

## برآورد میزان فرونشست در دشت آذرشهر با استفاده از تداخل‌سنجی راداری و تحلیل پارامترهای موثر آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی

صیاد اصغری سراسکانرود<sup>۱\*</sup> و مریم محمدزاده شیشه‌گران<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

نویسنده مسئول: s.asghari@uma.ac.ir \*

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۵

دریافت: ۱۴۰۰/۱/۱۶

### چکیده

یکی از مخاطراتی که در طی سال‌های اخیر در بسیاری از مناطق رخ داده است، مخاطرات ناشی از فرونشست است. شناسایی مناطق در معرض فرونشست و برآورد نرخ آن نقش مهمی در مدیریت و کنترل این پدیده دارد. در این پژوهش، به منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست در دشت آذرشهر از تصاویر راداری سنتینل ۱ سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ و به منظور پردازش اطلاعات از نرم‌افزار SARSCAPE استفاده شد. طبق نتایج، بیشینه نرخ فرونشست در ۵ سال در دشت آذرشهر، ۶ سانتی‌متر برآورد شده است. رابطه بین فرونشست و تغییرات مقدار سطح آب‌های زیرزمینی نشان داد که در سال ۹۲ سطح آب ۲۶/۵۳ متر بوده است که در طی ۵ سال در سال ۹۷ به ۲۲/۵۰ متر کاهش یافته است که ۴ متر افت سطح آب زیرزمینی در طی ۵ سال را نشان می‌دهد که این افت سطح آب زیرزمینی منجر به فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه شده است. بالاترین میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به ترتیب به کاربری‌های مرتع با مقدار ۶ سانتی‌متر، منطقه ساحلی ۵ سانتی‌متر و کاربری‌های باغات و مسکونی با مقدار ۴ سانتی‌متر در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین کاربری بایر هم با مقدار یکسان تقریباً ۳ سانتی‌متر کمترین مقدار فرونشست را به خود اختصاص داده است.

واژه‌های کلیدی: فرونشست، تداخل‌سنجی رادار، سنتینل ۱، دشت آذرشهر

### پیشگفتار

علل فرونشینی سطح زمین است (کوک و همکاران، ۱۳۷۷). در سال‌های اخیر افزایش روزافزون جمعیت و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی جهت تأمین آب برای مصارف خانگی، کشاورزی و حتی صنعتی در بعضی از نقاط جهان به ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریای کم عمق یا دریاچه‌های تحکیم نیافته انباشته شده‌اند، به نشست و یا فروریزش سطح زمین منجر شده و باعث به وجود آمدن مخاطره فرونشست شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۵). از اوایل دهه ۱۹۹۰، با عملیاتی شدن ماهواره‌های راداری، تداخل‌سنجی راداری نیز به صورت گسترده مورد استفاده متخصصان علوم زمین قرار گرفت. تداخل‌سنجی داده‌های راداری در بین روش‌های متنوع و گوناگون آشکارسازی تغییرات پوسته زمین به عنوان بهترین روش اندازه‌گیری پوسته این تغییرات از حیث هزینه، مقیاس و سرعت مطرح می‌باشد (رائوکولس و همکاران، ۲۰۰۷؛ داوودی‌جم، ۱۳۸۹). اصول این تکنیک برای اولین بار به وسیله گراهام در سال ۱۹۷۴ بیان شد.

فرونشست عبارت است از حرکت قائم یا نشست تدریجی یا فرورفتن ناگهانی سطح زمین، که به علت‌های گوناگونی نظیر انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات پوسته زمین و خروج گدازه‌ها از پوسته جامد و یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری، برداشت آب‌های زیرزمینی و یا نفت رخ می‌دهد. ایران کشوری خشک و نیمه‌خشک با نزولات جوی بسیار اندک است که منبع اصلی تأمین نیازهای کشاورزی، شرب و نیز صنعتی، آب‌های زیرزمینی است و در زمره کشورهای مواجه با بحران کمبود آب قلمداد می‌شود (اسدزاده و همکاران، ۲۰۱۶). پدیده فرونشست که ممکن است به صورت نشست تدریجی یا ناگهانی در سطح زمین ایجاد شود، به طور کلی ناشی از عوامل عمده‌ای همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات و افت سطح سیالات زیرزمینی و همچنین عوامل تکتونیکی می‌باشد (چن و همکاران، ۲۰۱۶). استخراج مایعات به ویژه آب و نفت از مهمترین

۱۹۹۲ - بر جامعه تحمیل کرده است (توماس و همکاران، ۲۰۰۹). در این زمینه مطالعات متعددی در سطح ملی و بین‌المللی صورت پذیرفته است که از آن جمله، می‌توان به این موارد اشاره کرد:

