

برآورد میزان فرورنشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل)

لیلا آقاییاری - دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی گرایش مخاطرات ژئومورفیک، دانشگاه محقق اردبیلی
موسی عابدینی* - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی
صیاد اصغری سراسکانرود - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

چکیده

یکی از مخاطرات پیش روی دشت‌های کشور، مخاطره فرورنشست می‌باشد. پدیده فرورنشست زمین به دلایل مختلف از جمله برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و تغییرات جوی سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی شده است. لذا پایش میزان نرخ فرورنشست و پرداختن به علل و عوامل تاثیرگذار جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت است. دشت اردبیل نیز به خاطر تغییرات اقلیمی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر یکی از مناطق مستعد جهت مخاطره فرورنشست می‌باشد. تکنیک تداخل سنجی راداری با دقت بالا از مناسب‌ترین و به روزترین روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری میزان فرورنشست می‌باشد. این تکنیک فاز گرفته شده از دو مجموعه رادار در دو دوره زمانی مختلف از یک منطقه را مقایسه و با ایجاد اینترفروگرام، قادر به اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در بازه زمانی است. در این پژوهش به منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرورنشست در دشت اردبیل از تصاویر سنتینل ۱ سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ و به جهت پردازش اطلاعات نیز از نرم‌افزار *sarscape5.2* استفاده شده است. جهت بررسی سطح آب زیرزمینی از داده‌های چاه‌های پیژومتری زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برای سال‌های ۶۶ تا ۹۹ با روش درون‌یابی کریجینگ استفاده گردید. نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از تصاویر لندست ۸ و طبقه‌بندی شی‌گرا در دشت اردبیل استفاده شد. نتایج بررسی اطلاعات ۳۹ حلقه چاه پیژومتری موجود در دشت اردبیل در بازه زمانی ۳۳ ساله، میانگین افت آب زیرزمینی حدود ۹٫۵ متر را نشان می‌دهد. هم‌نهادسازی نقشه‌های فرورنشست با لایه‌های کاربری اراضی نیز موبد رخداد بیشینه عرصه نشست که بالاترین میزان مربوط به مراتع خوب و مناطق کشاورزی ۲۲٪. میلی‌متر، مراتع متوسط ۲۱٪ میلی‌متر و مناطق انسان‌ساز ۲۰٪ میلی‌متر می‌باشد. نقشه حاصل از فرورنشست بیانگر نرخ فرورنشست در هر سال به طور میانگین ۴٫۴ میلی‌متر و طی بازه زمانی ۵ ساله ۲۲ میلی‌متر می‌باشد.

واژگان کلیدی: پدیده فرورنشست، دشت اردبیل، تداخل سنجی راداری، تصاویر راداری سنتینل ۱

مقدمه

از دیرباز سعی بر آن بوده تا علم و دانش بشری به عنوان ابزاری در جهت آسایش و امنیت وی به خدمت گرفته شود. یکی از مهم‌ترین رویدادهای مخاطره‌آمیزی که بیشتر در اثر فعالیت‌های بشری در زمین رخ می‌دهد، پدیده فرونشست می‌باشد. طبق تعریف ارایه شده توسط یونسکو این پدیده عبارتست از فروریزش یا نشست سطح زمین که در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴: ۲۷). به عبارتی فرونشست زمین نتیجه به هم خوردن تعادل بین فشارهای هدایت شده به سوی پایین در جهت قائم و یا کاهش مقاومت درونی مواد (استحکام) و یا ترکیبی از این دو حالت می‌باشد. رخداد پدیده مورفولوژیکی فرونشست می‌تواند متأثر از عوامل طبیعی (تغییر شکل‌های ناشی از عوامل تکتونیک و آتشفشانی، تحمیل بارهای سنگین، به هم خوردن ایزوستازی، فشردگی حاصل از ارتعاشات در اثر زلزله، خشک شدن رسوبات ریزدانه، اکسیداسیون خاک‌های آلی، ذوب پرمافروست، انحلال مواد و عناصر قابل حل) و عوامل انسانی (برداشت مایعات، فشردگی ناشی از تحمیل بارهای سنگین، فشردگی به علت زهکشی زمین و ..) شکل گیرد (عابدینی، ۱۳۹۶: ۳۷). هر چند محوریت رویداد آن متوجه دو عامل اصلی استخراج آب زیرزمینی و کارستی شدن سنگ‌های انحلال‌پذیر است (شریفی کیا، ۱۳۹۱: ۵۶). مهم‌ترین عامل فرونشست اغلب دشتهای ایران، برداشت بی‌رویه و از منابع آبهای زیرزمینی به موازات حاکمیت خشکسالی‌ها در چند دهه اخیر، توسعه بخش صنعت و کشت‌های عموماً با نیاز آبی بیشتر به همراه غالب بودن سیستم آبیاری سنتی می‌باشد (عابدینی، ۱۳۹۲: ۷۱).

با توجه به مخاطراتی که پدیده فرونشست در تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها، آبراه‌ها و سازه‌های انتقال آب، شکست یا بیرون زدگی لوله جداره چاه‌ها در نتیجه تنش‌های تراکمی ناشی از تراکم آبخوان‌ها و ایجاد اختلال در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها، کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و پیرو آن گسترش پهنه‌های بیابانی و سیلابی و کاهش بازدهی یا ایجاد تخریب در شریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم ممکن است ایجاد کند، شناسایی و مدیریت مناطق دچار فرونشست امری کلیدی در مدیریت شهری محسوب می‌شود (امیغ‌بی، ۱۳۸۸: ۲).

پدیده فرونشست بسیاری از نقاط دنیا از جمله ایران را تحت تاثیر قرار داده است و در طی سال‌های اخیر به عنوان یکی از مسائل و چالش‌های اصلی مطرح شده است. این پدیده در مناطق مختلف تحت تاثیر عوامل مختلفی توسعه یافته است. در فرونشست‌های ایران، افت آب زیرزمینی به عنوان اصلی‌ترین عامل مطرح شده است. چرا که ارتباط مستقیمی بین فرونشست مناطق و میزان افت آبهای زیرزمینی در مناطق مختلف برقرار است. در واقع حاکم بودن شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های صنعتی، کشاورزی و مصارف آب شرب بر منابع آب زیرزمینی، زیرساخت مناسبی برای رویداد این پدیده فراهم آورده است (شریفی کیا، ۱۳۹۱: ۵۷). طبق نتایج بعمل آمده بیشترین افت سطح آبهای سفره‌های زیر زمینی و فرونشست زمین در دشت کرج و روانسرا -سنجابی و هم چنین در دشت اردبیل مطبق با تراکم چاهها مناطقی که سازندهای آبرفتی پر شده دارای ضخامت زیاد هستند و با خالی شدن آب موجود در بین منافذ سازندهای سست فشردگی و تراکم حاصل منجر به فرونشست تدریجی میشود (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۵).

به منظور شناسایی و کاهش پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست نیاز به یک سیستم پایش فرونشست بیش از پیش در کشور و دشت اردبیل احساس می‌شود. اولین گام در پایش فرونشست اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی ناشی از آن در سطح زمین است. با علم به میزان نرخ فرونشست و همچنین پهنه و گستره مناطق تحت تاثیر، نه تنها قادر خواهیم بود میزان پیشرفت این پدیده را در یک منطقه شناسایی کنیم و از پیشرفت بیشتر آن جلوگیری نمائیم. بلکه می‌توانیم اطلاعات بارزشی از ویژگی‌های زمین شناسی و سفره آب زیرزمینی بدست آوریم.

