اکوهیدرولوژی
دورهٔ ۹، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۳۷۱-۳۵۳

پهنه‌بندی گسترهٔ خطر فرونشست زمین در دشت مرکزی استان البرز با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم تحلیل چندمعیارهٔ ARAS

صیاد اصغری سراسکانرود[1*]، مهدی فعال نذیری[2]، الناز پیروزی[3]
۱. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی
۲. دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی
۳. دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۹/۰۸؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۰/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۲/۱۱)

چکیده

یکی از مخاطراتی که طی سال‌های اخیر در بسیار از مناطق رخ داده، مخاطرات ناشی از فرونشست است. دشت مرکزی استان البرز نیز طی سال‌های اخیر با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه بوده که این عامل سبب شده است تا این منطقه در معرض وقوع مخاطرهٔ فرونشست قرار گیرد. هدف از این پژوهش، در مرحلهٔ اول ارزیابی فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در محیط نرم‌افزار SNAP، با بهره از قابلیت تصاویر Sentinel -A1 و همچنین در ادامه، نسبت به پهنه بندی مناطق مستعد با الگوریتم چندمعیارهٔ ARAS در محیط نرم‌افزار Edrisi در بازهٔ زمانی ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ اقدام شد. نتایج مطالعهٔ حاضر نشان داد مقدار بین صفر تا ۳۰۰ میلی‌متر فرونشست در محدودهٔ مورد بررسی ایجاد شده است که بیشترین میزان فرونشست در بخش مرکزی (محدودهٔ مهرشهر، خرمدشت، محمدشهر) و سپس در بخش جنوب غرب محدودهٔ ماهدشت متمرکز است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی، به‌ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۵۱، ۰/۱۴۷، ۰/۴۳ و ۰/۱۳۶، مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدودهٔ مطالعاتی بوده و به‌ترتیب ۱۳۵/۵۵ و ۱۹۲/۲۸ کیلومتر مربع از محدوده دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد است. به علاوه، نتایج حاصل از ضریب همبستگی بین نقشهٔ مستخرج از تداخل‌سنجی راداری با افت سطح آب چاه‌ها دارای مقدار ۰/۸۹ و با نقشهٔ پهنه‌بندی فرونشست ۰/۹۸ است. در نهایت، می‌توان گفت که مهم‌ترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشت دشت مرکزی استان البرز، بهرهٔ بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب است.

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

* نویسندهٔ مسئول
Email:Sayyad.sasghari21@gmail.com

مقدمه

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 [۱]. پدیدهٔ 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، توسعهٔ چاله در زمین‌های کارستی، یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، شامل برداشت بی‌رویهٔ سیالات از زمین نظیر آب نفت و گاز روی می‌دهد [۲]. پیامدهای محیطی پدیدهٔ 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، پدیدهٔ فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب بروز سیلاب شود. این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در جهت، سرعت جریان و توازن آب زیرزمینی نیز مخاطرات جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد [۳]. در ایران فرونشست زمین بیش از ۳ دهه سابقه دارد. 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، زیرساخت لازم را برای رویداد این پدیده فراهم آورده است. از حدود سه دهه قبل توسعهٔ کشاورزی‌های تجاری و معادن، حفر بی‌رویهٔ چاه‌های آب و برداشت بیش از ظرفیت قابل ترمیم دشت‌ها، روند فرونشست زمین در اراضی زراعی دشت‌های مرکزی ایران را شکل داد [۱]. بر اساس آمار اعلام‌شده در ایران، اثرات سوء ناشی از رخداد فرونشست رقم کمی نیست و به‌سرعت در حال ایجاد و گسترش در دشت‌های مختلف سراسر کشور است که عدم مدیریت و کنترل به‌موقع عوامل آن می‌تواند خسارت‌های جانی و مالی جبران‌ناپذیری به جای بگذارد [۴].

باید توجه داشت که از یک سو، یکی از راهکارهای مهم کنترل فرونشست در مناطق بر اساس تجارب جهانی، روش‌های غیرسازه‌ای کاهش‌دهنده و تطبیق‌دهنده است [۵] و از سوی دیگر، اندازه‌گیری رخداد فرونشست در مقیاس وسیع به دلیل نرخ کند و بطئی آن چالش‌برانگیز است و نیاز به فناوری‌های پیشرفته دارد. تداخل‌سنجی با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای راداری با پنجرهٔ مصنوعی روش دقیق مبتی بر استفاده از حداقل دو تصویر راداری از یک منطقه است و قادر است با دقت قابل توجهی در حد میلی‌متر تغییرات جابه‌جایی ارتفاعی در سطوح وسیع و طی بازه‌ای زمانی مختلف را اندازه‌گیری کند [۶]. پوشش سراسری و قدرت تفکیکی مکانی خوب تصاویر راداری و دقت قابل قبول، این روش را به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه و اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین بر اثر پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون زلزله، فرونشست زمین، زمین‌لغزش و... مطرح کرده است [۷]. به علاوه، امروزه سیستم اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مؤثر برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری تعاملی برای عملیات مدیریت ریسک هستند [۸]. همچنین، برای کشف طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM استفاده می‌شود [۹]. در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود [۱۰ و ۱۱]. بنابراین، می‌توان گفت که استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و به صدور نتایج مناسبی منجر شود.

با توجه به اهمیت موضوع در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینهٔ فرونشست صورت گرفته است. تورانی و همکاران به مطالعهٔ فرونشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند و برداشت بیش از حد و افت سطح آب زیرزمینی را مهم‌ترین علت فرونشست در منطقه عنوان کردند [۱۲].. کوه بنانی و همکاران در پژوهشی فرونشست زمین را با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری در دشت کاشمر و خلیل‌آباد (سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷)، بررسی کردند [۱۳]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد این منطقه در بیشترین حالت ۱۱ سانتی‌متر در سال فرونشست دارد و به طور تقریبی هر ۱ متر افت آب زیرزمینی، به فرونشست حداکثر ۱۳ سانتی متر زمین منجر می‌شود. منتظریون و اصلانی در پهنهٔ استان‌های تهران و البرز، خطر فرونشست زمین را با به

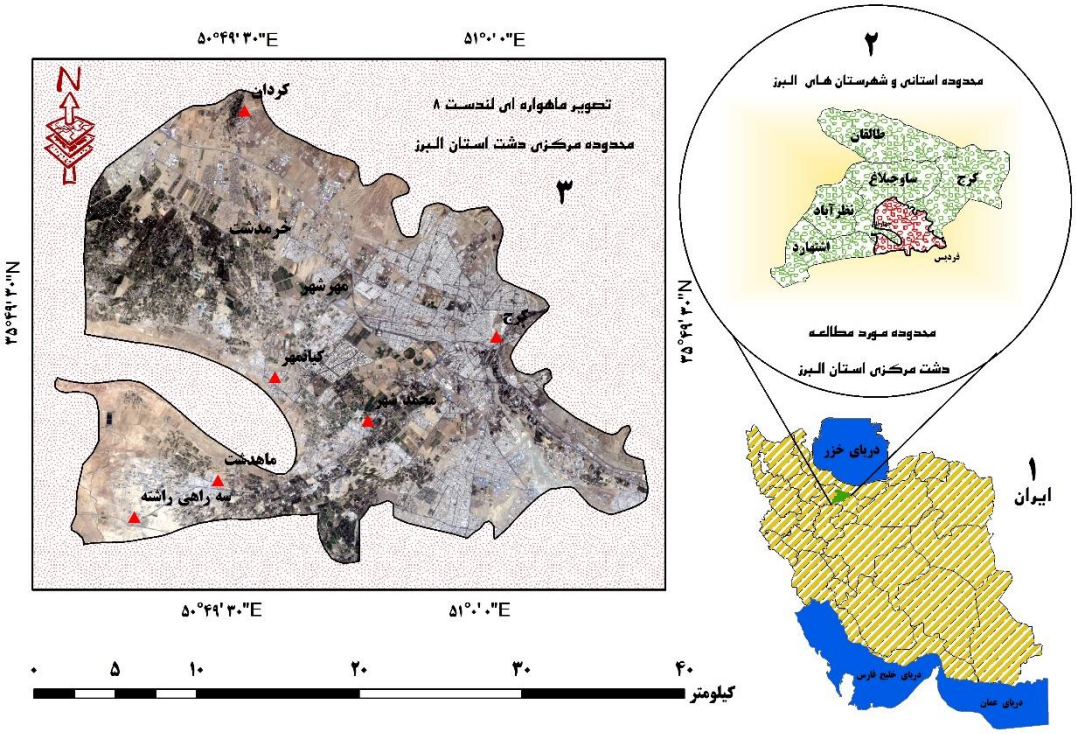
کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش AHP ارزیابی کردند [۴]. طبق نتایج به‌دست‌آمده، مناطق غرب و جنوب غربی تهران و همچنین دشت ورامین، شهریار، کرج، نظرآباد و ساوجبلاغ در استان البرز از جمله مناطق مستعد وقوع فرونشست هستند و عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع و ذخایر آب‌های زیرزمینی عمده دلیل فرونشست در محدوده باشد. ابراهیمی و همکاران به پایش میزان فرونشست محدودهٔ شهری دشت پاکدشت با روش تداخل‌سنجی پرداختند [۱۴]. نتایج حاصل از مطالعهٔ یادشده، طی بازهٔ 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. اصغری و محمدزاده به پایش فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی در دشت شهریار پرداخته‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده، بیشترین میزان فرونشست ۱۱ سانتی‌متر است و 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 محدودهٔ مطالعاتی است [۱۵]. بهاتارای به شناسایی فرونشست زمین در درهٔ کاتماندو نپال با استفاده از تکنیک DInSAR پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که عمق فرونشست در محدودهٔ ۱ سانتی‌متر تا ۱۷ سانتی‌متر است و عامل اصلی تأثیرگذار بر وقوع فرونشست زمین ناشی از آب‌های زیرزمینی است [۱۶]. مین و همکاران در پژوهشی به بررسی فرونشست در هانوی ویتنام، از طریق تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداختند و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل مؤثر در فرونشست محدوده شناخته شده است [۱۷]. هوانگ و همکاران به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند [۱۸]. بررسی‌ها طی بازهٔ زمانی دوساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری است و این نشست هم رابطهٔ مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. رنجبر و همکاران 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 در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت و برداشت بیشتر از آب‌های زیرزمینی؛ نرخ فرونشست افزایش یافته است [۱۹].