اصغری سراسکانرود و محمدزاده شیشه‌گران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای در دشت شهریار از داده سنتینل ۱ مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نرخ فرورانشست ۱۱ سانتی‌متر را نشان داد. همچنین رابطه بین فرورانشست و تغییرات مقدار سطح آب‌های زیرزمینی نشان داد که در سال ۲۰۱۵ سطح آب ۷۵/۸۵ متر بوده است که در طی ۶ سال در سال ۲۰۲۰ به ۶۸/۵۲ متر کاهش یافته است. که نشان می‌دهد در طی شش سال ۷ متر افت آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. شریفی‌کیا (۲۰۱۱) میزان فرورانشست به دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری در دشت نومق - بهرمان واقع در استان کرمان را با تغییرات تراز آبی مستخرج از چاه‌های پیژومتری مقایسه نموده و پی به ارتباط عددی بین آن‌ها برده است. نرخ و محدوده فرورانشست در دشت رفسنجان با پردازش تصاویر از ماهواره‌های ALOS, ENVISAT, Sentinel S1 در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ محاسبه شده است. پرهیزگار و همکاران (۲۰۱۵)، اقدام به بررسی پیش‌بینی افت سطح آب و ارزیابی فرورانشست زمین در آبخوان دامغان با ترکیب مدل‌های جی ام اس و جی ای پی نمودند. نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که با افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۹۵ سانتی‌متر و ۳۴۳ سانتی‌متر، نشست زمین به ترتیب به میزان ۴/۳۵ و ۴/۳۹ سانتی‌متر خواهد بود. این تحقیق نشان داد که در دشت دامغان سطح آب زیرزمینی به طور مداوم در حال پایین آمدن و مقدار نشست زمین در حال افزایش می‌باشد. لذا پمپاژ از چاه‌های در واقع در نواحی باریسک بالا باید کاهش یابد. ژو و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی پدیده فرورانشست در آبخوان شهر پکن پرداخته‌اند. هدف از این مطالعه برای تعیین کمیت فرورانشست زمین در طول دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان می‌دهد که فرورانشست زمین به طور یکنواخت و به طور مداوم در دوره‌های زمانی ۹۲ میلی‌متری در سال ارزیابی کرده است. متاق و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای در دشت رفسنجان از داده‌های Alos و Sentinel 1A مربوط به سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ در پهنای به وسعت ۱۰۰۰ کیلومترمربع به منظور

بدین صورت که تداخل‌سنجی تفاضلی راداری تغییرات فاز را از دو زوج تصویر راداری که در زمان‌های مختلف و به صورت پیوسته اخذ شده‌اند محاسبه کرده، مبتنی بر آن، تغییرات به وجود آمده در پوسته زمین را به صورت کمی و کیفی آشکار می‌کند. (پاچکو و همکاران، ۲۰۰۶). این فن برای اندازه‌گیری جابجایی‌های حاصل شده از زمین‌لرزه، جابجایی یخچال‌ها و پدیده فرورانشست و روراندگی با موفقیت به کار گرفته شده است. فرورانشست زمین به عنوان پدیده مورفولوژیکی، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین (شریفی‌کیا، ۲۰۱۱). و همچنین نشست تدریجی و یا ناگهانی مواد سطحی همراه است. رخداد این پدیده از هر نوع (تدریجی یا ناگهانی) می‌تواند با دخالت عوامل طبیعی و یا عوامل انسانی همچون تغییرات نوع کاربری زمین همراه باشد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰). مهمترین علت فرورانشست منطقه‌ای سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تراکم سفره‌های آب زیرزمینی در اثر پمپاژ بی‌رویه از منابع است (دهقانی، ۱۳۹۰؛ چانگ و همکاران، ۲۰۰۵). این وضعیت به ویژه در جایی که پمپاژ بی‌رویه از سفره‌های آبدار ماسه‌ای متخلخل که به صورت بین لایه‌ای با لایه‌های آبدار رسی نفوذناپذیر قرار دارد، بسیار حاد بوده، موجب فرورانشست گسترده می‌شود. تغییر در روند و میزان فرورانشست، می‌تواند موجبات وارد آوردن خسارات جدی به تأسیسات و همچنین، ساختمان‌های مستقر بر روی آن‌ها شود که از این‌رو به عنوان یک مخاطره طبیعی تهدید کننده مناطق مسکونی و کشاورزی به شمار آید. امروزه نشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه از لایه‌های آبدار زیرزمینی به عنوان یک مخاطره، جوامع ساکن بر آن را در سطوح بین‌المللی تهدید می‌کند. این پدیده در سطح زمین به صورت جابه‌جایی‌های عمودی نمود دارد که از مقیاس میلی‌متر تا متر و در محدوده‌ای وسیع حادث می‌شود. بر طبق گزارش کارشناسان، نزدیک به ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا در معرض این مخاطره قرار دارند. از جمله این مناطق دره پو(ایتالیا)، مکزیکوسیتی (مکزیک)، لاس وگاس، آنتلپ و سانتاکلارا (ایالات‌متحده)، بانکوک (تایلند) و شانگهای (چین) نام برد. از لحاظ اقتصادی وارده نیز به عنوان مثال می‌توان به خسارت ۵۰ میلیون یورویی وارد به مادرشهر ماریا در اسپانیا اشاره کرد که به تبع آن، هزینه‌های سنگین اجتماعی را در دوره خشکسالی ۱۹۹۵

