



بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی دشت سرمشهد

میلا د داوری صارم^۱، مائده روشن لیارجدمه^۲، محمد عباسی^۳

^۱ دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، milad.davari76@ut.ac.ir

^۲ دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، maedeh.roshan.li@ut.ac.ir

^۳ دپارتمان زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گلستان، m.abbasi99@stu.gu.ac.ir

چکیده

رشد جمعیت به همراه گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی باعث افزایش تقاضای آب و برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی گردیده است که از جمله آثار آن پدیده فرونشست می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای بررسی فرونشست زمین وجود داشته ولی امروزه از تکنیک‌های سنجش از دور استفاده می‌شود که ابزاری قدرتمند، ارزان و با دقت مناسب جهت سنجش بزرگ مقیاس و سریع فرونشست می‌باشد. هدف از این پژوهش، اندازه‌گیری میزان فرونشست دشت سرمشهد با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و سنجش اثرات عوامل موثر بر وقوع این پدیده است. در جهت نیل به هدف مذکور، مجموعه داده ماهواره‌ای سنتینل-۱ در مسیر پایین‌رو، در بازه زمانی یکساله به جهت بررسی میزان جابه‌جایی زمین مورد استفاده قرار گرفت. پردازش تصاویر راداری نشان‌دهنده حداقل و حداکثر میزان جابه‌جایی در محدوده به ترتیب ۰/۲۹۳- و ۰/۰۰۳ متر در سال می‌باشد. سپس نوسانات سطح آب آبخوان سرمشهد نیز با استفاده از داده‌های ۱۳ چاه مشاهده‌ای طی بازه زمانی هشت ساله مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی انجام شده حاکی از بیشینه افت ۶.۸۴ متری در شمال محدوده است، بطوری‌که در کل دشت، میانگین سالانه افت ۳۱.۴ سانتی‌متر می‌باشد. نتایج این پژوهش نمایانگر همبستگی خوب بین نقشه‌های فرونشست و افت سطح آب است. همچنین در بررسی صحرایی انجام‌شده در بخش شمالی دشت، فروچاله‌هایی با قطر سه تا هشت متر مشاهده شد که تطابق بسیار خوبی با نقشه فرونشست منطقه دارند. در همین راستا و با توجه به شواهد موجود، دو عامل افت سطح آب زیرزمینی و وجود سنگ‌های کربناته در زیر رسوبات آبرفتی، بیشترین نقش را در وقوع این مخاطره ایفا می‌کنند. از سوی دیگر هم‌مکانی بروز بیشینه افت سطح آب و فروچاله‌ها در بخش شمالی به عنوان ناحیه بحرانی با شهر باستانی غندجان (شهر باستانی مربوط به دوره ساسانیان) زنگ خطری است که اقدامات سریع در خصوص کاهش میزان فرونشست را می‌طلبد.

