

ارزیابی و پهنه‌بندی فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و تکنیک چند معیاره آراس

موسی عابدینی* - استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
لیلا آقایی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
الناز پیروزی - دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

چکیده

یکی از مخاطرات پیش‌روی بسیاری از مناطق کشور ایران، مخاطره فرونشست می‌باشد و با توجه به اهمیت موضوع، پایش نرخ فرونشست و پرداختن به عوامل تاثیرگذار جهت مدیریت این خطر، دارای اهمیت است. شهرستان نمین نیز، در سال‌های اخیر یکی از مناطق مستعد جهت مخاطره فرونشست می‌باشد. لذا؛ هدف از این پژوهش، ارزیابی فرونشست در این شهرستان، با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تصاویر سنتینل ۱ (در بازه زمانی ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱) و سپس پهنه‌بندی مناطق مستعد فرونشست با بهره‌گیری از الگوریتم چند معیاره آراس، می‌باشد. نتایج مطالعه، در بازه زمانی مورد بررسی، ۰/۳۷ میلی متر فرونشست را در شهرستان نمین نشان داد و بیشترین مقدار فرونشست در بخش مرکزی و شمال غرب و شمال شرق شهرستان، متمرکز است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب و کاربری اراضی به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۸۶ و ۰/۱۶۸، مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مطالعاتی می‌باشند و به ترتیب ۱۶۸/۰۱ و ۲۲۲/۳۱ کیلومتر مربع از محدوده دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد می‌باشد که پتانسیل نسبتاً بالایی این شهرستان از لحاظ فرونشست را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد، نتایج مطالعه حاضر، می‌تواند به مدیران سازمانی و برنامه‌ریزان منابع اراضی و خاک در زمینه حفاظت و مدیریت منابع آبی و جلوگیری از تخریب سرزمین کمک شایانی نماید.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی، تداخل‌سنجی راداری، تصاویر سنتینل ۱، فرونشست.

مقدمه

طبق تعریف ارایه شده توسط یونسکو فرونشست، عبارتست از فروریزش یا نشست سطح زمین که در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد (شم‌شکی و همکاران، ۱۳۸۴: ۲۷). به عبارتی فرونشست زمین به عنوان پدیده‌ای مورفولوژیک، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین و همچنین نشست تدریجی یا دفعی مواد سطحی همراه است (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۱). پدیده فرونشست به علل گوناگونی از جمله عوامل طبیعی مانند: زلزله، آتشفشان، فعالیت‌های گسلی، فرونشست ناشی از بالا آمدن سطح دریا، انحلال در سنگ، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه چاله در زمین‌های کارستی، یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، شامل برداشت بی‌رویه سیالات از زمین نظیر: آب نفت و گاز روی می‌دهد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۹: ۹۴).

پیامدهای محیطی پدیده فرونشست ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب بوده و اساساً شامل ایجاد شکاف روی سطح زمین، آسیب رساندن به سازه‌های انسانی مانند: پی ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها، راه‌ها و خطوط انتقال نیرو و فاضلاب، تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی و ایجاد خسارت به چاه‌ها است. همچنین پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب بروز سیلاب شود. به علاوه، این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در جهت، سرعت جریان و توازن آب زیرزمینی، مخاطرات جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد (شیرانی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۰۶).

در ایران فرونشست زمین بیش از ۳ دهه سابقه دارد و حاکمیت شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های رو به افزایش کشاورزی، مصارف آب شرب و صنعتی از منابع آب زیرزمینی، زیر ساخت لازم را برای رویداد این پدیده فراهم آورده است. بر اساس آمار اعلام شده در کشور ایران، اثرات سوء ناشی از رخداد فرونشست رقم پایینی نیست و به سرعت در حال ایجاد و گسترش در مناطق مختلف کشور می‌باشد که عدم مدیریت و کنترل به موقع عوامل آن می‌تواند خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری برجای بگذارد (منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸: ۳۶).

با توجه به اهمیت موضوع در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی در ایران و جهان، در زمینه فرونشست صورت گرفته است. به عنوان مثال؛ بهاتارای و همکاران^۱ (۲۰۱۷)، به شناسایی فرونشست زمین در دره کاتماندو نپال با استفاده از تکنیک DInSAR پرداخته و به این نتیجه دست یافتند که عمق فرونشست در محدوده ۱ سانتی متر تا ۱۷ سانتی متر می‌باشد و عامل اصلی تأثیرگذار بر وقوع فرونشست زمین ناشی از آب‌های زیرزمینی است. گامبولاتی و همکاران^۲ (۲۰۱۸)، در پژوهشی به مطالعه تأثیر فعالیت‌های انسانی بر میزان فرونشست زمین در مناطق مسکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سازه‌ها را مهم‌ترین علت فرونشست در مناطق مسکونی بیان کردند. مین و همکاران^۳ (۲۰۱۹)، در پژوهشی به بررسی فرونشست در هانوی ویتنام، از طریق تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداختند و با توجه به نتایج حاصله، افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل موثر در فرونشست محدوده شناخته شده است. هوانگ و همکاران^۴ (۲۰۲۰)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند. بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری می‌باشد و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. رنجبر و همکاران^۵ (۲۰۲۱)، به بررسی حساسیت فرونشست زمین، در شهرستان شهریار با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین بردار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ANFIS-ICA با سطح زیرمنحنی (۰/۹۳۲)، بهترین دقت را در بین مدل‌ها دارد و

1. Bhattarai et al

2. Gambolati et al

3. Minh et al

4. Huang et al

5. Ranjgar et al

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت و برداشت بیشتر از آب‌های زیرزمینی؛ نرخ فروزشست افزایش یافته است. هیوسین و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، در کراچی در بخش جنوبی پاکستان، در امتداد ساحل دریای عرب، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی SAR، به پایش میزان فروزشست پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که میزان فروزشست در محدوده بین ۶۷/۶۶ تا ۷۴/۶۸ میلی‌متر در سال بوده و استخراج آب‌های زیرزمینی برای مقاصد تجاری و خانگی علت اصلی فروزشست در منطقه مورد مطالعه است.

عابدینی (۱۳۹۲ و ۱۳۹۵)^۱، در مورد علل فروزشست دشت اردبیل کار کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که مهمترین علل فروزشست دشت اردبیل در دو دهه اخیر عمدتاً در ارتباط با برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و تا حدودی هم تکتونیک بوده است. عابدینی و همکاران (۱۳۹۵)^۲، در باره تعیین مناطق فروزشست احتمالی دشت روانسرا-سنجایی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی تحقیق کرده و به این نتیجه رسیدند که ارتباط و همبستگی قوی میان عمق رسوبات ریز دانه چاه‌ها و احتمال فروزشست زیاد آبی وجود ندارد به طوری که حداکثر عمق رسوبات ریز دانه در نواحی مستعد فروزشینی با احتمال خطر بالا، حدود ۱۲-۰ متر است این در حالی است که در برخی از نقاط آبخوان که استعداد کمتری برای فروزشست دارند عمق رسوبات ریز دانه بسیار بیشتر و حدود ۲۹-۲۲ متر است.