با توجه به اهمیت موضوع در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه فرونشست صورت گرفته است و پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌های سنجش از دور سبب شده است تا پایش پدیده فرونشست برخلاف گذشته با دقت و سرعت

بالا تری صورت گیرد یکی از روش‌های که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته شده است روش تداخل سنجی تفاضلی راداری است که دقت و سرعت بالایی در پردازش اطلاعات و پایش تغییرات سطح زمین دارد. به همین جهت در این پژوهش از روش تداخل سنجی راداری برای پایش میزان فرورنشست محدوده مورد مطالعه استفاده شده است.

فتح‌اللهی و همکاران ۱۳۹۷ به بررسی فرورنشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری پرداخته و نتایج مذکور بیانگر کارایی مناسب این روش به منظور جابه‌جایی ناشی از فرورنشست در میدانی مذکور است. تورانی و همکاران ۱۳۹۷ به مطالعه فرورنشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری پرداخته و برداشت بیش از حد و افت سطح آب زیرزمینی را مهم‌ترین علت فرورنشست در منطقه عنوان کردند. نایب زاده ۱۳۹۷ به بررسی فعالیت تکتونیکی در حوضه اشتهارد با استفاده از تداخل سنجی راداری پرداختند. حاجب و همکاران ۱۳۹۷ به بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری پرداختند و معتقدند که افت تحکیم لایه‌های منطقه باعث فرورنشست منطقه شده است. اصغری و همکاران ۱۳۹۹ به پایش میزان فرورنشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری در طی بازه ۶ ساله (۲۰۱۵-۲۰۲۰) پرداختند، نتایج بررسی ۸ سانتی‌متر فرورنشست و ۱۵ سانتی‌متر بالا آمدگی را نشان می‌دهد. شفیعی و همکاران ۱۳۹۹ به بررسی فرورنشست دشت آبخوان نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری پرداختند و جهت بررسی وضعیت افت سطح آب‌های زیرزمینی از روش درون‌یابی IDW استفاده کرده‌اند و نقشه‌های حاصل از فرورنشست نشان می‌دهد که نرخ نشست در هر سال به طور میانگین ۴ سانتی‌متر و طی بازه زمانی ۴ ساله ۱۶ سانتی‌متر می‌باشد. ابراهیمی و همکاران ۱۳۹۹ به پایش میزان فرورنشست 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 فرورنشست را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و موثرترین عامل در فرورنشست را هم افت سطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. شاه‌کرمی و همکاران ۱۳۹۹ مناطق فرورنشست در اثر اضافه برداشت آب زیرزمینی در دشت اراک را مورد بررسی قرار دادند نتایج بدست آمده بیانگر این موضوع هستند که نواحی مرزی و حاشیه‌ای دشت اراک در معرض افت بیش‌تر آب قرار دارند و تمرکز رسوبات ریزدانه رسی در قسمت‌های غربی به مراتب بیشتر از نواحی دیگر می‌باشد در نتیجه احتمال می‌رود این نواحی در معرض خطر فرورنشست بیشتری باشند. زارعی و همکاران ۱۳۹۹ به تعیین رابطه فرورنشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS دشت سلماس پرداختند. و نتایج نشان داد که به ازای یک متر افت سطح آب زیرزمینی، ۰/۰۷۸ متر سطح زمین در دشت نشست می‌کند. جوادی ۱۴۰۰ در رساله خود به برآورد و تحلیل میزان فرورنشست دشت همدان - بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS در طی بازه زمانی ۵ ساله و میزان فرورنشست این دشت را ۵۶ میلی‌متر به صورت سالانه برآورد کرده است و بیش‌ترین میزان فرورنشست مربوط به مناطق دارای افت منابع آب زیرزمینی است.

استیفن^۱ ۲۰۱۶ به بررسی علل فرورنشست و عوامل تشدیدکننده و خسارات ناشی از فرورنشست را بررسی کرده و مهم‌ترین علت فرورنشست را تخلیه بیش از حد آب‌های زیرزمینی و انحلال سنگ‌های کربناته اعلام کرد. کویی انجویون^۲ ۲۰۱۶ در کتاب علل فرورنشست زمین در شهر هوشی‌مین به مطالعه این پدیده پرداخته و توصیه‌های مناسبی در جهت مدیریت آن در سطح شهر بیان کرده است. گامبولاتی^۳ و همکاران ۲۰۱۸ به مطالعه تاثیر فعالیت‌های انسانی بر میزان فرورنشست زمین در مناطق مسکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سازه‌ها را مهم‌ترین علت فرورنشست در مناطق مسکونی بیان کردند. هوانگ^۴ و همکاران ۲۰۲۰ به بررسی فرورنشست شهر دژو با روش SBAS