واژه‌های کلیدی

فرونشست زمین، تداخل سنجی تفاضلی راداری، فروچاله، دشت سرمشهد، شهر باستانی غندجان



۱. مقدمه

به طور عام پوسته زمین به عنوان یک سطح صلب در نظر گرفته می‌شود. اما در واقع، این پوسته از مصالحی تشکیل شده‌است که در برابر تنش‌های وارده از خود کرنش نشان داده و تغییر شکل می‌دهد. فرونشست زمین یک پدیده پیچیده است که از مصداق بارز آن میتوان به فروچاله‌ها اشاره کرد. فروچاله‌ها حفره‌هایی هستند که در سطح زمین‌های آهکی و یا دیگر سنگ‌های انحلال‌پذیر به وجود می‌آیند. از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی، فروچاله فرورفتگی سطح زمین در اشکال بیضی و کروی دارای دیواره‌های با شیب تند در ابعاد به طور متوسط سه تا ده متر است که در اثر گسیختگی لایه‌های سطحی ایجاد می‌شود. این پدیده در سنگ‌های کربناته (آهک و گچ) متداول بوده و شناسایی آن‌ها به دلیل قابل رویت نبودن، کار بسیار سختی است. عوامل طبیعی و انسانی مختلفی از جمله وجود سنگ‌های کربناته و حفرات کارستی در زیر رسوبات آبرفتی، برداشت بی‌رویه و افت سطح ایستایی آب زیرزمینی و وجود لایه‌های رسی در عمق زمین و از بین رفتن چسبندگی آنها بوسیله جذب آب، در ایجاد این پدیده نقش مؤثری دارند. ایران جزء یکی از ۱۰ کشور پرخطر دنیا تلقی می‌شود که به دلیل آسیب پذیری بالا، کمبود زیرساخت‌ها و عدم شناخت مناسب از مناطق پرخطر، سهم شش درصدی از کل تلفات جهان را دارا می‌باشد [1]. با این وجود فروچاله‌ها که به آهستگی و به تدریج در طی زمان گسترش می‌یابند، شاید همانند سایر مخاطرات طبیعی نظیر سیل و زلزله، خسارت‌های ناگهانی و فاجعه‌بار نداشته باشند، ولی به طور معمول خسارت‌های ناشی از وقوع این مخاطره ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب هستند. بروز این مخاطره در نزدیکی ابنیه و راه‌های ارتباطی منجر به تخریب موارد یاد شده می‌گردد. در نتیجه بررسی و ارزیابی مخاطره مذکور قبل از اقدام به احداث هرگونه سازه و یا راه، میبایست انجام پذیرد. در مطالعه فرونشست گام اصلی، تشخیص محدوده و نرخ این پدیده می‌باشد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری فرونشست زمین وجود دارد که به دو دسته، روش‌های مستقیم (GPS¹، InSAR و ابزار تراکم‌سنج) و غیرمستقیم (مدل‌سازی ریاضی و مدل‌های رستر پایه) قابل تقسیم می‌باشند. امروزه برای بررسی فرونشست از روش تداخل‌سنجی راداری به دلیل پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی خوب، دقت بالا، داده‌های به‌روز، نیاز به نیروی انسانی کم، پایین بودن هزینه و سرعت بالا در به دست آوردن نتایج، استفاده می‌شود [2] [3]. در این بین روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR³) امکانی مناسب برای پایش فرونشست به‌شمار می‌رود. در این روش به یک زوج تصویر راداری، تصویر اصلی (Master) و فرعی (Slave) نیاز است تا تداخل نگاشت از کسر پیکسل‌های فاز دو تصویر به دست آید. این دو تصویر در زمان‌های مختلف از یک منطقه مشترک برداشت می‌شوند. مطالعات متعددی در زمینه پایش و بررسی فرونشست سطح زمین در آبخوان‌ها با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی انجام پذیرفته‌است [4] [5]. با این حال، فقدان مطالعات مرتبط با فرونشست زمین در دشت سرمشهد به عنوان یک دشت ممنوعه بحرانی که میانگین سالانه افت سطح آب بیش از ۳۰ سانتی‌متر دارد، احساس می‌شود. همچنین این موضوع بعثت وجود شهر باستانی غنجدان به وسعت تقریبی ۶۰۰ هکتار (در نزدیکی روستای سرمشهد و تل‌سامان) که یکی از شهرهای باستانی ایران مربوط به دوره ساسانیان بوده (حیات آن تا دوران اسلامی نیز ادامه داشته‌است) حائز اهمیت می‌باشد. در همین راستا هدف انجام این پژوهش، تعیین فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه بر اساس روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در طی یک سال آبی (۱۴۰۱-۱۴۰۲) می‌باشد. همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان سرمشهد نیز با استفاده از داده‌های ۱۳ چاه مشاهده‌ای (پیرومتر) بین سال‌های آبی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ مورد بررسی قرار گرفت. در انتها وجود یا عدم وجود ارتباط بین فرونشست و عوامل ایجادکننده آن از قبیل نوسانات سطح آب ارزیابی شده‌است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت سرمشهد با مساحت ۲۰۱.۸۶ کیلومترمربع در محدوده مطالعاتی فراشبند (حوضه آبریز حله که یکی از حوضه‌های آبریز درجه دو حوضه خلیج فارس و دریای عمان به شمار می‌آید) واقع گردیده‌است (شکل ۱). این منطقه از شمال به شهرستان کازرون، از جنوب شرق به شهرستان فراشبند و از غرب به استان بوشهر منتهی می‌شود. از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی در زاگرس چین‌خورده (پهنه فارس بیرونی^۴ و زیر پهنه فارس زیرساحلی^۵) جای گرفته، که از چین‌خوردگی‌های فراوان تاقدیسی و ناودیسی به صورت متناوب با روند شمال غرب-جنوب شرق

¹ Global Positioning System

² Interferometric Synthetic Aperture Radar

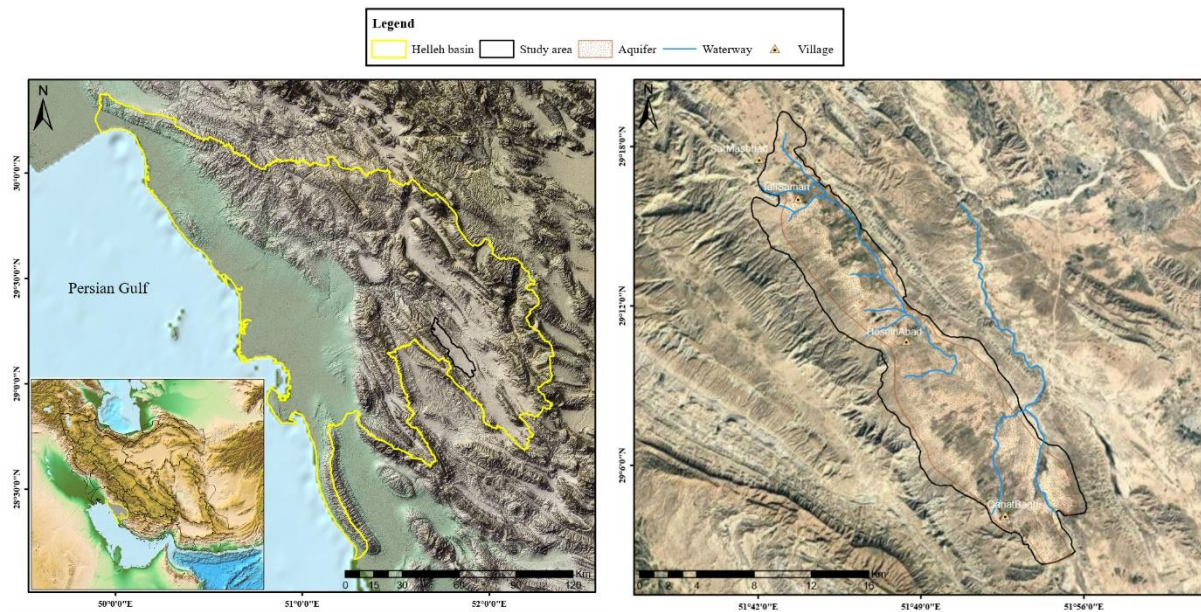
³ Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry

