

اندازه‌گیری میزان فرونشست زمین در شهر توریستی شاندیز خراسان رضوی و اثر آن بر ژئومورفوسایت‌های منطقه

موسی عابدینی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
زهرا نظری گزیک - دانشجوی دکتری، رشته ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۶ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

چکیده

یکی از مخاطراتی که در چند دهه اخیر در بسیاری از مناطق جهان و خصوصاً در کشورمان رخ داده است، مخاطرات ناشی از فرونشست زمین است که بسیاری از مناطق با ژئوسایت‌های مناسب گردشگری را تهدید می‌کند. هدف از انجام این پژوهش اندازه‌گیری میزان فرونشست زمین در شهر توریستی شاندیز خراسان رضوی و اثر آن بر ژئومورفوسایت‌های منطقه است. از جمله مناطق گردشگری در معرض تهدید فرونشست شهر شاندیز در دشت مشهد با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک است. در این تحقیق به منظور پایش میزان فرونشست در شهر شاندیز به روش تداخل سنجی از داده‌های ماهواره، Sentinel 1A سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ استفاده شده است. نتیجه مطالعات حاصل از تداخل سنجی راداری نشان داد که در طول دوره آماری در منطقه مورد تحقیق ۲۲ سانتی‌متر فرونشست اتفاق افتاده است. همچنین پی بردن به علت فرونشست، اطلاعات چاه‌های بیرومتری موجود در منطقه اخذ و تغییرات آن‌ها در طول دوره ۱۳۹۹-۱۳۷۰ بررسی گردید. میزان فرونشست‌های ثبت شده برای هر دوره به ترتیب ۲ سانتی‌متر برای ۲۰۱۶-۲۰۱۷، برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۱۸ حدود ۶ سانتی‌متر، ۲ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۸، ۵ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰، برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ حدود ۲ سانتی‌متر، ۴ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۲ و حدود ۱ سانتی‌متر برای بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ بدست آمد. طبق نتیجه بدست آمده سطح آب زیرزمینی در محدوده‌های دارای فرونشست زمین با افت حداقل ۵۷/۸۶ و حداکثر ۷۶/۸۴ متر همراه بوده است به همین دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی یکی از دلایل اصلی فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه است. در بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۱-۱۳۹۵) فرونشست ۲۲ سانتی‌متر در شمال و شرق و غرب و جنوب و مرکز شهر پراکنده می‌باشد و ژئوسایت‌های (قنات کاریزنو، برج تاریخی شاندیز، پدیده شاندیز، باغ کلبه دنج، فنجان نما، پارک کوهستانی و ...) منطقه را به خطر می‌اندازد و این امر می‌تواند روی گردشگری منطقه مورد تحقیق تاثیر منفی بگذارد. آموزش عمومی مردم و اطلاع‌رسانی درباره اثرات نامطلوب فرونشست زمین می‌تواند در ایجاد آگاهی و پایبندی به اقدامات جلوگیری موثر باشد.

واژگان کلیدی: تکنیک تداخل سنجی، فرونشست، ژئوسایت، Snap، شهر شاندیز.

مقدمه

یکی از مخاطرات مهم اغلب دشت‌ها و جلگه‌های کشورمان، مخاطرات ناشی از فرونشست زمین است که به دلایل مختلف از جمله برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و عوامل طبیعی موجب بروز مشکلات زیاد برای اراضی زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی شده‌است؛ لذا بررسی علل و آن جهت کنترل و کاهش مخاطرات آن امری بسیار ضروری است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۲). تعامل پایداری محیط و سیستم‌های سطحی زمین، از مهمترین مولفه‌ها در مدیریت محیط‌های ژئومورفولوژیک، به شمار می‌رود (نگهبان و همکاران، ۱۳۹۹). چشم‌انداز سطح زمین به‌عنوان سیستمی پیچیده حاصل تعامل فاکتورهایی نظیر فرایندهای جغرافیایی، اقلیمی، زمانی و فعالیت‌های انسانی است. توسعه فیزیکی شهرها، بدون رعایت اصول برنامه‌ریزی شهری و در نظر گرفتن پتانسیل مخاطرات طبیعی آنها منجر به آسیب پذیری زیاد شهرها می‌شود. آب زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده آب مورد نیاز بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت به ویژه در مناطق خشک فلات مرکزی ایران است؛ بنابراین بررسی روند تغییرات کیفی آن اهمیت فراوانی در مدیریت پایدار منابع آب دارد (ارشادحسینی و همکاران، ۱۴۰۰). یکی از مهم‌ترین عوامل فرونشست در نیم‌قرن اخیر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است. همچنین (عابدینی و رنجبری، ۱۳۹۵) به بررسی فرونشست زمین در ایران با سابقه بیش از ۳۵ سال پرداختند و دریافتند که این مشکل به‌طور روزافزون در بسیاری از مناطق کشور به دلیل استخراج بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی خودنمایی می‌کند. این پدیده در صورت عدم مدیریت صحیح می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را برای مناطق مختلف ایجاد کرده و شناسایی میزان فرونشست و برآورد نرخ آن، نقش به‌سزایی در مدیریت و کنترل این پدیده خواهد داشت (امیق^۱ و همکاران، ۲۰۱۰).

از طرفی گردشگری طبیعت یا ژئوتوریسم، بر اساس جاذبه‌های طبیعی شکل گرفته‌است. در واقع جاذبه‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیکی و زیست‌محیطی را در بر می‌گیرد. ژئوتوریسم شکلی از گردشگری است که با در نظر گرفتن ویژگی‌های قلمرو، هویت یک قلمرو را حفظ و تقویت می‌کند (خدانی و همکاران، ۲۰۲۱). شرایط اقلیمی، وضعیت توپوگرافی، وجود اشکال خاص ژئومورفولوژیکی در توسعه صنعت توریسم مهم بوده و غالباً مسافرت‌های گروهی با شرایط اقلیمی ارتباط تنگاتنگی دارند (عابدینی و زهتابی‌اصل، ۱۴۰۲). در سراسر جهان، بدلیل مزایای اقتصادی گردشگری، دولت‌ها سرمایه‌گذاری در این صنعت را افزایش می‌دهند تا اقتصاد محلی خود را رشد دهند (رسینگر^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). ژئوپارک‌ها و ژئوتوریسم فعالیت‌های نسبتاً جدیدی در گردشگری هستند. با این حال، هر دو در دهه گذشته به سرعت رشد کرده‌اند (کجان و همکاران^۳، ۲۰۲۲).

دشت مشهد یکی از دشت‌های مهم در استان خراسان رضوی است که شهر شاندیز در آن واقع شده‌است. فشار بیش از حد به منابع آب زیرزمینی با پمپاژ زیاد و کمبود بارش باعث شده‌است که تغذیه آبخوان به خوبی صورت نگیرد. افت سطح آب زیرزمینی در دشت مشهد اثرات نامناسبی را بر آبدهی چاه‌ها، تخریب قنوات، کیفیت آب و فرونشست زمین خواهد داشت (قره‌چلو و همکاران، ۱۴۰۰).

یکی از جدیدترین و موثرترین روش‌ها در مطالعه فرونشست، تکنیک تداخل‌سنجی تصاویر راداری است. یک ابزار قوی برای اندازه‌گیری توپوگرافی سطح و تغییرات آن در طول زمان است (بورگمن و همکاران^۴، ۲۰۰۰) و توانایی برآورد فرونشست را با دقت میلی‌متری با استفاده از مشاهدات فاز را دارا هستند (کروستو و همکاران^۵، ۲۰۱۳) و می‌تواند در تعیین نرخ

1. Amigh

2. Resinger

3. Keijan et al

4. Burgmann et al

5. Ceroseto et al

فرونشست در بازه زمانی مشخص مورد استفاده قرار گیرد. در سال‌های گذشته تحقیقات گسترده‌ای در جهان و ایران در زمینه برآورد میزان فرونشست زمین انجام شده که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

چین و همکاران^۱ (۲۰۱۹) به بررسی نقش فعالیت‌های کشاورزی در فرونشست زمین در دره سان خواکین در کالیفرنیا پرداختند. خشکسالی‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ موجب افزایش شدید استفاده از آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه باعث فرونشست گردید. یافته‌های اصلی آن‌ها نشان داد در مناطقی که تقاضای استفاده از آب زیرزمینی بیشتر باشد فرونشست زمین هم در منطقه زیاد می‌باشد. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی، مکان‌هایی که در آینده بیشتر در معرض تخریب قرار دارند را شناسایی و مدیریت منابع آب زیرزمینی را پیشنهاد دادند. ژانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۹) در پژوهشی با استفاده از روش SBAS-InSAR و تصاویر RADARSAT بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ به پایش میزان فرونشست شهر ووهان چین با استفاده از تصاویر راداری پرداختند. نتایج تحقیق بیانگر این است که بیش از ۴ منطقه دارای میزان فرونشست قابل توجهی است که این میزان بین ۲۷/۸ تا ۵۱/۵۶ میلی‌متر متغیر می‌باشد. حق شناس حقیقی و همکاران^۳ (۲۰۱۹) اقدام به بررسی میزان فرونشست محدوده شهرستان ورامین با استفاده از تصاویر Sentinel-1 از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ کرده‌اند و نتایج تحقیق نشان داده که عامل اصلی فرونشست زمین در محدوده دشت مورد تحقیق، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی بوده است. محبی‌تفرشی و همکاران^۴ (۲۰۱۹) در تحقیقی به بررسی فرونشست زمین در آبخوان ورامین با استفاده از روش منطق فازی کرده‌اند و نتایج کارشان نشان داده که قسمت‌های جنوب و مرکزی دشت مذکور بیشترین میزان فرونشست را دارند. رابط و همکاران^۵ (۲۰۲۰) به بررسی فرونشست زمین در دلتای نیل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و GPS پرداخته است. در این تحقیق از روش تداخل‌سنجی راداری و تعداد ۱۴۴ تصویر در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ استفاده کردند که نتایج نشان‌دهنده وجود فرونشست محلی ناشی از دخالت‌های انسانی (به دلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی) در تغییرات ژئومورفولوژی است. گورابی و همکاران^۶ (۲۰۲۰) در بررسی فرونشست زمین در کلان‌شهر اصفهان با تصاویر Sentinel-1 میزان فرونشست زمین را به میزان ۵- تا ۱۰۰- میلی‌متر در سال برآورد کردند که از جنوب به بخش‌های شمالی، شمال شرقی و شرقی کلان‌شهر اصفهان افزایش می‌یابد، در حالی که بخش‌های جنوبی شهر تقریباً یک منطقه پایدار هستند و میزان فرونشست قابل توجه در آن مشاهده نمی‌شود. روحی و همکاران^۷ (۲۰۲۱) اقدام به بررسی و محاسبه میزان فرونشست زمین، تغییرات رطوبت و شوری خاک با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور در دشت ورامین کرده‌اند. همچنین تغییرات فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴ توسط تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و نرم‌افزار SNAP بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده که افزایش میزان فرونشست زمین باعث افزایش سطح شوری خاک و شدت آن شده است. خان و همکاران^۸ (۲۰۲۲) به بررسی فرونشست زمین در شهر اسلام آباد پاکستان با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ پرداختند و میزان فرونشست در سال ۲۰۱۹ را ۶۹- میلی‌متر و در سال ۲۰۲۰ را ۹۸- میلی‌متر برآورد کرده‌اند. خرمی و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی فرونشست شهر مشهد با روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ پرداختند و بیشینه نرخ فرونشست را ۱۴ سانتی‌متر به دست آوردند. قاسمی و همکاران^۹ (۱۴۰۱) مخاطره فرونشست را در دشت کبودرآهنگ-فامنین مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادند. بر اساس نتایج حاصله، منطقه مورد مطالعه با افت شدید منابع آب زیرزمینی مواجه است به طوری که در بیش‌تری چاه‌های مورد مطالعه، میانگین افت سالانه آب زیرزمینی بیش از ۲ متر بوده و همین مسئله سبب شده است تا دشت

