اژدری، خلیل، کاظمی، غلامعباس، امام قلیزاده، صمد (۱۳۹۴) پیش بینی افت سطح آب و ارزیابی فرونشست زمین در آبخوان دامغان با ترکیب مدل های جی ام اس و جی ای پی، *مجله علوم دانشگاه تهران*. ۱(۱)، ۸۰-۳۶.
- حاجب، زهرا، موسوی، زهرا، معصومی، زهره، رضایی، ابوالفضل (۱۳۹۷) بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری، *مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*. ۱۸ تا ۲۰ اردیبهشت ماه، انجمن ژئوفیزیک ایران، تهران، ۵۲-۳۵۵.
- خورشیددوست، علی محمد، رزمی، رباب، معالی اهری، نسیم، عباسزاده، کریم (۱۳۹۶) مطالعه تأثیر نوسانات سطح آب زیرزمینی بر پدیده فرونشست در منطقه قلعه (آذربایجان شرقی، تسوج)، *نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی*. ۲۱(۶۰)، ۸۱-۱۰۱.
- دهقانی، مریم (۱۳۹۴) ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب های زیرزمینی، *نشریه مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*. ۲(۲)، ۷۳-۶۱.
- شریفی کیا، محمد (۱۳۹۰) بررسی پیامد ناشی از پدیده فرونشست در اراضی و دشت های مسکون کشور، *مجله علمی و پژوهشی زمین شناسی مهندسی*. ۳(۴ و ۵)، ۴۳-۸۵.
- شریفی کیا، محمد (۱۳۹۱) تعیین میزان فرونشست زمین به کمک تداخل سنجی راداری در دشت نوق و بهرمان، *مجله آمایش و فضا*. ۱۶(۳)، ۷۷-۵۶.
- صفاری، امیر، جعفری، فرهاد، توکل، محمد (۱۳۹۵) پایش و فرونشست زمین و ارتباط آن با آب زیرزمینی مطالعه موردی دشت شهریار و کرج، *پژوهش های ژئومورفولوژی کمی*. ۵(۲)، ۹۳-۸۲.
- صالحی اسفندرانی، رضا، غفوری، محمد، لشکری پور، غلامرضا، دهبان، مریم (۱۳۹۲) بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، *مهندسی آبیاری و آب ایران*. ۳(۱۱)، ۵۷-۴۷.
- علایی طالقانی، محمود. (۱۳۸۴). ژئومورفولوژی ایران. چاپ سوم، انتشارات قومس، تهران.
- محمدی، آرمان. «ارزیابی تراکم مخزن و فرونشست سطح میادین هیدروکربوری با استفاده از روش تداخل سنجی رادار و مدلسازی های ژئومکانیکی: مطالعه موردی میدان نفتی درود»، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، ۱۳۹۸، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- مرادی مطلق، جعفر. «نقش عوامل طبیعی در استقرار و توزیع محوطه های باستانی دشت ماهیدشت»، پایانه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۷، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- Aslan, G., Cakı, Z., Ergintav, S., Lasserre, C., Renard, F. (2018), **Analysis of secular ground motions in Istanbul from a long-term InSAR time-series (1992–2017)**, *Remote Sensing*, 10(3): 408-419.

- Brambati, A., Carbognin, L., Quaia, T., Teatini, P., Tosi, L. (2003), **The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence**, Episodes, 26(3): 264-268.
- Chatterjee, R.S., Fruneau, B., Rudant, J.P., Roy, P.S., Frison, P., Lakhera, R.C., Dadhlwal, V.K., Saha, R. (2006), **Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990 as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique**, Remote Sensing of Environment. 102: 176-185.
- Ding, X.L., Liu, Z.W., Li, Z.L., Chen, Y.Q. (2004), **Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70(10): 1151-1156.
- Daniel, R., C. Maisons, C. Carnec, S. Le Mouelic, C. King and S. Hosford. (2003), **Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement**. Remote Sensing of Environment, 88(4): 468-478.
- Guo, J., Zhou, L., Yao, C., Hu, J. (2016), **Surface subsidence analysis by multi-temporal InSAR and Grace: A case study in Beijing**, Sensors, 16(9): 1495-1503.
- Gutiérrez, F., Benito-Calvo, A., Carbonel, D., Desir, G., Sevil, J., Guerrero, J., Martínez-Fernández, A., Karamplaglidis, T., García-Arnay, Á., Fabregat, I. (2019), **Review on sinkhole monitoring and performance of remediation measures by high precision leveling and terrestrial laser scanner in the salt karst of the Ebro Valley, Spain**, Engineering Geology, 248: 283-308.
- Hooper, A.J., (2006), **Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation**. Remote Sensing of Environment. 112: 126-145.
- Smith, R.G., Knight, R., Chen, J., Reeves, J.A., Zebker, H.A., Farr, T., Liu, Z. (2017), **Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California**, Water Resources Research journal, 53: 2133-2148.
- Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R. (2015), **Land subsidence due to groundwater Withdrawal in the northern Beijing plain China**, Engineering Geology, 193: 243-255.