

صص ۱۷-۱

بررسی فرونشست شهر مشهد با استفاده از تداخل سنجی راداری

صیاد اصغری سراسکانرود*

استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

زهرا نظری گزیک

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

چکیده

پدیده فرونشست یکی از مخاطرات ژئومورفیک طی سال‌های اخیر در قسمت‌هایی از سطح کشور و از جمله در بخش‌هایی از دشت مشهد به مرحله بحرانی رسیده است و برنامه‌های عمرانی و سازه‌ای و کشاورزی را با محدودیت شدید در این بخش‌ها مواجه کرده است. شهر مشهد دومین کلان‌شهر ایران می‌باشد و در دشت مشهد در اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. به دلیل برداشت بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی، عوارض فرونشست به صورت شکاف زمین و ترک در دیوار سازه‌های مسکونی در حریم شمال غربی شهر مشهد مشاهده شده است. تکنیک تداخل سنجی راداری یک ابزار قوی در برآورد فرونشست با دقتی در محدوده میلی‌متر با استفاده از مشاهدات فاز را دارا هستند. در این مقاله به منظور پایش فرونشست اتفاق افتاده در شهر مشهد از داده‌های ماهواره Sentinel 1A سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ استفاده شده است. همچنین برای پایش کشت دیم و آبی منطقه از تصاویر Sentinel 2 سال ۲۰۲۰ استفاده گردید. نتیجه مطالعات حاصل از تداخل سنجی راداری نشان داد، در طول دوره آماری در منطقه مورد مطالعه ۴۴ سانتی‌متر فرونشست اتفاق افتاده است. در ادامه جهت یافتن علت فرونشست، اطلاعات چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه اخذ و تغییرات آن‌ها در طول دوره ۱۳۹۸-۱۳۷۰ بررسی شد. میزان فرونشست‌های ثبت شده برای هر دوره به ترتیب ۶ سانتی‌متر برای ۲۰۱۷-۲۰۱۸، برای دوره ۲۰۱۸-۲۰۱۹ حدود ۱۲ سانتی‌متر، ۱۵ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰ و ۲۰۲۰-۲۰۲۱ و ۱۱ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱ به دست آمده است. به خصوص در سطح آب زیرزمینی در محدوده‌های دارای فرونشست زمین با افت همراه بوده است. به خصوص در روستاهای مهدی‌آباد، شهر دانش، مشهد قلی و ... که بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی را دارا می‌باشد و در بهینه خطر فرونشست زیاد هم قرار دارند. یکی از دلایل اصلی فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی، فرونشست، سنتینل ۱، شهر مشهد، افت سطح آب زیرزمینی

مقدمه

فرونشست زمین پدیده‌ای مورفولوژیکی، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا با حرکت روبه پایین سطح زمین و همچنین نشست تدریجی یا ناگهانی مواد سطحی همراه است. این پدیده در حالت منطقه‌ای و به صورت نشست

روبه پایین سطح زمین و با بردار جابه‌جایی اندک مشهود است (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۷). بر اساس تعریف سازمان زمین‌شناسی ایالت متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست روبه پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای حرکت قائم رو به پایین سطح زمین و کمی افقی باشد (عابدینی، ۱۳۹۶). علیرغم این موضوع که فرونشست به‌کندی و تدریجی صورت می‌گیرد، می‌تواند طی یک مدت زمان طولانی خساراتی به بزرگی زلزله، آتش‌فشان و نیز زمین‌لغزش داشته باشد. پدیده فرونشست به‌طور کلی می‌تواند ناشی از عوامل عمده‌ایی همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات و یا افت سطح سیالات زیرزمینی و همچنین عوامل تکتونیکی باشد (فتح الهی و همکاران، ۱۳۹۶)، (چین، ۲۰۱۶). سفره‌های آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین منابع آبی برای کشاورزی، آشامیدن و صنعت است. در دهه‌های اخیر عواملی مانند رشد جمعیت، توسعه فعالیت‌های صنعتی منجر به استخراج بیش‌ازحد از آب زیرزمینی و کاهش آبخوان‌ها شده است. این امر به معنای استخراج و استفاده از آبی است که در طول هزاران سال در لایه‌های آبدار زمین ذخیره شده و با انجام این کار، سطح آب‌های زیرزمینی روز به‌روز افت کرده و سرانجام به‌جایی خواهد رسید که آبی برای استخراج وجود نخواهد داشت. پایین افتادن سطح آب‌های زیرزمینی به معنای خشک شدن مناطق پایین دست (مناطق با ارتفاع کمتر که آب جاری در لایه‌های آبدار تحت اثر جاذبه به سمت آن‌ها جریان می‌یابند)، از بین رفتن چاه‌ها، قنات‌ها و چشمه‌های آن است (دی‌گراف، ۲۰۱۷) که منجر به فرونشست زمین می‌شود. علت رخداد این پدیده می‌تواند عوامل طبیعی و یا انسانی باشد (گالووی، ۲۰۱۱). معمولاً فرونشست در نتیجه تحکیم لایه‌های خاکی (رسوبات) زمین به وقوع می‌پیوندد، به این صورت که برداشت آب‌های زیرزمینی و عدم جایگزینی آن موجب کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر خاک در لایه‌های زیرین می‌گردد. شهر مشهد، یکی از مناطق با نرخ فرونشست بسیار بالا است که با توجه به مخاطرات و خسارات جانی و مالی احتمالی ناشی از فرونشست، ضرورت دارد مورد توجه بیشتری قرار گیرند.

تاکنون مطالعات زیادی در مورد فرونشست زمین با استفاده از تداخل‌سنجی رادار در خارج و داخل کشور انجام شده است برای مثال: گو^۴ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی رابطه بین فرونشست زمین و تغییرات آب‌های زیرزمینی در پکن پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که بیش‌ترین نرخ فرونشست در محدوده مرکزی شهر و در حدود ۱۰ میلی‌متر در سال است که مقدار آن در محدوده تانژو به بیش از ۱۴۰ میلی‌متر در سال رسیده است. بررسی‌هایی که در این مطالعه بر روی آب‌های زیرزمینی انجام شد، ارتباط بالای میزان فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی را نشان داد. آگوستان^۵ و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی جابجایی زمین در جاکارتا از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های راداری پرداختند. نتایج پژوهش بیانگر این است که در این منطقه در ماه نوامبر ۲۰۱۵ تا سپتامبر ۲۰۱۶ حدود ۱۲ سانتی‌متر فرونشست داشته است. دو^۶ و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی میزان فرونشست شبه

۱-chen

2-De Graaf

3-Galloway

4-Guo

5-Agustan

6-Du

جزیره لیژاوو در چین با استفاده از تصاویر راداری پرداختند. در این پژوهش از روش تداخل سنجی راداری و تصاویر سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰ استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که حداکثر میزان فرونشست با ۳۲ میلی‌متر در نوار خط ساحلی بوده است، در حالی که میزان فرونشست در زمین‌ها داخلی بین ۱۰ تا ۱۹ میلی‌متر در سال برآورد شده است. بهاتارای (۲۰۱۷)، به شناسایی فرونشست زمین در دره کاتماندو نپال با استفاده از تکنیک DInSAR پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عمق فرونشست در محدوده ۱ سانتی‌متری تا ۱۷ سانتی‌متر است و عامل اصلی تأثیرگذار بر وقوع فرونشست زمین ناشی از آب‌های زیرزمینی است. مین و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی به بررسی فرونشست در هانوی ویتنام از طریق تکنیک تداخل سنجی راداری پرداختند و با توجه به نتایج به دست آمده افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل مؤثر در فرونشست محدوده شناخته شده است. هوانگ و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری است و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد.