با توجه به روند رو به رشد جمعیت و مهاجرت به استان البرز، بر حجم برداشت از سفره‌های زیرزمینی افزوده شده و کل آب مورد نیاز بخش کشاورزی و همچنین، ۷۰ درصد از آب شرب استان البرز از منابع زیرزمینی و چاه‌های عمیق تأمین می‌شود. بنابراین، برداشت غیرمجاز و بی‌رویه آب از منابع زیرزمینی به مرور زمان اراضی البرز را به محل مستعدی برای فرونشست زمین بدل کرده است. فرونشست می‌تواند به تأسیسات و زیرساخت‌های استان مثل فرودگاها، راه‌ها، شبکه‌های ریلی و نیروگاه‌های استان خسارت وارد کند و حتی آن‌ها را از انتفاع خارج کند و علاوه بر آن، منجر به خسارت دیدن منازل مردم شود و نیز مؤید وجود تعداد کثیری شواهد و رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی و نشست زمین در دشت مرکزی استان البرز است. از جملهٔ این موارد می‌توان به درز و ترک‌های روی دیوار منازل و ترک و نشست جاده‌ها و خیابان‌های و ترک‌هایی که روی زمین‌های کشاورزی و در سطح شهر شکل گرفته، اشاره کرد. در پژوهش حاضر به ارزیابی مقدار فرونشست محدودهٔ دشت مرکزی البرز طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداخته شده است. یکی دیگر از اهداف این مطالعه، تهیه و ارائهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی خطر نشست زمین با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل چندمعیارهٔ آراس و با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی بوده است تا بر اساس آن هم محدودهٔ فعلی وجود مشکل مشخص شود و هم سایر سطوح مستعد که احتمالاً در آینده درگیر این مشکل خواهند شد، شناسایی شوند.

محدودهٔ مطالعه‌شده

محدودهٔ دشت مرکزی استان البرز، از شمال، به کوه‌های البرز؛ از جنوب، به رشته‌کوه‌های مرکزی؛ از غرب، به دشت هشتگرد و از شرق، به دشت تهران محدود است. مساحت دشت مورد مطالعه ۵۹۷/۵۷ کیلومتر مربع بوده و بین طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۷۰ درجه تا ۵۱ درجه و ۱۱ دقیقه و عرض

جغرافیایی ۳۵ درجه و ۶۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۹۵ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). شیب کلی دشت به سمت جنوب و جنوب شرق است. ارتفاعات واقع در بخش شمالی دشت از توده توف سبزرنگ متعلق به دوان سوم و چهارم و ارتفاعات جنوب دشت از آندزیت و تشکیلات میوسن تشکیل شده است. دشت محدودهٔ مرکزی البرز را می‌توان محل اجتماع رسوبات حوضه‌های دو رودخانهٔ کرج و کن دانست و رسوبات مرکز دشت به صورت ضخیم و ریزدانه (رس و ماسه‌ریز) است. آب‌وهوای محدودهٔ مطالعه‌شده تحت تأثیر سلسله‌کوه‌های البرز، دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل است. به طور کلی، میانگین بارش سالیانه در استان البرز ۲۵۰ (حداکثر ۳۰۰) میلی‌متر است. طی فصل‌های پاییز و زمستان بیشترین میزان بارندگی‌های سالیانه ریزش می‌کند و در فصل خشک که از اواسط خرداد تا اوایل مهرماه ادامه دارد، کمتر از ۵ درصد بارندگی سالیانه استان نازل می‌شود. میانگین دمای سالانه در استان البرز ۱۶ درجهٔ سانتی‌گراد است که در این میان، ماه دی سردترین و ماه مرداد گرم‌ترین ماه‌های سال در استان البرز محسوب می‌شوند.



شکل ۱. نقشهٔ موقعیت محدودهٔ مطالعه‌شده

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از دو تصویر Sentinel-1A از نوع SLC مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ استفاده شد. سپس، برای پردازش‌های لازم از نرم‌افزار SNAP بهره گرفته شد. تکنیک استفاده‌شده در این پژوهش به منظور تعیین میزان فرونشست، روش تداخل‌سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر و یا غیر مکرر است. یک سیگنال راداری با دریچهٔ 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. در تداخل‌سنجی راداری تفاوت فاز دو تصویر از یک منطقهٔ زمانی و خط مبنای مشخص تعیین می‌شود. اصول بنیادین چگونگی اندازه‌گیری تغییرات سطحی پوستهٔ 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)[7] T0 ثبت و مقدار فاز را (Φm) آن را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار نشست عبارت‌اند از: فاصلهٔ P تا P1 که طی زمان مشخصی صورت گرفته است (Dt). برای اندازه‌گیری این مقدار، سنجنده تصویر دومی (تصویر فرعی)[8] 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 تداخل‌نگار فازی نمایش می‌دهد (ΔΦint). در صورت ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده و مقدار آن به کمک رابطهٔ ۱ به دست می‌آید [۲۰].

$$\Delta\varnothing_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda} \qquad (۱)$$

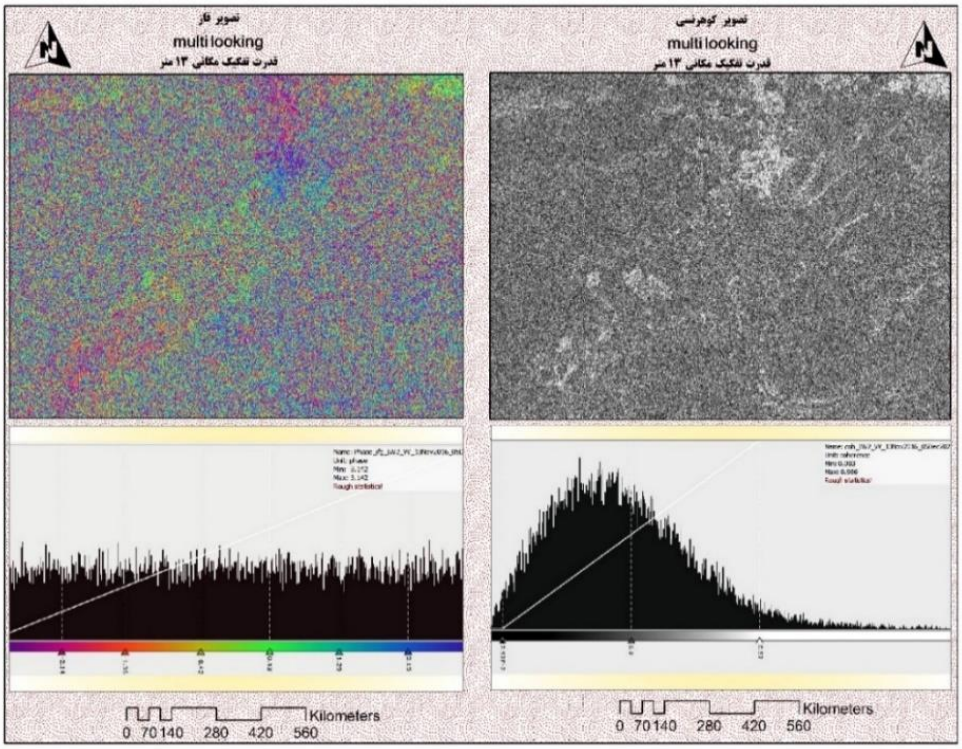
که در آن **SP** فاز تصویر اول، MP فاز تصویر دوم، عدد پی با مقدار ثابت ۳/۱۴ و λ طول موج است. در اندازه‌گیری مقدار فرونشست در این روش، سطح ناپایدار تصور شده، به طوری که سطح از P به P1 تنزل یافته است. با توجه به رابطهٔ ۲، تعیین مقدار نشست در فاصلهٔ زمانی دو تصویر (Dt) تابع اختلاف فاز دو تصویر ($\Delta\emptyset_{int}$) به همراه فاز ناشی از توپوگرافی ($\emptyset Top$) و فاز ناشی از اتمسفر خواهد بود. در نهایت، با نادیده انگاشتن اثر اتمسفر در جابه‌جایی‌هایی به میزان بالا (چند سانتی‌متر) و یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی اختلاف فاز دو تداخل‌نگار فقط بیان‌کنندهٔ مقادیر جابه‌جایی سطح (فرونشست) خواهد بود [۲۰].

$$\Delta\varnothing_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda} = \varnothing Top + \varnothing Mov + \varnothing Atm \qquad (۲)$$

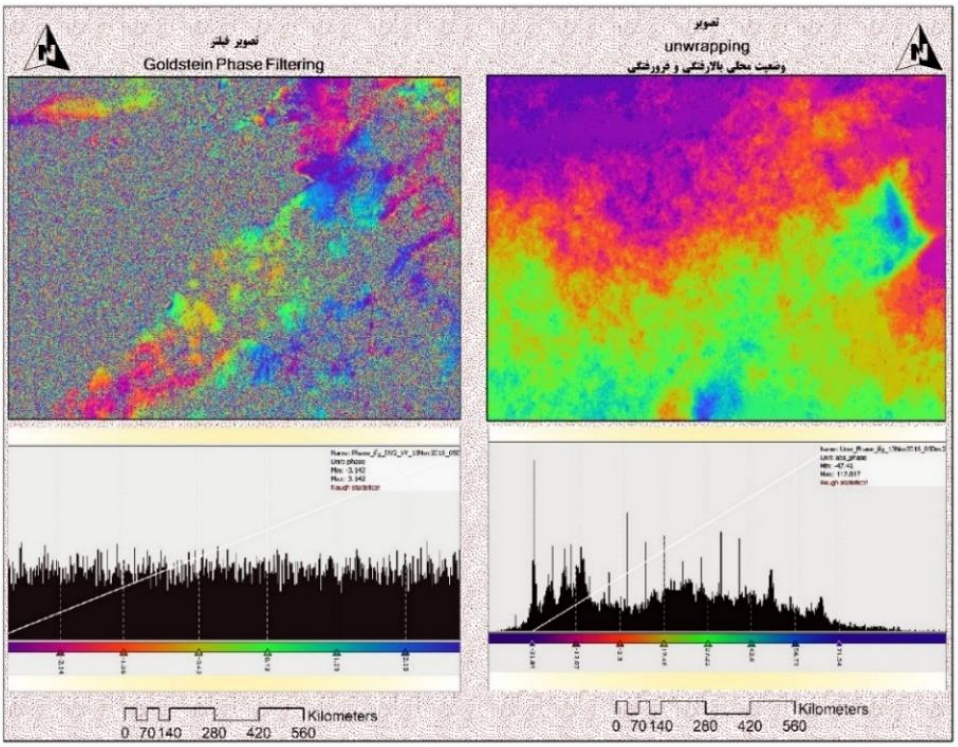
بنابراین، جهت پیش پردازش و تولید، تصویر فاز و کوهرنسی آماده شد (شکل ۲). تصویر فاز تصویری که نشان‌دهندهٔ اختلاف پرتوهای ارسالی راداری و سیگنال‌های دریافتی برای هر یک از پوشش‌ها است. در تصویر فاز فرینج‌ها نشان‌دهندهٔ تغییرات سطح هستند. تصویر کوهرنس نیز تصویری است که از همبستگی توانی (Power)دو تصویر هم مختصات شده SAR ایجاد می‌شود. این تصویر بیانگر شاخص همبستگی بین سیگنال‌های تصویر اصلی و تصویر وابسته است [۲۱]. در تصویر کوهرنسی مقدار پیکسل‌ها بین ۰ و ۱ بوده و هرچقدر کوهرنسی به عدد ۱ نزدیک باشد، دقت محاسبات در آن پیکسل بیشتر بوده است و اطلاعات اصلی برای ارزیابی فرونشست و برآمدگی از تصویر فاز و کوهرنسی به دست می‌آید [۲۲]. در منطقهٔ مطالعه‌شده به دلیل مهاجرپذیر بودن و نرخ بالای رشد ساکنان آن شاهد ساخت‌وساز و فعالیت‌های عمرانی زیادی هستیم. علاوه بر این عامل، وجود زمین‌های کشاورزی و باغ‌ها جزء عوامل ایجاد نویز در تصاویر است و بنابراین پس از به دست آمدن تصویر فاز و کوهرنسی برای حذف و کاهش نویزها از عمل فیلترینگ استفاده شده است. در این پژوهش از فیلتر Goldstein استفاده شده است. ویژگی فیلتر یادشده این است که به صورت انتخابی عمل می‌کند و عمل فیلترگذاری به صورت محلی انجام می‌شود، نوع عملکرد این فیلتر تحت تأثیر همبستگی تداخل‌نگار است، در مواردی که شاهد همبستگی پایین است، مقدار پیکسل‌های بیشتری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در مواردی که شاهد همبستگی بالا است، تعداد پیکسل‌های محدودی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتیجهٔ اعمال فیلتر تولید تداخل‌نگار فیلتر شده است که این تداخل‌نگار از لحاظ بصری حاشیه‌های مرتب تری نسبت به تداخل‌نگار فیلتر نشده دارد و میزان نویز در آن‌ها کاهش چشمگیری داشته است.