1. Jeanne et al

2. Zhang et al

3. Rateb et al

4. Goorabi et al

5. Roohi et al

6. Khan et al

کبودرآهنگ-فامنین در طی دوره زمانی ۵ ساله (از تاریخ ۱۶/۰۱/۲۰۱۵ تا ۱۴/۰۱/۲۰۲۰) بین ۲۹ تا ۲۱۶ میلی متر فرونشست داشته باشد. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، در بررسی فرونشست دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری دریافته‌اند بیش‌ترین نرخ فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰، ۱۵ سانتی‌متر بوده که این مقدار به سمت غرب و مرکز دشت کاهش یافته به صورتی که در قسمت غرب دشت، کم‌ترین میزان فرونشست مشاهده می‌گردد. همچنین میزان افت آب‌های زیرزمینی در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به ۲,۲۸ متر رسیده‌است که پیامد این افت سطح آب زیرزمینی به ایجاد فرونشست ۱۵ سانتی‌متری در دوره مطالعاتی دشت ماهیدشت گردیده است. حیدری و همکاران (۱۴۰۱) به مدلسازی توسعه فرونشینی دشت مرودشت و رابطه آن با برداشت آب‌های زیر زمینی پرداختند به این نتیجه رسیدند که نشست میانگین زمین که به طور میانگین ۰,۷۶ متر به ازای ۱۰ متر افت تراز آبخوان می‌باشد، میزان نشست متوسط زمین با روند کنونی برداشت در ده سال آینده ۱۱۴,۷۸ سانتی‌متر قابل پیش‌بینی می‌باشد و با افزایش ۳۰ درصدی برداشت، میزان افت تراز آبخوان در طی ۲۰ سال آینده در حدود ۳۷ متر می‌باشد که افت سالانه آن در حدود ۱,۹ متر می‌باشد. فرونشست زمین در این حالت نیز در حدود ۲۸۰ سانتی‌متر پیش‌بینی می‌شود. ایمانی و همکاران (۱۴۰۱) به شناسایی روستاهای در معرض خطر فرونشست در دشت اردبیل با استفاده از تحلیل شبکه ای - فازی در سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداختند. نتیجه‌گیری دهستان‌های ویلکیج مرکزی، فولادلوی شمالی و دهستان شرقی بیشترین سطح آسیب‌پذیری را از لحاظ وضعیت خطر فرونشست دارند. وضعیت بحرانی خطر فرونشست در این سه دهستان بیشترین مقدار را دارد. همچنین دهستان کلخوران و آغ‌بلاغ آقاجان خان از وضعیت متوسط به سمت وضعیت در معرض آسیب پیش می‌روند که نیازمند دقت بیشتری در مدیریت و برنامه ریزی منابع آب این دهستان‌ها هست. همچنین یک رابطه قوی بین نحوه پراکندگی چاه‌های عمیق در سطح دشت اردبیل و مناطق در معرض خطر بالای فرونشست وجود دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، زیر معیار وضعیت آب‌های زیرزمینی با وزن ۰,۳۸ بیشترین تاثیر را در وضعیت خطر فرونشست دشت اردبیل ایجاد کرده است. محرابی و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوه‌رنس (CPT) پرداختند نتایج کار آنها نشان داد که نرخ فرونشست در دشت جیرفت به‌طور فزاینده‌ای در حال افزایش است. به‌طوری که از ۱۱ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۴ به ۱۳ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۲ رسیده‌است. علاوه بر آن طی این مدت بر وسعت این مناطق افزوده شده و روند گسترش به‌سمت مناطق شمالی دشت در حرکت است. به‌منظور تحلیل عوامل مسبب این پدیده، علاوه بر بررسی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی دشت و ارتباط آن با فرونشست، نقش گسل‌ها و همچنین ضخامت خاک در ایجاد یا تشدید این پدیده بررسی شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که علاوه بر برداشت بی‌رویه از آبخوان، فرونشست دشت جیرفت تحت‌تأثیر گسل سبزواران نیز قرار دارد و شدت فرونشست در مناطق با ضخامت خاک بیشتر، بالاتر است.

شان‌دیز شهری ییلاقی و گردشگری در دشت مشهد و بیست کیلومتری شمال غرب شهر مشهد قرار دارد. شان‌دیز در کنار طبقه مهم‌ترین ییلاقات مشهد را تشکیل می‌دهند. شان‌دیز دارای دره‌های باصفا و پرآبی مانند مسیر ابرده به زشک و دره خادر می‌باشد؛ که به همراه درختان سر به فلک کشیده و گل‌های وحشی چشم‌اندازهای دلپذیر و زیبایی را بوجود آورده‌است؛ آب و هوای معتدل شان‌دیز و رودخانه‌های روان آن که از دامنه‌های شمالی رشته‌کوه بینالود سرچشمه می‌گیرند گردشگران بسیاری را از سراسر کشور در تمام فصول سال به خود جذب می‌کند. در دهه اخیر فرونشست به عنوان یک مخاطره ژئومورفیک در بخش وسیعی از دشت‌های ایران از جمله دشت مشهد به عنوان یکی از دشت‌های مهم در حال وقوع است. لذا بررسی میزان نرخ فرونشست و پرداختن به علل و عوامل تاثیر گذار جهت مدیریت خطر دارای اهمیت زیادی است.

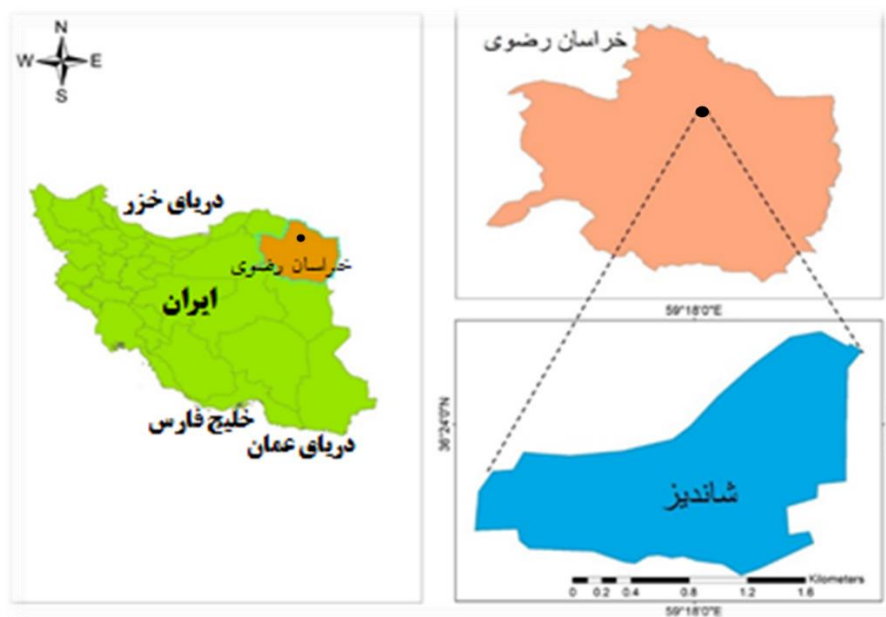
تا امروز مطالعات زیادی درباره فرونشست دشت مشهد و شهر مشهد انجام شده اما مطالعه موردی برای فرونشست شهر شان‌دیز صورت نگرفته است. بدلیل وجود پتانسیل بالای گردشگری و افزایش روزافزون جمعیت شهر شان‌دیز و روستاهای

آن و بهره برداری بی رویه از منابع آب سفره های زیر زمین در چند دهه اخیر، انجام تحقیق با این موضوع ضروری است. لذا هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان فرونشست زمین و اثرات زیانبار آن در محدوده شهر شاندیز در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا سال ۲۰۲۳ و تعیین ژئوسایت هایی که تحت تاثیر فرونشست این منطقه است.

روش تحقیق

موقعیت جغرافیایی منطقه

شهر بیلاقی شاندیز که جزو شهرستان طرقله شاندیز که در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۳ دقیقه واقع شده و از سطح دریا ۱۴۰۰ متر ارتفاع دارد (شکل ۱). این شهر از شمال به بخش مرکزی مشهد، از جنوب به شهرستان طرقله، از شرق با نیشابور و از غرب با گلپه‌هار مجاور می باشد و دارای وسعتی حدود ۳۷،۸۲۵ کیلومتر مربع است. باز آنجایی که شاندیز مشهد از مناطق بیلاقی خراسان شناخته می شود و مملو از پوشش گیاهی انبوه و متراکمی از درختان سر به فلک کشیده چنار و رودخانه های روان و جاذبه های گردشگری (قنات کاریزنو، برج تاریخی شاندیز، پدیده شاندیز، باغ کلبه دنج، فنجان نما، پارک کوهستانی و ...) است، آب و هوایی خنک و بیلاقی دارد و به عنوان یکی از کانون های عمده مسافران و گردشگران شهر مشهد و سراسر ایران است. سراسر جنوب این شهر ارتفاعات رشته کوه های بینالود خراسان جای دارد که قله شیرباد در منطقه ی زشک شاندیز نیز مرتفع ترین نقطه این رشته کوه و استان خراسان به شمار می رود.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهر شاندیز

کوه های شاندیز از نظر سنگ شناسی شامل سنگ ها و رسوبات پالئوزوییک، مزوزوییک و سنوزوییک هستند و به عنوان بخش شرقی البرز، متأثر از کوهزایی های سیمیرین و آلباین می باشند بر اساس مطالعات ژئوفیزیکی، ضخامت رسوبات در این منطقه حدود ۲-۱ کیلومتر است. کوه های شاندیز به دلیل گسلش های راندگی که به فرم پشته ی طاق شکل (پشت خوکی) از شمال شرق به جنوب غرب انتشار یافته اند، تکتونیک پوسته نازک دارد. در این ناحیه زون گسلی سنگبست - شاندیز با شیب زیاد از میان رسوبات کنگلومرا، ماسه سنگ و شیل ژوراسیک عبور می کند و این طور به نظر می رسد که در گذشته موجب راندگی میان رسوبات ژوراسیک شده است. زون گسلی

سنگبست - شانديز با طول تقریبی ۵۷ کیلومتر، پهنای متوسط ۲ کیلومتر و روند شمال غرب- جنوب شرق عمدتاً از ارتفاعات ۱۳۰۰ - ۱۴۰۰ متر می‌گذرد. این زون گسلی در نیمه شمال غربی خود به صورت گویز گسلی و در بخش جنوب شرقی به فرم فروافتادگی خطی دیده می‌شود. فعالیت امتداد لغزی و شیب لغزی این گسل موجب جابه جایی و برش در خطوط تراز هم ارتفاع و ناهنجاری در روند و شکل این محدوده ها شده است. (علوی، ۱۹۹۲)

داده ها و روش مورد استفاده

در این تحقیق به منظور بررسی میزان فرونشست شهر شانديز و ارتباط آن با افت سطح آب های زیرزمینی، ابتدا نرخ فرونشست زمین به روش تداخل سنجی راداری محاسبه شد و سپس روند تغییرات سطح آب چاه‌های پیژومتری در طول ۲۹ سال مورد بررسی قرار گرفت.