در ایران نیز دولتی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به مطالعه روند توسعه، اثرات و مکانیسم فرونشست زمین در دشت مشهد پرداختند و نشست سطح زمین را یکی از پیامدهای منفی افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان مشهد معرفی کردند همچنین نتایج ایشان نشان داد که آبخوان مشهد در دوره زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۵ در بخش‌های شمال غربی (محدوده بین شهر مشهد و قوچان)، مرکزی (مشهد شهر مشهد) و شرقی جنوب شرقی آبخوان فرونشست رخ داده است. اصغری و همکاران (۱۳۹۹)، به پایش میزان فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری در طی بازه ۶ ساله (۲۰۱۵-۲۰۲۰) پرداختند، نتایج بررسی‌ها ۸ سانتی‌متر فرونشست و ۱۵ سانتی‌متر بالا آمدگی را نشان می‌دهد. خرمی و همکاران در سال (۱۳۹۸) به بررسی فرونشست شهر مشهد به روش تداخل سنجی راداری پراکنش گر دائمی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ پرداختند و بیشینه نرخ فرونشست را ۱۴ سانتی‌متر به دست آوردند. مرادی و همکاران (۱۳۹۹) در تحلیل فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکتونیک و پیزومتری در منطقه ۱۸ شهر تهران را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که حداکثر میزان فرونشست به دست آمده از مطالعه تداخل سنجی راداری در حدود ۴۳۰ میلی‌متر و در محدوده محله یافت‌آباد است، همچنین بخش شرقی منطقه ۱۸ شهری بیش‌ترین تأثیر را از پدیده فرونشست دارد. شفیی و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری به این نتیجه رسیدند که در محدوده دشت در بازه زمانی ۱۲ ساله بیش‌ترین میزان افت آب زیرزمینی حدود (۲۲-) متر در بخش‌های شرقی، جنوبی و مرکزی آبخوان واقع در چاه‌های پیزومتری اسکان عشایر، خومه‌زار، شهرک صنعتی، تل‌مشکی و شور است. ابراهیمی و همکاران ۱۳۹۹ به پایش میزان فرونشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل سنجی پرداختند نتایج حاصل از روش تداخل سنجی راداری محدوده مطالعاتی در طی بازه زمانی یک‌ساله بین ۱۵ تا ۸۵ میلی‌متر فرونشست را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و مؤثرترین عامل در فرونشست را هم افت سطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. گورابی^۷ و همکاران (۱۴۰۰) به‌منظور بررسی

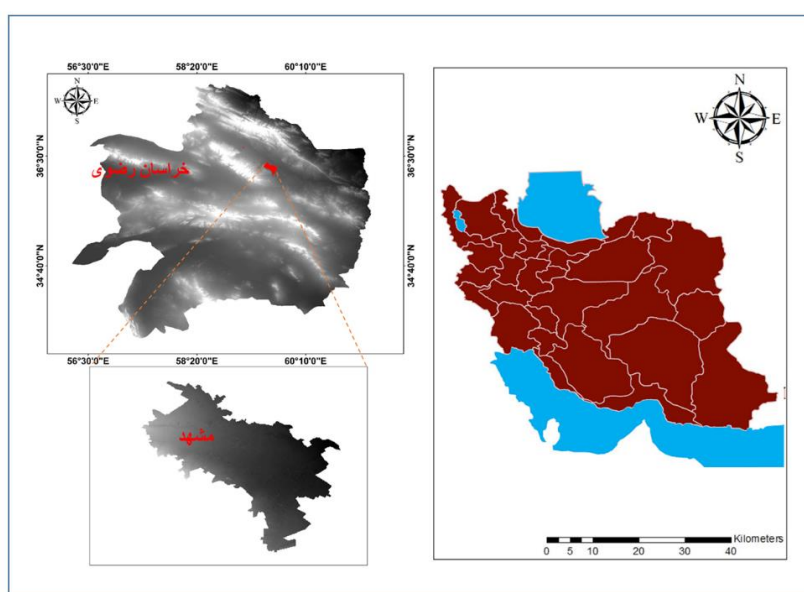
فرونشست زمین در کلان‌شهر اصفهان با تصاویر Sentinel-1 میزان فرونشست زمین را به میزان ۵- تا ۱۰۰- میلی‌متر در سال برآورد کردند که از جنوب به بخش‌های شمالی، شمال شرقی و شرقی کلان‌شهر اصفهان افزایش می‌یابد، در حالی که بخش‌های جنوبی شهر تقریباً یک منطقه پایدار هستند و میزان فرونشست قابل توجه در آن مشاهده نمی‌شود. عابدینی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی فرونشست دشت اردبیل به روش تداخل‌سنجی راداری از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که میزان فرونشست در هر سال به‌طور میانگین ۴,۴ میلی‌متر و طی بازه زمانی ۵ ساله ۲۲ میلی‌متر است. آقایی و همکاران (۱۴۰۰)، میزان فرونشست دشت اردبیل را با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اطلاعات ۳۹ حلقه چاه پیژومتری موجود در دشت اردبیل در بازه زمانی ۳۳ ساله، میانگین افت آب زیرزمینی حدود ۵,۹ متر را نشان می‌دهد. همچنین در بین کاربری‌های اراضی بالاترین میزان مربوط به مراتع خوب و مناطق کشاورزی ۰/۲۲ میلی‌متر، مراتع متوسط ۰/۲۱ میلی‌متر و مناطق انسان‌ساز ۰/۲۰ میلی‌متر است از طرفی نقشه حاصل از فرونشست بیانگر نرخ فرونشست در هر سال به‌طور میانگین ۴,۴ میلی‌متر و طی بازه زمانی ۵ ساله ۲۲ میلی‌متر است. اصغری و همکاران (۱۴۰۱)، پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت مرکزی استان البرز را با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم تحلیل چند معیاره ARAS مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که مقدار بین صفر تا ۳۰۰ میلی‌متر فرونشست در محدوده مورد بررسی ایجاد شده است که بیش‌ترین میزان فرونشست در بخش مرکزی (محدوده مهرشهر، خرم‌دشت، محمدشهر) و در بخش جنوب غرب محدوده ماهدشت متمرکز است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی وضعیت فرونشست شهر مشهد بر اثر افت آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۱ می‌باشد. با توجه به افزایش جمعیت و توسعه شهر مشهد و روستاهای موجود در منطقه، تغییر شرایط استفاده از شبکه جمع‌آوری فاضلاب و گسترش این شبکه، تغییر شرایط اقلیمی و تغییر وضعیت برداشت آب‌های زیرزمینی، نیاز به پایش دائمی وضعیت سطح آب زیرزمینی و فرونشست در این منطقه وجود دارد، لذا در این پژوهش، میزان نرخ فرونشست شهر مشهد با توجه به آخرین اطلاعات به‌روز شده است.