(دوچشمه گرگیج، ۱۳۹۴). در این پژوهش با از تداخل‌سنجی تفاضلی از تصاویر سنتینل ۱ که در محدوده باند C امواج مایکروویو (۵۶ سانتی‌متر) اخذ تصویر می‌کند. تصویر پایه و تابع تصحیحات هندسی و رادیومتریک تصویر در نرم‌افزار Snap انجام شد و سپس پردازش‌های لازم از طریق افزونه SARSCAPE 5.2 در نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد و تکنیک مورد استفاده در این پژوهش به منظور تعیین میزان فرونشست، روش تداخل‌سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر و یا غیرمکرر می‌باشد. 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 (شکل ۲). در این پژوهش از دو تصویر سنتینل ۱ استفاده شده است و بر مبنای آن محاسبات مربوط به خط مبنای عمودی و دیگر عوامل ذکر شده در انتخاب زوج تصویر انجام شد. مشخصات تصاویر راداری در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین به منظور استخراج نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره لندست ۸ که از سنجنده OLI آن به منظور استخراج نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ استفاده شد مشخصات تصاویر لندست در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی با استفاده از روش Radiance و FLAASH در نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. به منظور استخراج نقشه‌های مربوطه از نرم‌افزار ARCGIS 10.5 استفاده شد. به جهت طبقه‌بندی کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی شی‌گرا در نرم‌افزار eCognition Developer64 استفاده شد. همچنین به منظور به دست آوردن صحت طبقه‌بندی از Google Earth استفاده شد. در روش در طبقه‌بندی شی‌گرا، اطلاعات طیفی با اطلاعات مکانی ادغام گردیده و پیکسل‌ها بر اساس شکل، بافت و تن خاکستری در سطح تصویر با مقیاس مشخص، قطعه‌بندی شده و طبقه‌بندی تصویر بر اساس این قطعه‌ها انجام می‌شود. در قطعه‌بندی پیکسل‌ها توسط الگوریتم‌های مختلف، با نسبت‌های مختلف طیفی و شکلی قطعه‌بندی و بر اساس ویژگی‌های طیفی و فضایی در قالب اشیا گوناگون دسته‌بندی شده‌اند. طی این فرآیند شی‌های تصویری متناسب با همگن بودن یا ناهمگن بودن بر اساس پارامترهای مقیاس، رنگ، شکل،

مطالعه زمین بهره بردند. در این تحقیق آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نرخ فرونشست دشت از ۵ سانتی‌متر در سال به بیش از ۳۰ سانتی‌متر در سال در سال‌های اخیر تغییر یافته است که عمدتاً ناشی از بهره‌برداری شدید از منابع آب زیرزمینی بوده و تا حدودی از رفتار گسل کواترنری منطقه تبعیت می‌کنند. مقصودی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست غرب تهران را ۱۵ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند. با توجه به مصرف بی‌رویه آب زیرزمینی در دشت آذرشهر، این منطقه از استعداد فرونشست زیادی برخوردار است که می‌تواند در آینده‌ای نه چندان دور باعث به وجود آمدن مشکلات جانی، مالی و اقتصادی در سطح کلان را در پی داشته باشد. در همین راستا تحقیق حاضر با هدف بررسی میزان فرونشست دشت آذرشهر با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و تصاویر سنتینل ۱ برای سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ و همچنین بررسی تأثیر ارتباط افت سطح آب‌های زیرزمینی برای اعتبارسنجی فرونشست و همچنین میزان فرونشست در هر کاربری‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. علی‌رغم درگیری دشت آذرشهر با فرونشست زمین، تاکنون در زمینه اندازه‌گیری و محاسبه میزان دقیق آن، گزارشی ارائه نشده است.