امروزه تکنیک تداخل سنجی راداری به عنوان یک ابزار قوی برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین در طول زمان استفاده می‌شود و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد پایش فرونشست ارائه دهد. (Notti et al., 2016) روش تداخل سنجی راداری با مقایسه سیگنال‌های فاز برگشتی دو دسته داده‌های رادار در پیچه مصنوعی که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده اند، قادر به اندازه گیری تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی می‌باشد (محمد حسنی و همکاران، ۱۴۰۰). از داده های راداری که شامل تصاویر سنتینل ۱ جهت محاسبه نرخ فرونشست در بازه زمانی سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ با فرمت (SLC) تک منظر با پورابیزاسیون (VV) استفاده شده است و پس از محاسبه نرخ جابجایی سطح زمین برای منطقه مورد مطالعه به منظور بررسی بیشتر تأثیر افت تراز آب زیرزمینی بر فرونشست سعی شد که نوسانات تراز آب پیژومترها، پراکندگی چاه های بهره برداری مورد بررسی قرار بگیرد مطالعات تداخل سنجی راداری در این تحقیق توسط ۸ تصویر سنتینل و به کمک نرم افزار SNAP انجام گرفته است. برای کاهش نویز و افزایش همبستگی زمانی اینترفروگرام ها تا حد امکان سعی شده، از زوج تصاویر راداری با بازه زمانی کوتاه استفاده شود. ترکیب داده های راداری از مدارهای ص عودی و نزولی نیز میتواند جهت بهبود مدل های رقومی زمین با به دست آوردن جابجایی ها در جهات مختلف و با استفاده از اینترفرومتری مورد استفاده قرار گیرد. با عنایت به اینکه در این تحقیق هدف پایش میزان فرونشست سطح زمین است، تنها از داده های صعودی استفاده شده است؛ بنابراین اساس از تعداد ۸ تصویر مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۱ اطلاعات ثبت شده است.

شکل (۲) مراحل انجام تداخل سنجی رادار را نشان می‌دهد. به منظور مطالعه آخرین وضعیت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، اطلاعات آماری چاه‌های پیژومتری سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ از آب منطقه‌ای خراسان رضوی اخذ گردید که در ادامه در نرم افزار GIS بعد از میانگین‌گیری سالیانه با استفاده از مدل درون یابی IDW نقشه سطح آب زیرزمینی تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۱: مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

شماره	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویربرداری	گذر تصویربرداری	خط مبنا (متر)
۱	۲۰۱۶/۰۱/۱۵	Slc	Iw	صعودی	۱۱۰ تا ۱۶۳
۲	۲۰۱۷/۰۱/۱۷	Slc	Iw	صعودی	۱۱۰ تا ۱۶۳
۳	۲۰۱۸/۰۱/۲۵	Slc	Iw	صعودی	۱۱۰ تا ۱۶۳
۴	۲۰۱۹/۰۲/۲۲	Slc	Iw	صعودی	۱۱۰ تا ۱۶۳
۵	۲۰۲۰/۰۱/۱۰	Slc	Iw	صعودی	۱۱۰ تا ۱۲۹
۶	۲۰۲۱/۰۱/۱۲	Slc	Iw	صعودی	۱۲۸ تا ۳۳
۷	۲۰۲۲/۰۲/۰۸	Slc	Iw	صعودی	۱۲۸ تا ۳۳
۸	۲۰۲۳/۰۱/۱۶	Slc	Iw	صعودی	۱۲۸ تا ۳۳

برای پردازش تصاویر ماهواره ای در محیط نرمافزار SNAP از روش تداخل سنجی راداری با درجه مصنوعی و تکنیک تداخل سنجی راداری (In SAR) استفاده شده است. در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت های تصویربرداری و یا زمان های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه گردید. از تفاضل گیری بین این مقادیر، تصویر اینترفروگرام تولید شد.

پس از تشکیل تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد شد و با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین زده شد. رابطه فاز اینترفرومتری طبق رابطه (1) محاسبه گردید.

$$\begin{aligned} y_1 &= |y_1| \exp(i\varphi_1) \\ y_2 &= |y_2| \exp(i\varphi_2) \\ y_1 y_2 &= |y_1| |y_2| \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2)) \end{aligned}$$

رابطه (1)

در این رابطه؛ 1^y و 2^y سیگنال های دو پیکسل متناظر است که اولی تصویر اصلی (master) و دومی تصویر فرعی (slave) است. پس از ضرب مختلط این دو سیگنال، رابطه دیگری به دست می آید که در این رابطه $|y_1| |y_2|$ دامنه $2\varphi_1 - \varphi$ و برابر فاز اینترفروگرام است. در این رابطه، تغییر فاز به اندازه 2π معادل جابجایی به اندازه نصف طول موج مورد استفاده توسط ماهواره است که نشان دهنده یک فرینچ کامل در اینترفروگرام است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۹). فاز اینترفروگرام ایجاد شده ناشی از مؤلفه هایی نظیر مؤلفه مداری، توپوگرافی، جابجایی، اتمسفر و نویز است که هر یا از این پارامترها سبب تغییر فاز میشود. ارتباط اختلاف فاز ایجاد شده در تداخل سنجی راداری و مؤلفه های ذکر شده، به وسیله رابطه زیر تعیین می شود.

$$\begin{aligned} &+ \Delta\varphi_{\text{Deformation}} + \Delta\varphi_{\text{Atmosphere}} + \text{noise} \\ \Delta\varphi_2 &= \varphi_{21} - \varphi_2 = \Delta\varphi_{\text{Geometry}} + \Delta\varphi_{\text{Topography}} \end{aligned}$$

رابطه (2)

موقعیت نسبی تعدادی از عوارض زمینی در بازه زمانی بین دو تصویربرداری SAR به صورت جزئی تغییر می کند. این تغییرات ناشی از پدیده هایی نظیر فرونشست، زمین لرزه، زمین لغزش و یا حرکت گسل ها است. این اثر تغییر فازی را مستقل از خط مبنا ایجاد می کند که از رابطه زیر تعیین می شود.

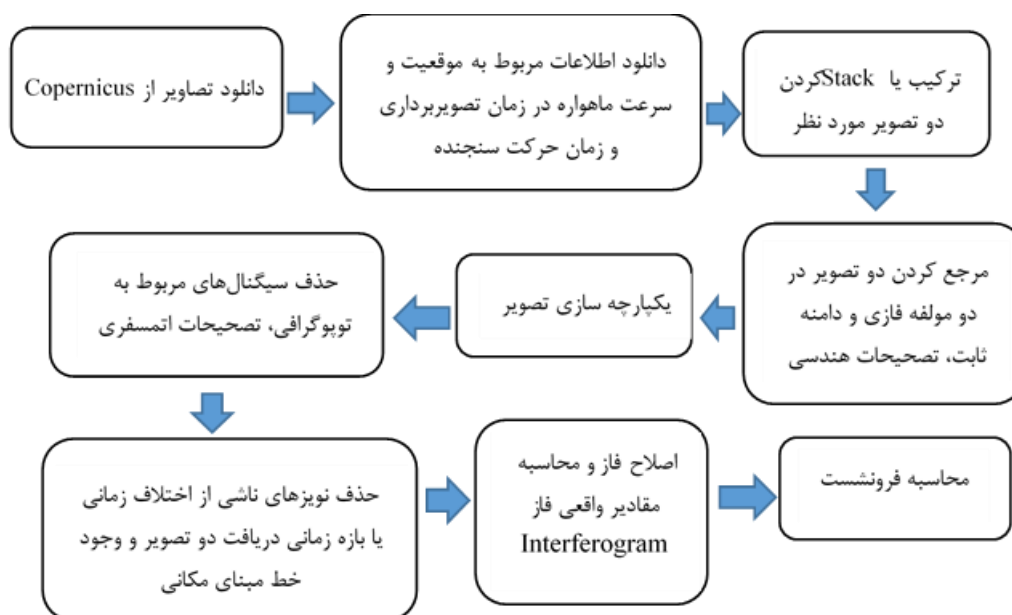
$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d$$

رابطه (3)

در این رابطه؛ d تصویر جابجایی نسبی عارضه در راستای رنج مایل است. پس از مسطح سازی اینترفروگرام، فاز تداخل سنجی شامل هر دو اثر ارتفاعی و جابجایی خواهد بود؛ بنابراین تداخل سنجی در این حالت مطابق رابطه زیر تعیین میشود (زندى و همکاران، ۱۳۹۹).