داده‌ها و روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد در شمال شرق ایران در طول شرقی ۳۰°-۵۹° تا ۴۰°-۵۹° و عرض شمالی ۱۵°-۳۶° تا ۲۰°-۳۶° قرار دارد. این شهر بین دو رشته کوه هزار مسجد و بینالود در منتهی‌الیه دشت مشهد در ارتفاع متوسط ۹۸۰ متر از سطح دریا با وسعت حدود ۱۲۰ کیلومترمربع قرار گرفته است. (شکل ۱) از جمله ویژگی‌های خاص شهر مشهد در مقایسه با سایر شهرهای کشور داشتن جمعیت ثابت حدود ۳ میلیون نفر و حضور حدود ۲۰ میلیون زائر به‌صورت سالانه در مقاطع زمانی کوتاه در مناسبت‌های ملی و مذهبی می‌باشد. این امر در کنار مشکلات دیگری چون وضعیت اقلیمی و کاهش نزولات جوی که به‌تبع آن کمبود منابع و محدودیت‌های تأمین آب را فراهم می‌سازد، موجب شده که توجه ویژه‌ای به مسائل و

مشکلات مرتبط با مدیریت منابع آب در آن معطوف گردد شهر مشهد بر روی نهشته‌های آبرفتی جوان دشت مشهد بنا شده است. نهشته‌های آبرفتی این دشت حاصل از فعالیت رودخانه کشف رود و سیلاب‌های فصلی رودخانه‌های محلی می‌باشد که از کوه‌های بینالود سرچشمه گرفته است. شهر مشهد از نظر ساختاری بر روی ناودیس باز دشت مشهد قرار گرفته است که از دو طرف توسط گسل‌های طولی بریده شده است. در سمت شمال دشت گسل معکوس راست‌گرد کشف رود با شیب به طرف شمال سبب بالا آمدن و رخنمون نهشته‌های مارنی شده است. پرباران‌ترین ماه سال، فروردین ماه ۴۷/۱ میلی‌متر و کم باران‌ترین آن در شهریورماه با ۱/۴ میلی‌متر محاسبه شده است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ارائه شده است (دهقان و همکاران، ۱۳۹۲).

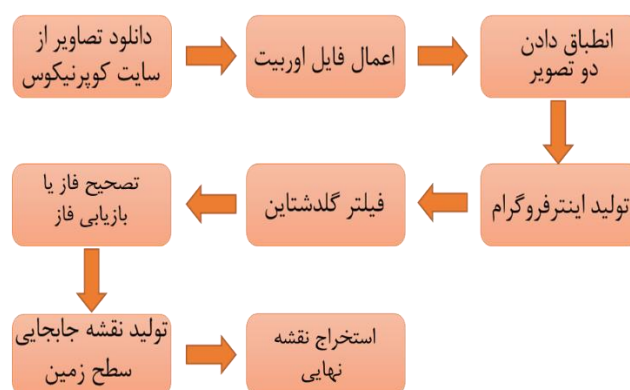


شکل ۱: محدوده مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده

روش کار در این پژوهش تحلیلی و میدانی است. در این پژوهش از داده‌های راداری که شامل تصاویر سنتینل ۱ جهت محاسبه نرخ فرونشست در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۱۷ 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 علاوه بر نوسانات تراز آب پیژومترها، افت چاه‌های بهره‌برداری، نقشه پهنه‌بندی میزان تخلیه سالانه آب زیرزمینی نیز مورد بررسی قرار گرفت سپس به منظور مطالعه آخرین وضعیت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، اطلاعات آماری چاه آب موجود در محدوده مورد مطالعه از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ از سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه تهیه شد. مطالعات تداخل‌سنجی راداری در این پژوهش توسط ۵ تصویر سنتینل و به کمک نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام گرفته است. برای کاهش نویز و افزایش همبستگی زمانی اینترفروگرام‌ها تا حد امکان سعی شده، از زوج تصاویر راداری با بازه زمانی ۱ ساله استفاده شود.

ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی نیز می‌تواند جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین با به دست آوردن جابجایی‌ها در جهات مختلف و با استفاده از اینترفرومتری مورد استفاده قرار گیرد. برای سهولت انجام کار و عدم قرارگیری منطقه در دو شیت و یکسان‌سازی و در برگرفتن منطقه مورد مطالعه در یک تصویر از داده‌های صعودی استفاده شد. همچنین در این پژوهش به منظور محاسبه فرونشست از تصاویر سنتینل (جدول ۱) با فرمت (SLC) تک منظر با پوراریزاسیون (VV) جهت محاسبه میزان نرخ جابجایی استفاده شده است. همچنین برای نتیجه بهتر کار نوع کشت منطقه را بر اساس اینکه به صورت دیم‌کاری یا آبی انجام می‌شود بررسی و پردازش کرده که این کار با استفاده از نرم‌افزار ENVI به بررسی تصاویر رادار SENTINEL-2 برای استخراج NDVI هر ۱۲ ماه سال انجام شد تا بتوانیم نوع کشت منطقه را مشخص کنیم. بدین منظور تصاویر ماه‌های سال ۲۰۲۰ از سایت Earthexplorer.usgs.gov تهیه شد. (شکل ۲)



شکل ۲: مراحل انجام کار در تداخل‌سنجی

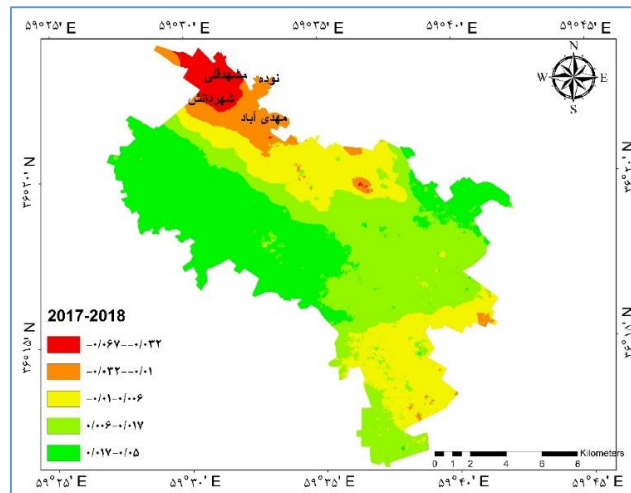
جدول ۱: مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