در این پژوهش علاوه بر پردازش به روش دستی با استفاده از گزینه‌های طراحی‌شده در SNAP از ابزار Builder Graphموجود در SNAP نیز استفاده شد. ابزار Builder Graphبه کاربر اجازه می‌دهد که نمودارها را از لیستی از اپراتورهای موجود به هم متصل کند و گره‌های اپراتور را به منابع خود متصل کند. شکل ۴، در سه مرحله، زنجیرهٔ پردازش پژوهش حاضر را به وسیلهٔ یک گراف نمایش می‌دهد.

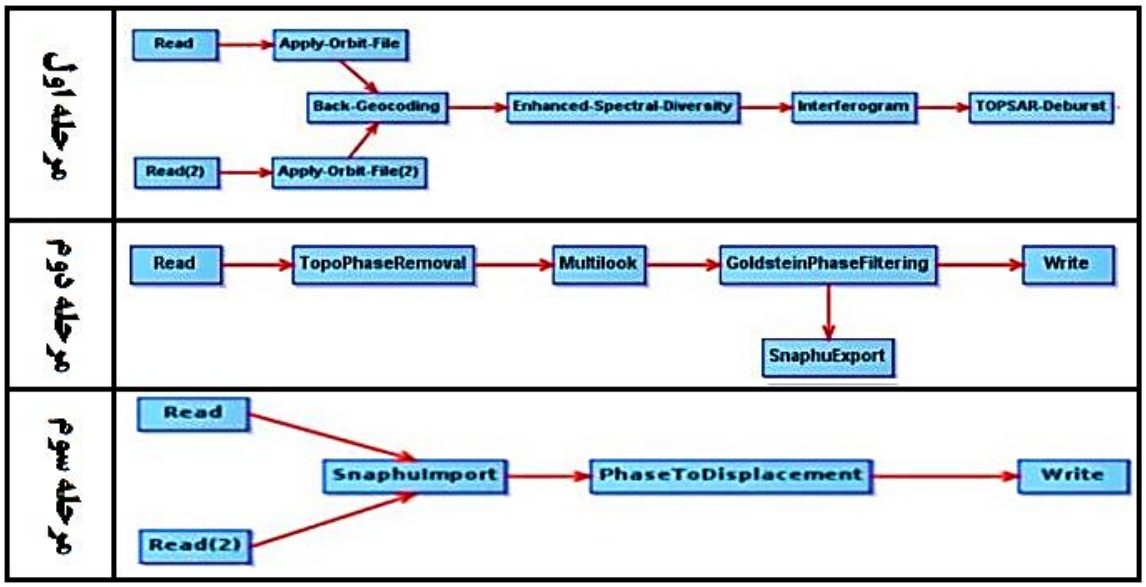
در پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط فرونشست منطقهٔ مطالعه‌شده و وضعیت منابع آب زیرزمینی اقدام به بررسی افت آب زیرزمینی شد. به این منظور، اطلاعات مربوط به ۲۴ چاه از چاه‌های مشاهده‌ای سطح تراز پیزومتری محدودهٔ دشت مرکزی البرز از سازمان آب منطقه‌ای استان البرز تهیه شد. موقعیت چاه‌های پیزومتری مورد بررسی، در شکل ۵، نمایش داده شده است. همچنین به‌ترتیب شکل‌های ۶ و ۷، مربوط به نقشهٔ هم‌عمق آب و هم‌تراز آب، محدودهٔ مورد مطالعه است. پس از بررسی نوسان تراز سفرهٔ دشت مرکزی البرز، در شش سال اخیر، مقدار افت سالانهٔ آب زیرزمینی محاسبه و سپس نقشهٔ پهنه‌بندی نوسانات تراز پیزومتریک با بهره گیری از روش کریجینگ تهیه شد.



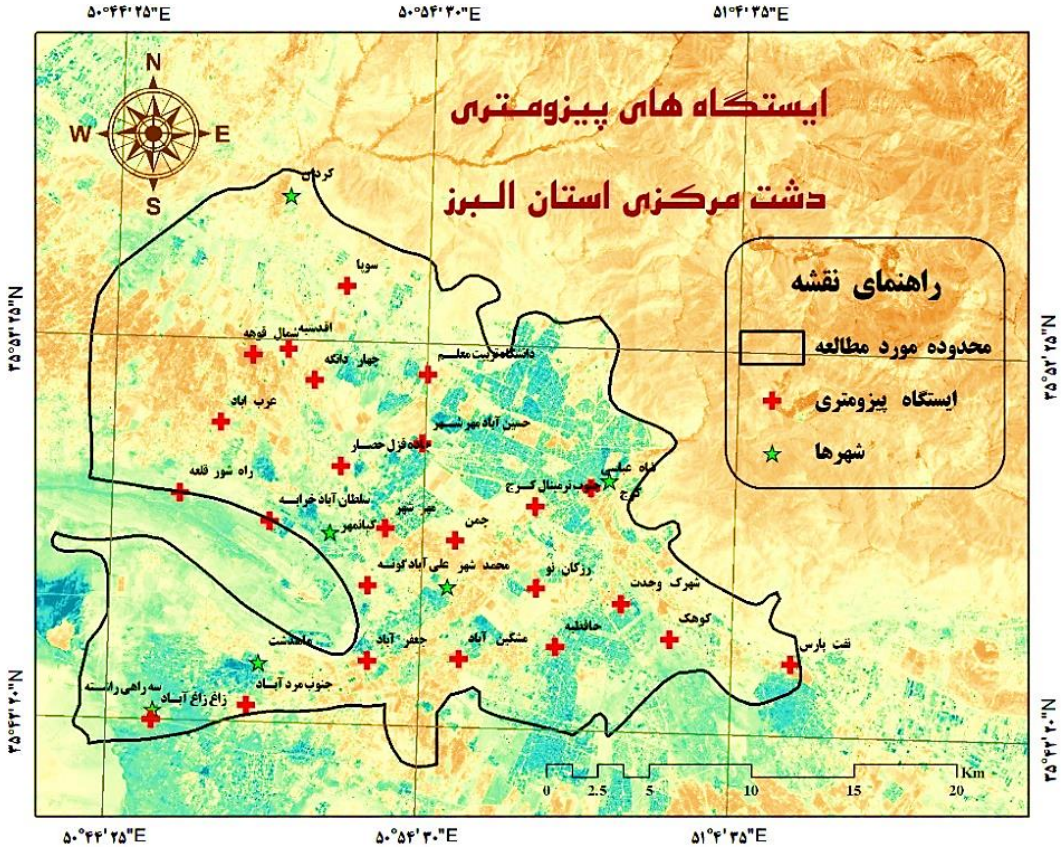
شکل ۲. تصویر فاز و همدوسی



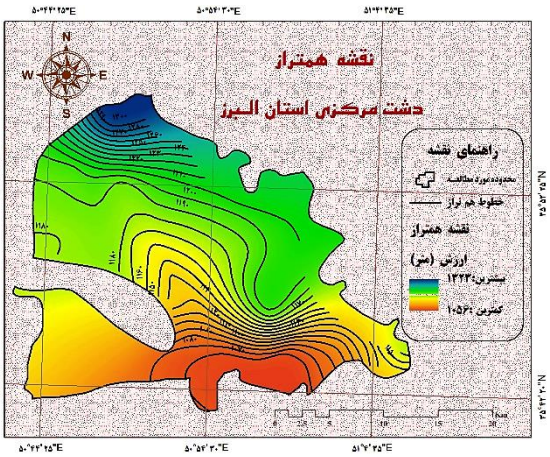
شکل ۳. وضعیت فیلتر و مقادیر محلی بالارفتگی و فرورفتگی



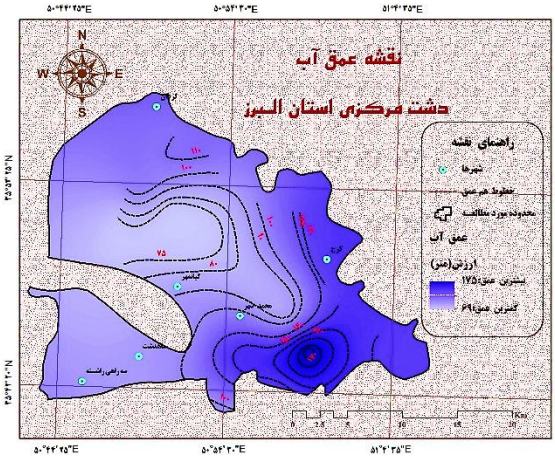
شکل ۴. روند اجرای پردازش خودکار تصاویر با استفاده از ابزار **Builder Graph** موجود در **SNAP**



شکل ۵. نقشهٔ موقعیت چاه‌های پیزومتری بررسی‌شده



شکل ۶. نقشهٔ عمق آب دشت مرکزی استان البرز



شکل ۷. نقشهٔ هم‌تراز دشت مرکزی استان البرز

جهت پهنه‌بندی خطر فرونشست در مرحلهٔ جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه‌بندی شوند. به این 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 شد. سپس، در مرحلهٔ بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی شبکهٔ آبراهه، با استفاده از نقشهٔ رودخانه‌های استان البرز، استخراج شد. لایه‌های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، دانلود شده از سایت (vertex.daac.asf.alaska.edu)، تهیه و لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشهٔ زمین‌شناسی استان؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدودهٔ مورد مطالعه، از تصاویر سنجندهٔ لندست ۸ سنجنده (OLI)، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov) استفاده شده است. در این راستا، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری 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 به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی کاربری‌ها در مطالعهٔ حاضر، چه از نظر تک‌تک کاربری‌ها و چه از نظر مجموع صحت و آمار کاپا، از صحت قابل قبولی (بزرگ‌تر از ۸۵ درصد)، در ارتباط با اطلاعات تولیدشده برخوردار است.