1. Stephen

2. KuiAnjouen

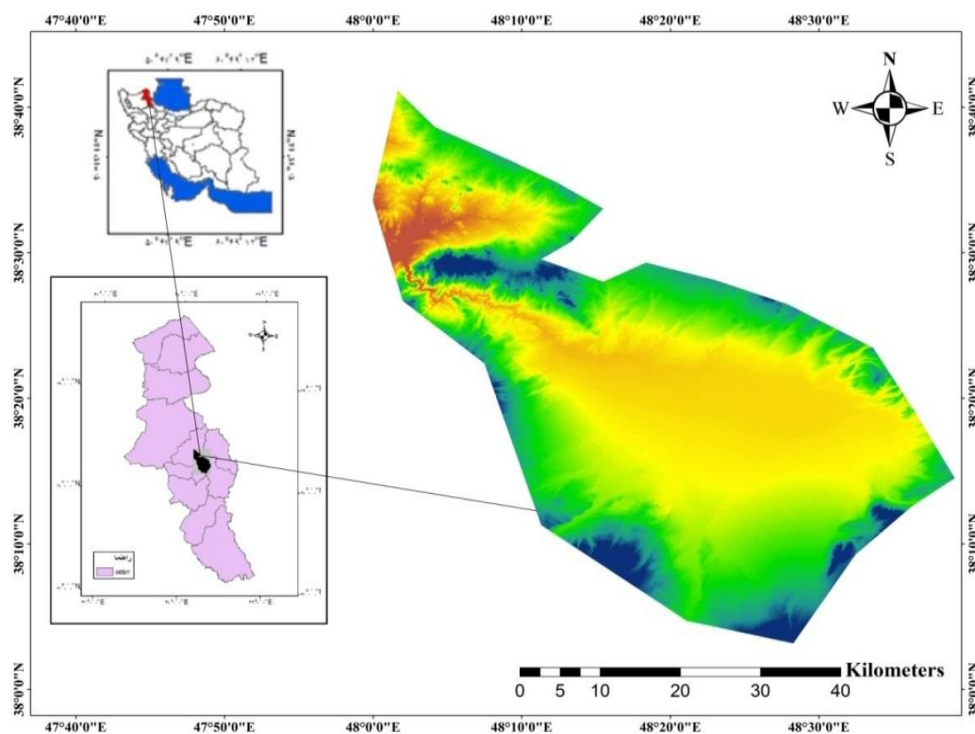
3. Gambulati et al

4.howang

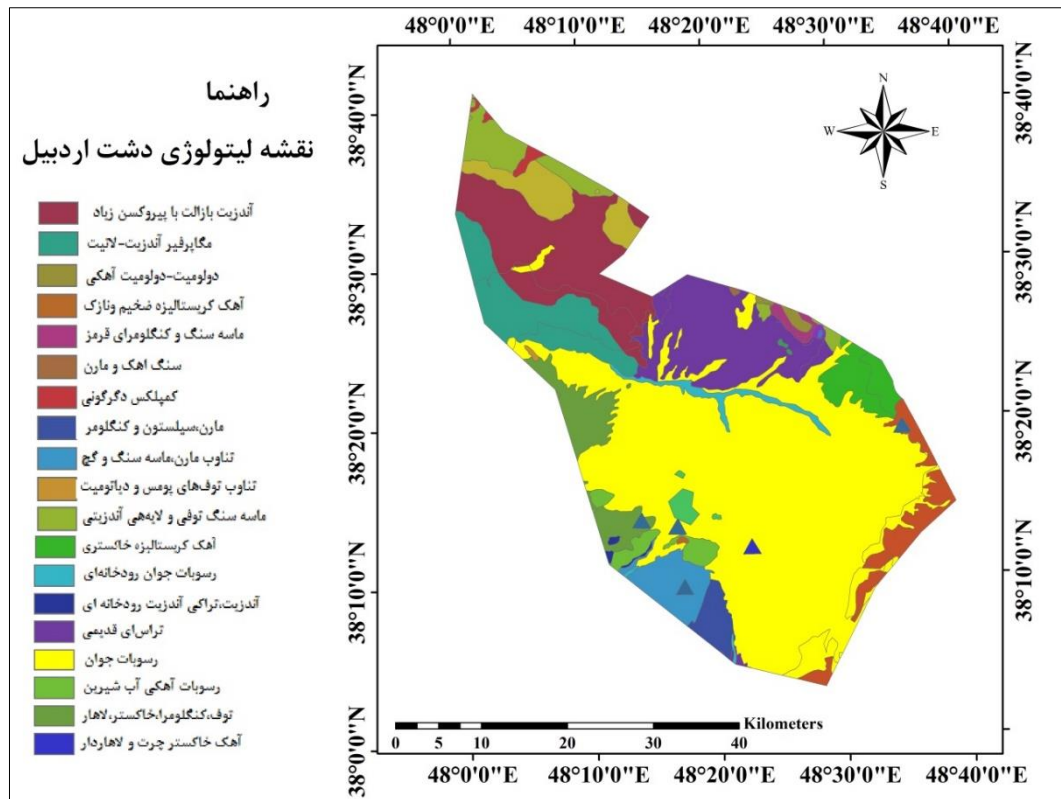
پرداختند بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی متری می‌باشد و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. با توجه به منابع بررسی شده محققان مختلف روش تداخل سنجی راداری، برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین روش متداولی می‌باشد. 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. تداخل سنجی راداری تفاضلی جابجایی سطح زمین را با دقت ارتفاعی سانتی متر و رزولیشن مکانی چند ده متر در منطقه‌ای به وسعت ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع اندازه‌گیری می‌کند. طبق بررسی منابع منتشر شده، تا کنون در دشت اردبیل با این روش و داده‌های ورودی، پژوهشی ارایه نشده است لذا جهت برآورد دقیق‌تر میزان فرونشست و تاثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان آن با روش تداخل سنجی راداری لزوم و خلاء انجام تحقیق با این روش کاملاً احساس می‌شود.

محدوده مورد مطالعه

دشت اردبیل در شمال غرب ایران در قسمت شرقی فلات آذربایجان و از نظر تقسیمات کشوری در مرکز استان اردبیل واقع شده است. در بررسی زمین‌شناسی، دشت اردبیل با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول خاوری و ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی قرار دارد. زمین‌های حاشیه دشت از اطراف به سمت دشت شیب دارند. ارتفاع متوسط اراضی کشاورزی حدود ۱۳۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. وسعت آن حدود ۸۲۰ کیلومتر مربع است. وجئی از حوضه آبخیز رودخانه قره‌سو به شمار می‌رود. دشت اردبیل متشکل از ۸۸ واحد روستایی ده واحد دهستان و ۲ واحد شهری اردبیل و آبی بیگلو است. شهر اردبیل مرکز استان اردبیل در غرب این دشت واقع شده است. در محدوده دشت اردبیل تعداد ۲۲۴۳ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق، ۲۰ دهنه چشمه و ۱۸ رشته قنات وجود دارد که به مصارف کشاورزی اختصاص دارند. رستم-زاده و همکاران، ۱۳۹۴:۳)



شکل ۱: نقشه موقعیت دشت اردبیل در ایران و استان اردبیل



شکل ۲: نقشه لیتولوژی دشت اردبیل

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود قدیمی‌ترین سازندهای شناخته شده در دشت اردبیل دولومیت و دولومیت آهکی متعلق به ژوراسیک است. رخساره‌های کرتاسه، ماسه سنگ و کنگلومرای قرمز می‌باشد. رخساره‌های دوران سوم شامل ماسه سنگ‌های توفی و توفی برشی با میان لایه‌های گدازه آندزیتی، آهک کریستالیزه، آندزیت بازالت با پیروکسن زیاد مربوط به پالئوژن می‌باشد. آبرفت‌های کواترن که شامل تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان دشت بیشترین سهم را در دشت اردبیل و بخش مرکزی آن که بیش‌ترین میزان تمرکز چاهها و قنات‌ها را دارد، از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است که در مرکز و قسمت شرقی دشت بیشترین میزان فرورنشست دیده می‌شود و در سایر بخش‌ها به واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرورنشست بسیار کمتر از سایر بخش‌ها است.

روش تحقیق

در راستای انجام این پژوهش از داده و تصاویر ماهواره ای و نرم افزارهای متعددی استفاده شده است که مشتمل بر موارد زیر خواهد بود:

تصاویر ماهواره ای راداری: در این پژوهش از تصاویر سنتینل ۱ که در محدوده باند C امواج مایکروبو 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 فرورنشست، روش تداخل سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر و یا غیر مکرر می‌باشد. از اساسی‌ترین مراحل در پردازش تداخل سنجی 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. مشخصات تصاویر راداری در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات تصاویر مورد استفاده

Year	Sensor name	Sub-image	Original image	Number
2016	Sentinel1	S1A_OPER_AUX_20151101	S1A_IW_SLC__1SDV_160330	1
2020	Sentinel1	S1A_OPER_AUX_20200127	S1A_IW_SLC__1SDV_200618	2

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 تداخل سنجی راداری تفاوت فاز دو تصویر از یک منطقه زمانی و خط مبنای مشخص تعیین می‌گردد (دهقانی بیدگلی و همکاران، ۱۳۹۹، ۱۷۸). روش تداخل سنجی 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 (چاترجی^۱ و همکاران، ۲۰۰۶، ۱۷۹). این روش را برای اولین بار توسط گولدشتاین^۲ و زبکر^۳ 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 آشکار سازی می‌کند. اصول بنیادین نحوه اندازه‌گیری تغییرات سطحی پوسته زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، P معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر شده است. سنجنده تصویر نخست (تصویر اصلی) T₀ ثبت و مقدار فاز را (Φ_m) 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) در زمان t و با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز (Φ_m) را برای آن اندازه‌گیری می‌کند. روش تداخل سنجی تفاضلی، تفاضل فاز Φ_S و Φ_m را در فرم تداخل نگار فازی نمایش می‌دهد (ΔΦ_{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.

$$(1) \quad \Delta\Phi_{int} = 4\pi \frac{SP-MP}{\lambda}$$

که در آن SP فاز تصویر اول، MP فاز تصویر دوم، عدد پی با مقدار ثابت ۳/۱۴ 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

¹. chatergi et al

^۲. Goldstein

³. zebker

نشست در فاصله زمانی دو تصویر (Dt) تابع اختلاف فاز دو تصویر ($\Delta\phi_{int}$) به همراه فاز ناشی از توپوگرافی (ϕ_{Top}) و فاز ناشی از اتمسفر خواهد بود (دینگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۴، ۱۱۵۴).