شماره	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویربرداری	گذر تصویربرداری	خط مبنا (متر)
۱	۲۰۱۷/۰۳/۱۷	Slc	Iw	صعودی	۱۶۳ تا -۱۱۰
۲	۲۰۱۸/۰۱/۲۳	Slc	Iw	صعودی	۱۶۳ تا -۱۱۰
۳	۲۰۱۹/۰۲/۲۳	Slc	Iw	صعودی	۱۶۳ تا -۱۱۰
۴	۲۰۲۰/۰۱/۱۰	Slc	Iw	صعودی	۱۲۹ تا -۱۱۰
۵	۲۰۲۱/۰۱/۱۲	Slc	Iw	صعودی	۱۲۸ تا -۳۳

بحث و یافته‌ها

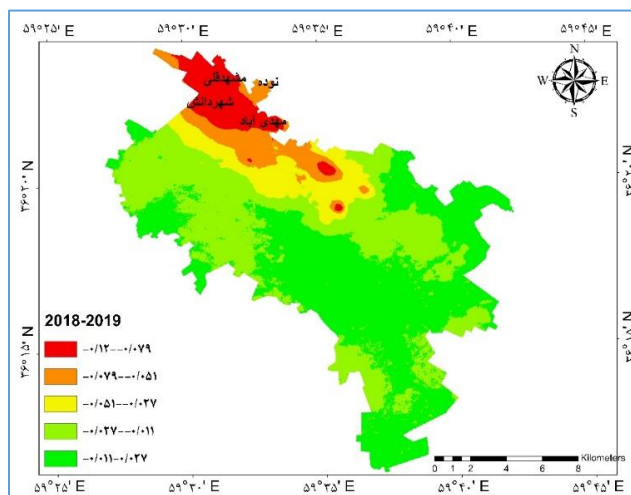
در بررسی‌های انجام شده با تصاویر راداری SLC ماهواره سنتینل ۱ در رابطه با شهر مشهد ۵ تصویر به صورت دو به دو در نرم‌افزار Envi مورد پردازش قرار گرفت که تصویر سال، ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸، ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ و تصویر ۲۰۱۹ با ۲۰۲۰ و ۲۰۲۰ با ۲۰۲۱ بررسی شد و میزان فرونشست‌های ثبت شده برای هر دوره به ترتیب ۶ سانتی‌متر برای ۲۰۱۷-۲۰۱۸، برای دوره ۲۰۱۸-۲۰۱۹ حدود ۱۲ سانتی‌متر، ۱۵ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰ و ۱۱ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱ به دست

آمد. شکل ۳ مربوط به سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ است که بیشترین میزان فرونشست منطقه ۶ سانتی‌متر در طی ۱ سال می‌باشد، بیشترین میزان فرونشست رخ داده در منطقه مورد مطالعه در محدوده‌های شمالی شهر، روستای مشهد قلی و شهر دانش است هرچه به سمت جنوب شهر پیش می‌رویم منطقه ثبات بیشتری پیدا می‌کند. در شکل ۳ میزان تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ ارائه شده است. در شکل ۳ میزان تغییرات فرونشست شهر مشهد از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ ارائه شده است.



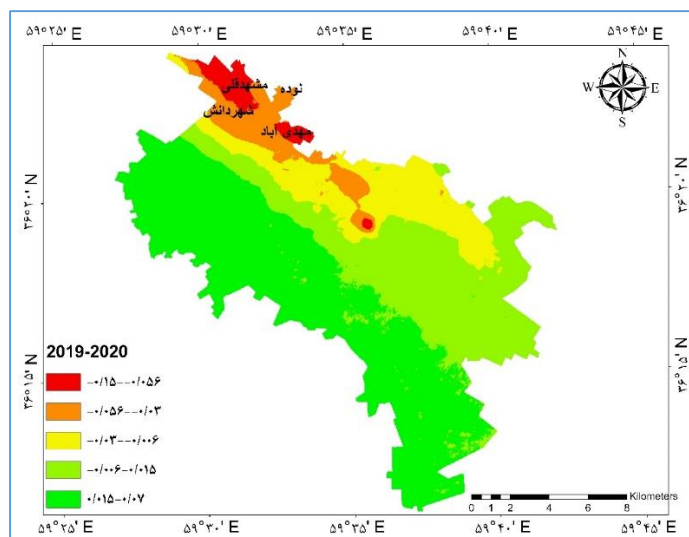
شکل ۳: تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ (مأخذ نگارندگان)

در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ میزان فرونشست سالانه منطقه ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد و بیشتر در مناطق شمالی شهر رخ داده که نسبت به سال قبل منطقه فرونشست از سمت شرق افزایش داشته و علاوه بر مشهد قلی و شهر دانش، روستاهای مهدی‌آباد و قلعه‌نو عوارض را در برگرفته است. میزان فرونشست افزایش یافته و در مناطق بیشتری پخش شده است. در شکل ۴ تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ ارائه شده است.



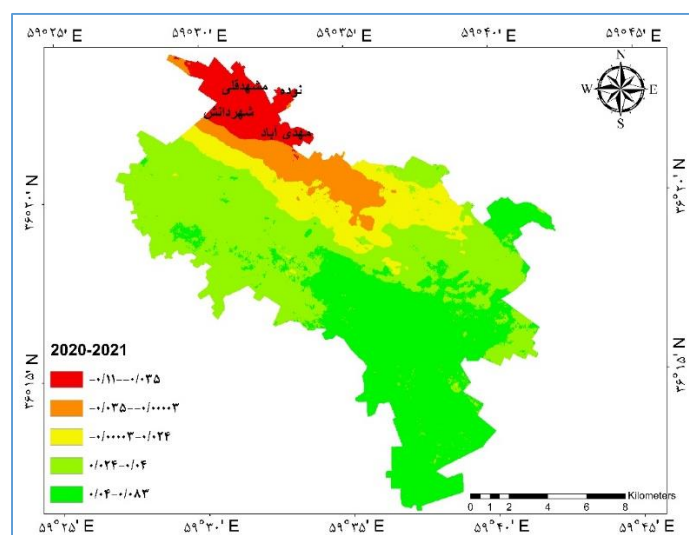
شکل ۴: تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ (مأخذ نگارندگان)

فرونشست سالانه ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ نسبت به سال‌های قبل افزایش داشته و ۱۵ سانتی‌متر است با این تفاوت که پهنه فرونشست کاهش یافته و روستاهای مهدی‌آباد و مشهد قلی و شهر دانش را در برمی‌گیرد پس میزان فرونشست این مناطق بیشتر است. (شکل ۵)