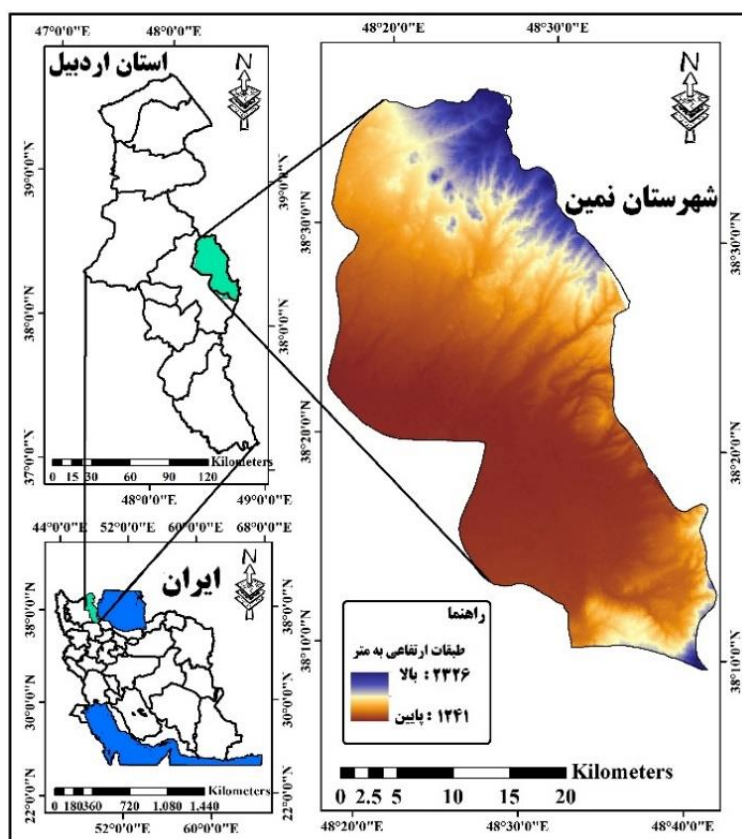
کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، اقدام به بررسی ارتباط فروزشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS کرده و نتیجه کارشان نشان داده که بین وضعیت توپوگرافی، ضخامت سازند و برداشت آب ارتباط تنگاتنگی وجود دارد و بیشترین میزان فروزشست در مناطق با برداشت زیاد، آبرفت‌های ضخیم، و مناطق پست دشت مشاهده می‌شود. کوه بنانی و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی به بررسی فروزشست زمین با بهره‌گیری از تداخل سنجی راداری در دشت کاشمر و خلیل‌آباد (سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷)، پرداختند. نتایج نشان داد این منطقه در بیشترین حالت ۱۱ سانتیمتر در سال فروزشست دارد و به طور تقریبی هر ۱ متر افت آب زیرزمینی منجر به فروزشست حداکثر ۱۳ سانتیمتر زمین می‌گردد. اصغری سرا سکانرود و همکاران (۱۳۹۹)، به پایش میزان فروزشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تصاویر سنتیل ۱، در طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ پرداختند و نتایج حاصل از این پژوهش در طول ۶ سال مورد بررسی، ۸ سانتی‌متر فروزشست را در این شهرستان نشان می‌دهد. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، به پایش میزان فروزشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل سنجی پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه، در طی بازه زمانی یک ساله بین ۱۵ تا ۸۵ میلی‌متر فروزشست را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و موثرترین عامل در فروزشست را هم‌افت سطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. اصغری و محمدزاده (۱۴۰۰)، به پایش فروزشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی در دشت شهریار پرداخته‌اند و طبق نتایج حاصله، بیشترین میزان فروزشست ۱۱ سانتیمتر می‌باشد و در طی شش سال ۷ متر افت آب زیرزمینی در منطقه وجود داشته و برداشت بیش از حد و افت سطح آب زیرزمینی را مهم‌ترین علت محدوده مطالعاتی می‌باشد. آقایی و همکاران (۱۴۰۱)، میزان فروزشست دشت اردبیل را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری برآورد کردند. نتایج مطالعه، در بازه زمانی ۵ ساله، فروزشست ۵ ساله، ۲۲ سانتی‌متر فروزشست را نشان می‌دهد و بیشترین میزان پراکندگی فروزشست در مناطق کشاورزی و مسکونی و با افت سطح آب زیرزمینی بالا، می‌باشد.

عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)^۲، میزان فروزشست دشت اردبیل را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری برآورد کردند. نتایج مطالعه، در بازه زمانی ۵ ساله، فروزشست ۵ ساله، ۲۲ سانتی‌متر فروزشست را نشان می‌دهد و بیشترین میزان پراکندگی فروزشست در مناطق کشاورزی و مسکونی و با افت سطح آب زیرزمینی بالا، می‌باشد.

با توجه به روند رو به رشد جمعیت شهرستان نمین، بر حجم برداشت از سفره‌های زیرزمینی افزوده شده و کل آب مورد نیاز بخش کشاورزی و بخش عمده‌ای از آب شرب شهرستان از منابع زیرزمینی و چاه‌های عمیق تأمین می‌شود. لذا، برداشت غیرمجاز و بی‌رویه آب از منابع زیرزمینی به مرور زمان اراضی شهرستان نمین را به محل مستعدی برای فرونشست زمین بدل کرده است. لذا با توجه به اهمیت موضوع و نظر به اینکه، اولین گام در پایش فرونشست اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی ناشی از آن در سطح زمین است و با توجه به اینکه روش تداخل سنجی راداری، برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین روش متداولی می‌باشد و پوشش سراسری و رزولیشن خوب تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را به عنوان ابزاری نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون فرونشست مطرح کرده است. در پژوهش حاضر به ارزیابی مقدار فرونشست محدوده شهرستان نمین در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری پرداخته شده است. یکی دیگر از اهداف این مطالعه تهیه و ارائه نقشه پهنه‌بندی خطر نشست زمین با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره‌ی آراس و با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی بوده است تا بر اساس آن هم محدوده فعلی وجود مشکل مشخص شود و هم سایر سطوح مستعد که احتمالاً در آینده درگیر این مشکل خواهند شد، شناسایی گردند.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان نمین یکی از شهرستان‌های استان اردبیل واقع در شمال غربی ایران است. این شهرستان، با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول خاوری و ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱). شهرستان نمین در شمال شرق استان اردبیل و در فاصله ۲۲ کیلومتری مرکز استان در کنار جاده ترانزیتی اردبیل به گیلان و تهران با وسعت ۱ هزار و ۳۷ کیلومترمربع در همسایگی کشور جمهوری آذربایجان واقع شده که حدود پنج و نیم درصد کل مساحت استان اردبیل را در بر می‌گیرد. جمعیت شهرستان حدود ۶۱ هزار نفرو دارای سه شهر نمین، ابی‌بیگلو و عنبران و شامل سه بخش مرکزی، ویلکیچ و عنبران و همچنین دارای ۷ دهستان و ۹۱ روستا است. از نظر ارتفاع، شهرستان نمین در محدوده ارتفاعی ۱۳۴۱ تا ۲۳۲۶ متر از سطح دریا قرار دارد. کوه‌های شهرستان نمین شامل کوه قرخلر، کوه عنبران، کوه فندق پشته، کوه‌های ننه کران، کوه بزرگ (بیوک داغ) در شمال شرقی ده کلسر، کوه‌های دگرماندرق، کوه‌های آبی بیگلو که در جنگل واقع شده و گرمه چشمه و سوها و نیارق و حور که یک رشته‌کوه از نمین بلکه از مغانات رو به جنوب شرقی پیشرفته و به کوه‌های باغرو متصل شده است. هر یک از این کوه‌ها اسم محلی مخصوص دارد و مجموع آن‌ها همان کوه تالش است. از نظر زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه در زون زمین‌ساختی البرز غربی - آذربایجان قرار دارد و این واحد، یک واحد مرکب با ساختمان‌های زمین‌های شکسته، چین‌خورده و آتشفشانی می‌باشد. جنبش‌های زمین‌ساخت آخر کرتاسه (حرکت لارامید)، نخستین جنبش‌های منطقه‌اند و در نتیجه‌ی این حرکات، شمال غرب ایران، به شکل مرکز جنبش‌های زمین‌ساختی آتشفشانی ظاهر شده است. فعالیت‌های ماگمایی آذربایجان از نوع آتشفشانی بوده و محیط‌های رسوبی و مناطق چین‌خورده را پوشش داده است. به ترتیب واحدهای Eav (آندزیت ولکانیکی)، با پوشش ۳۳۹/۰۳ کیلومترمربع از سطح شهرستان و Qt2 (رسوبات تراس‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌های پایکوهی)، با پوشش ۲۷۶/۲۱ کیلومترمربع از سطح شهرستان، بیش‌ترین مساحت به خود اختصاص داده‌اند. همچنین، به ترتیب واحدهای PAEav (آندزیت آتشفشانی)، با مساحت ۳/۱۴۸ کیلومترمربع و pCbr (دولومیت و ماسه‌سنگ)، با مساحت ۸/۸۳۷ کیلومترمربع، کم‌ترین مقدار از مساحت شهرستان را پوشانده‌اند. از نظر واحدهای ژئومورفولوژیکی، منطقه مورد مطالعه در واحد شمال غربی قرار دارد. نمین دارای آب و هوای معتدل، زمستان‌های سرد و تابستان‌های ملایم است.