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

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 تاثیر گذار است (حبیب زاده و علی المدرسی، 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 تاثیر گذار 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 اردبیل 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 فیلتر گذاری 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 را تحت تاثیر قرار می‌دهد (حبیب زاده و علی المدرسی، ۱۳۹۲، ۶۴).

مدل رقومی ارتفاعی: SRTM 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. برای حذف اثر توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر مورد استفاده قرار گرفته است. خطاهای مداری نیز با برآزش یک رویه به مناطقی که فاقد جابه‌جایی هستند مدل سازی شد و از اینترفروگرام مورد نظر کم گردید. خطای اتمسفر را می‌توان به کمک اطلاعات جوی و مدل اتمسفری تعدیل نمود (ماسونت و فیگل، ۱۹۹۸، ۴۶۰).

تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال: تصویر ماهواره‌ای اپتیکال در این تحقیق به منظور استخراج نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ استفاده شد مشخصات تصاویر لندست در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی از نرم‌افزار ENVI5.3 و به منظور استخراج نقشه‌های مربوطه از نرم‌افزار ARCGIS10.5 استفاده شد. برای طبقه‌بندی کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا در نرم‌افزار ecognition developer64 استفاده شد. همچنین به منظور به دست آوردن صحت طبقه‌بندی Google Earth استفاده شد.

جدول ۲: اطلاعات تصاویر سنجنده لندست ۸

SCENE-CENTER-TIME	SUN-AZIMUTH	ROW	PATH	Sansor name	Year
07:26:27	145.50248397	34	167	Landsat 8	2020

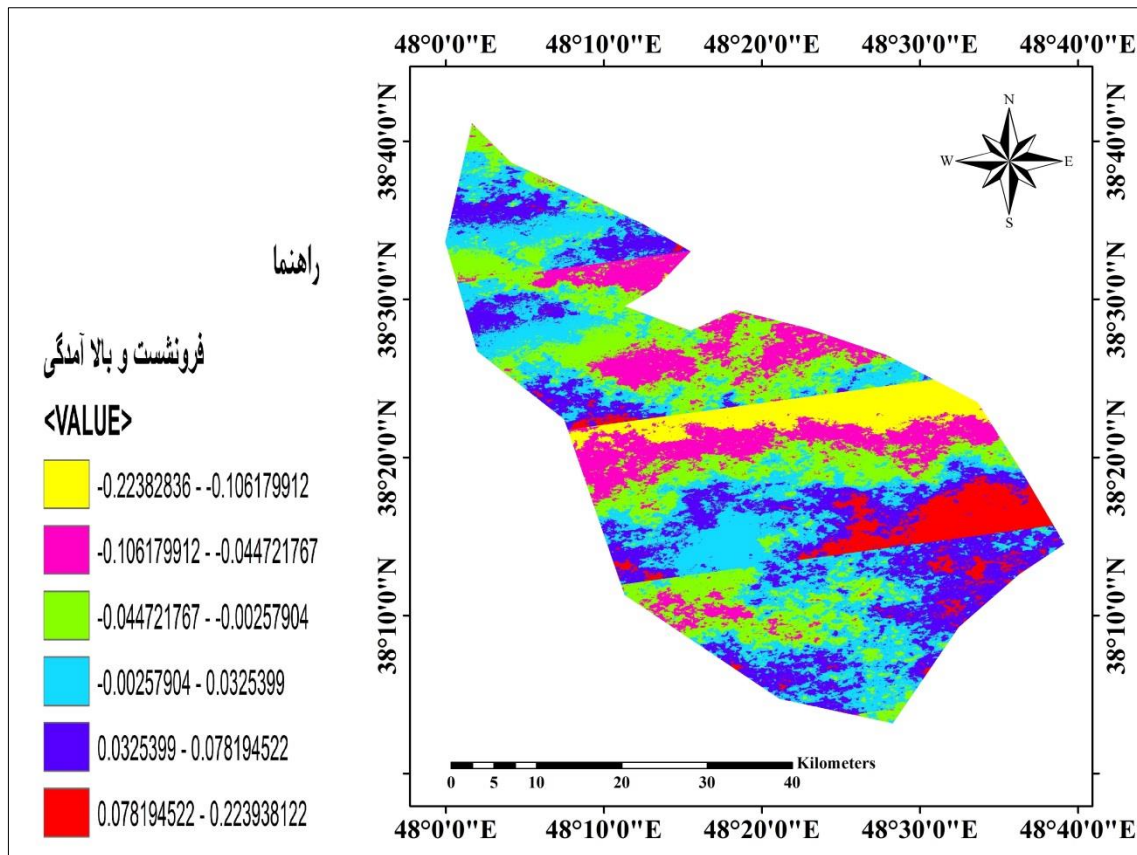
در روش طبقه‌بندی شیء‌گرا، اطلاعات طیفی با اطلاعات مکانی ادغام گردیده و پیکسل‌ها براساس شکل، بافت و تن خاکستری در سطح تصویر با مقیاس مشخص، قطعه‌بندی شده و طبقه‌بندی تصویر براساس این قطعه‌ها انجام می‌شود. در قطعه‌بندی پیکسل‌ها توسط الگوریتم‌های مختلف، با نسبت‌های مختلف طیفی و شکلی طبقه‌بندی و براساس ویژگی‌های طیفی و فضایی در قالب اشیا گوناگون دسته‌بندی شده‌اند. طی این فرآیند شیء‌های تصویری متناسب با همگن بودن یا ناهمگن بودن براساس پارامترهای مقیاس، رنگ، شکل، ضریب نرمی و شکل فشردگی ایجاد شد (فیضی‌زاده و هیلالی، ۲۰۱۰: ۷۶). با آزمون و خطا بهترین اندازه که نشان‌دهنده اشیا با ابعاد مختلف می‌باشند تعیین شد. در این پژوهش تصویر طبقه‌بندی شده دارای مقیاس ۴۵، شکل ۰/۵، ضریب فشردگی ۰/۵ انجام گردید. بعد از مشخص کردن تعداد و کلاس‌های موردنظر در طبقه‌بندی تعیین شیء‌های نمونه‌های آموزشی انجام و در نرم‌افزار بر سطح تصویر اعمال گردید. سپس طبقه‌بندی با استفاده از نزدیک‌ترین همسایه و روش درخت تصمیم‌گیری صورت گرفت. لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از صحت و درستی آن است. دقت طبقه‌بندی در سال ۲۰۲۰ با صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۶ است.

داده‌های چاه‌های پیزومتری:

در مطالعه مربوط به علل فرونشست زمین، بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی دارد. به همین دلیل اطلاعات مربوط به تغییرات سطح آب زیرزمینی در طی سال ۶۶ تا ۹۹ که از چاه پیزومتر واقع در دشت اردبیل برداشته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور انتخاب بهترین مدل درون‌یابی از بین مدل‌های مختلف، تمامی مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند و تنها مدل‌هایی انتخاب شدند که دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها بودند. به منظور پایش سطح آب‌های زیرزمینی نقشه سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برای هر دو سال (۶۶ و ۹۹) با روش مدل‌های کربجینگ که نتایج بیانگر دقت بالای این روش است مورد استفاده قرار گرفت.