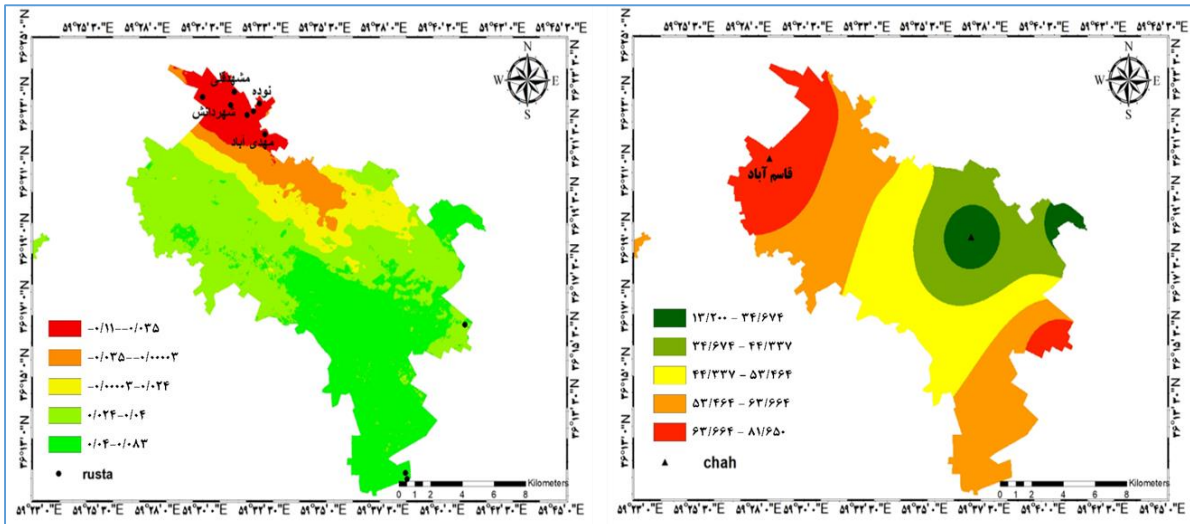
شکل ۵: تغییرات فرونشست از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ (مآخذ نگارندگان)

بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ میزان فرونشست منطقه نسبت به سال گذشته کاهش داشته و ۱۱ سانتی‌متر می‌باشد که این میزان فرونشست در تمامی روستاهای منطقه مشاهده شده و علاوه بر روستاهای سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ روستاهای نوده و باغ پیمان را نیز شامل می‌شود. در شکل ۶ تغییرات فرونشست از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ ارائه شده است.



شکل ۶: تغییرات فرونشست از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ (مآخذ نگارندگان)

فرونشست در دوره ۵ ساله ۲۰۱۷-۲۰۲۱ در چاه قاسم‌آباد و در روستاهای مهدی‌آباد، شهر دانش و مشهد قلی و... اتفاق افتاده است (شکل ۷ و شکل ۸).

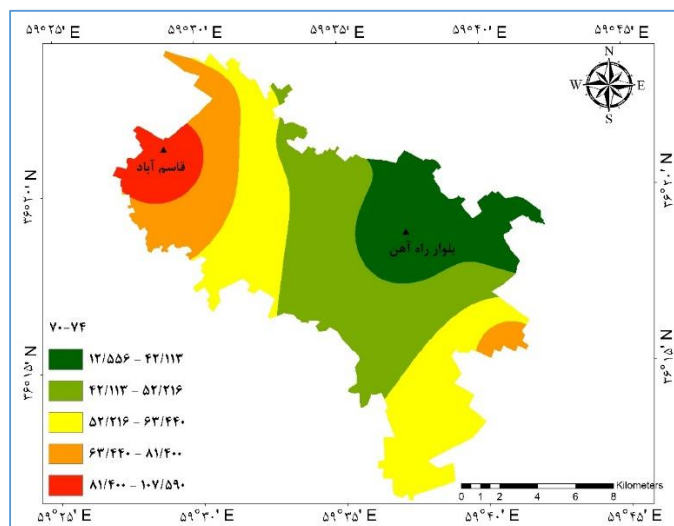


شکل ۷: موقعیت روستاها با فرونشست و موقعیت چاه‌ها با افت سطح آب در منطقه مورد مطالعه



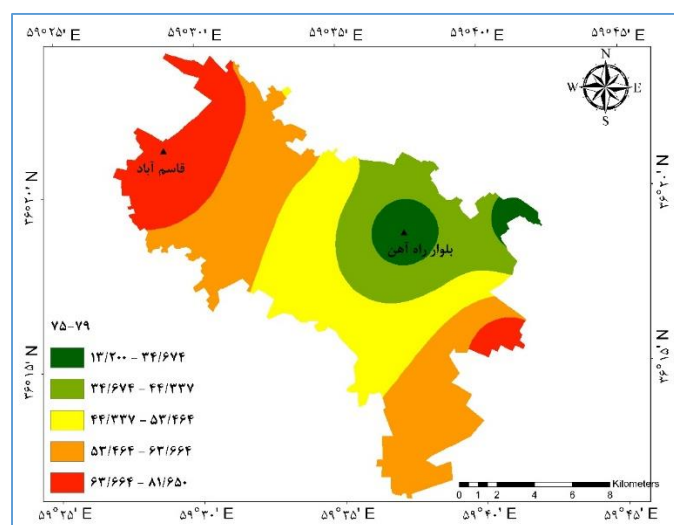
شکل ۸: نمونه‌ای از فرونشست در منطقه مورد مطالعه

در بررسی تراز آب شهر مشهد از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ تعداد ۲ حلقه چاه اصلی با داده‌های یکسان به دست آمد که اطلاعات آن از سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. داده‌ها هر ۵ سال میانگین‌گیری شد و نقشه‌های آن با استفاده از ابزار IDW در محیط GIS برای محدوده مورد مطالعه تهیه شد که در نقشه ابتدایی از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۴ بالاترین سطح آب در عمق ۱۲/۵۵ متری تا ۱۱۶/۳۲ متری سطح زمین می‌باشد که نشان‌دهنده حفر چاه بسیار عمیق در محدوده مورد مطالعه است. در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۴ کمترین و بیش‌ترین میزان افت سطح آب در منطقه مورد مطالعه ۱۲/۵۵ و ۱۰۷/۵۹ متر بوده و همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در منطقه شرق شهر در محدوده چاه قاسم‌آباد رخ داده است.



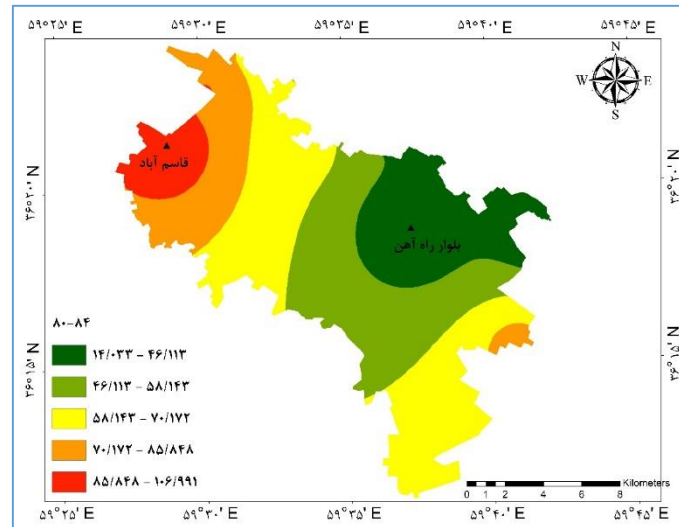
شکل ۹: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۴ (مأخذ نگارندگان)

در شکل ۱۰ نیز میزان افت آب در بازه زمانی ۱۳۷۵-۱۳۷۹ نسبت به دوره قبل کمتر بوده اما محدوده بیشتری را فراگرفته بیشترین میزان افت سطح آب ۸۱/۶۴ متر است.