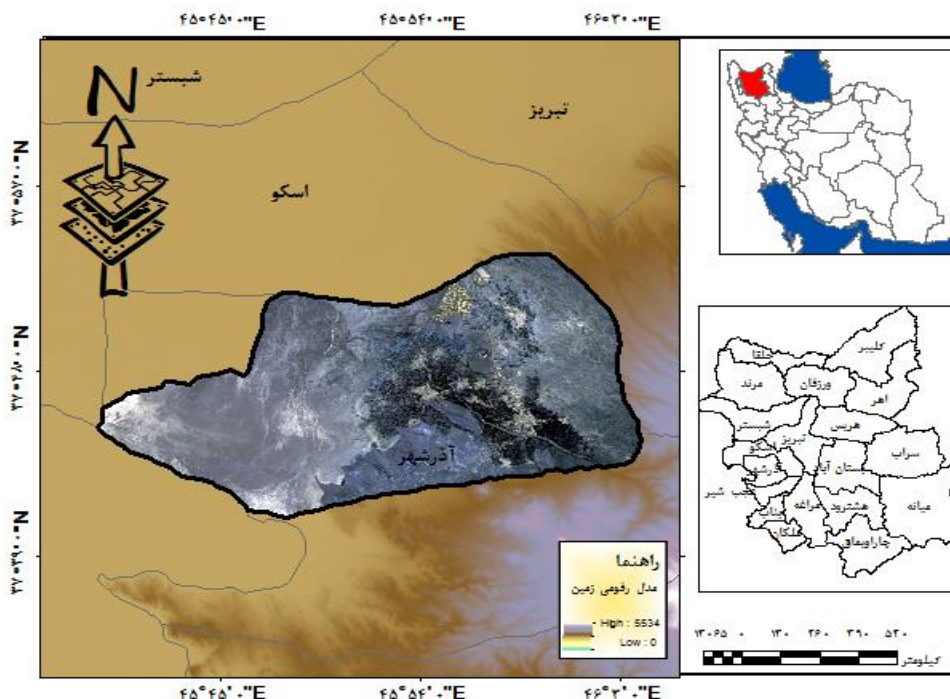
## مواد و روش

### منطقه مورد مطالعه

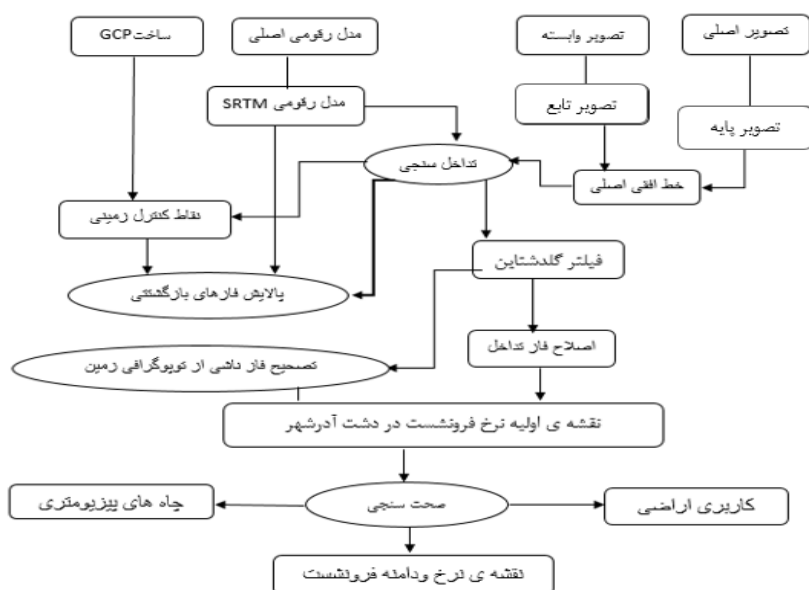
شهرستان آذرشهر در استان آذربایجان شرقی واقع در شمال غربی ایران با وسعت ۸۴۰ کیلومترمربع در ۳۰ کیلومتری واقع در جنوب غرب تبریز واقع شده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۴۰ متر می‌باشد. این شهرستان از سمت شمال و شرق با شهرستان اسکو، از سمت غرب با دریاچه ارومیه و از سمت جنوب با شهرستان عجب‌شیر هم مرز است (شکل ۱). میانگین میزان بارش سالانه آن به ۳۲۹ میلی‌متر می‌رسد. مهمترین رودخانه منطقه، آذرشهر چای است که دارای روند عمومی شرقی-غربی بوده و آب‌های سطحی منطقه را زهکشی می‌کند. این رودخانه ضمن مشروب کردن و عبور از وسط دشت به نواحی شوره‌زارها، در نهایت به دریاچه ارومیه ختم می‌شود. درجه حرارت در منطقه مورد مطالعه در ماه‌های تابستان به بیشترین حرارت ۴۲ درجه سانتی‌گراد مربوط به ماه مرداد و کمترین دما ۱۹ درجه سانتی‌گراد زیر صفر به دی ماه است

استفاده از نزدیک‌ترین همسایه و روش درخت تصمیم‌گیری صورت گرفت. لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از میزان صحت و درستی آن است. دقت طبقه‌بندی در سال ۲۰۲۰ صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۶ است. در حالی که طبقه‌بندی در سال ۲۰۱۵ با صحت کلی ۹۲ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۰ به نسبت دقت پایین‌تری را ارائه داده است.