نقشهٔ بارش محدوده نیز با استفاده از نقشهٔ هم‌بارش استان البرز، ترسیم و سپس با اجرای مراحل تکنیک آراس نسبت به تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرونشست اقدام شد.

مراحل تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش ARAS[1] (ارزیابی نسبت جمعی)

روش ARAS مبتنی بر این استدلال است که با استفاده از مقایسه‌های سادهٔ نسبی می‌توان پدیده‌های دنیای پیچیده را درک کرد [۲۳]. این تکنیک، روشی قدرتمند در ارائهٔ نرخ عملکرد و درجهٔ مطلوبیت گزینه‌های مختلف نسبت به وضع بهینه است و از سهولت کاربرد نسبی نیز برخوردار است [۲۴]. مراحل الگوریتم پیاده‌سازی آراس به شرح ذیل است:

۱: تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش به صورت معیار ـ گزینه است. یعنی یک ماتریسی که ستون‌های آن را معیارهای مسئله 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 استانداردسازی: در پیاده‌سازی تمامی الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر فرونشست، مرحلهٔ استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی صورت پذیرفت (جدول ۱). استاندارد کردن داده‌ها به معنای همسان کردن دامنهٔ تغییرات داده‌ها بین صفر و یک و یا یک دامنهٔ مشخص دیگر است. در مجموعه‌های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداکثر عضویت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداقل عضویت در مجموعه تعلّق می‌گیرد [۲۵].

1. Additive Ratio Assessment

جدول ۱. نوع توابع فازی‌ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست محدودهٔ مطالعه‌شده

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 یر 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
بارش	با کاهش مقدار بارش، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
افت سطح آب	با کاهش مقدار افت سطح آب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی

۳: وزن‌دار کردن ماتریس نرمال: جهت وزن دار کردن ماترس نرمال برای استخراج پهنه‌بندی روش‌های متعددی مانند AHP،ANP، CRITIC وجود دارد، اما در این پژوهش، جهت وزن‌دهی عوامل از روش CRITIC استفاده شده است. در این روش، داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضاد موجود بین عوامل یا معیارها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد و بعد از محاسبهٔ انحراف معیار عوامل، ماتریس متقارنی به ابعاد m×m ایجاد می‌شود که شامل ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل‌شده است. با تعیین پارامترهای بالا، تضاد موجود بین معیار j با معیارهای دیگر با استفاده از رابطهٔ ۳، محاسبه می‌شود [۲۶ و ۲۷].

$$Cjk = \sum_{k=1}^{m}(1-rjk) \qquad (۳)$$

که در آن Cjk معرّف مجموع تضاد معیار j با معیارهای k است که از k = 1 شروع شده و تا k = m ادامه دارد و rjk، همبستگی بین دو معیار k و j را نشان می‌دهد. میزان اطلاعات عامل j را می‌توان با استفاده از رابطهٔ ۴ محاسبه کرد [۲۶ و ۲۷].

$$Cj = \delta j \sum_{k=1}^{m}(1-rjk) \qquad (۴)$$

که در آن Cj، معرّف 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 Cj بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. وزن هر عامل مانند j از رابطهٔ ۵، تعیین می‌شود [۲۶ و ۲۷].

$$Wj = \frac{Cj}{\sum_{k=1}^{m} C_k} \qquad (۵)$$

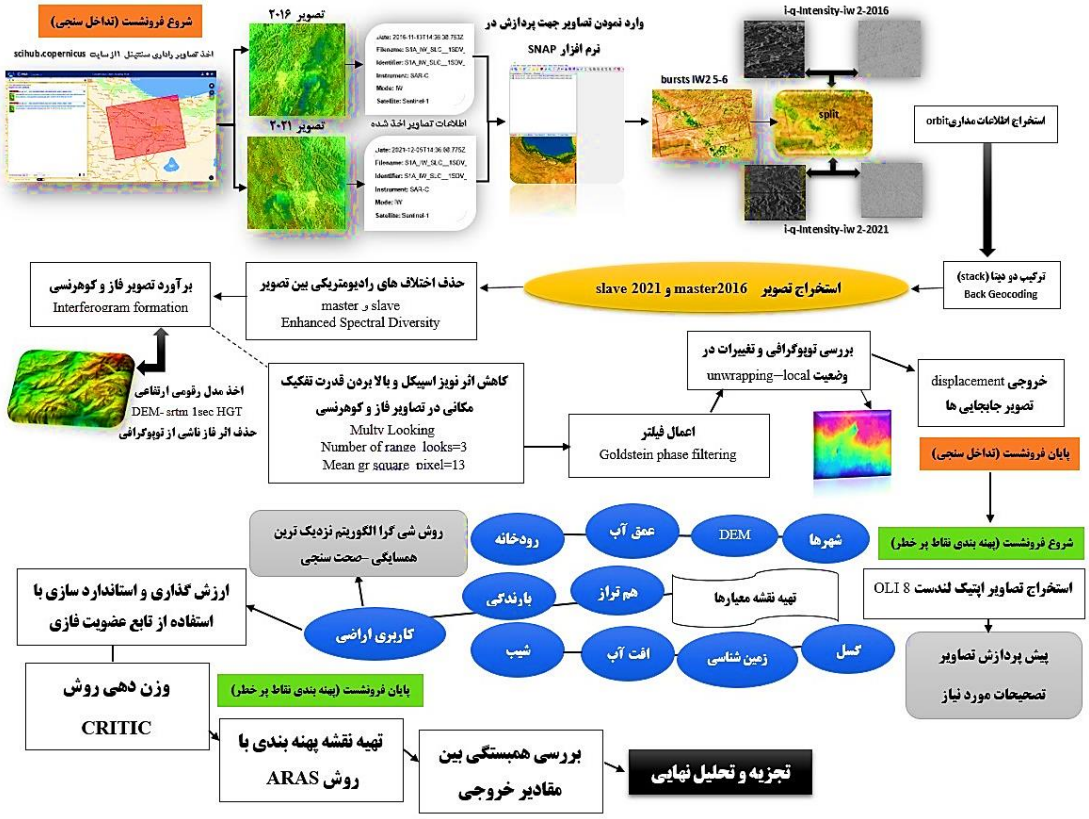
که در آن Wj معرّف وزن معیار j و Ck نشان‌دهندهٔ میزان اطلاعات مجموع معیارهای k است که از k = 1 شروع شده و تا k = m ادامه دارد. بنابراین، وزن نهایی هر معیار، از تقسیم میزان اطلاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلاعات تمامی معیارها به دست می‌آید [۲۶ و ۲۷].

۴- محاسبهٔ مطلوبیت کل هر گزینه: برای به دست آوردن تابع بهینگی S_i، اعداد نرمال‌شده وزین (x_{ij}) را به صورت سطری با هم جمع می‌کنیم (رابطهٔ ۶). بزرگ‌ترین مقدار S_i بهترین است و کمترین آن بدترین. با توجه به روند محاسبه‌شده، تابع بهینگی S_i دارای یک رابطهٔ مستقیم و متناسب با مقادیر x_{ij} و وزن‌های w_j از معیارهای بررسی‌شده و تأثیر نسبی آن‌ها روی نتیجهٔ نهایی است [۲۶ و ۲۷].

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} \hat{x}_{ij} \; ; i=\overline{0.m.} \qquad (۶)$$

۵- محاسبهٔ مطلوبیت نسبی هر گزینه و رتبه‌بندی گزینه‌ها: درجهٔ مطلوبیت هر گزینه (آلترناتیو) به وسیلهٔ مقایسهٔ متغیری که تجزیه‌وتحلیل شده است با حالت ایده آل یعنی S_0 مشخص می‌شود. معادلهٔ استفاده‌شده برای محاسبهٔ درجهٔ مطلوبیت K_i از یک گزینه a_i به صورت رابطهٔ ۷ است [۲۸ و ۲۹]. روندنمای پژوهش در شکل ۸، قابل مشاهده است.