⁴ External Fars

⁵ Sub-Coastal Fars



و تنگه‌های متعددی تشکیل شده‌است. در حال حاضر تنش‌های فشارشی ناشی از بازشدگی دریای سرخ و حرکت صفحه افریقا-عربستان در راستای شمال و یا شمال-شمال شرقی عامل لرزه‌خیزی نسبتاً زیاد ایران بخصوص در زون زاگرس گشته‌است [6]. در پیرامون دشت سازندهای آسماری، گچساران، میشان، آجاجاری و عضو آهک گوری رخنمون دارند. همچنین از لحاظ ساختاری سرمشهد به‌عنوان دشت ناودیسسی، در کنار تاق‌دیس‌های آسان و بزپر قرار دارد. میانگین سالانه دما و بارندگی در محدوده سرمشهد به ترتیب ۲۱.۲ درجه سانتیگراد و ۳۱۱.۸ میلی‌متر محاسبه شده‌است. اصلی‌ترین آبخوان منطقه، آبخوان سرمشهد تلقی می‌گردد که با مساحت ۱۵۱.۸۹ کیلومترمربع، تقریباً کل دشت را دربرمی‌گیرد، این آبخوان با ضخامت متوسط ۳۰ متر و میانگین ضریب ذخیره آن حدود ۳ درصد برآورد شده‌است. در آبخوان مذکور ۱۳ حلقه چاه مشاهده‌ای حفر و تجهیز شده که به طور تقریبی کل آبخوان را پوشش می‌دهد. بر اساس گزارش وزارت نیرو در خصوص دشت‌های ممنوعه کشور، دشت فراشبند (شامل چهار دشت: فراشبند، باچون، سرمشهد و نوجین) بعلت افت سطح آب در شمار محدوده‌های ممنوعه بحرانی لیست شده است [7].



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲.۲. روش کار

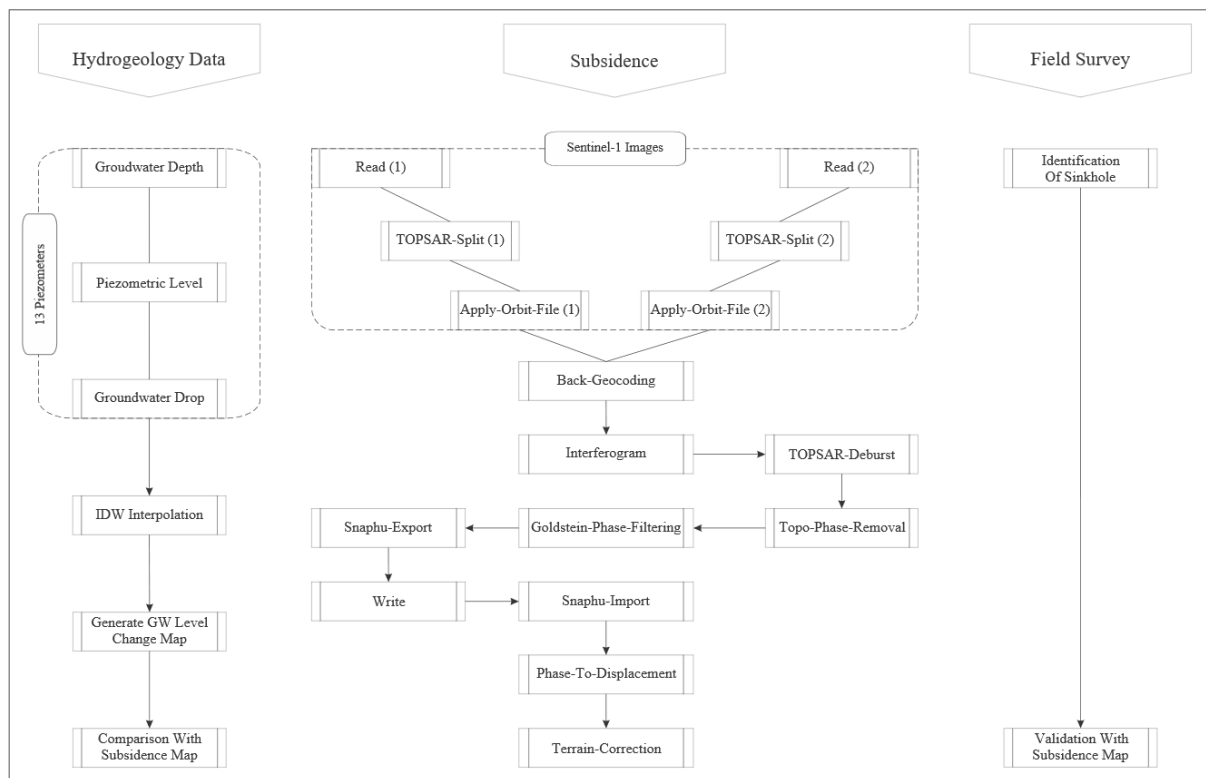
در پژوهش حاضر از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ استفاده شده‌است. ماهواره سنتینل-۱ به روزترین ماهواره راداری آژانس فضایی اروپا بوده که در آوریل ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شد و متشکل از دو ماهواره Sentinel-1A و Sentinel-1B می‌باشد. دو ماهواره مذکور در یک مدار با ارتفاع ۶۹۳ کیلومتری و اختلاف ۱۸۰ درجه از یکدیگر واقع شده‌اند. استفاده از این دو ماهواره، انجام مشاهدات از سطح زمین را در دوره بازه زمانی ۶ روزه، در شرایط مختلف آب و هوایی و بدون محدودیت در طول شبانه روز فراهم کرده‌است. سنجنده راداری ماهواره مذکور SAR-C بوده که در محدوده باند C از امواج رادار فعالیت می‌کند و دارای طول موج ۵/۵۴ سانتی‌متر، فرکانس ۵/۴۰۵ گیگاهرتز می‌باشد. همچنین برداشت داده در حالت‌های مختلف پلاریزاسیون (تک پلاریزاسیون VV یا HH، پلاریزاسیون دوگانه HV+HH یا VH+VH) را فراهم می‌کند. از آنجایی که داده‌های این ماهواره از باند C می‌باشند، این تصاویر در راستای مسیر پرواز ماهواره، محدوده ۱۵۰ کیلومتر و ۲۵۰ کیلومتر در راستای عمود بر مسیر پرواز را با قدرت تفکیک مکانی حدود ۱۰ متر تحت پوشش قرار می‌دهد [8]. روش مورد استفاده تداخل سنجی تفاضلی راداری است که به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و توانایی بدست آوردن اطلاعات از راه دور یک تکنیک مهم جهت اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین می‌باشد. این روش از اختلاف فاز میان دو تصویر گرفته‌شده در دو زمان متفاوت از یک منطقه برای محاسبه تغییرشکل استفاده می‌کند. در این پژوهش جایجایی سطح زمین با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱، از طریق وسایت کوپرنیک [9]