ضریب نرمی و شکل فشردگی ایجاد شد (فیضی‌زاده و هلالی، ۱۳۸۹). با آزمون و خطا بهترین اندازه که نشان‌دهنده اشیا با ابعاد مختلف می‌باشند تعیین شد. تصویر طبقه‌بندی شده در این پژوهش دارای مقیاس ۰/۵، ضریب فشردگی ۰/۵ انجام گردید (شکل ۳). بعد از مشخص کردن تعداد کلاس‌های مورد نیاز در طبقه‌بندی تعیین شی‌های نمونه‌های آموزشی انجام و در نرم‌افزار بر سطح تصویر اعمال گردید. سپس طبقه‌بندی با



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



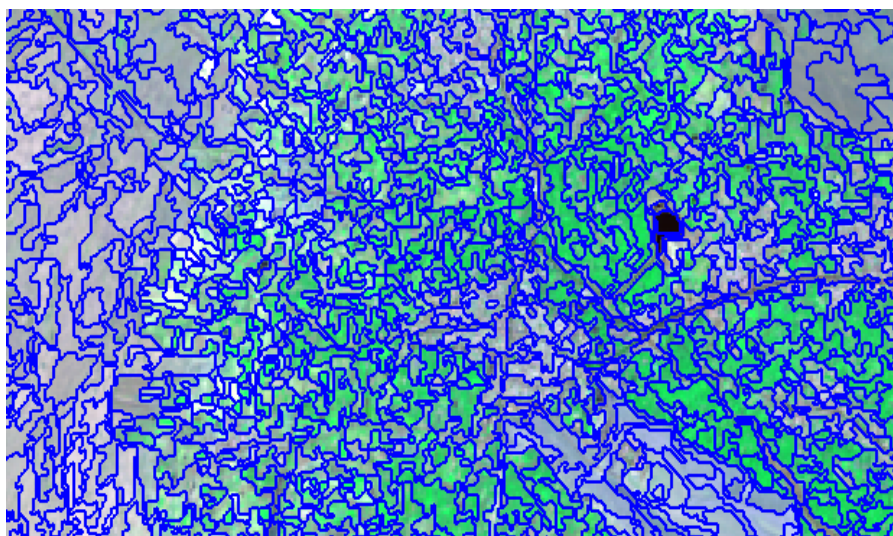
شکل ۲. فلوچارت مراحل تحقیق

جدول ۱. مشخصات تصاویر مورد استفاده

سال	نام ماهواره	گذر ماهواره	تصویر فرعی	تصویر اصلی
۲۰۱۵	سنتینل ۱	صعودی	S1A_OPER_AUX 20160703	S1A_IW_SLC__1SDV 20150702
۲۰۲۰	سنتینل ۱	صعودی	S1A_OPER_AUX 20200419	S1A_IW_SLC__1SDV 20200418

جدول ۲. اطلاعات تصاویر سنجنده لندست ۸

سال	نام ماهواره	گذر	ردیف	زاویه آزیموت خورشید	ساعت تصویربرداری
۲۰۱۵/۷/۱۶	لندست ۸	۱۶۸	۰۳۴	۱۲۳/۷۳۷۱۵۲۹۷	۰۷:۳۱:۴۳
۲۰۲۰/۷/۱۱	لندست ۸	۱۶۸	۰۳۴	۱۲۲/۸۶۴۱۶۱۷۸	۰۷:۳۲:۲۱



شکل ۳. نمونه تصویر قطعه‌بندی شده (مقیاس: ۴۵، شکل ۵/۵، ضریب فشردگی ۰/۵)