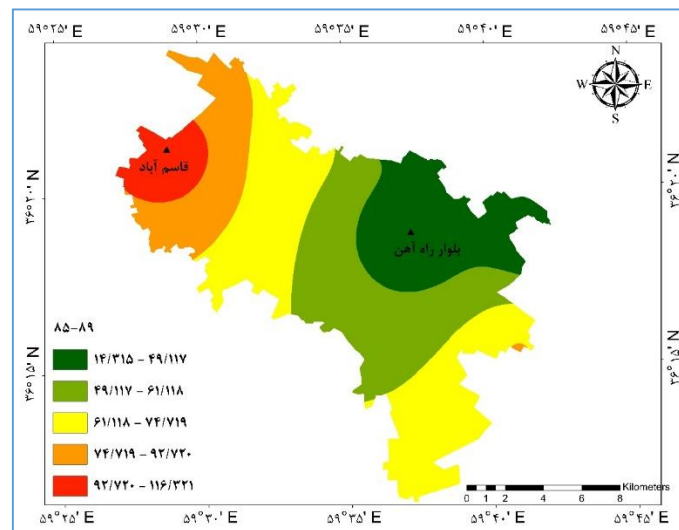
شکل ۱۰: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۹ (مأخذ نگارندگان)

در این بازه زمانی (۱۳۸۰-۱۳۸۴) افت سطح آب منطقه افزایش یافته کمترین و بیشترین میزان آن ۱۴/۰۳ و ۱۰۶/۹۹ متر است. (شکل ۱۱)



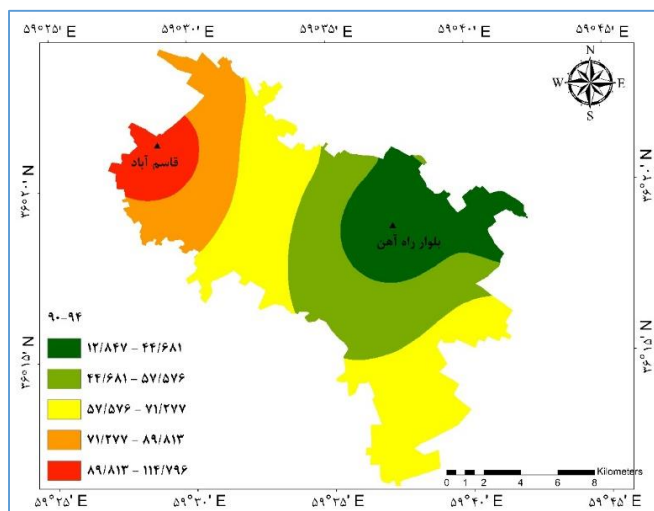
شکل ۱۱: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴ (مآخذ نگارندگان)

در شکل ۱۲ نیز میزان افت سطح آب در سال‌های ۱۳۸۴-۱۳۸۹ روند افزایشی دارد و بیشتر در قسمت شرقی دشت قرار دارد و میزان آن ۱۱۶/۳۲ متر است.



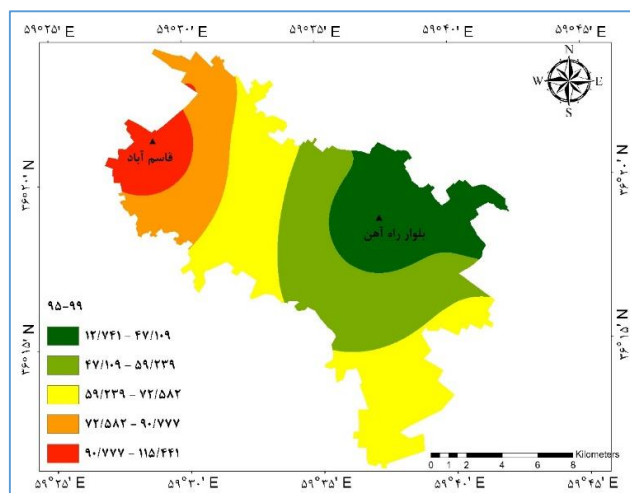
شکل ۱۲: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ (مآخذ نگارندگان)

در شکل ۱۳ مقدار سطح آب چاه‌ها در دوره ۱۳۹۰-۱۳۹۴ افزایش یافته و به ۱۲/۸۴ و ۱۱۴/۷۹ متر رسیده است اما مانند سال‌های قبل محدوده خطر در شرق شهر قرار دارد.



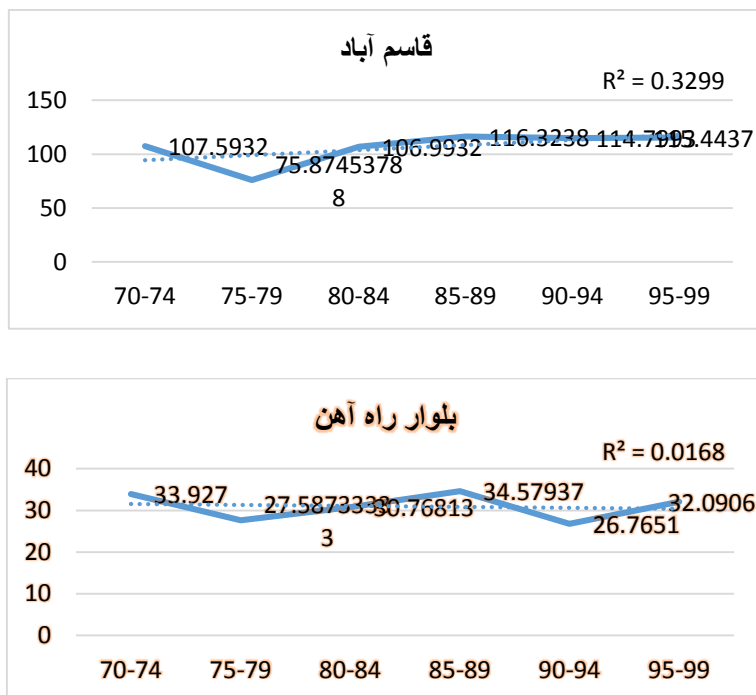
شکل ۱۳: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ (مآخذ نگارندگان)

همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود بالاترین سطح آب اندکی افزایش داشته ولی پایین ترین سطح آب کاهش داشته و به ۱۱۵/۴۴ متر رسیده است که به معنی افزایش افت سطح آب چاه است. از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۹ سطح آب چاه بلوار راه آهن روند کاهشی داشته اما در ۱۰ ساله اخیر سطح آب این چاه افزایش یافته است؛ اما در چاه قاسم آباد طی این ۳۰ سال افت سطح آب افزایش داشته فقط در بازه ۱۳۷۵ تا ۱۳۷۹ سطح آب چاه افزایش یافته است. همان طور که مشاهده می شود منطقه پرخطر همراه با افت سطح آب زیاد در قسمت شرق و شمال شرق شهر و در اطراف چاه قاسم آباد قرار دارد.