مورد بررسی قرار گرفته است که مشخصات تصاویر در جدول ۱ ذکر شده است. به جهت پردازش تصاویر از نرم افزار ESA-SNAP Desktop 9.0 استفاده شده است که روند اجرای پردازش به منظور برآورد جابجایی سطح زمین در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات تصاویر سنتینل-۱

S1A_IW_SLC_1SDV_20221009T023102_20221009T023129_045359_056C5B_CB68	تصویر ۱ (Master)
S1A_IW_SLC_1SDV_20230805T023105_20230805T023132_049734_05FAFF_E32C	تصویر ۲ (Slave)
۶۹۳ کیلومتر	ارتفاع مداری
C-SAR (C-band Synthetic Aperture Radar)	باند تصویربرداری
IW (Interferometric Wide swath)	حالت تصویربرداری
SLC (Single look Complex)	فرمت تصویربرداری
۵×۲۰ متر	قدرت تفکیک مکانی
VV	نوع قطبش



شکل ۲. فلوجارت روند بررسی فرورفتگی زمین در دشت سرمشهد

پس از انتخاب منطقه مطالعاتی عملیات co-registration انجام شد. در این مرحله تغییر موقعیت هر سلول در تصویر فرعی نسبت به تصویر اصلی بررسی و با محاسبه مجدد دامنه و فاز سلول‌ها، با درون‌یابی برای هر سلول در تصویر فرعی، تصاویر ثبت شده و تصویر فرعی نسبت به تصویر اصلی توجیه می‌گردد. مرحله بعد، تولید اینترفروگرام است که از اختلاف فاز بین دو تصویر SAR و از حاصل ضرب تصویر اول در مزدوج تصویر دوم به دست می‌آید. دامنه اینترفروگرام برابر حاصل ضرب دامنه دو تصویر اولیه و فاز اینترفروگرام برابر اختلاف فاز بین این دو تصویر است که دارای انواع خطاها از جمله، اثر توپوگرافی، خطاهای مداری، جابجایی و اثرات اتمسفری می‌باشد. ضرورت دارد برای محاسبه جابجایی سطح زمین در یک بازه زمانی خطاها حذف شوند. مرحله Deburst مرحله یکپارچه‌سازی تصاویر است. در این مرحله با حذف نویزهای نواری تمام داده‌ها به صورت تصویر واحد به هم می‌پیوندند. در ادامه لازم است در مرحله Topographic Phase Removal و با



استفاده از مدل ارتفاعی رقومی اثرات توپوگرافی را از بین برد، به این منظور از مدل ارتفاعی رقومی (Auto Download) SRTM استفاده شد. در مرحله Goldstein Phase Filtering از فیلتر گلدستاین استفاده می‌گردد. این فیلتر از نوع تطبیقی است که در کاهش نویز فاز موثر می‌باشد، سپس مرحله Phase Unwrapping لحاظ شد تا بتوان فاز اینترفروگرام (که تنها در 2π شناخته شده است) را به ارتفاع توپوگرافی مرتبط کرد و در انتها پس از طی این مراحل نسبت به تعیین میزان جابجایی سطح زمین اقدام می‌شود. همچنین مطابق شکل ۲ در این پژوهش آمار و داده‌های تراز ماهانه سطح آب ۱۳ چاه مشاهده‌ای موجود در محدوده، طی سال‌های آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۰ در نرم‌افزار ESRI ArcGIS Desktop 10.8 و صحت‌سنجی گردید. سپس خطوط هم‌عمق، هم‌تراز و افت سطح آب زیرزمینی در نرم‌افزار ESRI ArcGIS Desktop 10.8 و با استفاده از روش درون یابی فاصله معکوس (IDW^6) ترسیم شد.

۳. نتایج و بحث

در محدوده آبخوان، تعداد ۱۳ حلقه پیزومتر حفاری و تجهیز شده که بر اساس اطلاعات آنها، وضعیت سطح آب زیرزمینی در محدوده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳-الف موقعیت پیزومترهای دشت سرمشهد نمایش داده شده است. با توجه به اطلاعات حاصل از شبکه پیزومتری، نقشه‌های هم‌عمق، هم‌تراز و افت سطح آب در ذیل ارائه شده است.