رابطه (4)

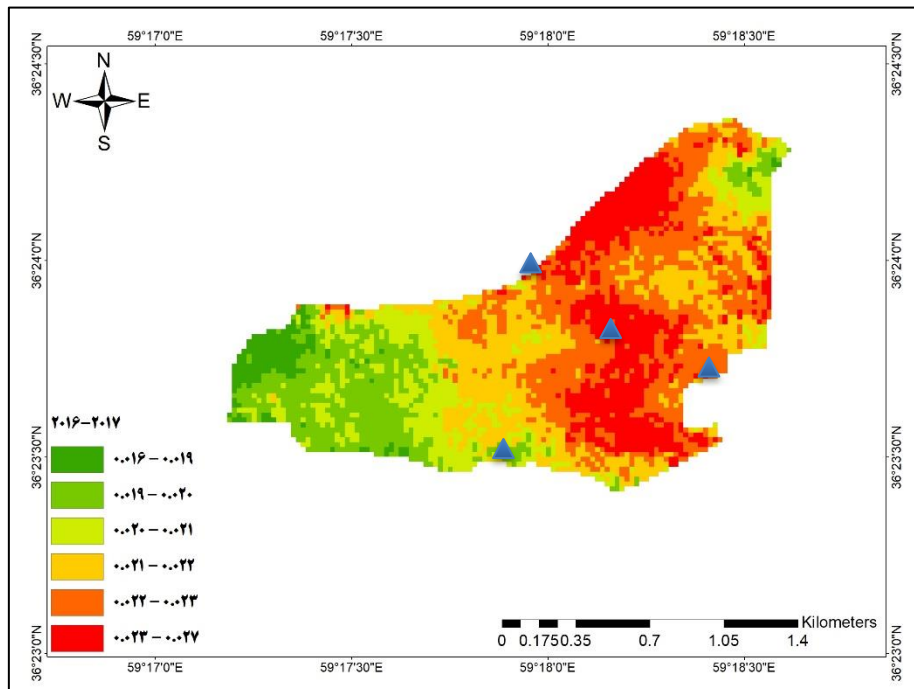
$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d$$



شکل ۲: مراحل انجام کار در نرم افزار SNAP برای محاسبه فرونشست (منبع: نویسندگان)

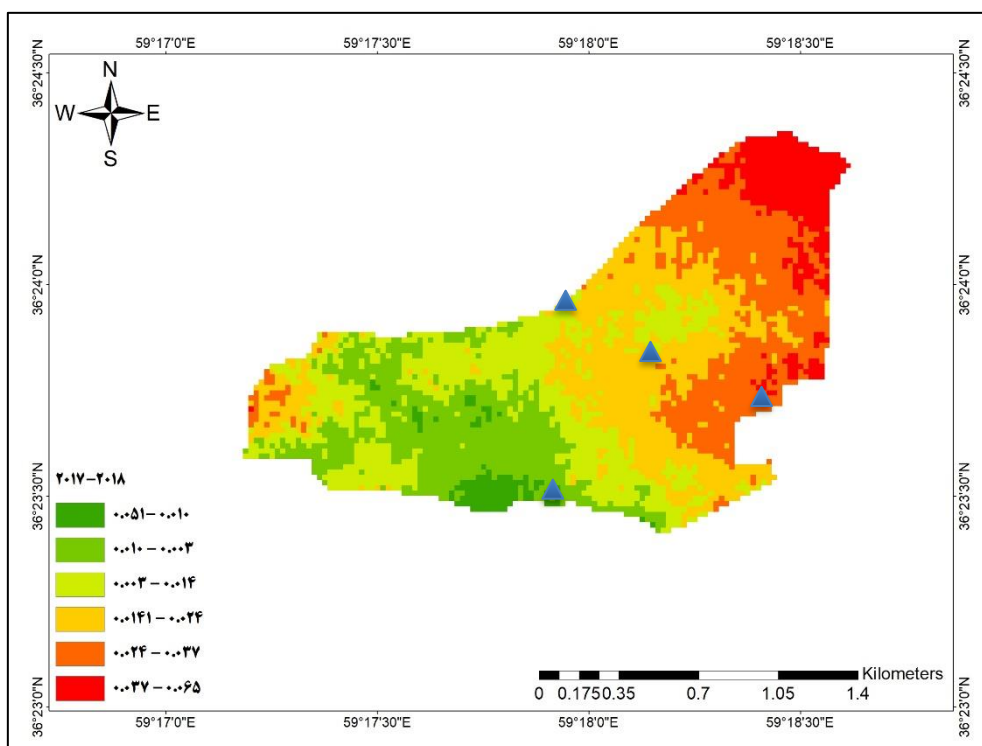
بحث و یافته‌ها

در بررسی‌های انجام شده با تصاویر راداری SLC ماهواره سنتیل ۱ در رابطه با شهر شان‌دیز ۸ تصویر به صورت دو به دو در نرم افزار snap مورد پردازش قرار گرفت که تصویر سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵)، ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ (۱۳۹۵ تا ۱۳۹۶)، ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ (۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷)، ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ (۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸)، ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ (۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹) و ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰) تصویر ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۲ (۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱) بررسی شد و میزان فرونشست‌های ثبت شده برای هر دوره به ترتیب ۲ سانتی‌متر برای ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵)، برای دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ (۱۳۹۵ تا ۱۳۹۶) حدود ۶ سانتی‌متر، ۲ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ (۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷)، ۵ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ (۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸)، برای بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ (۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹) حدود ۲ سانتی‌متر، ۴ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰) و حدود ۱ سانتی‌متر برای بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱) بدست آمد. در بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵) بیشترین میزان فرونشست منطقه ۲ سانتی‌متر و در محدوده شمال و شرق و مرکز شهر می‌باشد و پدیده شان‌دیز و شاهان دژ و باغ کلبه دنج و قنات کاریز نو را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهد. هرچه به سمت غرب شهر پیش می‌رویم منطقه ثبات بیشتری پیدا می‌کند. در شکل (۳) میزان تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ ارائه شده است.



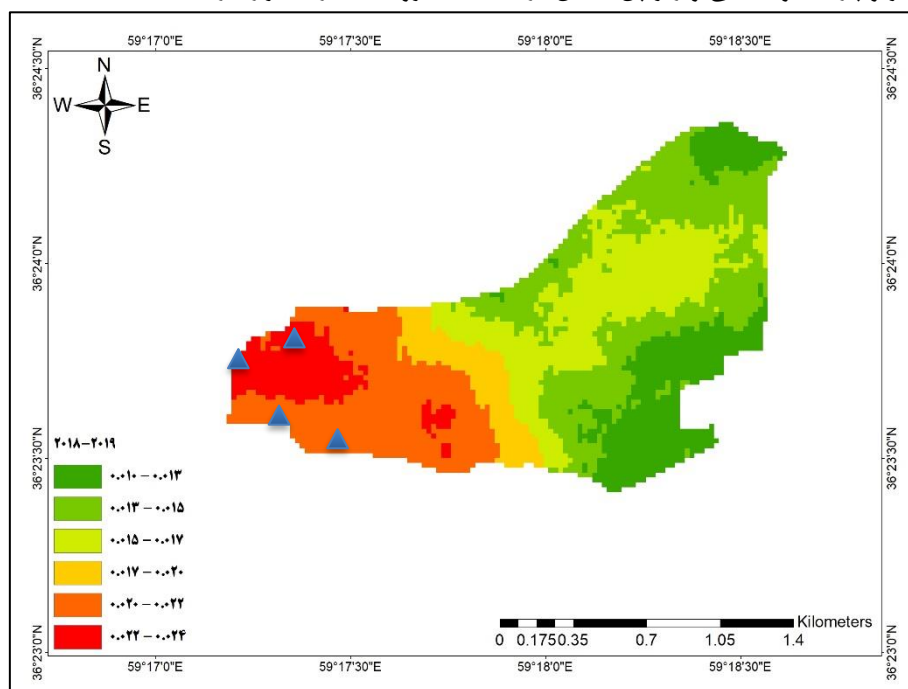
شکل ۳: تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ (۱۳۹۴-۱۳۹۵) (ماخذ نگارندگان)

در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ (۱۳۹۵-۱۳۹۶) میزان فرونشست سالانه منطقه ۶ سانتی متر می باشد و در مناطق شمال شرق و شرق شهر رخ داده و تا نواحی مرکزی امتداد یافته که نسبت به سال قبل منطقه فرونشست کاهش داشته و میزان فرونشست افزایش یافته است. منطقه گردشگری پدیده شاندیز و شاهان دژ و باغ کلبه دنج و قنات کاریزنو در پهنه خطر قرار دارند. در شکل (۴) تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ ارائه شده است.



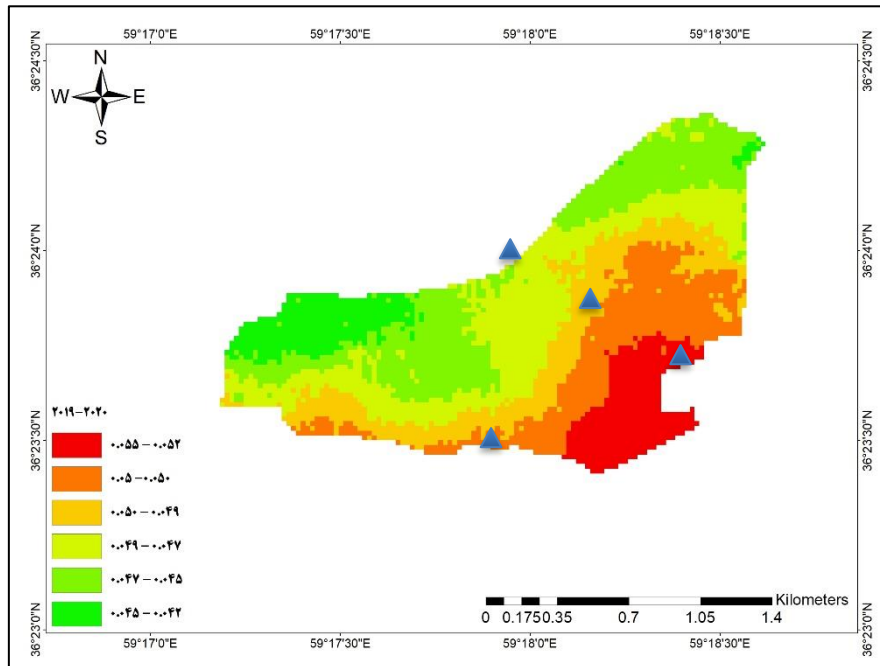
شکل ۴: تغییرات فرورنشست از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ (۱۳۹۵-۱۳۹۶) (ماخذ نگارندگان)

فرورنشست سالانه ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ (۱۳۹۶-۱۳۹۷) نسبت به سال‌های قبل کاهش داشته و ۲ سانتی متر است و پهنه فرورنشست محدوده غرب و جنوب غرب را در بر گرفته و تا نواحی شرقی اثرات آن مشاهده می‌شود. برج تاریخی شاندیز و بوستان مشاهیر و پارک کوهستانی و زیر پل جنگل در منطقه با فرورنشست زیاد قرار دارند.