بحث و یافته‌ها

در این پژوهش با روش تداخل سنجی راداری میزان و دامنه فرونشست را تبیین کردیم. به منظور تولید نقشه‌های معرف الگوی فضایی میزان و دامنه فرونشست در دو بازه زمانی متفاوت به همراه جدول رقومی زمین SRTM جهت عملیات تداخل سنجی استفاده شد. نقشه خروجی حاصل از مقادیر مثبت و به رنگ قرمز و آبی جابه‌جایی مربوط به حرکت زمین به سمت دید راداری (بالا آمدگی) را با مقادیر منفی به رنگ زرد و بنفش بیانگر دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری (فرونشست) است. نتایج حاصله در شکل شماره ۳ نمایش داده شده است. (اصغری و همکاران، ۱۴۰۰: ۸). براساس نقشه تهیه شده، محدوده مطالعاتی در طی ۶ سال اخیر از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ میزان فرونشست ۲۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد که با توجه به نقشه مزبور بیشترین میزان فرونشست در مرکز و شرق دشت و کم‌ترین میزان در جنوب شرقی دشت بوده است.

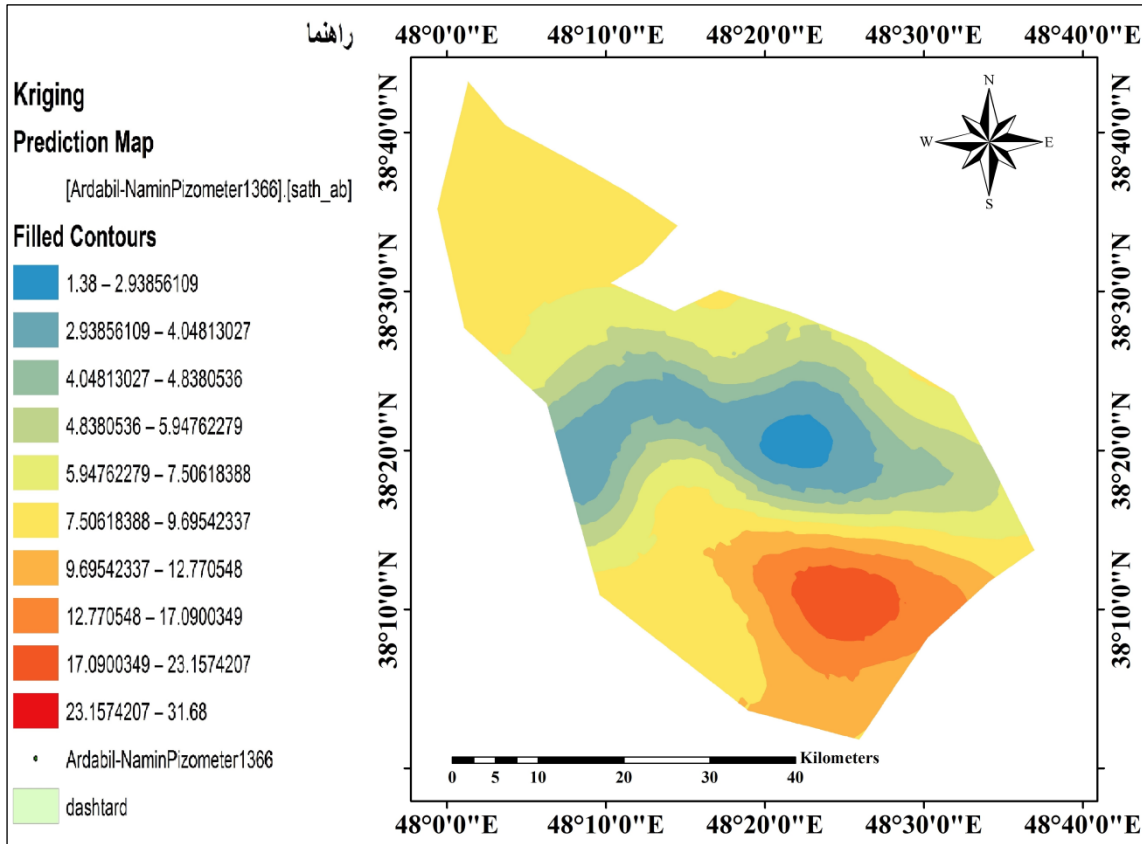


شکل ۳: نقشه فرونشست و بالا آمدگی دشت اردبیل

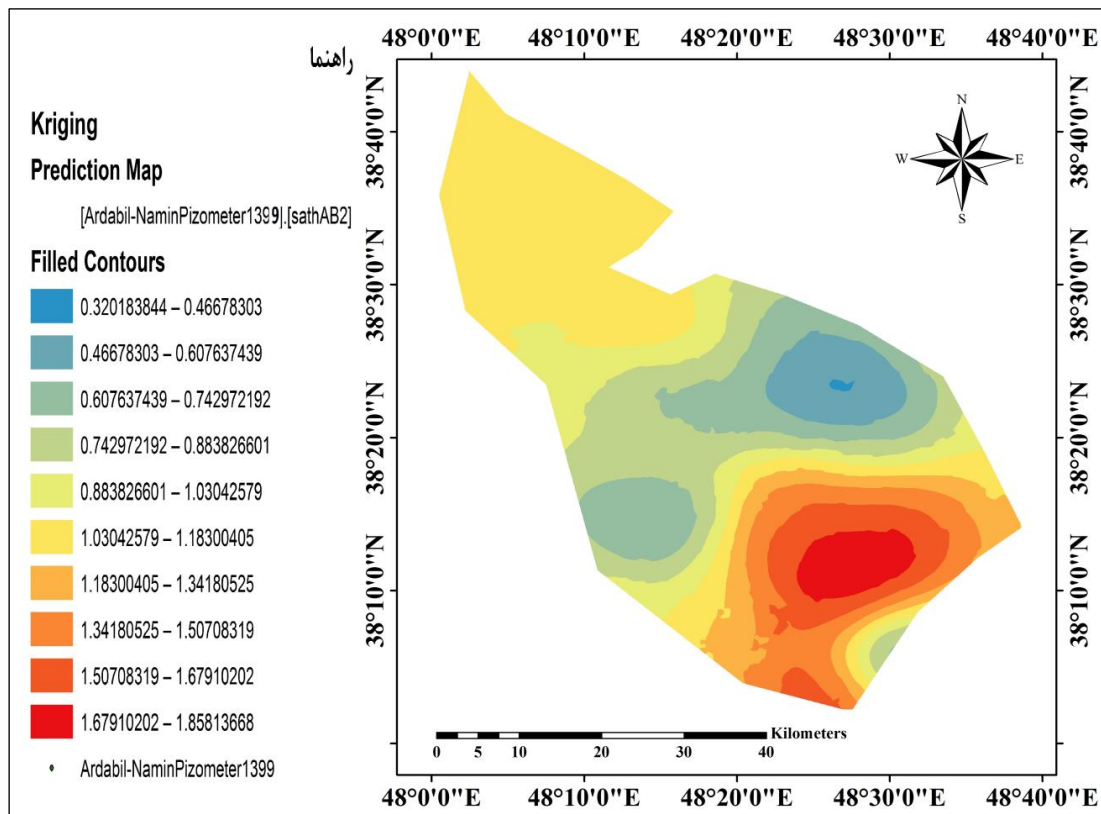
تحلیل رابطه فرونشست و سطح آب‌های زیرزمینی