۱.۳. نقشه هم‌عمق سطح آب

منحنی‌های هم‌عمق سطح آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی سرمشهد در شکل ۳-ب ارائه شده است. در این نقشه منحنی‌های هم‌عمق ۵ تا ۴۰ متر بیانگر نوسانات عمق آب آبخوان آبرفتی سرمشهد است. کمترین عمق سطح آب در پهنه جنوبی آبخوان آبرفتی مشاهده شده و به سمت شمال آبخوان بر عمق آب افزوده می‌شود. با توجه به تمرکز کم چاه بهره‌برداری در پهنه جنوبی آبخوان و عبور سرشاخه رودخانه دالکی از جنوب آبخوان آبرفتی از یک سو و تراکم چاه‌های بهره‌برداری در شمال آبخوان از سوی دیگر، نحوه قرارگیری منحنی‌های هم‌عمق سطح آب زیرزمینی قابل توجیه است.

۲.۳. نقشه هم‌تراز سطح آب

در نقشه تراز آب زیرزمینی (شکل ۳-ج)، منحنی‌های هم‌تراز آب زیرزمینی آبخوان سرمشهد با فاصله ۱۰ متری نشان داده شده است. در این آبخوان آبرفتی منحنی‌های تراز ۷۳۰ تا ۸۲۰ متر رسم شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، جهت عمده جریان از سمت شمال به جنوب آبخوان می‌باشد، که روند کلی آب‌های سطحی منطقه به ویژه سرشاخه رودخانه دالکی را دنبال می‌کند.

۳.۳. نقشه افت سطح آب

افت سطح آب زیرزمینی در فاصله زمانی ۸ ساله در آبخوان آبرفتی سرمشهد از ۱- متر در جنوب آبخوان تا ۶- متر در شمال آبخوان دچار تغییر شده است (شکل ۳-د). بررسی آمار بلندمدت این پیزومترها حاکی از آن است که در دوره آماری ۸ ساله سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط سالانه حدود ۳۱.۴ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. بر اساس اطلاعات موجود بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای شماره ۲ و به میزان ۶.۸۴ متر در شمالی‌ترین بخش آبخوان است که علت این موضوع را میتوان ناشی از قرارگرفتن در بالادست جریان آب زیرزمینی و در کانون منطقه پرتراکم چاه‌های بهره‌برداری دانست (جدول ۲). همچنین بر اساس این جدول کمترین افت مربوط به چاه مشاهده‌ای شماره ۱۳ واقع در بخش جنوب آبخوان می‌باشد که دلایل عمده افت کم در این محل ناشی از تغییرات تمرکز چاه‌های بهره‌برداری، وجود تغذیه‌کننده‌های سطحی و مجاورت با سازند آهکی (احتمالاً ارتباط هیدرولیکی سازند و آبرفت در این ناحیه برقرار است) می‌باشد. شکل ۴ تغییرات عمق سطح آب در گذر زمان را در چهار پیزومتر شمال غرب تل‌سامان، شمال غرب تل‌نقاره، جنوب شرق تل‌نقاره و شمال غرب جاده بزپر نشان می‌دهد.

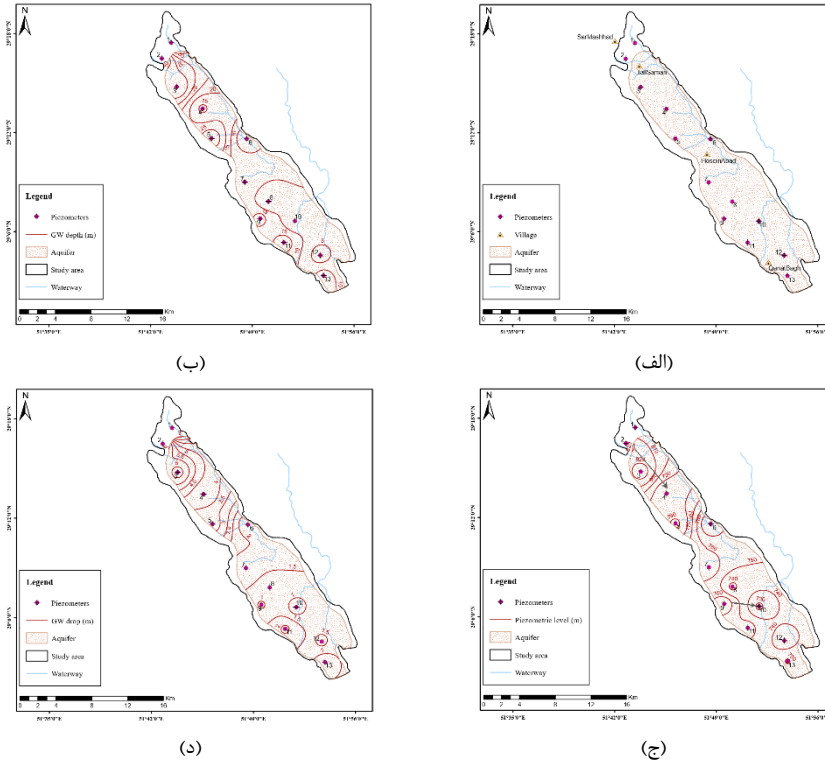
۴.۳. نقشه فرونشست

در شکل ۵ نقشه نرخ جابجایی با روش DInSAR در محدوده دشت سرمشهد نمایش داده شده است. بر این اساس، در این محدوده حداکثر میزان فرونشست و بالآمدگی به ترتیب ۰/۲۹۳- و ۰/۰۰۳+ متر در سال می‌باشد. بخش شرقی محدوده میزان فرونشست کمتری را نسبت به