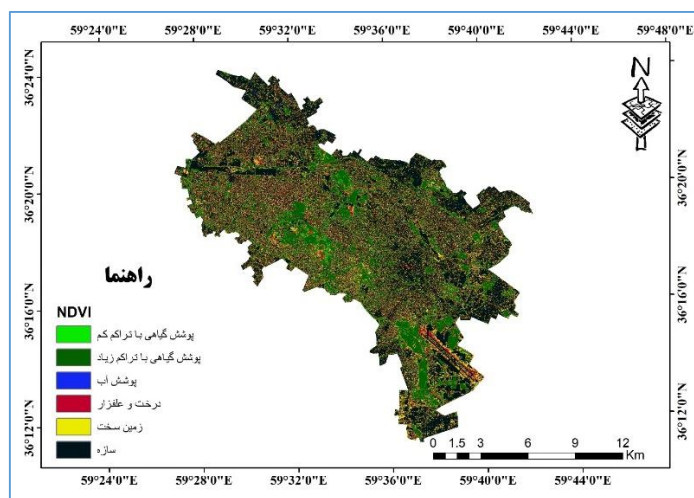


شکل ۱۴: نقشه اختلاف ارتفاع بر اساس متر از سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸ (مآخذ نگارندگان)

با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می شود که برای چاه قاسم آباد ابتدا روند افت سطح آب کاهشی بوده و از سال ۱۳۷۹ به بعد روند افزایشی داشته و تاکنون ادامه یافته است. چاه بلوار راه آهن نیز در بازه زمانی ۱۳۷۴-۱۳۷۹ و ۱۳۹۰-۱۳۹۴ افت سطح آب کاهش داشته و در بقیه زمان ها افزایش داشته است.



شکل ۱۵: نمودار روند افت سطح آب چاه‌ها



شکل ۱۶: پهنه‌بندی NDVI در شهر مشهد

پوشش زمین و کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز می‌باشند؛ زیرا در کیفیت و حجم کل آب‌های سطحی و زیرزمینی نقش مؤثری دارند. بررسی میزان افزایش، کاهش، انتقال و ثبات بین کاربری‌ها درک بهتری از نحوه تغییرات پوشش و کاربری اراضی یک منطقه می‌دهد. ما در اینجا به بررسی پوشش گیاهی شهر مشهد (شکل ۱۶) و تأثیر آن بر فرونشست پرداختیم که طبق بررسی‌های انجام شده یکی از دلایل اصلی فرونشست در منطقه، استفاده از آب زیرزمینی برای کشت محصولات است. برای به دست آوردن نقشه نوع کشت از تصاویر یک‌ساله محدود شده مورد مطالعه از ژانویه ۲۰۲۱ تا دسامبر ۱۴۰۲ با استفاده از باندهای ۴ و ۸ ماهواره سنتینل ۲، شاخص NDVI را به صورت

ماه به ماه در گوگل ارث انجین مورد پردازش قرار گرفت (جدول ۲) و با ترکیب تمام ماه‌ها یک خروجی یکسان به دست آورده که با توجه به رفتار طیفی (امضای طیفی) و طبقه‌بندی استاندارد شاخص NDVI پدیده‌های مختلف روی زمین شناسایی می‌کنیم.

جدول ۲: درصد پهنه‌بندی شاخص NDVI

درصد	نوع پوشش
۰,۰۶	آب
۴۵,۳۴	سازه
۱۷,۳۹	علفزار
۸,۹۴	تراکم کم
۱۴,۶۵	تراکم زیاد
۱۳,۷۱	زمین سخت

با توجه به بررسی فرونشست در طول دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ با استفاده از تکنیک‌های سری زمانی InSAR و افت سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ شهر مشهد، نتایج نشان داد که افت سطح آب چاه‌ها تأثیر مستقیم بر فرونشست منطقه دارد. میزان افت سطح آب در این بازه زمانی حداقل ۱۲/۵۵ متر و حداکثر ۱۱۶/۳۲ بوده و بیشتر در مناطق شمال و شمال غرب رخ داده که متأثر از کاهش بارندگی، خشک‌سالی و کشت آبی و باغی زیاد در منطقه و فشار بیش‌ازحد به منابع آب‌های زیرزمینی در این سال‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشتر سطح زیر کشت منطقه مورد مطالعه کشت آبی است. بیش‌ترین میزان فرونشست نیز ۱۵ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰ که در مناطق شمال و شمال غرب شهر مشهد اتفاق افتاده است. همان‌طور که بیان شد و با توجه به نقشه‌های بررسی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی شهر مشهد مشاهده می‌شود مکان‌های دارای فرونشست زیاد منطبق بر مناطقی است که افت آب بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله فرونشست زمین در شهر مشهد در طول دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ با استفاده از تکنیک‌های سری زمانی InSAR بررسی شد. میزان فرونشست در طول ۴ دوره آماری در منطقه مورد مطالعه ۴۴ سانتی‌متر به دست آمد. میزان فرونشست‌های ثبت شده هر دوره به ترتیب ۶ سانتی‌متر برای ۲۰۱۷-۲۰۱۸، برای دوره ۲۰۱۸-۲۰۱۹ حدود ۱۲ سانتی‌متر، ۱۵ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰ و ۱۱ سانتی‌متر برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱ به دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بیش‌ترین میزان فرونشست در مناطق شمال و شمال غرب شهر مشهد اتفاق افتاده است. سطح آب چاه‌ها در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ به بیش‌ترین حد کاهش خود رسیده‌اند میزان افت سطح آب در این بازه زمانی حداقل ۱۲/۵۵ متر و حداکثر ۱۱۶/۳۲ بوده و بیشتر در مناطق شمال و شمال غرب رخ داده که متأثر از کاهش بارندگی، خشک‌سالی و کشت آبی و باغی زیاد در منطقه و فشار بیش‌ازحد به منابع آب‌های زیرزمینی در این سال‌ها است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشتر سطح زیر کشت منطقه مورد مطالعه

کشت آبی است. مقایسه بین تحلیل‌های مستخرج از داده‌های نقاط چاه و تصاویر ماهواره‌ای نیز مؤکد رابطه بین پایین آمدن سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه است به‌خصوص در روستای شهر دانش که بیش‌ترین میزان افت سطح آب زیرزمینی را دارا است و در پهنه خطر فرونشست زیاد هم قرار دارند. در نهایت با استفاده از نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست مشخص شد. ضروری است سازمان‌ها و نهادهای متولی با اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های مناسب، پیش از وقوع بحران درصدد کاهش هرگونه آسیب به سکونتگاه‌های انسانی، جمعیت و زیرساخت‌های موجود در این مناطق باشند. از طرفی قسمت شمال و شمال غرب شهر مشهد جزو مناطق بحرانی و حساس از نظر مخاطره فرونشست است. افزایش جمعیت و نیاز بیش از پیش آن‌ها به آب از یک‌طرف و همچنین ساخت و سازهای بی‌رویه برای برطرف کردن نیاز جمعیت جدید، از طرف دیگر افزایش دما، خشک‌سالی‌های متوالی و احتمال تداوم آن در سال‌های آینده عواملی برای استفاده هر چه بیشتر آب‌های زیرزمینی است که خود باعث رخداد فرونشست در سطح وسیع‌تر می‌شود.