به منظور انتخاب بهترین مدل درونیابی از بین مدل‌های مختلف، تمامی مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند و مدلی که دارای بیشترین دقت بود انتخاب گردید. به منظور پایش سطح تراز آب‌های زیرزمینی دشت اردبیل طی دو بازه زمانی مشخص شده از روش کریجینگ که طبق جدول ۲ دارای بیشترین دقت بود انتخاب شد. در این پژوهش نرخ و دامنه فرونشست استخراج شده براساس روش تداخل سنجی راداری تفاضلی از طریق اطلاعات چاههای پیزومتری مورد اعتبار سنجی قرار گرفته است. (اصغری و همکاران، ۹۰:۱۴۰۰) برای بررسی سطح آب‌های زیرزمینی ملاک عمل در این پژوهش داده‌های اخذ شده از مدیریت منابع آب شهرستان اردبیل بوده است. پس از بررسی آمار و انتخاب داده‌هایی که برای تمام چاههای پیزومتری موجود در محدوده دشت اردبیل برای سال‌های آماری ۶۶ تا ۹۹ و تغییرات سطح ایستایی ۳۹ چاه پیزومتری از ۵۴ چاه پیزومتری موجود انتخاب شد. نتایج بررسی اطلاعات ۳۹ حلقه چاه پیزومتری موجود در دشت اردبیل در بازه زمانی ۳۳ ساله، میانگین افت آب زیرزمینی حدود ۹٫۵ متر را نشان می‌دهد. بیش‌ترین میزان فرونشست زمین در مجاورت چاههای پیزومتری مشاهده می‌گردد.

شکل شماره ۴ و ۵ نقشه‌های درونیابی شده را برای دشت اردبیل با استفاده از مدل درونیابی کریجینگ برا دو دوره آماری (سال ۱۳۶۶ و ۱۳۹۹) را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نقشه درون‌یابی به روش کریجینگ سال آبی ۱۳۶۶



شکل ۵: نقشه درون‌یابی به روش کریجینگ سال آبی ۱۳۹۹

در جدول شماره ۳ مدل درون‌یابی به همراه میانگین استاندارد شده، ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی، میانگین خطای استاندارد و ریشه میانگین مربعات خطاهای پیش‌بینی استاندارد آورده شده است.

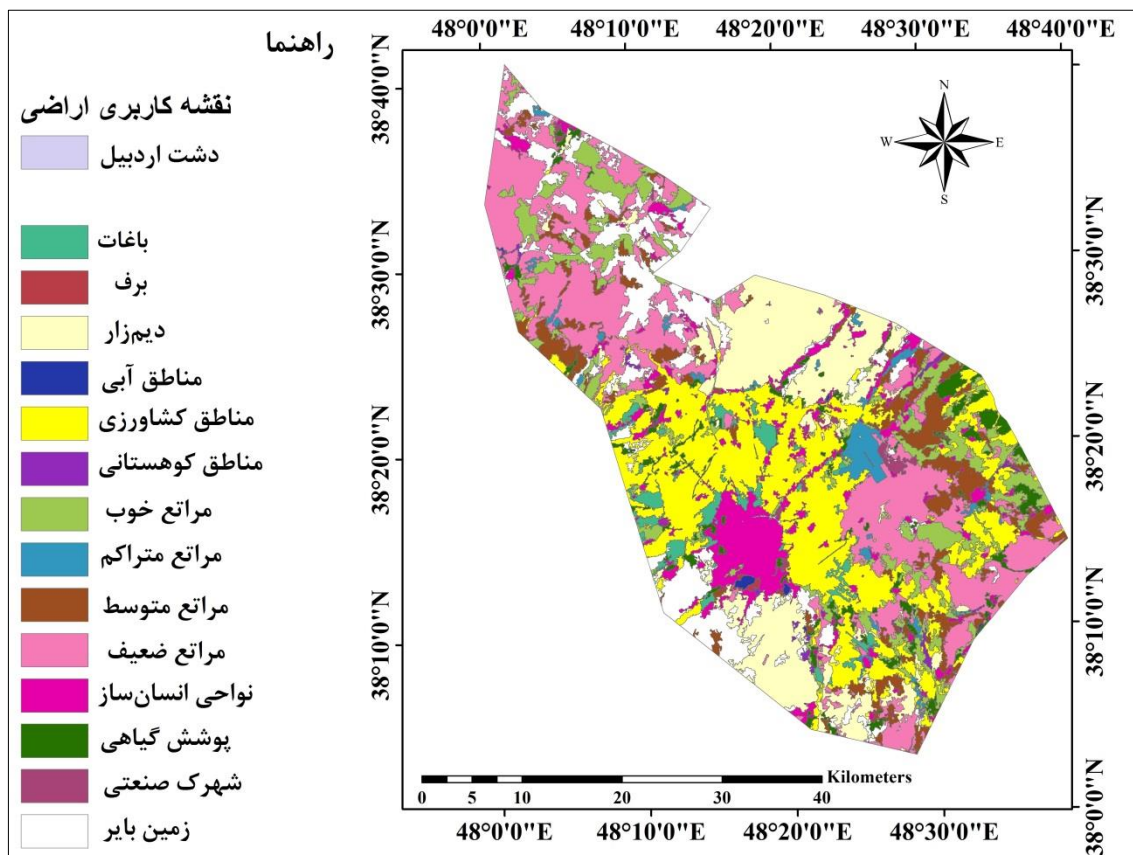
جدول ۳: مشخصات و ویژگی مدل درون‌یابی کریجینگ

RMSS	ASE	RMS	MS	سال آبی	مدل به کار رفته برای درون‌یابی
0.9955	2.226	2.217	0.000429	۱۳۶۶	KIRIGING
0.9973	2.267	2.251	0.000441	۱۳۹۹	

کاهش آبدی چاهها، چشمه‌ها و قنات‌ها و تغییر محل و کف‌شکنی چاه‌ها و در نتیجه تحمیل هزینه‌ای گزاف در این خصوص به صاحبان چاهها، افت کیفی منابع آب و شور شدن تدریجی، ایجاد محدودیت در مصارف کشاورزی، صنعت و شرب، نشست زمین و کاهش ظرفیت حجم مخزن طبیعی از تبعات افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل است. با استفاده از اطلاعات به دست آمده می‌توان گفت که قسمت شرقی و مرکزی دشت اردبیل بیش‌ترین تغییرات را به لحاظ افت سطح آب زیرزمینی داشته‌اند که به علت مساعد بودن شرایط کشاورزی و بالا بودن سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا و تراکم چاه‌های عمیق حفر شده، برداشت از آب زیرزمینی فراوان بوده و به همین دلیل میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی بالا می‌باشد.