⁶ Inverse Distance Weighting



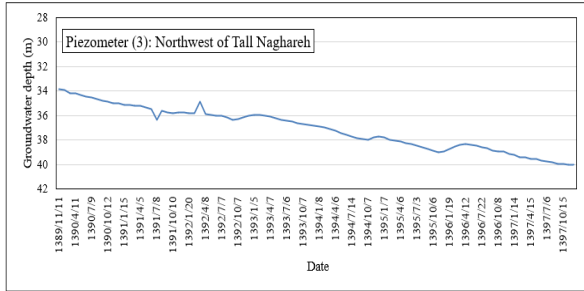
بخش غربی دارا می باشد. عمده فرونشست بخش جنوبی ناشی از وجود زمین های کشاورزی گسترده قلمداد می شود. ولی در بخش شمالی دشت با وجود کاهش چشمگیر زمین های کشاورزی، میزان فرونشست کاهش پیدا نکرده است، عمده دلیل این مسئله از مقایسه دو نقشه ی افت سطح آب و فرونشست فهم می شود. در واقع فرونشست ناحیه شمالی را میتوان با افت سطح آب مرتبط دانست. همچنین از میان روستاهای واقع در دشت سرمشهد، وضعیت فرونشست روستای قنات باغ بحرانی تر است.



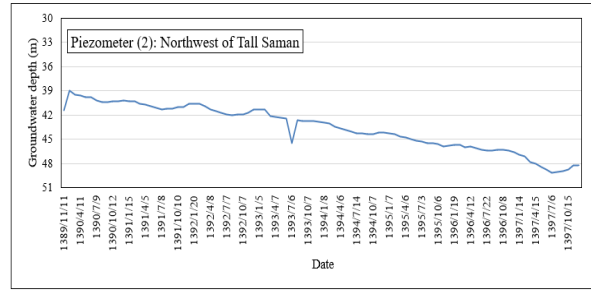
شکل ۳. الف) نمایش موقعیت پیزومترها؛ و نقشه های ب) هم عمق، ج) هم تراز؛ و د) افت، سطح آب زیرزمینی در آبخوان سرمشهد

جدول ۲. داده های آماری چاه های مشاهده ای واقع در دشت سرمشهد

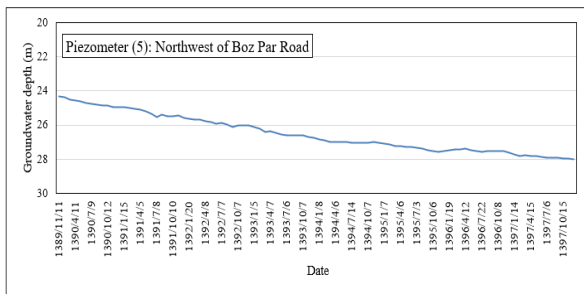
شماره	پیزومتر	عمق سطح آب (متر)		افت سطح آب (متر)		هم تراز سطح آب (متر)
		۱۳۹۰	۱۳۹۸	سالانه	مجموع	
۱	جاده سرمشهد-دادین	۹.۸۳	۱۰.۷۷	۰.۱۲	۰.۹۴	۷۹۸.۹۷
۲	شمال غرب تل سامان	۴۱.۴۱	۴۸.۲۵	۰.۸۶	۶.۸۴	۸۲۶.۷۶
۳	شمال غرب تل نقاره	۳۳.۸۷	۴۰.۰۳	۰.۷۷	۶.۱۶	۸۲۴.۲۸
۴	جنوب شرق تل نقاره	۱۰	۱۴.۳۸	۰.۵۵	۴.۳۸	۷۸۲.۵۷
۵	شمال غرب جاده بزیر	۲۴.۳۳	۲۷.۹۸	۰.۴۶	۳.۶۵	۷۹۱.۲۶
۶	جاده حسین آباد جره	۴.۴۶	۶.۱۳	۰.۲۱	۱.۶۷	۷۴۰.۸۰
۷	بورد تیمور	۱۰.۳۳	۱۲.۱۰	۰.۲۲	۱.۷۷	۷۶۴.۵۵
۸	امامزاده	۳.۷۶	۵.۰۲	۰.۱۶	۱.۲۶	۷۳۸.۵۳
۹	همتالو	۱۵.۳۴	۱۶.۳۰	۰.۱۲	۰.۹۶	۷۶۶.۷۷
۱۰	گل مخک	۵.۰۷	۵.۸۵	۰.۱۰	۰.۷۸	۷۲۸.۷۵
۱۱	شمال قنات باغ	۱۵.۲۱	۱۷.۲۷	۰.۲۶	۲.۰۶	۷۵۲.۴۳
۱۲	جاده گاز	۰.۹۶	۲.۵۱	۰.۱۹	۱.۵۵	۷۳۴.۰۱
۱۳	جاده قنات باغ	۱۰.۳۳	۱۱.۰۱	۰.۰۹	۰.۶۸	۷۵۰.۲۰



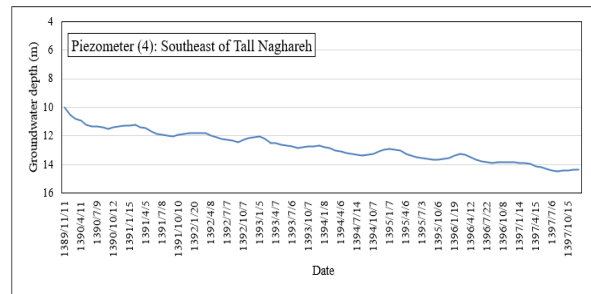
(ب)