### داده‌های چاه‌های پیژومتری

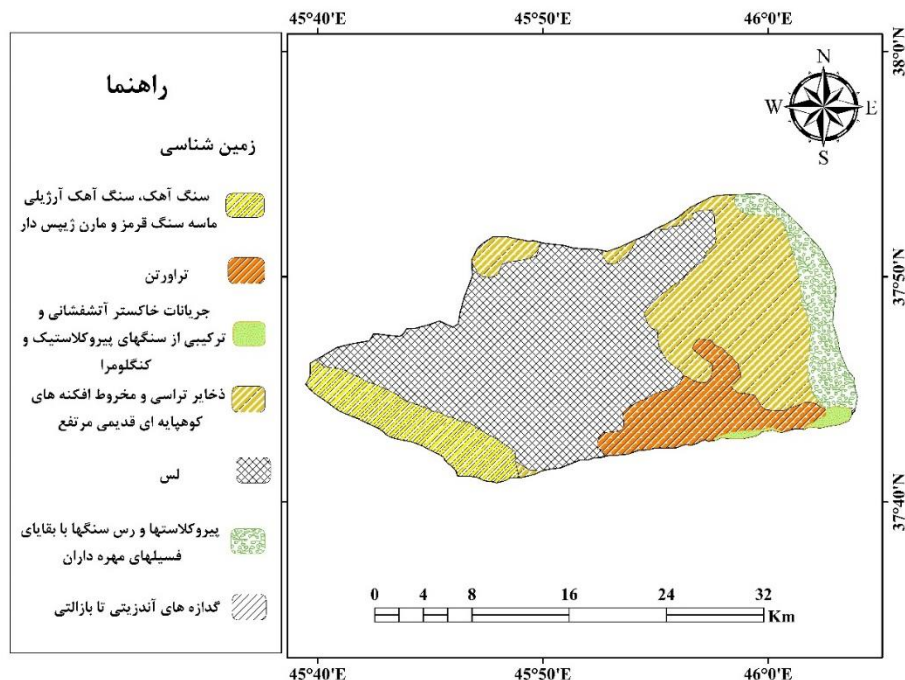
همچنین در مطالعات مربوط به علل فرونشست زمین بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی دارد. به همین دلیل اطلاعات مربوط به تغییرات سطح آب زیرزمینی در طی سال‌های ۹۲ و ۹۷ که از ۳۱ چاه پیژومتری واقع در دشت آذرشهر برداشت شده و مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور انتخاب بهترین مدل درون‌یابی از بین مدل‌های مختلف، تمامی مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و تنها مدلی انتخاب شدند که دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها بودند. به منظور پایش سطح تراز آب‌های زیرزمینی نقشه سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برای هر دو سال با روش مدل‌های کریجینگ نتایج از دقت بالایی را نشان می‌دهد. روش K-Bessel با مقدار RMS ۰/۱۳۴، برای سال ۹۷ و روش Gaussian با مقدار RMS ۰/۱۳۵، برای سال ۹۲ که دقیق‌ترین روش شناخته شدند، استخراج شد.

### زمین‌شناسی منطقه

با نگاهی به نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ورقه آذرشهر می‌توان واحدهای رسوبی و نیز سنگ‌های ولکانیکی ناشی از ولکانسیم سهند را در این منطقه مشاهده نمود. واحدهای کواترنر بیشترین گسترش را در نقشه زمین‌شناسی این ناحیه داشته که شامل نهشته‌های آبرفتی کوهپایه‌ای قدیمی و گستره‌ای نسبتاً پهن‌تر از نهشته‌های تراورتن و نهشته‌های رسی و نمکی است. پهنه تراورتنی منطقه از حوالی گوگان تا حوالی داشکسن به طول حدود ۱۴ کیلومتر گسترده شده است. عرض میانگین این پهنه تراورتنی حدود ۴۰۰ متر می‌باشد. در طول نئوژن فعالیت آتشفشانی سهند باعث گردیده که قطعات ولکانوکلاستیک در این منطقه گسترش یافته و واحدهای کنگلومرای کوهپایه‌ای ولکانوکلاستیک که حاوی نهشته‌های لاهار است را به وجود آورد. توف و ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک و توف ماسه‌ای با میان لایه‌هایی از دیاتومیت در قسمت‌های

قدیمی‌تر که سنگ کف منطقه را تشکیل داده‌اند، شامل واحدهای تریاس - ژوراسیک و کرتاسه می‌باشند که عمدتاً ترکیب کربناته دارند (رهگشا و پورقاضی، ۱۳۸۷). شکل ۴ نقشه زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد.

بالاتر قرار دارند. فعالیت آتشفشانی جوان سهند باعث شده که در این منطقه چند گنبد کوچک و بزرگ آتشفشان (ترشکوه، دین‌آباد، هفت چشمه و ...) ایجاد شود که ترکیبی از آندزیت، آمفیبول آندزیت و داسیت می‌باشند. واحدهای



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

شده است. سنجنده تصویر نخست (تصویر اصلی)<sup>۳</sup> این فضا را در  $T_0$  ثبت و مقدار فاز را  $(\Phi_m)$  آن را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار نشست عبارت‌اند از فاصله  $P$  تا  $P_1$  که طی زمان مشخصی صورت گرفته است.  $(Dt)$  برای اندازه‌گیری این مقدار، سنجنده تصویر دومی (تصویر فرعی)<sup>۴</sup> در زمان  $t$  و با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز  $(\Phi_m)$  را برای آن اندازه‌گیری می‌کند. روش تداخل‌سنجی تفاضلی، تفاضل فاز  $\Phi_s$  و  $\Phi_m$  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.