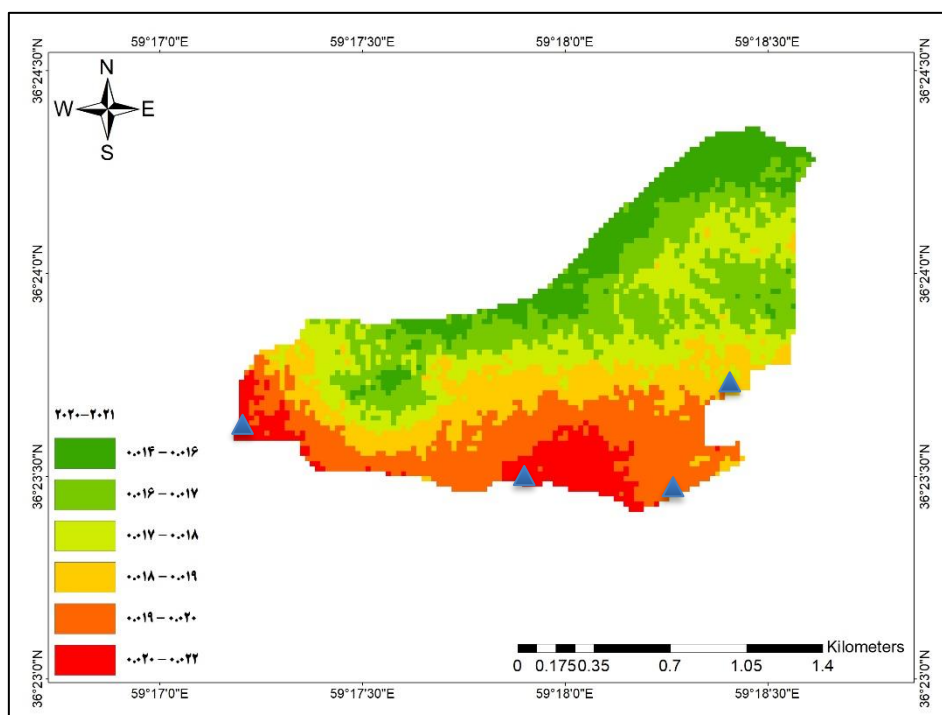
شکل ۵: تغییرات فرورنشست از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ (۱۳۹۶-۱۳۹۷) (ماخذ نگارندگان)

بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ (۱۳۹۷-۱۳۹۸) میزان فرورنشست منطقه نسبت به سال گذشته افزایش داشته و ۵ سانتی‌متر می‌باشد که این میزان فرورنشست در جنوب منطقه تا قسمت‌های مرکزی و شمالی مشاهده می‌شود و مکان‌های گردشگری فنجان نما و پانسیون اسب سواری و باغ کلبه دنج در پهنه فرورنشست زیاد و پدیده شان‌دیز و شاهان دژ نیز در منطقه خطر قرار دارند. در شکل (۶) تغییرات فرورنشست از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ ارائه شده است.



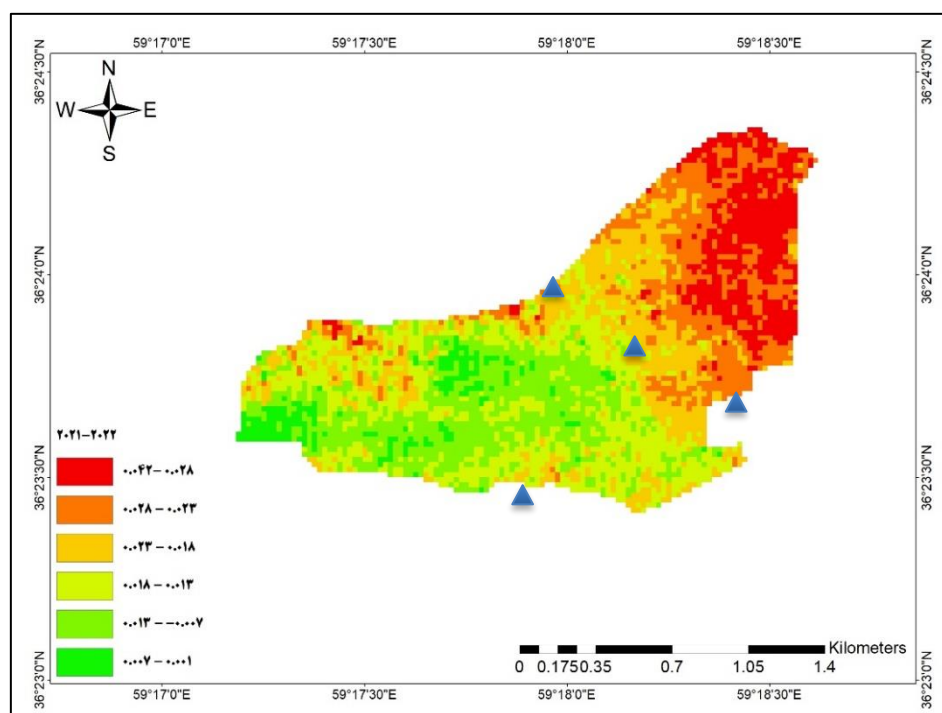
شکل ۶: تغییرات فرورنشست از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ (۱۳۹۷-۱۳۹۸) (ماخذ نگارندگان)

فرورنشست سالانه ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ (۱۳۹۸-۱۳۹۹) نسبت به سال‌های قبل افزایش داشته و ۲ سانتی‌متر است و پهنه فرورنشست مناطق جنوب و جنوب غرب (پانسیون اسب سواری، فنجان نما، زیر پل جنگل و پارک کوهستانی و بوستان مشاهیر) را در بر گرفته است.



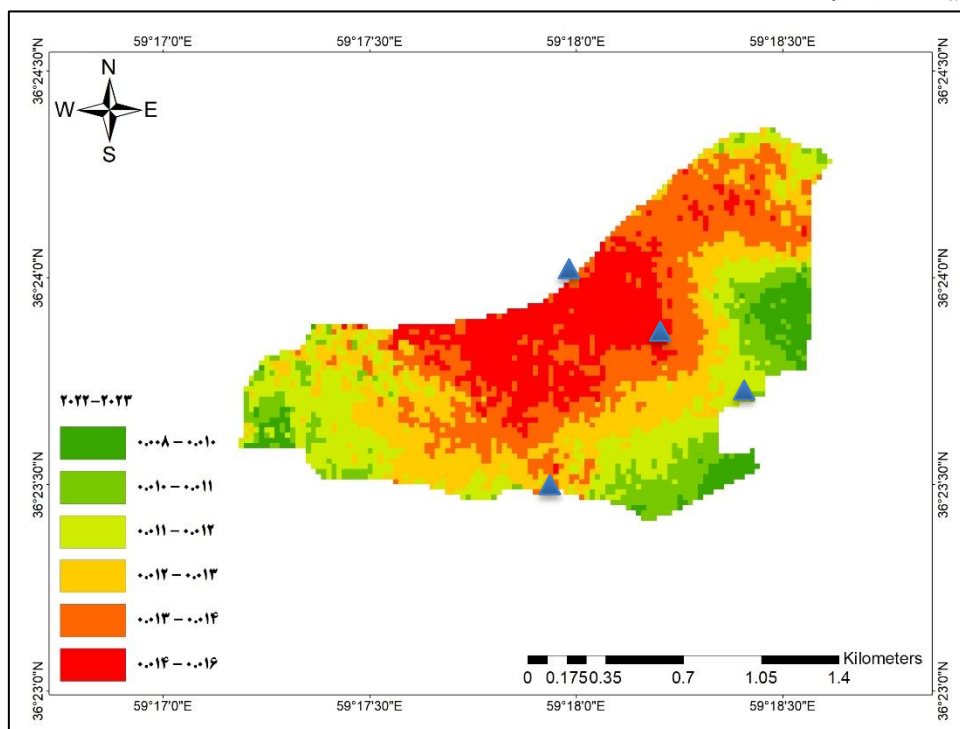
شکل ۷: تغییرات فرورنشست از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ (۱۳۹۸-۱۳۹۹) (ماخذ نگارندگان)

بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ (۱۳۹۹-۱۴۰۰) میزان فرورنشست منطقه نسبت به سال گذشته افزایش داشته و ۴ سانتی‌متر می‌باشد که این میزان فرورنشست در شمال شرق و شرق با شدت بیشتر و در تمام سطح شهر با شدت کمتر مشاهده می‌شود و تمام مکاه‌های گردشگری در معرض خطر قرار دارند. در شکل (۸) تغییرات فرورنشست از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ ارائه شده‌است.



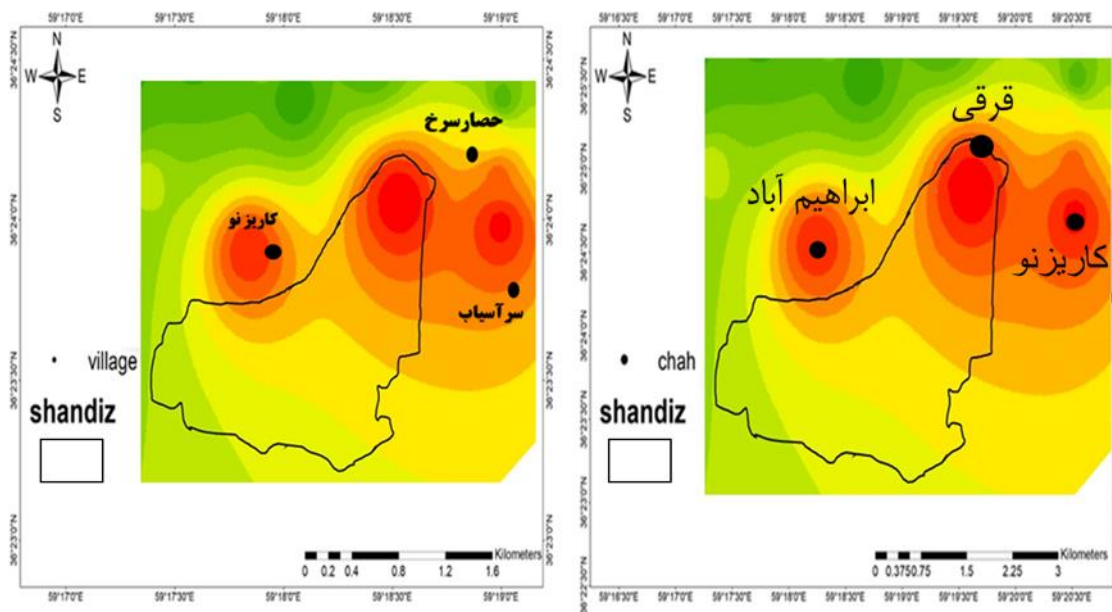
شکل ۸: تغییرات فرورنشست از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ (۱۳۹۹-۱۴۰۰) (ماخذ نگارندگان)

میزان فرونشست سالانه ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۰-۱۴۰۱) نسبت به سال های قبل کاهش داشته و ۱ سانتی متر است و خطر فرونشست محدوده شمال و شمال شرق بیشتر و در تمام مناطق شهر با شدت کمتر مشاهده می شود. کلیه ژئوسایت های شاندیز در پهنه خطر فرونشست هستند.