(الف)



(د)

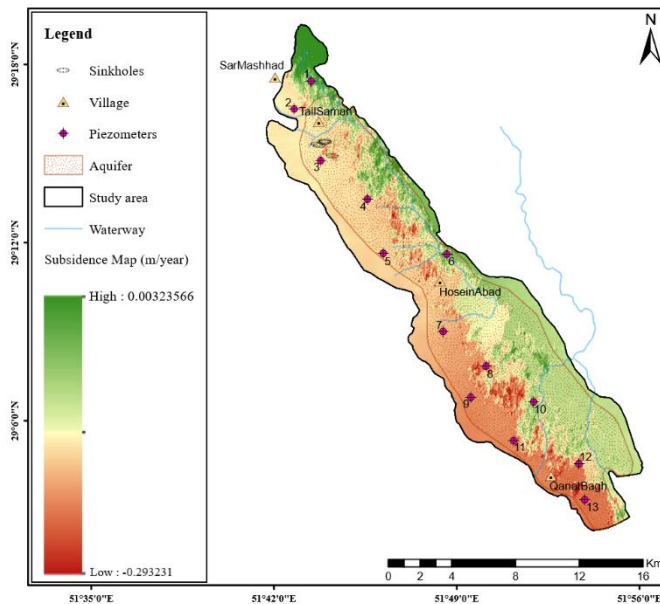


(ج)

شکل ۴. هیدروگراف پیزومترهای؛ الف) شمال غرب تل سامان ب) شمال غرب تل نقره ج) جنوب شرق تل نقره د) شمال غرب جاده بزیر

۵.۳. بررسی صحرائی

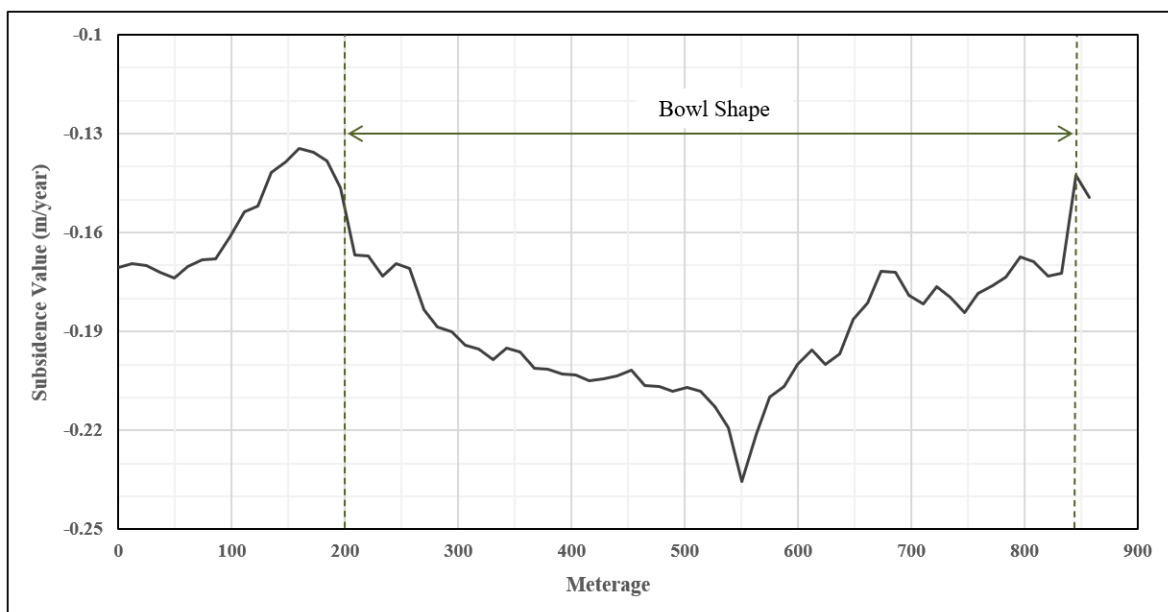
در بازدیدهای میدانی به عمل آمده از بخش شمالی آبرفت سرمشهد، فروچاله‌های متعددی رویت شد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، قطر حفرات ایجاد شده از سه تا هشت متر متغیر بوده‌است. همچنین عمق تقریبی تا ۱۰ متر برای آنها قابل تصور است. نکته حائز اهمیت تطابق پراکندگی فروچاله‌ها با نقشه‌های فرونشست و افت سطح آب می‌باشد. از اینرو مطابق شکل ۷ نیمرخ (Profile) تغییرات فرونشست زمین در راستای فروچاله‌ها (جنوب غرب-شمال شرق) ترسیم شده‌است. نمودار مذکور حاکی از کاسه‌ای شکل بودن فرونشست زمین می‌باشد.