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

که در آن  $SP$  فاز تصویر اول،  $MP$  فاز تصویر دوم، عدد پی با مقدار ثابت  $3/14$  و  $\lambda$  طول موج می‌باشد. در اندازه‌گیری مقدار فرونشست در این روش، سطح ناپایدار تصور شده، به

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  $5/6$  سانتی‌متر حدود پنج متر است (چاترجی و همکاران، ۲۰۰۶). این روش را برای اولین بار گولدشتاین<sup>۱</sup> و زیکر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۹ ارائه کردند. این اصطلاح به روش اندازه‌گیری پاره‌ای 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 در این شکل،  $P$  معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر

<sup>3</sup> Master

<sup>4</sup> Slave

<sup>1</sup> Goldstein

<sup>2</sup> Zebeker

خط مبنای زمانی<sup>۷</sup> در صورتی که هدف مطالعه تغییرات ارتفاعی منطقه باشد، تصاویر اخذ شده از یک منظر و در زمان‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در چنین حالتی که خط مبنای تداخل‌سنجی، اختلاف زمانی دو برداشت است. تداخل‌سنجی راداری قادر است اندازه‌گیری‌های دقیقی از تغییرات ارتفاعی زمین در پهنه گسترده و با فراوانی مکانی مناسب را فراهم نماید (گلاوی و هافمن، ۲۰۰۷).

### 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 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 (ماسومنت و فیگل، ۱۹۹۸).

### تداخل‌سنجی رادار

امروزه با گسترش فناوری و فناوری و به ویژه انجام ماموریت‌های مختلف از تصاویر راداری در سراسر جهان بحث استفاده از این تصاویر در جهت تولید محصولات گوناگون اهمیت یافته است. یکی از اصلی‌ترین فرایندها جهت استفاده تصاویر راداری، تداخل‌سنجی راداری<sup>۷</sup> است. خروجی این فرایند اطلاعات ارتفاعی از سطح زمین و همچنین اطلاعات از جابه‌جایی‌های رخ داده در سطح زمین است. تداخل‌سنجی راداری تکنیکی است که به واسطه اختلاف فاز بین دو تصویر بین تصاویر راداری اخذ شده از یک منظر، محاسبه می‌شود. این تصاویر ممکن است از موقعیت‌های تصویربرداری و یا حتی زمان‌های تصویربرداری مختلف اخذ شده باشند. تفاضل فازهای تصاویر، نوع جدیدی از تصویر است که اینترفروگرام نام دارد. اینترفروگرام برای منطقه‌ای که در حد فاصل زمانی دو

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 ( $\phi_{Top}$ ) و فاز ناشی از اتمسفر خواهد بود (دینگ و همکاران، ۲۰۰۴).

$$\Delta\phi_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda} = \phi_{Top} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} \quad (2)$$

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 بیان‌کننده مقادیر جابجایی سطح (فرونشست) خواهد بود. تکنیک مورد استفاده در این پژوهش به منظور تعیین میزان فرونشست، روش تداخل‌سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر و یا غیرمکرر می‌باشد. 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.

### خط مبنا<sup>۵</sup>

با توجه به اینکه هدف، نقشه ارتفاعی و یا نقشه تغییرات ارتفاعی منطقه باشد، تصویربرداری در بازه مکانی و زمانی مشخصی صورت می‌گیرد و فاصله بین تصاویر اخذ شده تحت عنوان خط مبنا شناخته می‌شود و بسته به اینکه این فاصله در زمان و مکان باشد، خط زمانی و مکانی تعریف می‌شوند (شکل ۵).

خط مبنای مکانی: در حالتی که آنتن‌ها به صورت هم‌زمان و در موقعیت مکانی متفاوت اقدام به زوج تصویر می‌نمایند، بردار موقعیت ماهواره‌ها معرف خط مبنای مکانی است. در چنین حالتی امکان محاسبه ارتفاع زمینی فراهم می‌شود، که ممکن است با هدف تولید و یا اصلاح مدل رقومی ارتفاعی موجود منطقه صورت بگیرد. اخذ تصاویر در تک گذر که در آن دو آنتن بر روی یک ماهواره و در راستای عمود بر حرکت قرار می‌گیرد، راه حل مناسبی برای اخذ هم‌زمان تصاویر در سنجنده‌های هواپرد محسوب می‌شود. مزیت اصلی استفاده از این تکنیک هم‌زمانی اخذ تصاویر و عدم نیاز به کنترل دقیق فاصله بین دو آنتن است.