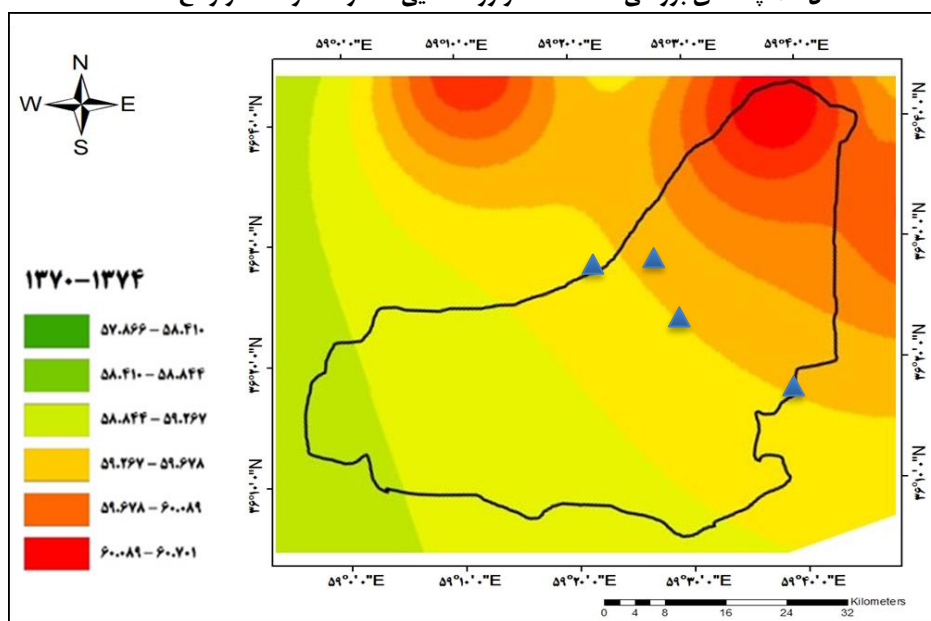


شکل ۹: تغییرات فرونشست از سال ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۰-۱۴۰۱) (ماخذ نگارندگان)

در بررسی تراز آب شهر شاندیز از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ تعداد ۳ چاه اصلی قرقی، کاریز نو و ابراهیم آباد که در شمال و شمال شرقی و غرب شهر واقع شده اند (شکل ۱۰) با داده های یکسان بدست آمد که اطلاعات آن از سازمان آب منطقه ای خراسان رضوی تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. داده ها هر ۵ سال میانگین گیری شد و نقشه های آن با استفاده از ابزار IDW در محیط GIS برای محدوده مورد مطالعه تهیه شد. همان طور که مشاهده می شود در شرق منطقه روستاهای حصار سرخ و سرآسیاب و در غرب روستای کاریز نوخردو در محدوده خطر زیاد واقع شدند. کمترین و بیشترین میزان افت سطح آب در بازه ۲۹ ساله ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹، ۵۷/۸۶ و ۷۶/۸۴ متر محاسبه شد در این بازه زمانی تمامی قسمت های شهر با افت آب همراه بوده و قسمت های شمال و شمال شرق و غرب افت بیشتری داشته است. در بازه زمانی ۷۰ تا ۷۴ کمترین و بیشترین میزان افت سطح آب در منطقه مورد مطالعه ۵۷/۸۶ و ۶۰/۷۰ متر بوده و همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود در منطقه شمال شرق و شرق رخ داده است و تا غرب اثر آن مشاهده می شود.

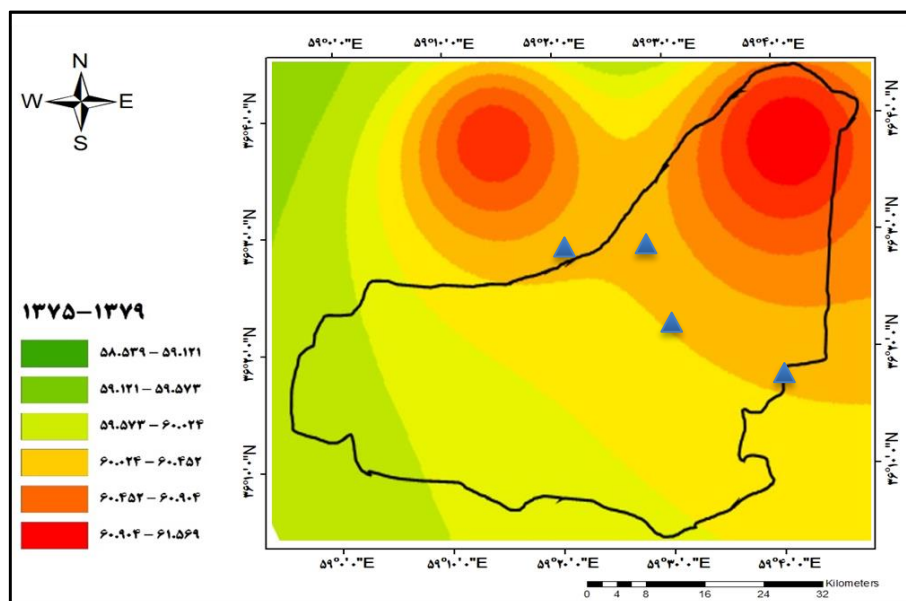


شکل ۱۰: چاه‌های بررسی شده منطقه و روستاهایی که در محدوده خطر واقع شده اند



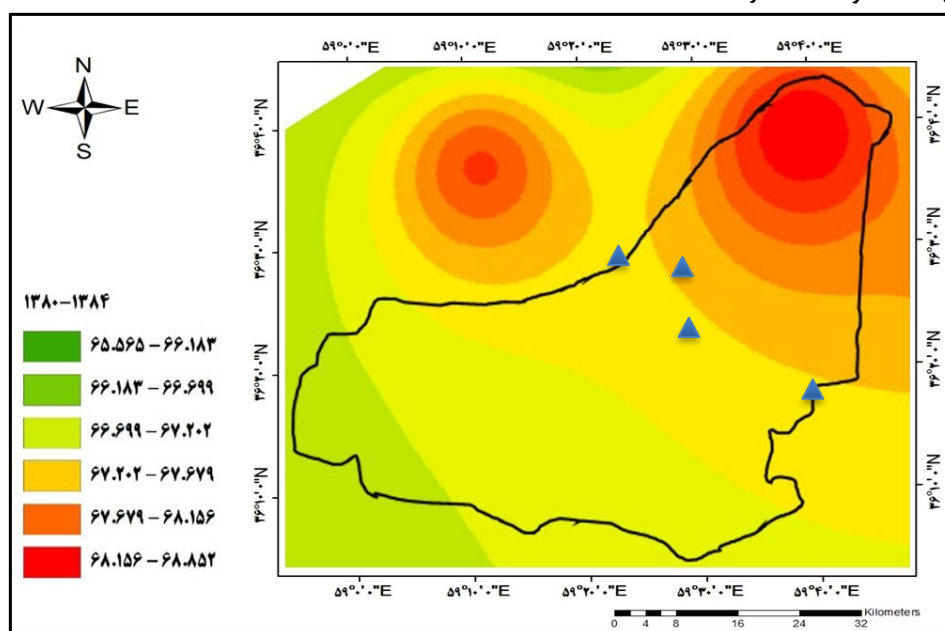
شکل ۱۱: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۴ (ماخذ نگارندگان)

در شکل (۱۲) همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان افت سطح آب نسبت به دوره قبل افزایش یافته و بیشترین میزان افت سطح آب به ۶۱/۵۶ متر رسیده‌است. باغ کلبه دنج، پدیده شاندیز، شاهان دژ و قنات کاریز نو در پهنه خطر زیاد قرار دارند



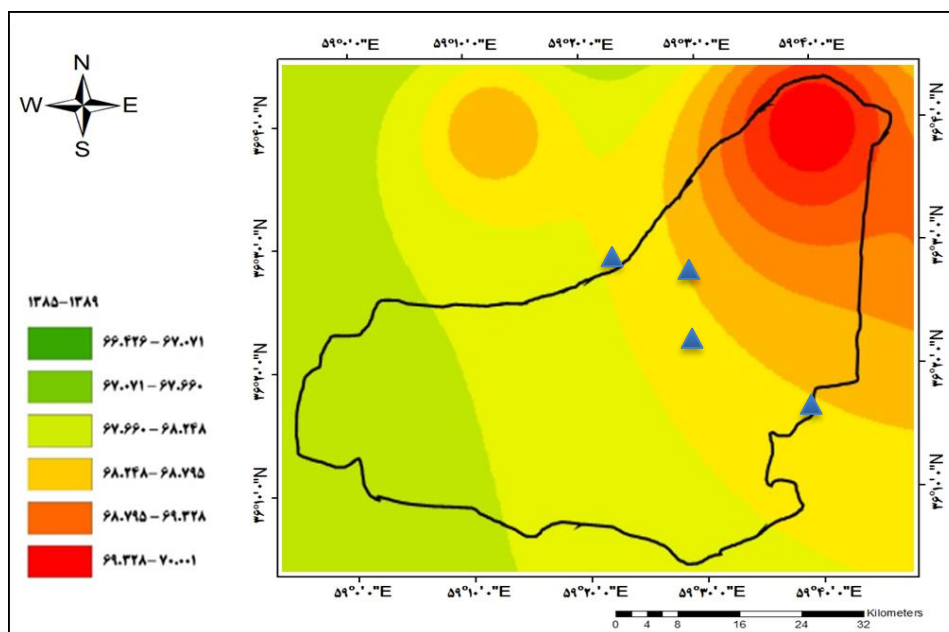
شکل ۱۲: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۹ (ماخذ نگارندگان)

در این دوره میزان افت سطح آب کاهش چشم‌گیری نسبت به دوره قبل دارد، محدوده خطر نیز کاهش یافته و کمترین و بیشترین آن $۶۵/۵۶$ و $۶۸/۸۵$ متر است.



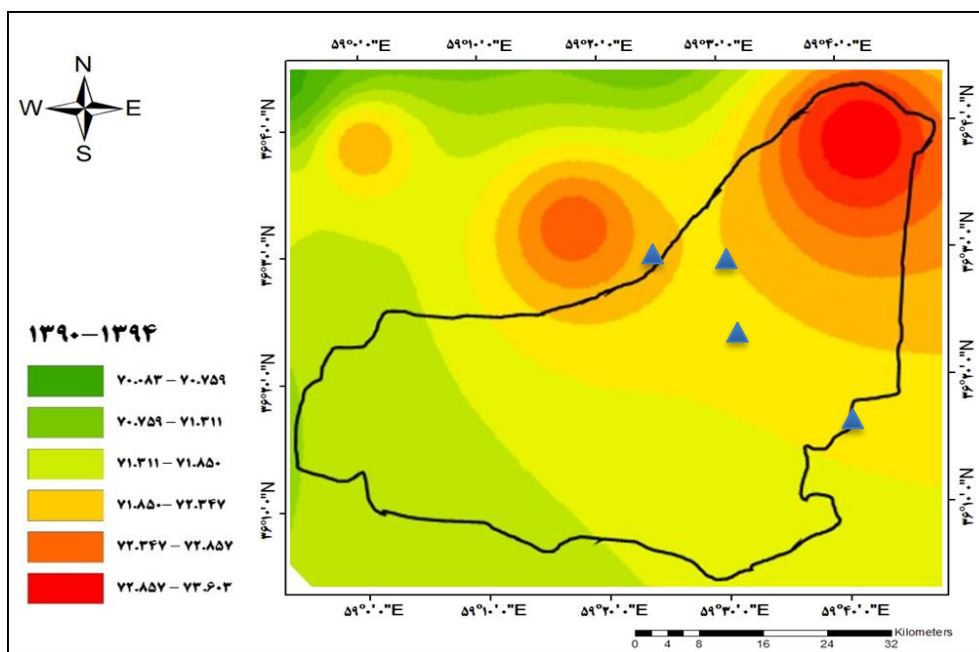
شکل ۱۳: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴ (ماخذ نگارندگان)

همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل (۱۴) نیز افزایش افت سطح آب رخ داده و پهنه خطر نیز افزایش یافته است و بیشترین میزان افت سطح آب به ۷۰ متر رسیده است.