$$K_i = \frac{S_i}{S_0} ; i = \overline{0.m.} \qquad (۷)$$

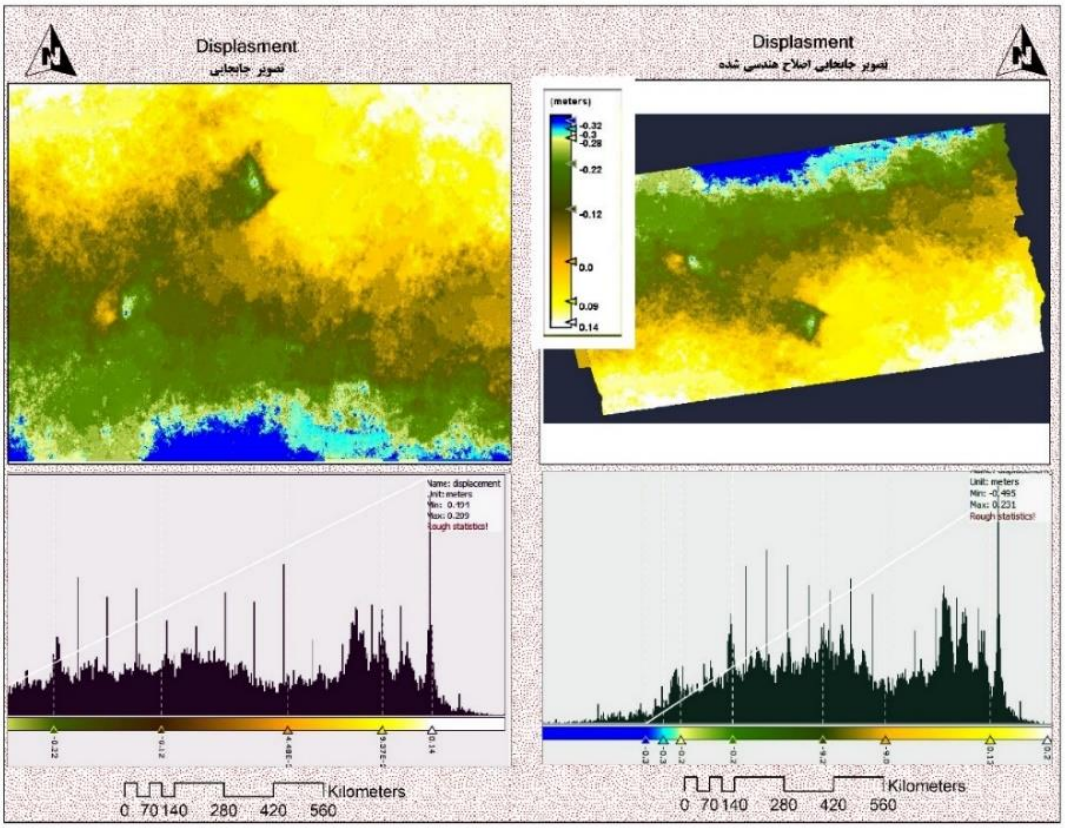


شکل ۸. فلوچارت مراحل پژوهش

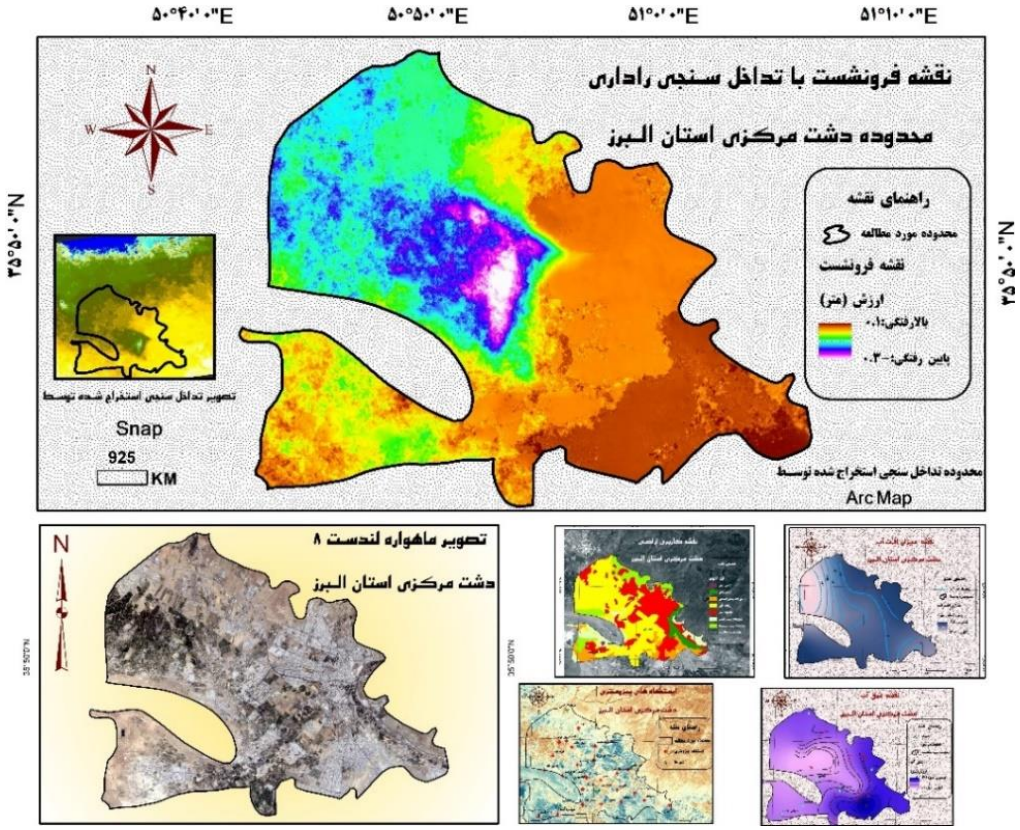
یافته‌ها

برآورد مقدار فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری

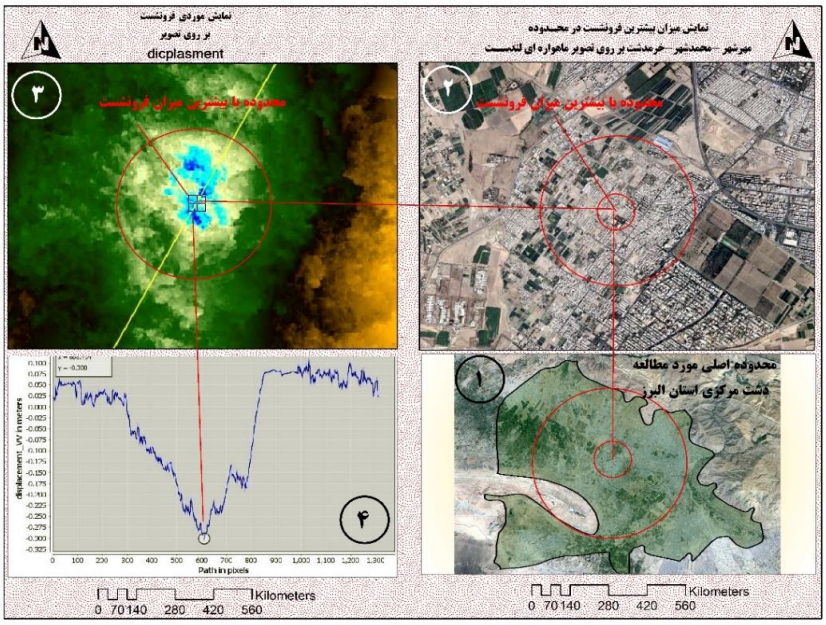
پس از انجام مراحل تداخل‌سنجی تبدیل اختلاف فازها به جابه‌جایی عمودی انجام شد و به جابه‌جایی عمودی در سیستم متریک تبدیل شده است. تصویر جابه‌جایی و جابه جایی اصلاح‌شده در شکل ۹ نمایش داده شده و شکل ۱۰ نیز نشان‌دهندهٔ خروجی نهایی حاصل از برآورد مقدار فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی رادار است که با توجه به نقشهٔ خروجی، مقادیر مثبت و به رنگ قهوه ای جابه‌جایی مربوط به حرکت زمین به سمت دید راداری (بالاآمدگی) و مقادیر منفی به رنگ سفید و بنفش بیانگر دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری (فرونشست) است. نتیجهٔ مطالعهٔ میزان فرونشست بین صفر تا ۳۰۰ میلی‌متر را طی ۶ سال اخیر، نشان می‌دهد که با توجه به نقشهٔ یادشده، بیشترین میزان فرونشست در بخش مرکزی (در محدودهٔ مهرشهر، خرمدشت، محمدشهر) به مقدار ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و سپس در بخش جنوب غرب محدوده (ماهدشت) به مقدار ۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر متمرکز است. در این مناطق به سبب تأمین نیازهای آبی جامعه سکونتگاهی و مناطق اطراف و همچنین، تأمین نیازهای آبی بخش صنعت از جمله کارخانه‌ها و فعالیت‌های کشاورزی، دست‌اندازی به منابع آبی بیشتر بوده و استحصال آب‌های زیرزمینی بسیار زیاد است. به همین دلیل میزان افت نیز بالا بوده است که این عوامل با دخالت اقلیم خشک این منطقه باعث استعداد بالای این مناطق در بحث فرونشست شده است. برای اعتبارسنجی دقت پیکسل‌ها در تداخل‌سنجی به صورت موردی محدوده‌های دارای بیشترین میزان فرونشست طی بازهٔ زمانی مطالعه با تصویر کوهرنسی مورد ارزیابی قرار گرفت و دقت محاسبات در پیکسل‌های مورد نظر دارای کوهرنسی بین ۰/۶ تا ۰/۸ بوده که دقت بسیار زیاد محاسبات در پیکسل را نشان می‌دهد (شکل ۱۱).



شکل ۹. تصویر جابه‌جایی و جابه‌جایی اصلاح‌شده



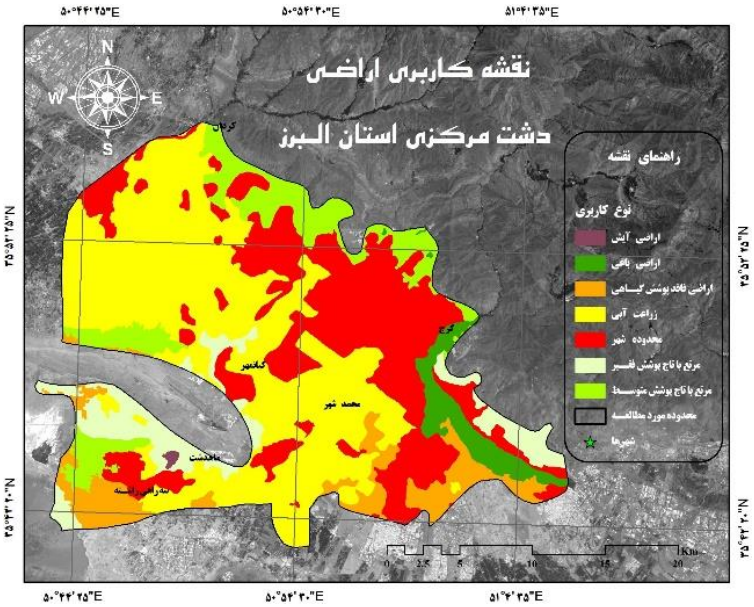
شکل ۱۰. نقشهٔ فرونشست و بالاآمدگی دشت مرکزی استان البرز



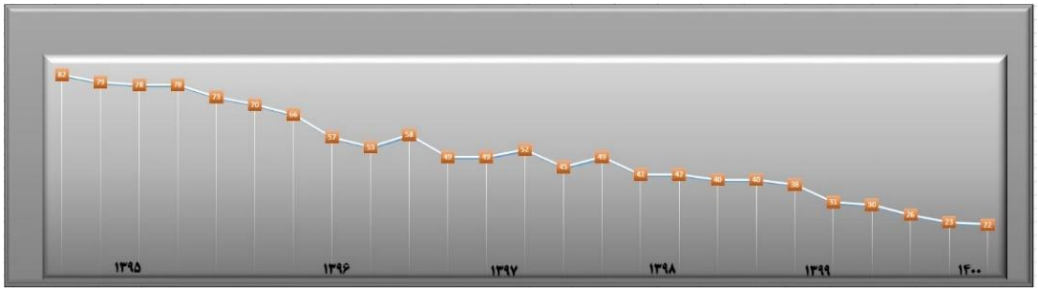
شکل ۱۱. نمایش واضح‌تر بیشترین مقدار فرونشست به صورت موردی در محدودهٔ مهرشهر، محمدشهر و خرم‌دشت

بررسی و تحلیل نقشهٔ کاربری اراضی (شکل ۱۲) و فرونشست و مطالعات صورت‌گرفته مؤید رخداد بیشینهٔ عرصه فرونشست به‌ترتیب در مناطق کشاورزی و محدودهٔ شهری و روستایی است، به طوری که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی برای وقوع فرونشست دارد و رابطهٔ بین توسعهٔ شهری و فرونشست زمین رابطه‌ای دوجانبه است که هر دو بر هم تأثیر گذاشته و تأثیر می‌پذیرند. تراکم جمعیت و نیاز آبی و غذایی منجر به بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی می‌شود و همچنین، افزایش باغ‌ها و ویلاها در استان باعث شده تعداد چاه‌ها افزایش پیدا کنند. بنابراین، افزایش بهره‌برداری از یک سو و توسعهٔ مناطق شهری و عدم تغذیه به آبخوان از طرف دیگر، منجر به ایجاد نشانه‌های فرونشست در بسیاری از نقاط دشت مرکزی استان البرز شده است.