شکل ۱: نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

برآورد مقدار فرونشست استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری

در این پژوهش از تصاویر سنتینل ۱ که در محدوده باند C امواج مایکروویو اخذ تصویر می‌کند، استفاده شده است. سپس پردازش‌های لازم از طریق افزونه SARSCAPE 5.2 در نرم افزار ENVI 5.3 انجام شد و تکنیک مورد استفاده در این پژوهش به منظور تعیین میزان فرونشست، روش تداخل‌سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر و یا غیر مکرر می‌باشد. در تداخل‌سنجی راداری تفاوت فاز دو تصویر از یک منطقه زمانی و خط مبنای مشخص تعیین می‌گردد (قنوتای و همکاران، ۱۳۹۹: ۴). از اساسی‌ترین مراحل در پردازش تداخل‌سنجی 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 پژوهش حاضر از دو تصویر Sentinel-1-A از نوع SLC مربوط به سال ۲۰۱۶ و سال ۲۰۲۰ استفاده گردید. یک سیگنال راداری با دریچه مصنوعی از دو بخش دامنه و فاز تشکیل شده است. دامنه، قدرت سیگنال برگشتی است و فاز کسری از یک سیگنال کامل موج سینوسی است. فاز در تصویر راداری از طریق فاصله بین آنتن سنجنده و عارضه زمینی مشخص می‌گردد. اگر چه فاز یک تصویر منفرد به سختی اطلاعات مفیدی در اختیار قرار می‌دهد. اما تفاوت فاز یک زوج تصویر هم‌مرجع و هم‌دوس اطلاعات ذی‌قیمتی در اختیار محققان قرار می‌دهد. در تداخل‌سنجی راداری تفاوت فاز دو تصویر از یک منطقه زمانی و خط مبنای مشخص تعیین می‌گردد. روش تداخل‌سنجی 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. این روش را برای اولین بار توسط

گولدشتاین^۱ و زبکر^۲ در سال ۱۹۸۹ ارائه شد. این اصطلاح به روش اندازه‌گیری پاره‌ای از 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. اصول بنیادین نحوه اندازه‌گیری تغییرات سطحی پوسته زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، P معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر شده است. سنجنده تصویر نخست (تصویر اصلی) $T0^7$ ثابت و مقدار فاز را (Φm) 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 (تصویر فرعی)^۸ در زمان t و با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز (Φm) را برای آن اندازه‌گیری می‌کند. روش تداخل‌سنجی تفاضلی، تفاضل فاز Φs و Φm 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.

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

که در آن SP فاز تصویر اول، MP فاز تصویر دوم، عدد پی با مقدار ثابت $3/14$ و 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 ناشی از توپوگرافی (ΦTop) و فاز ناشی از اتمسفر خواهد.

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

در نهایت، با نادیده انگاشتن اثر اتمسفر در جابجایی‌هایی 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. تداخل نگار تفاضلی حاصل در برگیرنده مقداری نویز است. عامل به وجود آورنده این نویزها می‌تواند مختلف باشد، دو عامل اصلی در به وجود آمدن آن‌ها تاثیرگذار است (حبیب‌زاده و علی‌المدرسی، ۱۳۹۲: ۶۳). عامل اول مربوط به تفاوت زمانی بین دو تصویر اصلی و وابسته است. گاهی اوقات برخی از تغییرات در منطقه که در بین فاصله زمانی بین دو تصویر اتفاق می‌افتد جز عوامل به وجود آورنده نویز می‌باشند که می‌توان به ساخت و سازهای مربوط به فعالیت‌های عمرانی و یا فعالیت‌های کشاورزی در منطقه اشاره کرد. عامل دوم که در به وجود آوردن نویزها تاثیرگذار است خط مبنای مکانی می‌باشد که میزان نویزها در تصاویر ارتباط مستقیمی با خط مبنای مکانی دارد، هر چه این میزان بیشتر باشد ما شاهد وجود نویزهای بیشتری در تداخل نگار هستیم. در منطقه مورد مطالعه به دلیل مهاجر پذیر بودن شهرستان نمین و نرخ بالای رشد ساکنین آن شاهد ساخت و ساز و فعالیت‌های عمرانی زیادی هستیم. علاوه بر این عامل، وجود زمین‌های کشاورزی و باغات جز عوامل ایجاد نویز در تصاویر است و برای حذف و کاهش نویزها از عمل فیلترینگ استفاده شده است. به دلیل کارایی بالای فیلتر Goldstein در انجام این تحقیق از آن استفاده شده است، نتیجه اعمال فیلتر تولید تداخل نگار فیلتر شده است که این تداخل نگار از لحاظ بصری حاشیه‌های مرتب تری نسبت به تداخل نگار فیلتر نشده دارد و میزان نویز در آن‌ها کاهش چشمگیری داشته است. ویژگی این فیلتر این است که به صورت انتخابی عمل می‌کند و عمل فیلترگذاری به صورت محلی انجام می‌شود، نوع عملکرد این فیلتر تحت تاثیر همبستگی تداخل نگار است، در مواردی که شاهد همبستگی پایین است مقدار پیکسل‌های بیشتری را تحت تاثیر قرار می‌دهد و در مواردی که شاهد همبستگی بالا است تعداد پیکسل‌های محدودی

¹. Goldstein

². zebker

را تحت تاثیر قرار می‌دهد. فاز اینترفروگرام حاوی اثر توپوگرافی، خطای مداری و اثرات اتمسفر می‌باشد. برای به دست آوردن جابه‌جایی سطح زمین در یک بازه زمانی، می‌بایست خطاهای مداری، اثرات توپوگرافی و نویز اتمسفر از اینترفروگرام‌ها حذف گردند. خطاهای مداری نیز با برازش یک رویه به مناطقی که فاقد جابه‌جایی هستند مدل‌سازی شد و از اینترفروگرام مورد نظر کم گردید. خطای اتمسفر را می‌توان به کمک اطلاعات جوی و مدل اتمسفری تعدیل نمود (آقایاری و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۲۳). در مطالعه مربوط به علل فرونشست زمین، بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی دارد. به منظور پایش سطح آب‌های زیرزمینی نقشه سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برای سال‌های (۶۶ و ۹۹) با روش مدل‌های کریجینگ که نتایج بیانگر دقت بالای این روش است مورد استفاده قرار گرفت.

مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش ARAS^۱ (ارزیابی نسبت جمعی)

جهت پهنه‌بندی، خطر فرونشست، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه‌بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، فاصله از شهر و روستا، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی)، با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی گردید. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه‌ی رودخانه‌های شهرستان نمین، تهیه گردید. لایه‌های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، دانلود شده از سایت (vertex.daac.asf.alaska.edu)، تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی استان؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، از تصاویر لندست هشت، سنجنده (OLI)، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، استفاده شده است. در این راستا، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر با استفاده از روش Flaash، در نرم‌افزار Envi انجام شد. سپس طبقه‌بندی با روش شیء‌گرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار Ecognition Developer، صورت گرفت و نتایج حاصله از طبقه‌بندی کاربری‌ها در مطالعه‌ی حاضر، چه از نظر تک‌کاربری‌ها و چه از نظر مجموع صحت و آمار کاپا، از صحت قابل قبولی (بزرگ‌تر از ۸۵ درصد)، در ارتباط با اطلاعات تولیدشده برخوردار می‌باشد. سپس با اجرای مراحل تکنیک آراس نسبت به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست اقدام شد.

روش ARAS مبتنی بر این استدلال است که با استفاده از مقایسه‌های ساده نسبی می‌توان پدیده‌های دنیای پیچیده را درک کرد (علیزاده و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۲۶). این تکنیک، روشی قدرتمند در ارائه نرخ عملکرد و درجه مطلوبیت گزینه‌های مختلف نسبت به وضع بهینه است و از سهولت کاربرد نسبی نیز برخوردار است (آنامرادنژاد و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۴). مراحل الگوریتم پیاده‌سازی آراس به شرح ذیل می‌باشد:

۱: تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش به صورت معیار-گزینه است. یعنی یک ماتریسی که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است. ۲: نرمال کردن ماتریس تصمیم یا استاندارد سازی: در پیاده‌سازی تمامی الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر فرونشست، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی صورت پذیرفت (جدول ۱). استاندارد نمودن داده‌ها به معنی هم‌سان کردن دامنه تغییرات داده‌ها بین صفر و یک و یا یک

^۱. Additive Ratio Assessment

دامنه مشخص دیگر است. در مجموعه‌های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداکثر عضویت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداقل عضویت در مجموعه تعلق می‌گیرد (حسینی^۱، ۲۰۱۹: ۱۳).

جدول ۱: نوع توابع فازی ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست محدوده مورد مطالعه

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	با کاهش مقدار شیب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از شهر و روستا	در مناطق مجاور از شهر و روستا، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور خطوط گسل، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از رودخانه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست کاهش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
افت سطح آب	با افزایش مقدار افت سطح آب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی

منابع: (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۶۰)، (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱: ۵۳).

۳: وزن دار کردن ماتریس نرمال: جهت وزن دار کردن ماتریس نرمال برای استخراج پهنه بندی روش های متعددی مانند ANP، AHP، CRITIC وجود دارد اما در این پژوهش، جهت وزن دهی عوامل از روش CRITIC استفاده شده است. در این روش، داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضاد موجود بین عوامل یا معیارها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و بعد از محاسبه انحراف معیار عوامل، ماتریس متقارنی به ابعاد $m \times m$ ایجاد می‌گردد که شامل ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده است. با تعیین پارامترهای بالا، تضاد موجود بین معیار j با معیارهای دیگر با استفاده از رابطه ۳، محاسبه می‌گردد.

$$C_{jk} = \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن C_{jk} معرف مجموع تضاد معیار j با معیارهای k است که از $k = 1$ شروع شده و تا $k = m$ ادامه دارد و r_{jk} همبستگی بین دو معیار k و j را نشان می‌دهد. میزان اطلاعات عامل j را می‌توان با استفاده از رابطه ۴، محاسبه نمود.

$$C_j = \delta_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن C_j ، معرف میزان اطلاعات معیار j و انحراف معیار در مقادیر مربوط به عامل یا معیار j را نشان می‌دهد. با توجه به روابط یادشده، معیارهایی که دارای C_j بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. وزن هر عامل مانند j از رابطه ۵، تعیین می‌گردد.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن W_j معرف وزن معیار j و C_k نشانگر میزان اطلاعات مجموع معیارهای k است که از $k = 1$ شروع شده و تا $k = m$ ادامه دارد. لذا، وزن نهایی هر معیار، از تقسیم میزان اطلاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلاعات تمامی معیارها بدست می‌آید (علی‌نژاد و خلیلی^۲، ۲۰۱۹: ۵۳۰).

۴- محاسبه مطلوبیت کل هر گزینه: برای به دست آوردن تابع بهینگی S_i ، اعداد نرمال شده وزین (X_{ij}) را به صورت سطر با هم جمع می‌کنیم (رابطه ۶). بزرگترین مقدار S_i بهترین است، و کمترین آن بدترین. با توجه به روند محاسبه

¹. Hoseini

². Alinezhad and Khalili

شده، تابع بهیجگی S_i دارای یک رابطه مستقیم و متناسب با مقادیر X_{ij} و وزن های W_j از معیارهای بررسی شده و تأثیر نسبی آنها بر روی نتیجه ی نهایی است.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij}; i=\overline{0.m.6} \text{ رابطه ۶}$$

۵- محاسبه مطلوبیت نسبی هر گزینه و رتبه‌بندی گزینه ها؛ درجه ی مطلوبیت هر گزینه (آلترناتیو) به وسیله مقایسه متغیری که تجزیه و تحلیل شده است با حالت ایده آل یعنی S_0 مشخص می‌گردد. معادله مورد استفاده برای محاسبه درجه ی مطلوبیت K_i از یک گزینه a_i به صورت رابطه (۷) است (دیانی و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۷۱؛ زاوادسکاس و تورسکیس^۱، ۲۰۱۰: ۱۶۱). فلوجارت مربوط به فرآیند پژوهش، در شکل ۲، نمایش داده شده است.