شکل ۵. نقشه فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی



شکل ۶. فروچاله‌های شناسایی شده در بخش شمالی محدوده



شکل ۷. نیمرخ میزان جابجایی در راستای جنوب‌غرب-شمال‌شرق فروچاله‌ها



۴. نتیجه گیری

ارزیابی صورت گرفته در خصوص میزان فرونشست دشت سرمشهد نشان می دهد که دو عامل افت سطح آب زیرزمینی و وجود سنگ های کربناته در زیر رسوبات آبرفتی، بیشترین نقش را در رخداد این مخاطره ایفا می کنند. آب زیرزمینی در بیشتر نقاط ایران، به دلیل قرار گرفتن در شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک جهانی، توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارش و کمبود منابع آب سطحی از مهمترین منابع تأمین کننده نیاز بخش های شرب، کشاورزی و صنعت می باشد. این موضوع باعث افزایش تقاضای آب و استفاده بیشتر از منابع آب زیرزمینی گردیده است، به نحوی که آب زیرزمینی قابل شرب در بسیاری مناطق، جهت سایر مصارف استفاده شده و با کمبود و افت شدید منابع آب زیرزمینی مواجه شده ایم. در این پژوهش بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در بخش شمالی آبخوان سرمشهد در بازه زمانی ۸ ساله (۱۳۹۸-۱۳۹۰) به میزان ۶.۸۴ متر تعیین گردید. عمده ترین علت این بیشینه افت، کاهش میزان نزولات جوی و برداشت از آب های زیرزمینی (تأثیر خشکسالی های اخیر و کاهش تغذیه آبخوان) می باشد. همچنین علت اختلاف در نوسانات سطح آب در بخش های شمالی و جنوبی آبخوان را میتوان علاوه بر ازدیاد برداشت به نفوذپذیری سازندها نیز ارتباط داد، به طوری که در جنوب آبخوان سازند آسماری و بختیاری رخنمون دارند که از نفوذپذیری مناسبی برخوردار هستند و احتمالاً ارتباط هیدرولیکی سازند و آبرفت در این ناحیه برقرار است. در شرق منطقه نیز سازند گچساران رخنمون دارد که از نفوذپذیری مناسبی برخوردار نیست. وقتی سطح آب افت می کند، تنش مؤثر در اثر از بین رفتن حالت شناوری بر روی سقف حفرات، افزایش می یابد. این افزایش تنش می تواند باعث فشار بیشتر به سقف غار و در نتیجه ریزش آن و ایجاد فروچاله در زمانی زودتر از وضعیتی گردد که افت سطح آب در آن وجود ندارد. با توجه به هم مکانی شهر باستانی غندجان با بیشینه افت و وجود فروچاله ها در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه، اقدام سریع دستگاه های مسئول امری انکارناپذیر است. متأسفانه ممکن است در صورت غفلت، سایت باستانی غندجان که تاکنون مطالعات جامع و اکتشافات باستان شناسی در آن انجام نگرفته، از بین برود. از راهکارهای متداول این موضوع با نگرش به ارزیابی انجام شده، میتوان به نظارت بر مصرف و بهره برداری از چاه های آب اشاره کرد. در همین راستا به منظور تدقیق بررسی های صورت گرفته، موارد ذیل برای پژوهش های آتی پیشنهاد می شود:

- ۱- بررسی و ارزیابی میزان فرونشست زمین در محدوده دشت سرمشهد با استفاده از روش SBAS⁷ در بازه زمانی چندین ساله
- ۲- بررسی بسیار دقیق مشخصات و پارامترهای ژئوتکنیکی منطقه (انجام آزمون های آزمایشگاهی، صحرایی و حفاری تعدادی گمانه)
- ۳- انجام ترازبایی دقیق منطقه در دوره های زمانی مختلف، با هدف تعیین میزان فرونشست و استفاده از آن جهت صحت سنجی نتایج
- ۴- ارزیابی داده چاه های مشاهده ای در بازه زمانی بلند مدت تر
- ۵- بررسی صحرایی به منظور تکمیل فهرست فروچاله های موجود در منطقه مورد مطالعه و ارزیابی دقیق بروز این مخاطره

منابع

- [1] Davari Sarem, M., Habibi, A., and Roshan Liarajdameh, M., (2022). Application of digital elevation model in preparation of hazard maps: a case study of Paveh county, Kermanshah province, Iran, The 2th International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment and Horizons of Islamic Art, Tabriz, Iran.
- [2] Motagh M, Shamschiri R, Haghighi MH, Wetzel HU, Akbari B, Nahavandchi H, Roessner S, Arabi S. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements, *Engineering geology*; 218:134-51, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.011>
- [3] Gao M, Gong H, Chen B, Li X, Zhou C, Shi M, Si Y, Chen Z, Duan G. Regional land subsidence analysis in eastern Beijing plain by insar time series and wavelet transforms. *Remote Sensing*; 10(3):365, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10030365>
- [4] جانبازفوتمی، مهدیه، خلقی، مجید، عبده کلاهچی، عبدالنبی، و روستایی، مه آسا. (۱۳۹۹). بررسی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی استان قزوین. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶(۳)، ۱۴۷-۱۳۳.

⁷ Satellite-based Augmentation Systems



- [5] عمادالدین، سمیه، شاهی، ویدا، آرخی، صالح، و آق آتابای، مریم. (۱۴۰۱). تعیین میزان فرونشست زمین در محدوده مخروط افکنه ورامین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری. پژوهشهای جغرافیای طبیعی (پژوهش های جغرافیایی)، ۵۴(۲)، ۱۶۹-۱۸۳.
- [6] Davari Sarem, M., Roshan Liarajdameh, M., and Abbasi, M., (2022). Deterministic seismic hazard analysis and response design spectrum of Kazerun county, Fars province, The 2th International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment and Horizons of Islamic Art, Tabriz, Iran.
- [7] شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، ۱۳۹۸. دشت های ممنوعه کشور، ۸۰ صفحه.
- [8] روشن لیارجدمه، مائده، حسن پور، جعفر، و داوری صارم، میلاد. (۱۴۰۲). بررسی مخاطرات ناشی از حفاری بخش آبرفتی تونل انتقال آب کانی سیب. نهمین کنگره سالانه بین المللی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، ایران.
- [9] The European Space Agency (ESA). (2017). Download of sentinel-1 images. <https://scihub.copernicus.eu>