تحلیل رابطه فرونشست و کاربری اراضی

نتایج حاصل از انطباق نقشه کاربری اراضی و نقشه فرونشست در جدول شماره ۴ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان فرونشست به ترتیب مربوط به نوع کاربری مراتع خوب و مناطق کشاورزی با ۰/۲۲ میلی‌متر، مراتع متوسط ۰/۲۱ میلی‌متر و انسان‌ساز ۰/۲۰ میلی‌متر می‌باشد. به طوریکه مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونتگاهی نیز به دلیل ساخت وسازها و وجود ابنیه‌های بزرگ و سنگین مستعد وقوع فرونشست هستند در شکل ۶ نقشه طبقات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به اینکه عمده محصولات کشاورزی زیر کشت دشت اردبیل گندم، جو و سیب زمینی می‌باشد که نیاز آبی بالایی برای رشد دارند و کاهش چشمگیر بارندگی و کمبود منابع آب‌های سطحی در سالهای اخیر لزوم استفاده از منابع آب‌های زیرزمین را بالا برده و همین مساله سبب افت بیش‌تر منابع آب زیرزمینی در منطقه شده است. نتایج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه و پراکنش فرونشست در این پژوهش نشان می‌دهد که به دلیل رشد سریع جمعیت و توسعه صنعت و کشاورزی، تقاضای آب نیز بسیار زیاد می‌باشد. با این حال بهره‌برداری بیش از حد آب‌های زیرزمینی به دلیل کمبود منابع آب‌های سطحی آشکار است که منجر به فرونشست زمین می‌شود و باعث آسیب به جاده‌ها، پل‌ها، لوله‌های آب زیرزمینی و سایر تاسیسات شهری می‌شود. همچنین بررسی نقشه فرونشست و نقشه کاربری زمین نشان می‌دهد که پراکنش فرونشست زمین همپوشانی بالایی با مناطق مسکونی، زمین‌های کشاورزی دشت اردبیل دارد که باعث افزایش تقاضای آب و نیز به علت عدم تامین توسط آب‌های سطحی، دشت اردبیل رادر آینده بیشتر مستعد برای فرونشست می‌کند.



شکل ۶: نقشه کاربری دشت اردبیل سال ۲۰۲۰

جدول ۴: مشخصات آماری فرونشست کاربری‌ها

کاربری	فرونشست	بالآمدگی	میانگین	انحراف معیار
کشاورزی	-۰/۲۲۲۲	۰/۲۱۸۷	-۰/۰۹۵	۰/۰۶۲
مراتع خوب	-۰/۲۲۰۹	۰/۲۲۳۹	-۰/۰۹۰	۰/۰۶۵
مراتع متوسط	-۰/۲۱۸۳	۰/۲۰۳۷	-۰/۰۷۰	۰/۰۶۹
مناطق انسان ساز	-۰/۲۰۶۶	۰/۲۰۰۴	-۰/۰۳۰	۰/۰۵۷

بررسی‌های زمینی موید وجود تعداد کثیری شواهد و رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از افت سطح آبهای زیرزمینی و نشست زمین در دشت اردبیل می‌باشد. از جمله می‌توان به درز و ترک‌های روی دیوار منازل و ترک و نشست جاده‌ها و خیابان‌های شهر اردبیل اشاره کرد. ترک‌هایی که در روی زمین‌های کشاورزی شکل گرفته سبب توسعه فرسایش شده است. به گونه‌ای که این درز و ترک‌ها باعث کاهش کیفیت زمین‌های کشاورزی و از بین رفتن آن‌ها و آسیب به سیستم آبیاری شده است.



شکل ۷: ترک‌های شکل گرفته ناشی از فرونشست در دشت اردبیل

نتیجه گیری

بررسی وضعیت فرونشست طبق شکل شماره ۳ در ۵ سال اخیر از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که میزان فرونشست در هر سال ۴ میلی‌متر و در طی ۵ سال ۲۲ میلی‌متر می‌باشد. به منظور سازگاری نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری با دیگر داده‌های تکمیلی از نقشه کاربری اراضی و همچنین چاه‌های پیژومتری در سطح دشت اردبیل استفاده شد. با بررسی و تحلیل نقشه کاربری اراضی و فرونشست اردبیل و مطالعات میدانی موید رخداد بیشینه عرصه فرونشست به ترتیب در مناطق کشاورزی و مراتع خوب یا ۰/۲۲ میلی‌متر، مراتع متوسط ۰/۲۱ میلی‌متر و انسان‌ساز ۰/۲۰ میلی‌متر می‌باشد که شرایط زیستی ناامن و پرمخاطره‌ای را برای ساکنین دشت اردبیل فراهم می‌کند و به صورت غیر مستقیم باعث تنزل کیفیت شرایط محیطی و زندگی ساکنان دشت اردبیل شده است. نشست زمین پدیده‌ای فراگیر در سطح جهان است که عمدتاً در اثر بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و شدت یافتن افت سطح آن، نمود کمی و کیفی قابل توجهی در چند سال اخیر داشته است. جهت بررسی وضعیت و تاثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی و تاثیر آن بر میزان فرونشست دشت اردبیل از اطلاعات ۳۹ چاه پیژومتری (اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای اردبیل) طی سال‌های ۶۶ تا ۹۹ که نتایج تحلیل از کاهش ۴۸ درصدی سطح ایستابی را در سال ۹۹ نسبت به سال ۶۶ نشان می‌دهد. بیشینه سطح ایستابی چاه‌های پیژومتری از ۴۵ متر به بیش از ۷۰ متر در سال ۹۹ رسیده است که حاکی از وخامت اوضاع آبخوان دشت اردبیل است که نیازمند شناسایی عوامل تاثیرگذار، اقدامات کاهش‌دهنده و اقدامات تطبیق‌دهنده از جمله محدود یا ممنوعیت استخراج آب‌های زیرزمینی در مناطق در معرض فرونشست و اجرای مقررات سخت‌گیرانه جهت استخراج کنندگان منابع آب زیرزمینی در مناطق در معرض فرونشست و پایش پیوسته شاخص‌های فرونشست است. به طور کلی ایجاد چنین شرایط و وضعیتی در رویداد پدیده فرونشست و پیامدهای مخاطره‌آمیز و فاجعه‌بار آن برای کشور، قبل از هر چیزی عزم ملی برای پذیرش و مقابله با این پدیده به عنوان یک معضل و مخاطره منتهی به یک فاجعه را طلب می‌نماید. موضوعی که درک آن از یک سو مستلزم افزایش مطالعات برای شناسایی کامل نواحی مستعد به صورت یک طرح ملی است. از طرفی لازم است زیرساخت لازم برای آگاهی رسانی و همگانی بودن اطلاع از نتایج و معضلات ناشی از این مسئله برای مردم در جهت مشارکت آنها در جهت جلب مشارکت مردم و مسئولان و تعدیل زیرساخت‌های ایجابی فراهم گردد. و نهایتاً برای پیشگیری و کاهش و تعدیل حجم دامنه فاجعه محتمل از این مخاطره، دستگاه‌های زیربسط تمامی مقررات و استانداردهای لازم ساخت و ساز را برای نواحی در معرض فرونشست، مورد بازنگری قرار داده و اساس را بر شرایط نوین تعریف نماید. (اصغری و همکاران، ۱۳۰۰:۱۳)

در تحقیقی مشابه شفيعی و همکاران ۱۳۹۹، اقدام به بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری پرداختند. نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که با افت حدود ۲۲ متر سطح آب در بازه زمانی ۱۲ ساله،

نشست زمین حدود ۱۶ سانتی‌متر و برای هر سال به طور میانگین ۴ سانتی متر بوده است و با افت سطح آب زیرزمینی به طور مداوم فرونشست در منطقه مورد مطالعه نیز در حال افزایش است. در پژوهشی دیگر محمدزاده و همکاران (۱۴۰۰)، با عنوان بررسی و پایش فرونشست دشت شهریار و ارتباط آن با کاربری اراضی و افت سطح آب‌های زیرزمینی به این نتیجه رسیده‌اند که با هم نهادسازی نقشه فرونشست با لایه کاربری اراضی بیشترین فرونشست در کاربری باغات با ۱۱/۵۴ سانتی‌متر و مرتع ۱۱/۳۴ سانتی‌متر مشاهده شد و همچنین رابطه بین فرونشست و تغییرات مقدار سطح آب‌های زیرزمینی در طی ۶ سال شاهد افت ۷ متری آب‌های زیرزمینی در دشت شهریار بوده‌اند.