$$K_i = \frac{S_i}{S_0}; i = \overline{0.m.7} \text{ رابطه ۷}$$

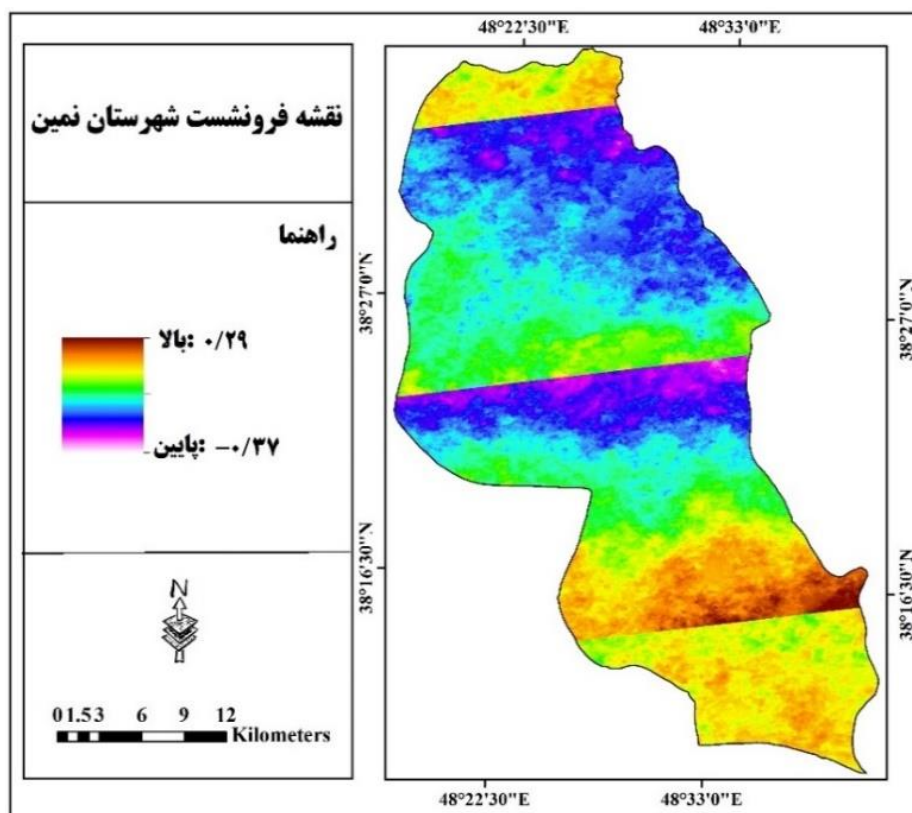


شکل ۲: فلوجارت مربوط به فرآیند پژوهش

¹. Zavadskas and Turskis

برآورد مقدار فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری

پس از انجام مراحل تداخل‌سنجی تبدیل اختلاف فازها به جابجایی عمودی انجام شد و به جابجایی عمودی در سیستم متریک تبدیل شده است. شکل ۳، میزان فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰، را در طی ۵ سال اخیر، نشان می‌دهد که با توجه به نقشه مزبور، بیشترین میزان فرونشست در بخش مرکزی، شمال غربی و شمال شرقی، به مقدار ۰/۳۷ میلی‌متر، متمرکز است. بررسی و تحلیل نقشه کاربری اراضی و فرونشست و مطالعات میدانی موید رخداد بیشینه عرصه فرونشست به ترتیب در مناطق کشاورزی و محدوده شهری و روستایی می‌باشد. وجود دشت‌های حاصلخیز و جریان رودخانه قره‌سو در شهرستان نمین فرصت مناسبی برای فعالیت‌های کشاورزی و دامداری فراهم نموده است و مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارند. به علاوه، به سبب تامین نیازهای آبی جامعه سکونت‌گاهی و مناطق اطراف و همچنین تامین نیازهای آبی بخش صنعت از جمله؛ شهرک صنعتی شماره ۲ اردبیل دست‌اندازی به منابع آبی بیشتر بوده و استحصال آب‌های زیرزمینی بسیار بالاست و به همین دلیل میزان افت آب نیز بالا بوده است (عملیات اجرایی شهرک صنعتی شماره ۲ اردبیل پس از اخذ مصوبه هیات محترم وزیران از سال ۱۳۸۰ شروع شده است. این شهرک که بزرگترین شهرک صنعتی استان می‌باشد. در فاصله ۱۳ کیلومتری مرکز استان و در جوار بزرگراه اردبیل-آستارا واقع شده است. همجواری این شهرک با گمرک و فرودگاه و نیز استقرار در مسیر بزرگراه اردبیل به تهران و نداشتن محدودیت‌های زیست محیطی برای استقرار صنایع مختلف از مزایا و جاذبه‌های این شهرک می‌باشد. مساحت شهرک ۶۰۰۰ هکتار بوده و امکان توسعه ۷۰۰۰ هکتار را دارا می‌باشد). همچنین از ویژگی‌های این شهرستان وجود جنگل فندقلو و مرات سرسبز شغاله درق به وسعت ۵ هزار هکتار در ناحیه شرق و شمال شرقی و مسیر دهانه تونل جاده ارتباطی استان اردبیل به گیلان بوده که جزء مناطق گردشگری و سرسبز منحصر به فرد برای گردشگری داخلی و خارجی در فصول مختلف سال می‌باشد. لذا با توجه به طبیعت بکر و جاذبه‌های گردشگری شهرستان نمین، افزایش باغ‌ها و ویلاها، باعث شده تعدادچاه‌ها افزایش پیدا کنند و افزایش بهره‌برداری از یک سو و توسعه مناطق سکونتگاهی و عدم تغذیه مناسب آبخوان از طرف دیگر منجر به ایجاد نشانه‌های فرونشست در بسیاری از نقاط محدوده شده است.



شکل ۳: نقشه فرونشست شهرستان نمین

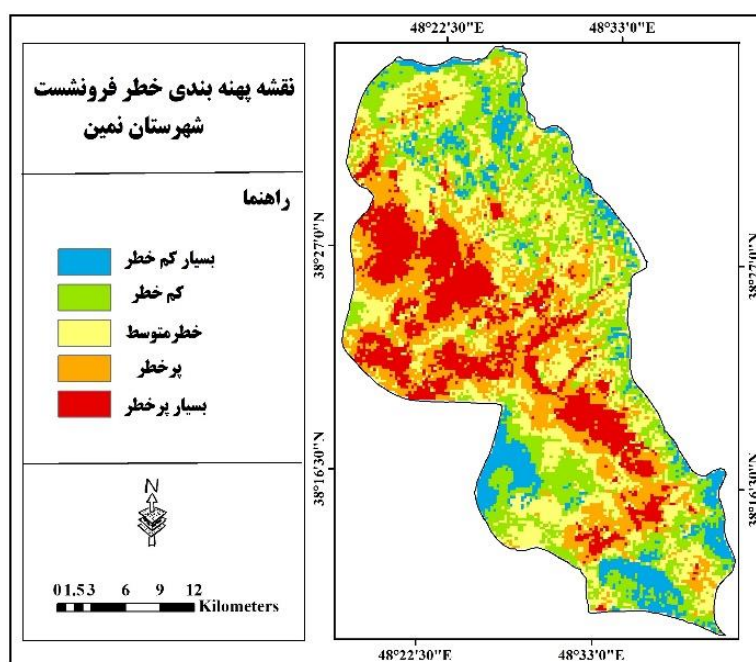
پهنه بندی خطر فرونشست

پس از استخراج نقشه‌های هر یک از معیارها (شکل ۴) و اعمال وزن‌های مربوطه‌ی حاصل از روش کرتیک (جدول ۲) و با اجرای مراحل مختلف تکنیک آراس، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست در ۵ طبقه‌ی بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، بدست آمد (شکل ۵). با توجه به نتایج حاصله، به ترتیب معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی و زمین شناسی، بیشترین وزن و اهمیت را دریافت کردند و با توجه به اینکه در وزن‌دهی CRITIC، وزن معیارها، با توجه به نقشه‌های معیار و میزان همبستگی، تضاد و انحراف معیار بین لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده، تعیین می‌گردد، استفاده از این روش، در وزن‌دهی معیارها در پژوهش حاضر می‌تواند معضل استقلال صفات از یکدیگر که به هنگام مقایسه‌ی زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی و فرایند تحلیل شبکه‌ای وجود دارد را برطرف نماید.