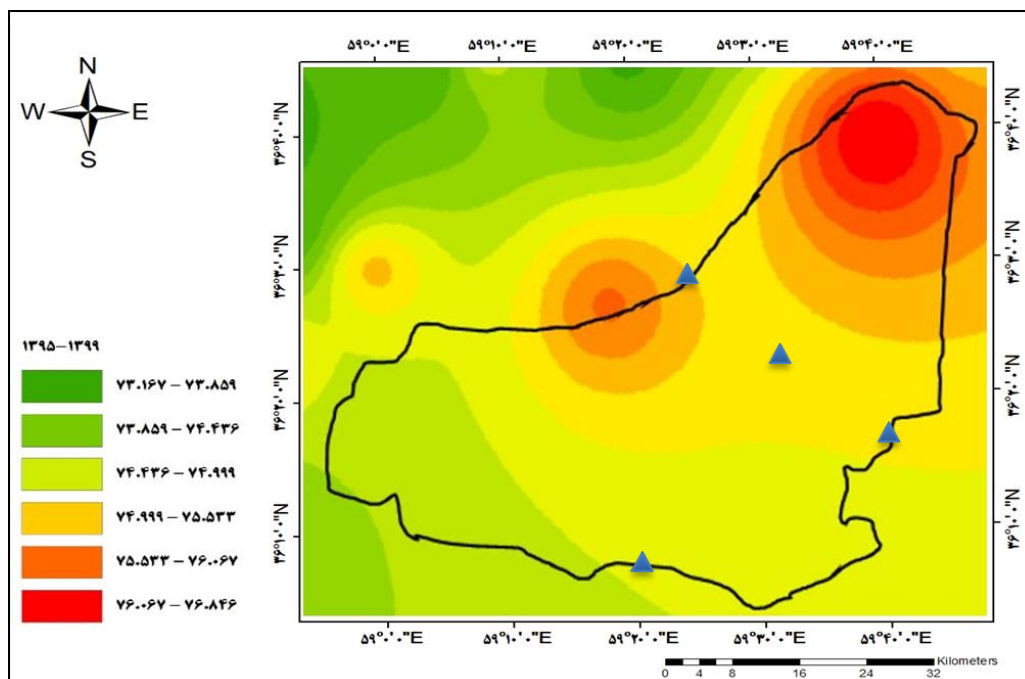
شکل ۱۴: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ (ماخذ نگارندگان)

در این دوره میزان افت سطح آب افزایش داشته ولی پهنه خطر نسبت به دوره قبل کاهش یافته و میزان بیشترین افت سطح آب ۷۳/۶۰ متر است. قنات کاریز نو و شاهان دژ در محدوده خطر زیاد قرار دارند.



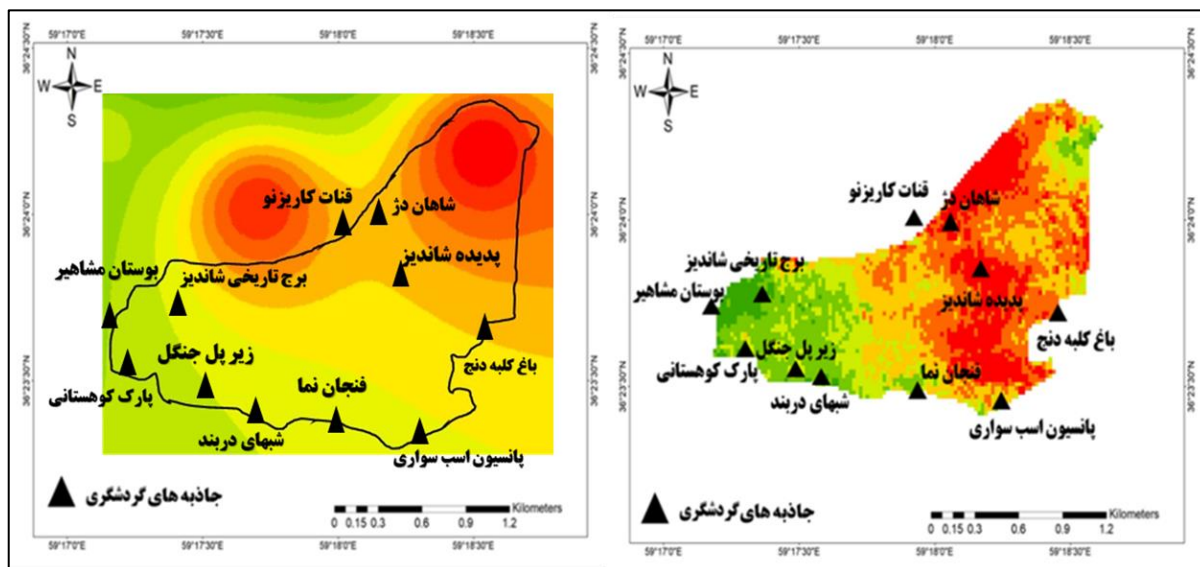
شکل ۱۵: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ (ماخذ نگارندگان)

همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود بالاترین و پایین‌ترین سطح آب افزایش داشته و به ۷۶/۸۴ متر رسیده است که به معنی افزایش افت سطح آب چاه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منطقه پرخطر همراه با افت سطح آب زیاد در قسمت شرق و شمال شرق و قسمتی از غرب شهر که قنات کاریز نو در محدوده خطر نارنجی قرار دارد.



شکل ۱۶: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸ (ماخذ نگارندگان)

همان طور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود جاذبه و ژئوسایت‌های گردشگری شهر شاندیز (قنات کاریزنو، برج تاریخی، باغ کلبه دنج، پدید شاندیز، پارک کوهستانی و...) در پهنه مخاطره آمیز فرونشست و افت آب زیرزمینی واقع شده‌اند. تصویر برخی از این مناطق توریستی در شکل (۱۸) آورده شده‌است.



شکل ۱۷: جاذبه های گردشگری شهر شاندیز بر روی نقشه اختلاف ارتفاع و نقشه فرونشست



شکل ۱۸: تصویر برخی مناطق توریستی شهر شاندیز

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرونشست زمین در شهر شاندیز مورد بررسی قرار گرفت و نرخ فرونشست منطقه در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ (۱۳۹۴-۱۴۰۱) میلادی با تصاویر راداری پایین گذر ماهواره Sentinel-1A و با استفاده از نرم افزار SNAP تعیین شد و از داده‌های چاه‌های پیژومتری و بازدید میدانی به منظور صحت‌سنجی و تفسیر نتایج استفاده گردید. میزان فرونشست در طول ۷ دوره آماری در منطقه مورد مطالعه ۲۲ سانتی‌متر به دست آمد که در تمام مناطق شهر گسترده شده است. میزان فرونشست‌های ثبت شده هر دوره به ترتیب ۲ سانتی‌متر در بازه ۲۰۱۶-۲۰۱۷ (۱۳۹۴-۱۳۹۵)، ۲۰۱۷-۲۰۱۸ (۱۳۹۵-۱۳۹۶)، ۲۰۱۸-۲۰۱۹ (۱۳۹۶-۱۳۹۷)، ۲۰۱۹-۲۰۲۰ (۱۳۹۷-۱۳۹۸)، ۲۰۲۰-۲۰۲۱ (۱۳۹۸-۱۳۹۹)، ۲۰۲۱-۲۰۲۲ (۱۳۹۹-۱۴۰۰) و حدود ۱ سانتی‌متر برای بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ (۱۴۰۰-۱۴۰۱) بدست آمد. بر اساس نتایج بدست آمده بیشترین میزان فرونشست در مناطق مرکزی و جنوبی و شمالی و شرق شهر شاندیز اتفاق افتاده است. سطح آب چاه‌ها در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ به بیشترین حد کاهش خود رسیده‌اند. میزان افت سطح آب در این بازه زمانی حداقل ۵۷/۸۶ و حداکثر ۷۶/۸۴ متر بوده است و بیشتر در مناطق شرق و جنوب شرقی رخ داده و اثر آن تا مرکز شهر ادامه یافته است که متاثر از کاهش بارندگی، خشکسالی و فشار بیش از حد به منابع آب‌های زیرزمینی در این سال‌ها می‌باشد.

مقایسه بین تحلیل‌های مستخرج از داده‌های نقاط چاه و تصاویر ماهواره‌ای نیز نشانگر رابطه بین پایین آمدن سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه است. خصوصاً در منطقه شمال شرق و شرق تا مرکز که بیشترین میزان

افت سطح آب زیرزمینی را دارا می‌باشد و در پهنه خطر فرونشست زیاد هم قرار دارند. تمام مناطق محدوده توسعه فیزیکی شهر شاندیز از افت سطح آب برخوردار و در معرض خطر فرونشست جدی است. در واقع شهر شاندیز منطقه‌ای گردشگری معروف منطقه است و گردشگران و بازدیدکنندگان زیادی دارد. با توجه به قرار گرفتن ژئوسایت‌های شهر شاندیز (قنات کاریزنو، برج تاریخی شاندیز، پدیده شاندیز، باغ کلبه دنج، فنجان نما، پارک کوهستانی و ...) در محدوده‌های با خطر فرونشست زیاد نیاز به توجه ویژه‌ای دارد.

نتایج پژوهش را با مقالات دیگر مورد مطالعه قرار دادیم در کار دهقانی و همکاران (۲۰۱۸) مقدار متوسط فرونشست سالانه در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ بین ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر متغیر بوده است و محدوده فرونشست آنها قسمت شمال غرب مشهد بوده است و محدوده فرونشست بدست آمده در پژوهش حاضر تطبیق کامل دارد و میزان میانگین فرونشست این پژوهش در ۴ دوره ۱۱ سانتی متر بدست آمده است که این عدد با نتایج تحقیقات خرمی و همکاران که در فاصله زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میزان فرونشست سالانه را برای شهر مشهد حدود ۱۴ سانتی متر برآورد کردند هم مطابقت دارد.