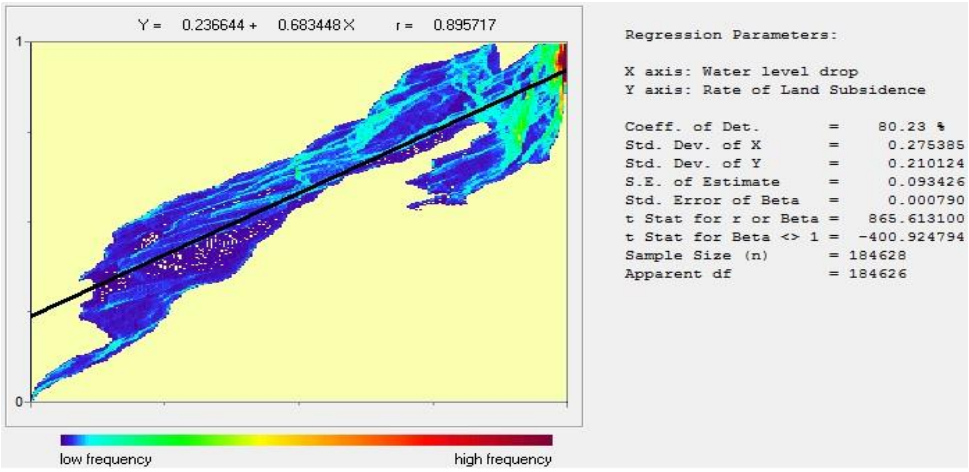
نرخ و دامنهٔ فرونشست استخراج‌شده براساس روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی از طریق اطلاعات چاه‌های پیزومتری مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. بررسی وضعیت و تأثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی و تأثیر آن بر میزان فرونشست به طور میانگین کاهش ۳۰ متری سطح ایستابی را در سال ۲۰۲۱ نسبت به سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد (شکل ۱۳). بررسی وضعیت موقعیت مکانی چاه‌ها و میزان افت سطح آب در آن ها نیز، بیانگر این است که در یک روند کلی میزان افت سطح آب از جنوب محدوده به سمت شمال محدوده و همچنین، از شرق به سمت غرب محدوده بیشتر می‌شود. به طور کلی، داده‌های مکانی چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه‌های خطوط هم‌افت و هم‌عمق، در دشت مرکزی استان البرز با مناطق نشست حاصل از پردازش راداری در بازهٔ زمانی مورد مطالعه، مطابقت دارد و مناطق با فرونشست زیاد، در مناطقی با بیشترین مقدر افت آب (به طور عمده با ۱۵ تا ۳۰ متر افت آب طی بازهٔ زمانی مطالعه‌شده) و در مناطقی با عمق کم آب (به طور عمده با عمق ۶۹ تا ۱۰۰ متر)، قرار دارد. به علاوه، بیشترین میزان فرونشست زمین در مجاورت چاه‌های پیزومتری مشاهده می‌شود. به علت مساعد بودن شرایط کشاورزی و بالا بودن سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا در محدودهٔ دشت مرکزی استان البرز، برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و همچنین، به منظور تأمین بخش اعظمی از آب بخش شرب، بهره برداری از چاه‌های منطقه افزایش یافته، به طوری که این میزان از بهره‌برداری در بعضی موارد بیشتر از توان احیای چاه‌ها بوده است و به همین دلیل، میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن مقدار نشست زمین، بالا می‌باشد. بررسی ارتباط بین معیار افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست و منطبق کردن مناطق با میزان زیاد فرونشست با موقعیت چاه‌ها نیز بیانگر این است که بین افت سطح آب چاه‌ها و میزان فرونشست منطقه رابطهٔ مستقیم برقرار است و ضریب همبستگی آن ها ۰/۸۹ است (شکل ۱۳).



شکل ۱۲. نقشهٔ کاربری اراضی محدودهٔ مطالعه‌شده



شکل ۱۳. نمودار مقایسه‌ای میانگین افت آب طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ محدودهٔ دشت مرکزی استان البرز

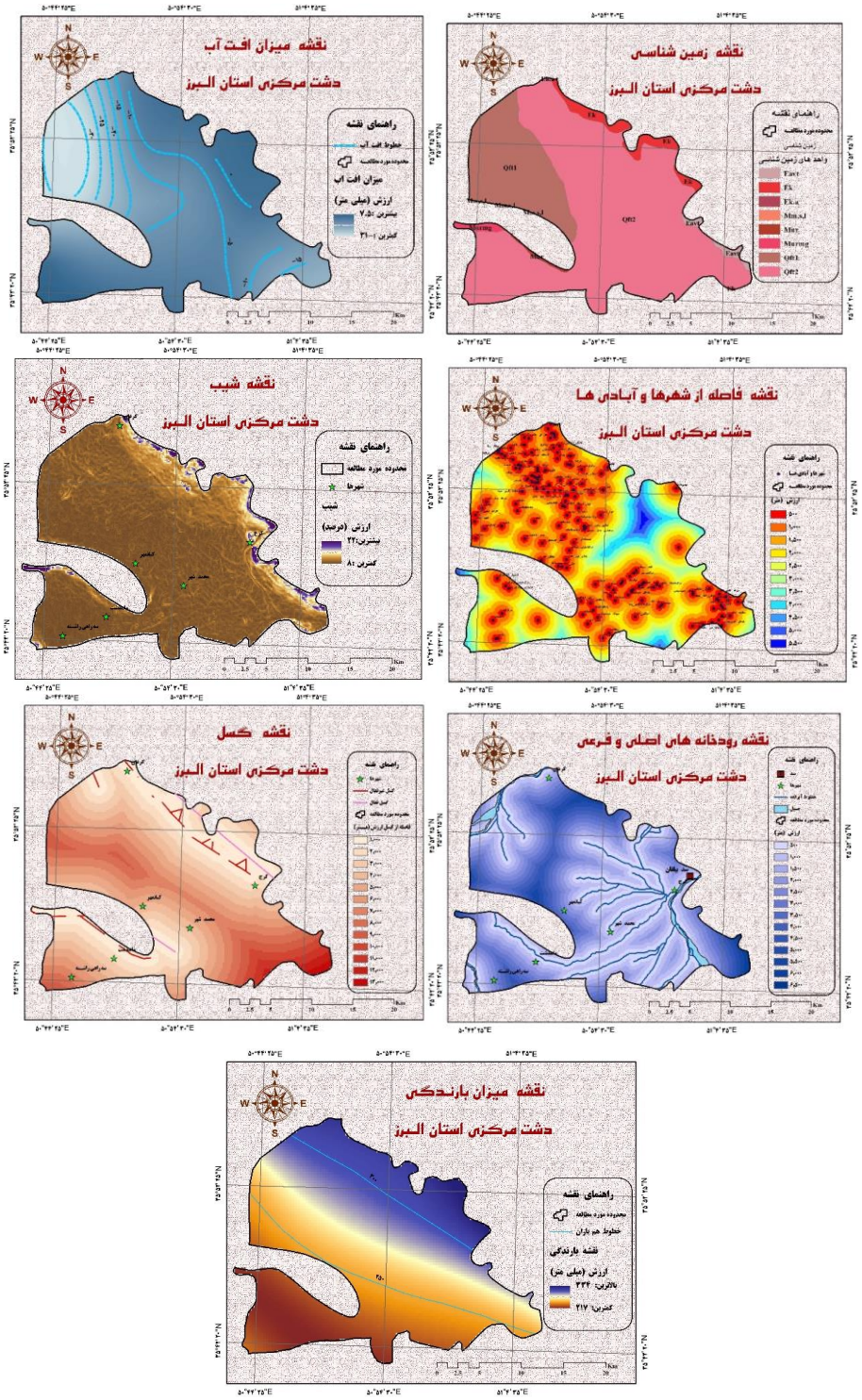


شکل ۱۴. رابطهٔ همبستگی بین نقش افت آب و نقشهٔ برآورد میزان فرونشست دشت مرکزی استان البرز

پهنه‌بندی خطر فرونشست

پس از استخراج نقشه‌های هر یک از معیارها (شکل ۱۵) و اعمال کردن وزن‌های مربوطهٔ حاصل از روش کرتیک (جدول ۲) و با اعمال مراحل مختلف تکنیک آراس، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست در ۵ طبقهٔ بسیار پرخطر تا بسیار کم‌خطر، به دست آمد (شکل ۱۶). با توجه به نتایج به‌دست آمده، به‌ترتیب معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی، 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 می‌شود، استفاده از این روش، در وزن‌دهی معیارها در پژوهش حاضر می‌تواند معضل استقلال صفات از یکدیگر که به هنگام مقایسهٔ زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و فرایند تحلیل شبکه‌ای وجود دارد را برطرف کند. با توجه به خروجی حاصل از به‌کارگیری روش آراس، ۱۳۵/۵۵ کیلومترمربع از مساحت محدوده در کلاس بسیار پرخطر و ۱۹۲/۲۸ کیلومترمربع در کلاس پرخطر قرار دارد (جدول ۳).