جدول ۲: مجموع تضاد، انحراف معیار، میزان اطلاعات و وزن نهایی معیارهای مطرح در پهنه بندی فرونشست شهرستان نمین

معیار	مجموع تضاد	انحراف معیار	میزان اطلاعات	وزن نهایی
کاربری اراضی	۳/۴۴۳	۰/۳۵۵	۱/۲۲۴	۰/۱۶۸
زمین شناسی	۲/۷۰۴	۰/۴۰۲	۱/۰۸۹	۰/۱۵۰
فاصله از گسل	۲/۵۲۲	۰/۳۲۳	۰/۸۱۴	۰/۱۱۲
شیب	۳/۰۷۳	۰/۳۱۲	۰/۹۵۹	۰/۱۳۳
فاصله از رودخانه	۲/۸۴۳	۰/۳۳۰	۰/۹۳۸	۰/۱۲۹
سطح آب	۲/۸۱۴	۰/۴۸۱	۱/۳۵۴	۰/۱۸۶
فاصله از شهر و روستا	۳/۱۳۳	۰/۲۷۹	۰/۸۷۶	۰/۱۲۰

با توجه به خروجی حاصل از به کارگیری روش آراس، $۱۶۸/۰۱$ کیلومترمربع از مساحت محدوده در کلاس بسیار پرخطر و $۲۲۲/۳۱$ کیلومترمربع در کلاس پرخطر قرار دارد (جدول ۳). بخش اعظمی از کلاس بسیار پرخطر و پرخطر از لحاظ احتمال وقوع فرونشست در بخش مرکزی و نیمه غربی، قرار گرفته است.



شکل ۵: نقشه پهنه بندی خطر فرونشست شهرستان نمین

جدول ۳: اطلاعات طبقات خطر فرونشست شهرستان نمین

بسیار کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	طبقه خطر
۹۵/۳۲	۲۲۰/۴۸	۲۴۵/۸۸	۲۲۲/۳۱	۱۶۸/۰۱	مساحت به کیلومترمربع
۱۰/۰۱	۲۳/۱۶	۳۵/۸۳	۲۳/۳۵	۱۷/۶۵	مساحت به درصد

کاربری اراضی یکی از مولفه‌های اساسی در پژوهش و بررسی فرونشست و نیز پهنه‌بندی این خطر در یک منطقه می‌باشد و نوع کاربری زمین، خصوصیات سطحی زمین را تحت تأثیر خود قرار داده و موجب تغییر رفتار مواد آن در مقابل فرآیندهای زمین‌شناسی منطقه، می‌گردد (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۶۲). انواع کاربری‌ها، در شهرستان نمین، به صورت زراعت دیم و آبی (به ترتیب با پوشش ۱۸۶/۱۲ و ۹۱/۶۲ کیلومترمربع از مساحت محدوده)، باغات (با مساحت ۲/۵۲ کیلومترمربع)، جنگل (با مساحت ۵۶/۷۸ کیلومترمربع)، اراضی بایر (با ۳۹/۵۰ کیلومترمربع)، مناطق مسکونی (۴۹/۱۴ کیلومترمربع)، مراتع فقیر، متوسط، خوب و متراکم (به ترتیب؛ با ۲۳۷/۶۴، ۱۳۰/۱۳۷، ۱۲۹/۴۳ و ۱۵/۱۰ کیلومترمربع)، اراضی پوشیده از آب (با مساحت ۰/۵۲ کیلومترمربع)، اراضی پوشیده از برف (با ۰/۱۷۱ کیلومترمربع)، شهرک صنعتی (با مساحت ۳/۹۴ کیلومترمربع)، و اراضی کوهستانی (با ۴/۸۶ کیلومترمربع)، می‌باشد. بررسی نقاط بسیار پر خطر و پر خطر معرفی شده توسط الگوریتم آراس نشان می‌دهد؛ از لحاظ معیار کاربری اراضی، کاربری زراعی، مناطق شهری و صنعتی بیشترین درصد از مساحت مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد را به خود اختصاص داده است. بر اساس نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی بخش عمده‌ای از اراضی شهرستان به کاربری کشاورزی اختصاص داده شده است که همین عامل سبب بهره‌برداری بیش از حد از سفره آب‌های زیرزمینی در طی سال‌های اخیر شده است. به علاوه بخش اعظمی از آب مورد نیاز جهت شرب و بخش صنعتی نیز از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد و این امر نیز به نوبه خود در کاهش سطح آب به دنبال آن، در افزایش پتانسیل خطر فرونشست در محدوده مورد مطالعه دخیل می‌باشد. بررسی‌های زمینی موید وجود تعداد کثیری شواهد و رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی و نشست زمین در شهر نمین می‌باشد. از جمله می‌توان به درز و ترک‌های روی دیوار منازل و ترک و نشست جاده‌ها و خیابان‌های شهر و ترک‌هایی که در روی زمین‌های کشاورزی شکل گرفته سبب توسعه فرسایش شده است، اشاره کرد (شکل ۶).



شکل ۶: ترک‌های شکل گرفته ناشی از فرونشست در شهر نمین

براساس نتایج ارائه شده از مطالعات محققان، به نظر می‌رسد که اعمال فشار بیش از حد بر آبخوان ممکن است، موجب بروز پدیده‌ی فرونشست شود. از این رو، در بررسی فرونشست به بررسی وضعیت سفره‌ی آب زیرزمینی پرداخته می‌شود (آقایاری، ۱۴۰۱: ۱۰۳). با توجه به بررسی داده‌های چاه‌های پیژوتری شهرستان (اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل)، مشخص است که سطح آب شهرستان نمین، رو به پایین رفتن است. به طوری که کمترین افت سطح آب ۱/۳ متر و بیشترین ۲۳ متر می‌باشد و بیش‌ترین افت در بخش‌های مرکزی و شمالی شهرستان مشاهده می‌شود. علت این افت، برداشت‌های غیراصولی به دلیل افزایش حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق به صورت مجاز و غیرمجاز، کاهش بارندگی در سال‌های اخیر و به تبع آن کاهش آب‌های سطحی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد و بر این اساس احتمال وقوع فرونشست نیز، در این قسمت از محدوده افزایش می‌یابد.

عوامل انسان‌ساخت مانند؛ زمین‌های کشاورزی، خطوط انتقال نیرو و عملیات حفاری، سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی و شبکه‌های حمل و نقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب‌های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار وارده بر زمین در اثر احداث

ساختمان‌های بزرگ و تراکم زیرساخت‌ها میزان آسیب‌پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرورانشست می‌شوند (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۶۳). به طور کلی، فاصله از مناطق شهری و روستایی در محدوده مطالعاتی بین صفر تا ۴۵۰۰ متر می‌باشد. از لحاظ معیار فاصله از مناطق شهری و روستایی، بر اساس خروجی حاصل از روش آراس، مناطق بسیار پرخطر، در فاصله صفر تا ۵۰۰ متری از نقاط شهری و روستایی قرار دارند و در این مناطق به سبب تأمین نیازهای آبی جامعه سکونتگاهی و مناطق اطراف و همچنین تأمین نیازهای آبی بخش کشاورزی، دست اندازی به منابع آبی و استحصال آب‌های زیرزمینی بسیار بالاست به همین دلیل میزان افت آب و احتمال وقوع فرورانشست، بالا بوده است.