نتایج پژوهش را با مقالات دیگر مورد مطالعه قرار دادیم در کار دهقانی و همکاران مقدار متوسط فرونشست سالانه در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ بین ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر متغیر بوده است و محدوده فرونشست آن‌ها قسمت شمال غرب مشهد بوده است و محدوده فرونشست به دست آمده در پژوهش حاضر تطبیق کامل دارد و میزان میانگین فرونشست این پژوهش در ۴ دوره ۱۱ سانتی‌متر به دست 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 سانتی‌متر برآورد کردند هم مطابقت دارد.

برخی از راهکارهای مؤثر برای جلوگیری از فرونشست زمین:

- 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 کار آبی 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 محیط‌زیست 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 ساخت‌وسازها 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 پایداری به اقدامات جلوگیری مؤثر 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.

هر چند 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 محیط‌زیست و جامعه جلوگیری کرد. برای اجرای این راهکارها، همکاری بین دولت، سازمان‌های مردم‌نهاد و جامعه بسیار حائز اهمیت است.

منابع

- ۱- ابراهیمی، عطرین. قاسمی، افشان. گنجائیان، حمید (۲۰۲۰): پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. جغرافیا و روابط انسانی، دوره ۲، شماره ۸، صص ۲۹-۴۱.
- ۲- آقایی، لیلا. عابدینی، موسی. اصغری سراسکانرود، صیاد. (۱۴۰۰): برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). سال یازدهم، شماره ۱، صص ۱۳۲-۱۱۷.
- ۳- اصغری سرکانرود، صیاد. محمد زاده شیشه‌گران، مریم. (۱۴۰۱): برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت شهریار). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۱۰، شماره ۱.
- ۴- خرمی، محمد. ابریشمی، سعید. مقصودی، یاسر. (۱۳۹۸): تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل‌سنجی راداری پراکنش گر دائمی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۱ شماره ۶، صص ۱۲۰۴-۱۱۸۹.
- ۵- دولتی، ج. لشکری‌پور، غلامرضا. حافظی مقدس، ن. صالحی متعهد، فهیمه. (۱۳۹۵): بررسی روند توسعه اثرات و مکانیسم فرونشست زمین در دشت مشهد. همایش تخصصی پدیده فرونشست زمین در ایران.
- ۶- دهقانی، مریم. صالحی، رضا (۱۳۹۲): بررسی فرونشست دشت مهبیار جنوبی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. آبیاری و آب ایران، دوره ۳، صص ۴۷-۵۷.
- ۷- سازمان آب منطقه‌ای شهرستان مشهد. (۱۳۹۹).
- ۸- شفیعی، نجمه. مختاری، لیلا. امیر احمدی، ابوالقاسم. زندی، رحمان. (۱۳۹۹): بررسی فرونشست دشت نور آباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره ۴، صص ۹۳-۱۱۱.
- ۹- عابدینی، موسی، (۱۳۹۶): مبانی فرونشست زمین (مخاطرات هیدروژئومورفولوژی و مدیریت محیط). انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی، چاپ یکم.
- ۱۰- فتح‌اللهی، نرگس. آخوندزاده هنزائی، مهدی. بحرودی، عباس. (۱۳۹۶): بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل‌سنجی رادار. مجله سپهر، دوره ۷۲، شماره ۱۰۵، صص ۴۳-۲۳.
- ۱۱- لشکری‌پور، غلامرضا. غفوری، محمد. رستمی بارانی، حمیدرضا. (۱۳۸۷): بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر. مجله مطالعات زمین‌شناسی، شماره ۱.
- ۱۲- مرادی، آیدین. عمادالدین، سمیه. آرخی، صالح. رضائی، خلیل. (۱۳۹۹): تحلیل زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیزومتري. نشریه تحلیلی فضایی مخاطرات محیطی، سال هفتم، شماره ۱، صص ۱۷۶-۱۵۳.

- 13- Agustan, A. Sulaiman, A. Ito, A. (2016): Measuring Deformation In Jakarta Through Long Trm Synthetic Aperature Radar(SAR) Data Analysis.
- 14- Bhattarai, R. Alifu, H. Maitiniyazi, A. Kondoh. (2017):. Detection Of Land Subsidence In Kathmandu Valley, Nepal, Using Dinsar Technique, Land 2017, 6(2, 1-178).
- 15- Chen, B. Gong, H. Chen, Y. Li, X. Zhou, C. Lei, K. Zhu, L. Zhao, X. (2020): Land Subsidence And Its Relation With Groundwater Aquifers In Beijing Plain Of China, Science Of The Total Environment.
- 16- Chen, M. Tomás, R. Li, Zh. Motagh, M. Li, T. Hu, L. Gong, H. Li, X. Yu, J. Gong, X. (2016): Imaging Land Subsidence Induced By Groundwater Extraction In Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry, Remote Sens, 8(6), 468p.
- 17- De Graaf, I.E. Van Beek, R.L. Gleeson, T. Moosdorf, N. Schmitz, O. Sutanudjaja, E.H. And Bierkens, M.F. (2017): A Global-Scale Two-Layer Transient Groundwater Model: Development And Application To Groundwater Depletion, Advances In Water Resources, 102, Pp. 53-67.
- 18- Du, Y. Feng, G. Peng, X. Li, Z (2017): Subsidence Evolution Of The Leizhou Peninsula, China, Based On Insar Observation From 1992 To 2010, Appl. Sci. 2017, 7, 466; Doi:10.3390/App7050466
- 19- Galloway, D.L. Burbey, T.J. (2011): Review: Regional Land Subsidence Accompanying Groundwater Extraction, Hydrogeology Journal, 19: Pp.1459-1486.
- 20- 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.
- 21- Guo, J. Lv Zhou; Chaolong Yao; Jiyuan Hu. (2016): Surface Subsidence Analysis By Multi-Temporal Insar And GRACE: A Case Study In Beijing, Sensors.Pp.1-18.
- 22- 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.
- 23- Minh, D. H. T. Tran. Q, C. Pham, Q.N, Dang, T, Nguyen, D.A, El-Moussaw, A. (2020): "Measuring Ground Subsidence In Ha Noi Through The Radar Interferometry Technique Using Terrasar-X And Cosmos Skymed Data," In IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote.Sensing, Vol. 12, No. 10, Pp. 3874-3884.