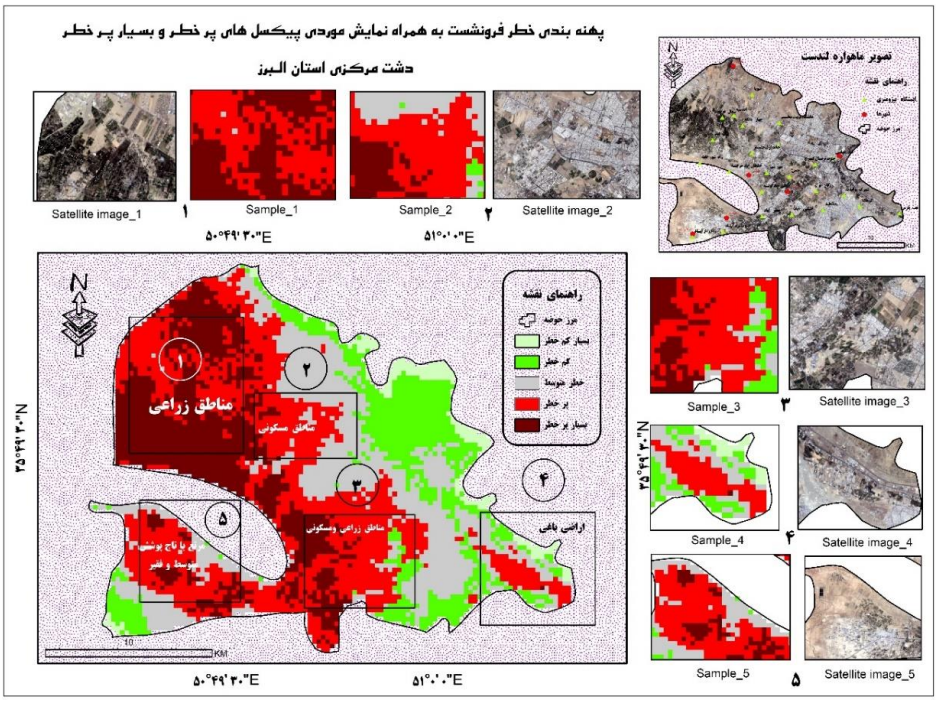


شکل ۱۵. نقشهٔ معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر فرونشست محدودهٔ مطالعه‌شده (تهیه و تنظیم: نگارندگان، ۱۴۰۰)

جدول ۲. مجموع تضاد، انحراف معیار، میزان اطلاعات و وزن نهایی معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت مرکزی استان البرز

معیار	مجموع تضاد	انحراف معیار	میزان اطلاعات	وزن نهایی
افت سطح آب	۴/۲۹۵	۰/۲۷۵	۱/۱۸۲	۰/۱۵۱
زمین‌شناسی	۲/۸۶۶	۰/۳۷۲	۱/۰۶۷	۰/۱۳۶
شیب	۲/۸۷۹	۰/۳۹۰	۱/۱۲۴	۰/۱۴۳
کاربری اراضی	۲/۸۹۴	۰/۴۰۰	۱/۱۵۷	۰/۱۴۷
فاصله از رودخانه	۲/۸۱۲	۰/۳۲۲	۰/۹۰۷	۰/۱۱۵
فاصله از شهر و روستا	۲/۱۵۲	۰/۴۶۴	۰/۹۹۸	۰/۱۲۷
بارش	۲/۰۴۲	۰/۳۴۶	۰/۷۰۷	۰/۰۹۰
فاصله از گسل	۱/۹۹۸	۰/۳۴۰	۰/۶۸۱	۰/۰۸۷

بخش اعظمی از کلاس بسیار پرخطر و پرخطر دشت کرج از لحاظ احتمال وقوع فرونشست در بخش شمال محدوده (شهرک افشاریه، حکیمیه، مزرعه حمیدیه و سهیلیه)، شمال غرب (لشکرآباد، قوهه و رامچین، محمدآباد افشار، سنقر آباد) و بخش مرکزی (مهرشهر، خرم‌دشت و کمال‌آباد) قرار گرفته است. به علاوه، با توجه به نقشه پهنه‌بندی پتانسیل خطر فرونشست در قسمت جنوب و جنوب غربی محدوده در محدودهٔ شهری ماهدشت راشته، سردار آباد، احمدآباد؛ مشکین‌آباد و عباس آباد، سردارآباد، شهرک بعثت و محمدآباد زیاد است. بخشی از قسمت جنوب شرقی محدودهٔ دشت کرج شامل امیرآباد، کوهک، شهرک ابوذر و گرمدره نیز در طبقه با احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارند.



شکل ۱۶. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت مرکزی استان البرز

جدول ۳. اطلاعات طبقات خطر فرونشست

طبقهٔ خطر	بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم‌خطر	بسیار کم‌خطر
مساحت به کیلومترمربع	۱۳۵/۵۵	۱۹۲/۲۸	۱۴۸/۵۵	۹۵/۷۶	۲۵/۴۳
مساحت به درصد	۲۲/۶۸	۳۲/۱۷	۲۴/۸۶	۱۶/۰۳	۴/۲۶

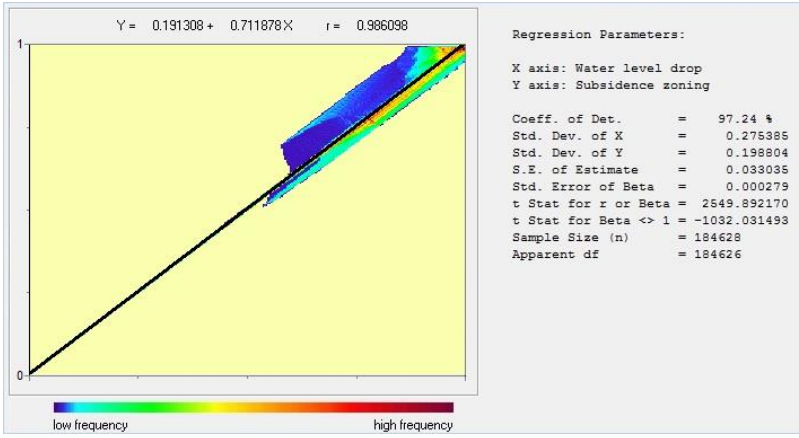
بررسی نقاط بسیار پرخطر و پرخطر معرفی‌شده توسط الگوریتم آراس نشان می‌دهد؛ از لحاظ معیار کاربری اراضی، کاربری زراعی و مناطق شهری، بیشترین درصد از مساحت مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد را به خود اختصاص داده است. محدودهٔ مطالعاتی به دلیل وضعیت توپوگرافی هموار مناسب، محدودیت کمی جهت توسعهٔ فعالیت‌های کشاورزی دارد. در واقع، نداشتن اختلاف ارتفاع، نداشتن شیب زیاد و وجود رسوبات آبرفتی مناسب در کنار عوامل اقتصادی منطقه سبب شده است تا فعالیت‌های کشاورزی این منطقه با گسترش زیادی همراه باشد، به طوری که بر اساس نقشهٔ کاربری اراضی محدودهٔ مطالعاتی بخش عمده‌ای از دشت به اراضی کشاورزی اختصاص داده شده است که همین عامل سبب بهره‌برداری بیش از حد از سفرهٔ آب‌های زیرزمینی طی سال‌های اخیر شده است. به علاوه، بخش اعظمی از آب مورد نیاز جهت شرب نیز از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود و این امر نیز به نوبهٔ خود در کاهش سطح آب به دنبال آن، در افزایش پتانسیل خطر فرونشست در محدودهٔ مورد مطالعه دخیل است.

از لحاظ معیار فاصله از مناطق شهری و روستایی، مناطق بسیارپرخطر در فاصلهٔ صفر تا ۵۰۰ متری از نقاط شهری و روستایی قرار دارند و بنابراین، می‌توان گفت که عوامل انسان‌ساخت، مانند: زمین‌های کشاورزی، تأسیسات زیرزمینی مانند سکونتگاه‌های شهری و روستایی و شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب‌های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار واردشده بر زمین میزان آسیب‌پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست شده‌اند. از منظر لیتولوژیکی، به طور کلی شهرهای موجود در محدودهٔ دشت مرکزی البرز، روی رسوبات آبرفتی جوان شکل گرفته‌اند و رسوبات آبرفتی گسترهٔ کرج حاصل فعالیت رودخانهٔ کرج و همچنین، رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی منشأ گرفته از دره‌های موجود در ارتفاعات شمالی است و مستعد برای ایجاد فرونشست، هستند. به علاوه، رسوبات آبرفتی قدیمی هزاردره و نهشته‌های تبخیری نئوژن (رس و مارن) به دلیل پوکی و تخلخل زیاد مقدار نشست بیشتری دارند و با کاهش فشار آب منفذی و به نسبت افزایش تنش مؤثر، میزان فرونشینی افزایش می‌یابد.

شیب نقش مؤثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد، از میزان تمرکز چاه‌ها می‌کاهد و میزان فرونشست 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. گسل‌ها به نوبهٔ خود نقش مؤثر و مهمی در میزان توسعهٔ فرونشست در سطح دشت دارد. از دیدگاه زمین‌ساختی محدودهٔ مطالعه‌شده در مجاورت زون فعالی و تکتونیزه البرز قرار گرفته و از حرکات زمین‌ساختی این زون متأثر است. از مهم‌ترین گسل‌ها، در محدوده می‌توان به گسل ماهدشت- کرج (از نوع گسل فشاری همراه با مؤلفهٔ راست لغز و درازای دست‌کم ۳۰ کیلومتر، راستای شرقی، شمال شرقی، غربی- جنوب غربی و شیب تند بیشتر رو به جنوب- جنوب شرقی)، گسله کردان-کرج (گسل تراستی کواترنر)، اشاره کرد. با بررسی معیار فاصله از گسل نتایج مشخص شد که طبق نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرونشست، به طور عمده؛ نقاط پرخطر واقع در بخش شمال و شمال غربی محدوده در فاصلهٔ ۴۰۰ تا ۸۰۰۰ متری و مناطق دارای احتمال خطر بخش جنوب غربی، در فواصل ۵۰ تا ۵ هزار فواصل متری، از گسل واقع شده‌اند.

با افزایش فاصله از آبراهه ها نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل نبود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. با انطباق نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرونشست با نقشهٔ معیار فاصله از رودخانه، می‌توان گفته که به طور عمده مناطق دارای احتمال خطر در فاصله ۷۰۰ تا ۵۵۰۰ متری از رودخانه قرار دارند. فرونشست‌ها با میزان بارندگی ارتباط دارند و هر چه میزان بارندگی کمتر باشد، فرونشست‌ها نیز بیشتر خواهد شد. می‌توان گفت که مناطق پرخطر و بسیار پرخطر از نظر عامل بارش، در محدوده‌هایی با مقدار متوسط بارش سالیانه ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر قرار دارند. اگر چه گروهی از عوامل در ایجاد خطر فرونشست مؤثر بوده‌اند، ولی مهم‌ترین آن‌ها در دشت مرکزی استان البرز، عامل برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی است و مناطق دارای احتمال خطر زیاد در بخش

هایی با افت سطح آب ۱۵ تا ۳۰ متر قرار دارند. بنابراین، با توجه به نقش و اهمیت معیار افت سطح آب، نقشهٔ نهایی حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست با نقشهٔ معیار افت سطح آب محدوده مورد بررسی قرار گرفت و مقدار همبستگی بین نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرونشست با نقشهٔ افت سطح آب چاه‌ها، ضریب همبستگی آن‌ها ۰/۹۸را نشان داد و در نتیجه هر چه برداشت از آب‌های زیرزمینی، بیشتر شود؛ فضای خالی در زیرزمین هم بیشتر خواهد شد که این امر منجر به فرونشست می‌شود (شکل ۱۷).