ویژگی‌های سنگ‌شناسی به طور گسترده بر ویژگی‌های فیزیکی، مانند؛ استحکام و نفوذپذیری مواد سطحی و زیرسطحی و احتمال خطر فرورانشست تأثیر می‌گذارد (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۶۶). قدیمی‌ترین سازندهای شناخته شده در سطح شهرستان نمین، دولومیت و دولومیت آهکی متعلق به ژوراسیک است. رخساره‌های کرتاسه، ماسه سنگ و کنگلومرای قرمز می‌باشد. رخساره‌های دوران سوم شامل ماسه‌سنگ‌های توفی و توفی برشی با میان لایه‌های گدازه آندزیتی، آهک کریستالیزه، آندزیت بازالت با پیروکسن زیاد مربوط به پالئوژن می‌باشد. آبرفت‌های کوتاه‌تر محدود شده شامل تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان می‌باشد که بیشترین مساحت شهرستان نمین و بخش مرکزی آن را پوشش می‌دهند. به علاوه، عمده‌ترین میزان تمرکز چاه‌ها و قنات‌ها نیز در بخش مرکزی و متشکل از رسوبات آبرفتی، می‌باشد که بیشترین میزان پتانسیل فرورانشست را دارند و در سایر بخش‌ها به واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی، زمینه برای وقوع فرورانشست بسیار کمتر است. از منظر لیتولوژیکی، به طور عمده شهرها و روستاهای موجود در محدوده نیز، بر روی رسوبات آبرفتی جوان شکل گرفته‌اند که مستعد برای ایجاد فرورانشست، می‌باشند. شیب نقش موثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد، از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرورانشست زمین هم کاهش می‌یابد. از لحاظ معیار شیب، مناطق دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد، بین شیب‌های صفر تا ۵ درصد قرار دارند و به طور عمده بیشترین مقدار پیکسل‌های با احتمال خطر، دارای شیب کمتر از یک درصد، هستند.

عامل نزدیکی به رودخانه به عنوان عامل مزاحم در ایجاد فرورانشست مطرح می‌باشد و با فاصله گرفتن از رود امتیاز بیشتری به زمین‌های منطقه تعلق می‌گیرد (شایان و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۵۱). هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرورانشست افزایش می‌یابد. با انطباق نقشه پهنه‌بندی خطر فرورانشست با نقشه معیار فاصله از رودخانه، می‌توان گفته که به طور عمده مناطق دارای احتمال خطر در فاصله ۱۵۰۰ متری از رودخانه قرار دارند. به دلیل اثر گذاشتن فعالیت گسل‌ها (نظیر زلزله) بر روی فرورانشست زمین، بررسی گسل‌های منطقه ضرورت می‌یابد و گسل‌ها به نوبه خود نقش موثر و مهمی در میزان توسعه فرورانشست دارند (آقایاری، ۱۴۰۱: ۱۰۵). به گونه‌ای که هر چه میزان فاصله از خطوط گسل بیش‌تر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کمتری برای احتمال فرورانشست زمین را دارا بوده و هر چه میزان فاصله به خطوط گسل نزدیک‌تر شود احتمال وقوع فرورانشست بیش‌تر می‌شود. از مهم‌ترین گسل‌ها، در محدوده می‌توان به گسل‌های شرقی اردبیل - بزغوش هروآباد عنبران و گسل رودبار - آستارا، اشاره نمود. با بررسی معیار فاصله از گسل به این نتیجه دست یافتیم که طبق نقشه پهنه‌بندی خطر فرورانشست، به طور عمده؛ نقاط پرخطر در فاصله ۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰ متری از گسل واقع شده‌اند.

ابعاد کاربردی مطالعه حاضر و اقدامات مورد نیاز

هدف مطالعه حاضر ارزیابی و پهنه‌بندی فرونشست در سطح شهرستان نمین، در استان اردبیل بوده است. لذا در درجه اول با توجه به نتایج مطالعه حاضر می‌توان به میزان فرونشست در سطح شهرستان نمین و شناخت نواحی دارای فرونشست در سطح شهرستان دست یافت. بعد از شناسایی و مشخص شدن نواحی درگیر فرونشست در حال حاضر، در مرحله دوم، با توجه به نتایج بخش پهنه‌بندی، نواحی که دارای پتانسیل احتمال وقوع خطر فرونشست، هستند و ممکن است در آینده در این مناطق فرونشست رخ دهد، در قالب نقشه پهنه‌بندی، به صورت طبقات بسیار پرخطر و پرخطر معرفی شده است. به علاوه در طی انجام مراحل پهنه‌بندی، با بکارگیری روش وزن‌دهی کرتیک که در آن کارشناس دخالتی ندارد و وزن‌دهی باتوجه به نقشه‌های معیار و میزان همبستگی، تضاد و انحراف معیار بین لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده، تعیین می‌گردد، مهم‌ترین عوامل یا معیارهای دخیل در ایجاد فرونشست در سطح شهرستان، تعیین شده است. لذا نتایج مطالعه حاضر با شناسایی نواحی درگیر فرونشست در حال حاضر و معرفی نقاطی که احتمال رخداد فرونشست در آن‌ها، در آینده وجود دارد، می‌تواند مورد توجه سازمان‌های ذی‌ربط و متولی فرونشست زمین، مثل؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، شرکت آب منطقه‌ای، جهادک شاورزی، حفاظت از محیط‌زیست، منابع طبیعی و امور آبخیزداری و شهرداری‌ها، قرار گیرد و در زمینه انجام اقدامات کنترلی و پیشگیرانه وقوع فرونشست، حفاظت و مدیریت منابع آبی و جلوگیری از تخریب سرزمین کمک‌شایانی نماید. به علاوه، با توجه به اینکه، نتایج حاصل از ارزیابی فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، نشان‌دهنده انطباق روند افت سطح آب‌های زیرزمینی با میزان فرونشست می‌باشد و همچنین؛ با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب، مهمترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست محدوده مطالعاتی معرفی شده است، بایستی راهکارهای بلندمدت و کوتاه مدت در رابطه با مسئله برداشت آب؛ به صورت اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب، جلوگیری از برداشت سفره‌های آب زیرزمینی، توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز، پایش مستمر مناطق مستعد فرونشست، مهار آب‌های، تهیه و نصب کنتور هوشمند و کنترل برداشت آب، آموزش عمومی کشاورزان محلی، کنترل شدید مصرف آب و تغییر الگوی مصرف، مورد توجه مسئولان ذی‌ربط و مربوطه و همچنین ساکنان محلی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور پایش وضعیت فرونشست شهرستان نمین از تصاویر A-Sentinel ۱، در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ و روش تداخل سنجی راداری استفاده شده است. به علاوه، در راستای بررسی و شناسایی پهنه و گستره مناطق تحت نفوذ فرونشست در محدوده مورد مطالعه، از تکنیک چندمعیاره آراس استفاده گردید. ارزیابی میزان فرونشست منطقه بیانگر این است که بیشترین میزان فرونشست در مناطق در بخش مرکزی و شمال غرب و شمال شرق محدوده بوده است و نتایج حاصله بیانگر انطباق روند افت سطح آب‌های زیرزمینی با میزان فرونشست است و در مناطقی که بیشترین افت سطح آب وجود داشته است، میزان فرونشست نیز بیشتر بوده است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۸۶ و ۰/۱۶۸، بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند و لذا، می‌توان گفت که مهمترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست محدوده مطالعاتی بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی می‌باشد و لذا، نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات انجام شده توسط؛ کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، یزدانی و همکاران (۱۳۹۸)، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، اصغری و محمدزاده (۱۴۰۰)، عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، بهاتارای (۲۰۱۷)، گامبولاتی و همکاران (۲۰۱۸)، تانگ مین و همکاران (۲۰۱۹)، هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)، رنجبر و همکاران (۲۰۲۱) و هیوسین و همکاران (۲۰۲۲)، مبنی بر عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع

و ذخایر آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی و به دنبال آن، افزایش فرونشست، همخوانی دارد. هم چنین طبق نتایج به دست آمده، به ترتیب ۱۷/۶۵ و ۲۳/۳۵ درصد از مساحت محدوده، در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد و ریسک بالای فرونشست زمین بیشتر در بخش مرکزی و نیمه غربی منطقه، وجود دارد. در نهایت می‌توان اذعان داشت با توجه به این امر که فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه‌ی آن، در محدوده مورد مطالعه آسیب برساند، لازم است تا سازمان‌های متولی فرونشست زمین، با انجام اقدامات مسئولانه و هم‌افزایی لازم، مانع کاهش ذخایر آبی و فرونشست‌های خطرآفرین برای حیات در منطقه انجام دهند.