در ادامه برخی از راهکارهای موثر برای جلوگیری از فرونشست زمین ارائه شده است:

- ۱- کنترل و مدیریت مصرف آب: تغییر الگوی مصرف آب به سمت روش‌های بهینه می‌تواند به حفظ آب زیرزمینی و جلوگیری از فرونشست زمین کمک کند. این شامل بهبود کارایی سیستم‌های آبیاری، استفاده از روش‌های صرفه‌جویی در استفاده از آب و ایجاد آب‌های جایگزین مانند بازیافت آب است.
 - ۲- حفظ منابع طبیعی: حفظ منابع طبیعی نظیر جنگل‌ها، باتلاق‌ها و سایر زیستگاه‌ها می‌تواند به جلوگیری از فرونشست زمین کمک کند. احداث مناطق حفاظت شده و اجرای قوانین سختگیرانه در مورد تخریب محیط زیست می‌تواند از نابودی و آسیب دیدن منابع طبیعی جلوگیری کند.
 - ۳- استفاده از تکنولوژی‌های مدرن: استفاده از تکنولوژی‌های مدرن در احداث ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها می‌تواند به جلوگیری از فرونشست زمین کمک کند. مثلاً استفاده از سیستم‌های ارتفاع‌سنجی *GPS* در ساخت و سازها می‌تواند دقت بیشتری در تسطیح و اجرای آنها ایجاد کند.
 - ۴- آموزش و اطلاع‌رسانی: آموزش عمومی مردم و اطلاع‌رسانی درباره اثرات نامطلوب فرونشست زمین می‌تواند در ایجاد آگاهی و پایبندی به اقدامات جلوگیری موثر باشد. این شامل آموزش در مورد روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، حفظ منابع طبیعی و مدیریت منابع است.
 - ۵- ارزیابی و نظارت مداوم: ارزیابی و نظارت مداوم بر فعالیت‌های مختلف می‌تواند به تشخیص مشکلات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی فرونشستی کمک کند. این شامل انجام مطالعات کامل زمین‌شناسی، نظارت بر نقاط مستعد فرونشست زمین و ارائه راهکارهای مناسب برای جلوگیری از آن است.
- هرچند که جلوگیری کامل از فرونشست زمین ممکن نیست، اما با بهره‌گیری از راهکارهای مناسب و پیروی از اصول بهینه‌سازی، می‌توان از حداقل سوءتاثیر فرونشست زمین بر محیط زیست و جامعه جلوگیری کرد. برای اجرای این راهکارها، همکاری بین دولت، سازمان‌های مردم‌نهاد و جامعه بسیار حائز اهمیت است.

منابع

- ارشاد حسینی، م، کشتکار، ا، حسینی، س، افضلی، ع (۱۴۰۰). تحلیل روند تغییرات زمانی در کیفیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از آزمون ناپارامتریک منکنندال و روش گرادیان سنی نمونه پژوهشی دشت یزد - اردکان. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، شماره ۴، صص ۸۷-۱۰۶.
- آقایی، ل، عابدینی، م، اصغری سراسکانرود، ص (۱۴۰۱). برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل)، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۱۱. شماره ۱. صص ۱۳۲-۱۱۷.
- اکبری، ا، جوانشیری، م، محمدپور، ز (۱۳۹۹). بررسی فرونشست سطح زمین در دشت اسفدن. همایش محیط زیست جغرافیا و گردشگری دانشگاه بزرگمهر قائنات.
- ایمانی، ب، جعفرزاده، ج (۱۴۰۱). شناسایی روستاهای در معرض خطر فرونشست دشت اردبیل با استفاده از تحلیل شبکه ای-فازی در سیستم اطلاعات جغرافیایی. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. شماره ۴۷. صص ۶۲-۸۶.
- تورانی، م، آق آتابایی، م، روشیتی، م (۱۳۹۶). بررسی فرونشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخل سنجی، رادار، مجله بررسی جغرافیایی فضا، دوره ۸، شماره ۲۷. صص ۱۱۷-۱۲۷.
- حق شناس حقیقی، م، متق، م (۱۳۹۸). پاسخ سطح زمین به تراکم پیوسته سیستم آبخوان در تهران، ایران: نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل بلند مدت چند حسگر *InSAR*. نشریه سنجش از دور محیط زیست، شماره ۲۲۱، صص ۵۳۴-۵۵۰.
- حیدری، ا، جلیری، ا (۱۴۰۱). مدل‌سازی توسعه فرونشینی دشت مرودشت در رابطه با برداشت آب‌های زیر زمینی. مخاطرات محیط طبیعی. دوره یازدهم. شماره ۳۴. صص ۱۷-۳۳.
- دهقانی، م، صالحی متعهد، ف، حافظی مقدس، ن (۲۰۱۸). ارزیابی علل زمین شناختی فرونشست زمین دشت مشهد و اثرات آن بر شهر مشهد. همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست شهرمشهد.
- روستایی، ش رضایی مقدم، م. ح، یاراحمدی، ج، نجفوند، س (۱۴۰۱). بررسی مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش *FUZZY-AHP* (مطالعه موردی: دشت شبستر-صوفیان). مجله پژوهش-های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۱۲. شماره ۱۳۳۴. 10.22034/GMPJ.2022.329254.1334.
- زندی، ر، شفیععی، ن (۱۳۹۹). بررسی فرونشست سطح زمین در دشت جوبین. همایش محیط زیست جغرافیا و گردشگری دانشگاه بزرگمهر قائنات
- عابدینی، موسی، آقایی، لیللا، پیروزی، الناز (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه‌بندی فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تکنیک چند معیاره آراس. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۱۲. شماره ۲.
- عابدینی، م، نظافت تکلله، ب، خیاطی، آ. (۱۴۰۱). ارزیابی و تحلیل پتانسیل‌های مقاصد ژئومورفولوژیکی و ژئوتوریستی استان اردبیل با استفاده از مدل‌های فیولت و مدل دینامیکی. فصلنامه جغرافیایی فضای گردشگری، سال دوازدهم، شماره ۴۵. صص ۷۳-۵۶.
- عابدینی، موسی، الهامه عبادی و احسان قلعه، ۱۴۰۱، بررسی فرونشست دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، شماره ۲۶، شماره ۷۹، دروه ۲۶. صص ۲۲۰-۲۰۷.
- عابدینی، موسی، رنجبری، احد (۱۳۹۵)، ژئوتوریسم آذربایجان شرقی، انتشارات نگین سیلان، صفحه ۲۹۷.
- عابدینی، موسی، زهتابی اصل، ژاله (۱۴۰۲)، بررسی نقش توریسم در روند توسعه و گسترش فیزیکی شهر سریعین با تاکید بر مخاطرات ژئومورفیک، دومین کنفرانس بین‌المللی چالش‌ها و راهکارهای مدیریت توسعه گردشگری پایدار (با تاکید بر استان اردبیل)، دانشگاه محقق اردبیلی.
- علوی، م. (۱۳۷۱). تکتونیک رانش منطقه بینالود، شمال شرق ایران، تکتونیک ۱۱، (۲). صص ۳۶۰-۳۷۰.
- غلامرضایی، م، منصوری مقدم، س (۱۴۰۱). تاثیر کیفیت خدمات بر وفاداری گردشگران در تفرجگاه‌های عمومی مطالعه موردی: پارک طبیعت پردیس شاندیز. کنفرانس ملی اکوتوریسم.

- قاسمی، ا، نصرتی، م، منبری، ف (۱۴۰۱). اطلاعات جغرافیایی. شماره ۱۲۴. صص ۷۵-۸۶.
- قره چلو، س، اکبری قوچانی، ح، گلپان، ک (۱۴۰۰). ارزیابی میزان فرونشست در ارتباط با آب‌های زیر زمینی با کمک ماهواره راداری سنتینل ۱ او الوس ۱ (منطقه مورد مطالعه: دشت مشهد)، مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. دوره ۱۲. شماره ۳. صص ۱۱-۱۴.
- مهرابی، ع، کریمی، ص، خالصی، م (۱۴۰۲). تحلیل فضایی فرونشست دشت جیرفت با استفاده از تکنیک پیکسل‌های کوهنرس (CPT). جغرافیا و برنامه ریزی محیطی. شماره ۸۹. صص ۹۹-۱۱۶.
- محمد حسنی، م، شیخ شریعتی کرمانی، ب (۱۴۰۰). تعیین میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: شریان‌های حمل و نقلی منطقه غرب شهر کرمان)، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل. دوره ۳. شماره ۶۸. صص ۹۰-۷۵.
- نگهبان، س، جهان تیغ‌مند، س، رحیمی هرآبادی، س (۱۳۹۹). تبیین جایگاه روش‌شناسی اثباتی و فرائباتی در مخاطرات ژئومورفولوژیک (مورد: پهنه‌بندی مخاطرات ریزش سنگ در آزاد راه رودبار- رستمآباد)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال نهم، شماره ۱. صص ۶۶-۵۲.
- Amigh Pay, M., Arabi, S., and Talebi, A., (2010). "Study on Yazd plain subsidence using InSAR and its precise leveling", *Geosciences*, 20(77), 157-164.
- Bhattarai, R., Alifu, H., Maitiniyazi, A. & Kondoh, A. (2017). Detection of land subsidence in Kathmandu valley, Nepal, using DInSAR technique, *Land*, 6(2), 39-54.
- Burgmann, R., Rosen, P.A., Fielding, E.J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol.28, pp.169-209.
- Crosetto, M., Gili, J.A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., Serral, D. (2013). Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, No 4, pp. 923-933.
- Goorabi, A. Karimi, M. Yamani, M. Perissin, D. 2020. Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, 181.
- Jeanne, P., Faar, T. G., Rutqvist, J., Vasco, D. W (2019). Role of agricultural activity on land subsidence in the Jouquin Valley, California, *Journal of Hydrology*, Vol. 569, PP.462-469.
- Keijan, X. Wenhui. W (2022). Geoparks and Geotourism in China a Sustainable Approach to Geoheritage Conservation and local Development – A Review. *Land* 2022.
- Khan, J., R, X., Afaq Hussain, M., Qasim Jan, M., 2022, Monitoring Land Subsidence Using PS-InSAR Technique in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan, *Remote Sensing*, 14,3722, pp 1-25.
- Khodani, M. Peta, TH. Liewellyn, L (2020). Developing a scale for Measuring Influential Factors towards Geotourism Development. *Independent Research Journal in the Management Sciences*.
- Notti, D., Mateos, R.M., Monserrate, O., Devanthery, N., Peinado, T., Roldan, F.J., Fernandez-Chacon, F., Galve, J.P., Lamas, F., Azanon, J.M.) 2016(. Lithological control of land subsidence induced by groundwater withdrawal in new urban AREAS (Granada Basin, SE Spain). *Multiband DInSAR monitoring. Hydrological Process*, Vol.30, pp. 1-15,
- Rateb, A., Abotalib, Z., (2020) Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel1 satellites and GPS between 2015 and 2019, *Science of the Total Environment* 729:1-10.
- Reisigner, Y. Michael, N. Hayes, J (2019). Destination Competitiveness from a tourist Perspective A case of the United Arab Emirates. *International Journal of Tourism Research*. 21(2).259-279.

- *Roohi, M., Faeli, M., Irani, M., & Shamsaei, E., (2021). Calculation of land subsidence and changes in soil moisture and salinity using remote sensing techniques. Environmental Earth Sciences, 80, 4- 23.*
- *Zhang, Y., Wang, Z., Xue, Y., Wu, J., & Yu, J. (2016). Mechanisms for earth fissure formation due to groundwater extraction in the Su-Xi-Chang area, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75(2), 745-760.*