شکل ۱۷. رابطهٔ همبستگی بین نقش افت آب و نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت مرکزی استان البرز

بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست زمین طی سال‌های گذشته به دلایل مختلف از جمله رشد بی‌رویه جمعیت، برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی به همراه عوامل دیگر سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان به زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و... شده است. پایش میزان نرخ فرونشست و نیز پرداختن به علت یا علل تأثیرگذار آن جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت است. در این پژوهش به منظور بررسی میزان فرونشست از تصاویر A1-Sentinelدر بازهٔ زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ و روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. به علاوه، در راستای تهیهٔ نقشهٔ فرونشست زمین در دشت مرکزی استان البرز از تکنیک چندمعیارهٔ آراس استفاده شد و به منظور اجرای مدل آراس، بر اساس مطالب ارائه‌شده در بخش روش تحقیق، وزن‌دهی با روش کرتیک انجام شده است.

نتایج ارزیابی وضعیت آب زیرزمینی منطقه بیانگر این است که محدودهٔ مطالعاتی طی سال‌های اخیر با روند افزایشی افت سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است. به طوری که میزان افت سطح آب در بعضی از چاه‌ها به ۳۰ متر در سال رسیده است و با کاهش تراز آب زیرزمینی، افزایش تنش مؤثر ناشی از کاهش فشار آب منفذی موجب ایجاد فرونشست می‌شود. به طور کلی، روند افزایشی افت سطح آب در محدودهٔ مطالعاتی از سمت جنوب به سمت مناطق شمالی محدوده بوده است. همچنین، ارزیابی میزان فرونشست منطقه نیز بیانگر این است که بیشترین میزان فرونشست در مناطق شمالی محدوده بوده و روند افزایش آن از سمت جنوب به سمت مناطق شمالی محدوده مطالعاتی است. در واقع، نتایج به‌دست‌آمده 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 و افت سطح آب زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه، باعث نشست رسوبات و کاهش تخلخل آن‌ها شده است و بنابراین حتی اگر سطح آب زیرزمینی مجدد بالا آید، جبران این خسارت‌ها را نخواهد کرد. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشت؛ معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی، به‌ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۵۱، ۰/۱۴۷، ۰/۴۳ و ۰/۱۳۶، مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدودهٔ مطالعاتی هستند. همچنین، طبق نتایج به‌دست‌آمده، به‌ترتیب ۲۲/۶۸ و ۳۲/۱۷ درصد از مساحت محدوده، در طبقهٔ بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد و ریسک بالای فرونشست زمین بیشتر در مناطق

مرکزی و شمالی و غربی منطقه وجود دارد. همچنین، مقدار همبستگی بین نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرونشست با نقشهٔ افت سطح آب چاه‌ها نیز ضریب همبستگی آن‌ها ۰/۹۸را نشان داد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که مهم‌ترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست محدودهٔ مطالعاتی بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی و افت سطح آب است و بنابراین، نتایج مطالعهٔ حاضر با تتایج مطالعات انجام‌شده توسط تورانی و همکاران [۱۲]، منتظریون و اصلانی [۴]، ابراهیمی و همکاران [۱۴]، اصغری و محمدزاده [۱۵]، بهاتارای [۱۶]، هوانگ و همکاران [۱۸]، رنجبر و همکاران [۱۹]، 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.

در نهایت، می‌توان اذعان داشت با توجه به این امر که فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومهٔ آن، در محدودهٔ دشت مرکزی استان البرز آسیب برساند. از این‌رو، باید راهکارهای بلندمدت به صورت اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب و راهکارهای کوتاه‌مدت به صورت، جلوگیری از برداشت سفره‌های آب زیرزمینی به اشکال مختلف و پایش مستمر مناطق مستعد این پدیده، ایجاد سدهای زیرزمینی به منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست، مهار آب‌های سطحی و اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز، تهیه و نصب دستگاه‌های کنتور هوشمند، ایجاد تشکل‌های آب‌بران و حمایت از این تشکل‌ها، ایجاد و استقرار بازار محلی آب و ساماندهی شرکت‌های حفاری، کنترل شدید مصرف آب و تغییر الگوی مصرف، مورد توجه مسئولان ذی‌ربط و مربوطه و همچنین، ساکنان محلی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با همکاری **ادارهٔ کل راه و شهرسازی استان البرز** و **شرکت سهامی آب و منطقه‌ای استان البرز** به انجام رسیده است. به این‌ترتیب، از همکاری ایشان تشکر می‌کنیم.

منابع

[1]. Sharifi Kia, Mohammad, Determining the extent and amplitude of land subsidence using radar interference method in Nogh-Bahraman plain, Journal of Spatial Planning and Planning 2012: Volume 16, Number 3, pp. 73-55. [Persian]

[2]. Shafiee, Najmeh, Mokhtari, Leilagli, Amir Ahmadi, Abolghasem, Zandi, Rahman. Investigation of aquifer subsidence in Nurabad plain using radar interferometry method. Quantitative Geomorphological Research 2020:, 8 (4), pp. 93-111. [Persian]

[3]. Shirani Kourosh, Pasandi Mehrdad, Ebrahimi Babak .Investigation of land subsidence in Najafabad plain of Isfahan using radar differential interferometry technique. Journal of Soil and Water Sciences 2021: 25 (1): 127-105. [Persian]

[4]. Montazeriun, Maryam; Aslani, Fereshteh. Landslide risk assessment using GIS in Tehran and Alborz provinces. Crisis Prevention and Management Knowledge Quarterly 2019: Volume 9, Number 1, pp. 13-1. [Persian]

[5]. Abidin H. Z., Andreas H., Gumilar I., and Brinkman J. J., On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta, Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities (HS01 – IUGG2015). Published by Copernicus Publications on behalf of the International Association of Hydrological Sciences 2015.

[6]. Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J., & Ao, M.. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China. Remote Sensing of Environment 2018: 205,180–198.

[7]. Shirani Kourosh, Pasandi Mehrdad, Ebrahimi Babak. Investigation of land subsidence in Najafabad plain of Isfahan using radar differential interferometry technique. Journal of Soil and Water Sciences 2021: 25 (1): 127-105. [Persian]

[8]. Bou kheir, R., Cerdan, O & Abdelah, C. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. Geomorphology 2006: 82, 347-359.

[9]. Aher P, Adinarayana J, Gorantiwar SD Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. Agric Eng Int CIGR J 2013 :15(1):11–18.

[10]. Georgiou, D., Mohammed, E.S., Rozakis, S. Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. Renew. Energy 2015 :75, 459–467.

[11]. Arab Ameri, A., Pourghasemi, H.R., Cerda. A., (2018), Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models, Science of The Total Environment 2015 :613-614.

[12]. Turani, Marjan, Aq Atabay, Maryam, Rustaei, Meh Asa. Study of subsidence in Gorgan city using radar interferometry method. Journal of Spatial Planning 2019: 8 (27), 117-128. [Persian]

[13]. Kooh Banani, Hamid, Yazdani, Mohammad Reza, Hosseini, Seyed Keyvan.. Zoning of land subsidence risk using radar interference (Case study: Kashmar and Khalilabad plains. Desert Management 2019: 7 (13), 76-65. [Persian]

[14]. Ebrahimi, Atrin, Ghasemi, Afshan, Ganjaeian, Hamid. Monitoring the subsidence of Pakdasht urban area using radar interferometry method. Geography and Human Relations 2020: 2 (4), 29-41. [Persian]

[15]. Asghari Saraskanrood, Sayad, Mohammadzadeh Shishegran, Maryam. Estimation of subsidence using radar interferometry technique and groundwater parameters and land use (Case study: Shahriar plain. Quantitative geomorphological research 2021: 10 (1), 54-40. [Persian]

[16]. Bhattarai, R. Alifu, H. Maitiniyazi, A. Kondoh. Detection of Land Subsidence in Kathmandu Valley, Nepal, Using DInSAR Technique, Land 2017: 6(2), 1-178.

[17]. Minh, D. H. T. Tran., Q, C. Pham, Q.N, Dang, T, Nguyen, D.A, El-Moussaw, A.. "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 2019: 10,3874-3884.

[18]. Huang, G. Fan, H. Lu, L. Yu, W., The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2020: 1-6.

[19]. Ranjgar, Babak, Seyed V. Razavi-Termeh, Fatemeh Foroughnia, Abolghasem Sadeghi-Niaraki, and Daniele Perissin.. "Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Persistent Scatterer SAR Interferometry Technique and Optimized Hybrid Machine Learning Algorithms" Remote Sensing 2021. [Persian]

[20]. Qanvati, Ezatullah, Sharifi Kia, Mohammad, Hosseini, Seyed Ibrahim. Explaining the effect and geomorphological process of subsidence phenomenon in changing the land pattern of geomorphological forms Case study of Yazd-Ardakan plain. Quantitative Geomorphological Research 2019: 8 (3), 1-16. [Persian]

[21]. Qara Cheloo, Saeed, Akbari Quchani, Hesam, Glian, Saeed, Ganji, Kamran. Assessment of land subsidence in relation to groundwater with the help of Sentinel-1 and Alus-1 radar satellites (study area: Mashhad plain). Remote Sensing and GIS in Natural Resources 2021: 12 (3), 40-61.

[22]. Abdul Maleki, Ali, Maleki, Amjad, Khazaei, Ali. Monitoring the elevation of the earth and analyzing its geomorphological effects using telemetry data. Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources 2021: 12 (4), 118-95. [Persian]

[23]. Alizadeh Reza, Izadi Hassan, Arasteh Mojtaba. Ranking of nature-based tourism capacity in mountainous areas, case study: Eastern region of Lorestan province. Planning and arranging space 2021: 25 (1): 117-142. [Persian]

[24]. Anamradnejad, Rahim Bardi, Nikpour, Amer, Hassani, Zohreh. Physical-Spatial Analysis of Urban Areas Based on Intelligent Urban Growth Indicators (Case Study: Babol), Journal of Urban Research and Planning 2019: 9 (34), 19-30. [Persian]

[25]. Hoseini H.. Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation, Information Processing in Agriculture 2019: 6 (1): 11-19. [Persian]

[26]. Alinezhad A, Khalili J.. New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). International Series in Operations Research & Management Science 2019.[Persian]

[27]. Tuş A, Aytaç Adalı E. The new combination with CRITIC and WASPAS methods for the time and attendance software selection problem, opsearch 2019: 56: 528–538.

[28]. Diani Leila, Portaheri Mehdi, Rokanuddin Eftekhari Abdolreza, Ahmadi Hassan. Ranking of the main structures of organizing the worn-out structures of the villages around the metropolises using the cumulative ratio evaluation method (ARAS) (Case study: around the metropolis of Tehran). Planning and arranging space 2019: 22 (3): 145-181.

[29]. Zavadskas, E.; Turskis, Z .a new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making, Technological and Economic Development of Economy 2010: 16(2) 159-172.