منابع

- ابراهیمی، ع.، قاسمی، الف. و گنجائیان، ح.، ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، جغرافیا و روابط انسانی، دوره ۲، شماره ۴، صص ۲۹-۴۱.
- اصغری سراسکانرود، ص.، پیروزی، الف. و آقایی، ل.، ۱۴۰۱. پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره MARCOS و CODAS، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۱، شماره ۴، صص ۱۷۲-۱۴۹.
- اصغری سراسکانرود، ص.، و محمدزاده شیشه‌گران، مریم.، ۱۴۰۰. برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت شهریار)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۱، صص ۵۴-۴۰.
- اصغری سراسکانرود، ص.، محمدزاده شیشه‌گران، م. و قلعه، احسان.، ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، دومین کنفرانس مدیریت شهری، و شهرسازی و معماری با رویکرد اقتصاد و عمران شهری، تبریز، صص ۱۱-۱.
- آقایی، ل.، عابدینی، م. و اصغری سراسکانرود، ص.، ۱۴۰۱. برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۱، صص ۱۳۲-۱۱۷.
- آنامرادنژاد، ر.ب.، نیک پور، ع. و حسنی، ز.، ۱۳۹۷. تحلیل کالبدی- فضایی نواحی شهری بر اساس شاخص‌های رشد هوشمند شهری (مطالعه موردی: شهر بابل)، پژوهش و برنامه ریزی شهری، دوره ۹، شماره ۳۴، صص ۳۰-۱۹.
- حبیب‌زاده، م.ص.، سرکارگر اردکانی، ع. و المدرسی، ع.، ۱۳۹۲. بررسی فرونشست زمین در شهریار با استفاده از تکنیک D-SAR، پایان نامه دانشگاه آزاد اسلامی یزد. استاد راهنما: سید علی المدرسی.
- دیانی، ل.، پورطاهری، م.، رکن‌الدین افتخاری، ع.ر. و احمدی، ح.، ۱۳۹۷. رتبه‌بندی سازه‌های اصلی ساماندهی بافت‌های فرسوده روستاهای پیرامون کلان‌شهرها با استفاده از روش ارزیابی نسبت تجمعی (ARAS) (مطالعه موردی: پیرامون کلان‌شهر تهران)، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره ۲۲، شماره ۳، صص ۱۴۵-۱۸۱.
- شایان، س.م.، یمانی، م.، یادگار، و م.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۳، شماره ۹، صص ۱۵۸-۱۳۹.
- شریفی‌کیا، م.، افضلی، ع.ع. و شایان، س.، ۱۳۹۴. استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفولوژیک ناشی از فرونشست در دشت دامغان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۴، شماره ۲، صص ۶۰-۷۴.

- شفیعی، ن.، مختاری، ل.گ.، امیر احمدی، الف.ق. و زندی، رحمان.، ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۴، صص ۹۳-۱۱۱.
- شمشکی، الف.، بلورچی، م.ج. و انصاری، ف.، ۱۳۸۴. بررسی فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار. طرح پژوهشی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره گزارش ۸۴-۰۶/۲۰ Enggeo، صص ۸۴-۱.
- شیرانی، ک.، پسندی، م. و ابراهیمی، ب.، ۱۴۰۰. بررسی فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، مجله علوم آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۱، صص ۱۲۷-۱۰۵.
- عابدینی، م.، آقایی، ل. اصغری سراسکانرود، ص. ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۱، شماره ۴، صص ۴۳-۶۸.
- عابدینی، م.، ۱۳۹۵. مبانی فرونشست زمین، چاپ اول. تألیف، نشر دانشگاه محقق اردبیلی. ۲۳۰ صفحه
- عابدینی، م.، ۱۳۹۲. بررسی علل فرونشست دشت اردبیل و اثرات آن در محدوده شهر - فصلنامه علمی- پژوهشی، جغرافیای طبیعی، سال بهار ۱۳۹۲ شماره ۱۹. صص ۸۴-۷۱.
- عابدینی، م.، الهامه عبادی و احسان قلعه^۱، ۱۴۰۱. بررسی فرونشست دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، شماره ۲۶، شماره ۷۹، دوره ۲۶، صص ۲۲۰-۲۰۷.
- عابدینی، م.، خان‌بیگی، موسی پور، ت.، دانشور، ح.، ۱۳۹۵. تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت روانسرا- سنجابی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی، دومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری، شرکت کیان تایر و جهاد دانشگاهی آذر بایجان شرقی.
- علیزاده، ر.، ایزدی، ح. و آراسته، م.، ۱۴۰۰. رتبه‌بندی ظرفیت گردشگری طبیعت‌محور در مناطق کوهستانی، نمونه موردی: منطقه شرقی استان لرستان، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره ۲۵، شماره ۱، صص ۱۱۷-۱۴۲.
- قنوتی، ع.، شریفی کیا، م. و حسینی، الف.، ۱۳۹۸. تبیین اثر و فرایند ژئومورفولوژیکی پدیده فرونشست در تغییر الگوی لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی مطالعه موردی دشت یزد- اردکان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۳، صص ۱۶-۱.
- کوه بنانی، ح.، یزدانی، م. ر. و حسینی، ک.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کاشمر و خلیل‌آباد)، مدیریت بیابان، دوره ۷، شماره ۱۳، صص ۷۶-۶۵.
- کیانی، ف.، عابدینی، م. و احمدزاده، غ.ر.، ۱۳۹۷. بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز، صص ۸-۱.
- منتظریون، م. و اصلانی، ف. ۱۳۹۸. ارزیابی خطر فرونشست با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان های تهران و البرز، دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره ۹، شماره ۱، صص ۱۳-۱.
- Alinezhad, A., & Khalili, J., 2019. *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). International Series in Operations Research & Management Science, vol 277, Springer, Cham.*
- Bhattarai, R., Alifu, H., Maitiniyazi, A., & Kondoh, A., 2017. *Detection of Land Subsidence in Kathmandu Valley, Nepal, Using DInSAR Technique, Land, 6 (2), 1-178*

- Gambolati, G., Massimillano, F., & Teatro, F., 2018. Anthropogenic Land Subsidence, *GROUNDWATER*, 2444-2457.
- Huang, G., Fan, H., Lu, L., & Yu, W., 2020. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-1-6*.
- Hoseini, H., 2019. Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation, *Information Processing in Agriculture*, 6 (1), 11-19.
- Hussain, M.A., Chen, Z., Shoaib, M., Ullah Shah, S., Khan, J., & Ying, Z., 2022. Sentinel-1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique., *Sci Rep*, 12, 5294.
- Minh, D. H. T., Tran., Q. C., Pham, Q.N., Dang, T., Nguyen, D.A., & El-Moussaw, A., 2019. 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*, 10(2), 3874-3884.
- Ranjgar, B., Seyed, V., Razavi, T., Foroughnia, F., Sadeghi-Niaraki, A., & Daniele Perissin. 2021. Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Persistent Scatterer SAR Interferometry Technique and Optimized Hybrid Machine Learning Algorithms, *Remote Sensing*, 13(7), 1326, 1-24.
- Zavadskas, E., & Turskis, Z., 2010. a new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making, *Technological and Economic Development of Economy*, 16(2), 159-172.