منابع

- اصغری سراسکانرود، صیاد، قلعه، احسان، عبادی، الهامه، ۱۴۰۰، بررسی تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با سطح آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی، دشت اردبیل)، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال دوازدهم شماره اول، صص ۲۱-۱۰.
- اصغری سراسکانرود، صیاد، محمدزاده، مریم، ۱۴۰۰، برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت شهریار)، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دهم، شماره ۱، صص ۵۴-۴۰.
- اصغری سراسکانرود، صیاد، محمدزاده شیشه گران، مریم، قلعه، احسان، ۱۳۹۹، پایش میزان فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، دومین کنفرانس مدیریت شهری، و شهرسازی و معماری با رویکرد اقتصاد و عمران شهری، تبریز، صص ۱۲-۱.
- اصغری سراسکانرود، صیاد، محمدنژاد آروق، وحید، امامی، هادی، ۱۳۹۸، بررسی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش پیکسل پایه و شیء‌گرا و تحلیل اثرات تغییر کاربریها بر فرسایش خاک (مطالعه موردی: شهرستان مراغه)، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره یکم، صص ۱۷۸-۱۶۰.
- -ابراهیمی، عطربین، قاسمی، افشان و گنجائیان، حمید، ۱۳۹۹، پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، فصلنامه جغرافیا و روابط انسانی، دوره ۲، شماره ۴، صص ۱۳-۱.
- آمیخ پی، معصومه، عربی، سیاوش، ۱۳۸۸، بررسی فرونشست یزد با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و ترازبایی دقیق، طرح پژوهشی سازمان نقشه برداری کشور، صص ۴۶-۱.
- جوادی، سید محمدرضا، ۱۴۰۰، برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان - بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS، رساله دکتری، دانشگاه تبریز، استادراهنما دکتر معصومه رجبی، صص ۱۵۶-۱.
- حسین آبادی، سعید، اکبری، ابراهیم، نقد بیشی، ابراهیم، ۱۳۹۹، ارزیابی و شبیه سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از طبقه بندی شیء‌گرا و مدل زنجیره مارکوف (مورد مطالعه: شهر بیرجند و پیرامون آن)، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و سوم، صص ۱۸۸-۱۶۹.
- حاجب، زهرا، موسوی، زهرا، معصومی، زهره، رضایی، ابوالفضل، ۱۳۹۷، بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری، مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صص ۳۵۵-۳۵۲.
- زارعی، کیوان، رسول زاده، علی، صدیقی، مرتضی، احمدزاده، غلامرضا، رضانی مقدم، جواد، ۱۳۹۹، تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS

- (مطالعه موردی: دشت سلماس)، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال یازدهم شماره چهل و یکم، صص ۱۵-۱.
- شاه کرمی، نازنین، قاسمی، شبنم، ۱۳۹۹، مناطق فرونشست در اثر اضافه برداشت آب زیرزمینی در دشت اراک، چهارمین مجمع توسعه فناوری و کنفرانس بین المللی یافته های نوین عمران معماری و صنعت ساختمان ایران، صص ۱۳-۱.
 - شفیعی، نجمه، گلی مختاری، لیلا، امیراحمدی، ابوالقاسم، زندی، رحمان، ۱۳۹۹، بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، صص ۱۱۱-۹۳.
 - شریفی کیا، محمد، ۱۳۹۱، تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنج راداری در دشت نوق- بهرامان، مجله برنامه ریزی و آمایش فضا دوره شانزده، شماره سوم، صص ۷۳-۵۵.
 - شمشکی، امیر، بلورچی، محمدجواد، انصاری، فرهاد، ۱۳۸۴، بررسی فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار، طرح پژوهشی سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره گزارش ۸۴-۰۶/۲۰-Engeo صص ۸۴-۱.
 - شمشکی، امیر، بلوری محمدجواد، انتظام سلطانی ایمان، ۱۳۹۴، فرونشست زمین در شهر تهران و عوامل موثر در شکل گیری آن، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، صص ۱۲-۱.
 - عابدینی، موسی (۱۳۹۶) مبانی فرونشست زمین (مخاطرات هیدروژئومورفولوژی و مدیریت محیط)، انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی، چاپ یکم، صص ۲۳۰-۱.
 - عابدینی، موسی (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، موسی، خان بیگی، علی و موس پور، توحید و حسین دانشور (۱۳۹۵) تعیین مناطق احتمالی فرونشست دشت روانسر- سنجایی با استفاده از *AHP* و *GIS*، دومین کنگره بین المللی علوم زمین و توسعه شهری، شرکت کیان تایر و جهاد دانشگاهی آذر بایجان شرقی
 - عابدینی، موسی (۱۳۸۸) بررسی مسائل هیدروژئومورفولوژی و فرونشست ناشی از افت سطح آبهای زیرزمینی در دشت اردبیل و راهکارها، دانشگاه محقق اردبیلی. مجموعه مقالات.
 - فتح الله، نرگس، آخوندزاده، مهدی، بحرودی، عباس، ۱۳۹۷، بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۷، شماره ۱۰۵، صص ۳۴-۲۴.
 - رستم زاده، هاشم، اسدی، اسماعیل، جعفرزاده، جعفر، ۱۳۹۴، بررسی سطح ایستایی آبهای زیرزمینی دشت اردبیل، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال دوم شماره یک، صص ۴۲-۳۱.
 - کیانی، فاطمه، عابدینی، موسی و غلامرضا احمد زاده (۱۳۹۶) بررسی پتانسیل فرونشست شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط *GIS*. تهران، سومین کنگره بین المللی علوم زمین و توسعه شهری و اولین کنفرانس هنر، معماری و مدیریت شهری. بین المللی.
- Abdulaziz, Aljammaz, Sultan, Mohamed, Izadi, Moein, Abotalib Abotalib Z, 2021, *Land Subsidence Induced by Rapid Urbanization in Arid Environment 5455s: A Remote Sensing-Based Investigation, A Remote Sensing-Based Investigation*, p1-24
 - Chaofan, Zhou, Huili, Gong, Beibei, Chen, Mingliang, Gao, Qun, Cao, Jin, Cao, Li Duan, Junjie, Zuo, Min, Shi, 2019, *Land Subsidence Response to Different Land Use*

- *Types and Water Resource Utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China, Remote Sens, pp1-22*
- *Qui T, Nguyen,.(2016), Sustainable Development of Civil, Urban and Transportation Engineering Conference The Main Causes of Land Subsidence in Ho Chi Minh City, Procedia Engineering 142 .pp 33*
- *Stephen A., Nelson,(2016), Surface Subsidence and Collapse, Natural Disasters, on 03.PP1-10*
- *Gambolati, g-and, Massimillano, F, Teatro. F. 2006, Anthropogenic Land Subsidence, GROUNDWATER. DOI: 10.1002, PP 2444-2457*
- *Guoman Huang, Haitao Fan , Lijun Lu, Wenqing Yu, 2020, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-pp 1-6*
- *Raucooules, D, Colesanti, C, Carnec Carnec, C, 2007, Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence, C.R, Geoscience 339, 289-302*