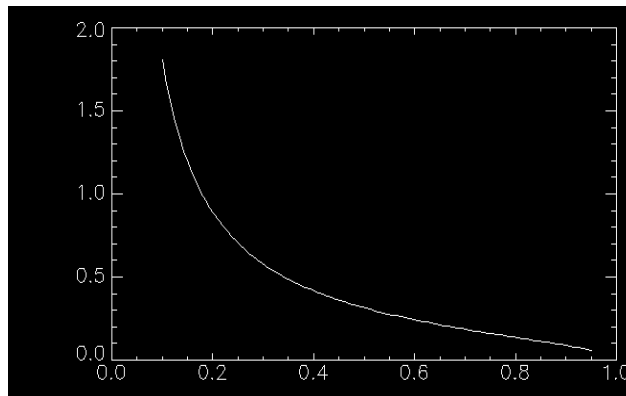
<sup>7</sup> interferometry

<sup>5</sup> base line

<sup>6</sup> temporal baseline

جمع‌آوری می‌شود. که این حالت خود نیز به دو حالت تداخل‌سنجی در راستای پرواز و تداخل‌سنجی در جهت عمود بر راستای پرواز تقسیم بندی می‌شود. و اما در تداخل‌سنجی یا تکرار مسیر، سکو تنها حامل یک آنتن می‌باشد. این آنتن یک منطقه را در دو عبور مختلف با هندسه تقریباً مشابه پوشش می‌دهد (قنادی و همکاران، ۲۰۱۹). تداخل‌سنجی راداری با محدودیت‌های نیز همراه است که مهمترین آن عبارت است از توان تفکیک زمانی پایین، اختلال در صورت عدم همبستگی زمانی و مکانی میان تصاویر، نیاز به مدل سازی و تصحیح اثر یونسفری و تروپوسفری و نهایتاً یک بعدی بودن اندازه‌گیری در راستای خط دید سنجنده در تداخل‌سنجی راداری است (قنادی و همکاران، ۲۰۱۹).

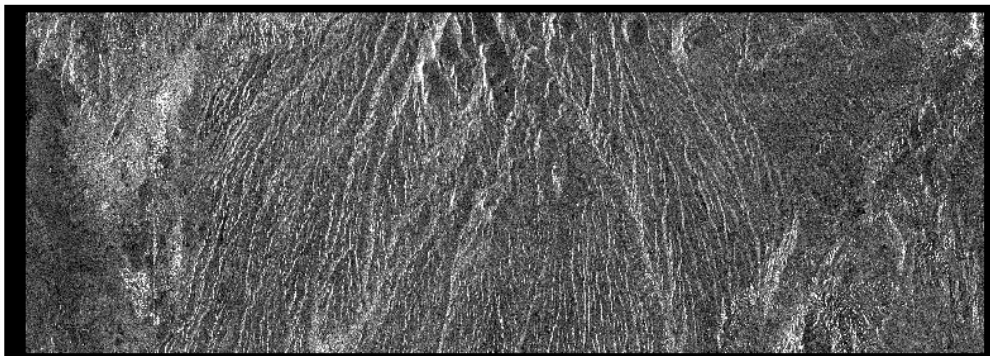
تصویربرداری دچار هیچگونه تغییری نشده باشد می‌تواند بیانگر ارتفاع منطقه باشد (شکل ۶). در تداخل‌سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود. از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر جدید حاصل می‌شود که اینترفروگرام نام دارد. اینترفروگرام یک طرح تداخلی فرینج<sup>۸</sup> است. فرینج‌ها خطوطی با اختلاف فازهای مساوی شبیه به خطوط تراز در نقشه‌های توپوگرافی هستند. به طور کلی دو روش برای تداخل‌سنجی راداری وجود دارد که عبارت اند از: روش تداخل‌سنجی تک مسیر و روش تداخل‌سنجی با تکرار مسیر. در روش تداخل‌سنجی مسیر، با استفاده از دو آنتنی که روی یک سکو نصب شده‌اند به صورت همزمان اطلاعات



شکل ۵. خط مبنا مکانی و زمانی

جدول ۲. اطلاعات تصاویر سنتینل ۱

<i>PI Ambiguity <math>\gamma</math></i> <i>displacement</i> <i>(DInSAR) (m)</i>	<i>Normal</i> <i>Baseline (m)</i>	<i>PI Ambiguity <math>\gamma</math></i> <i>height (InSAR) (m)</i>	<i>Range Shift</i> <i>(pixels)</i>	<i>Azimuth</i> <i>Shift</i>	<i>Doppler</i> <i>Centroid</i> <i>diff. (Hz)</i>	تاریخ تصاویر
0.028	74/29	515.485	342/94	-4.008	-26.063	20151031 20200126



شکل ۶. اینترفرومتری



## اعمال فیلتر

تأثیر فرونشست دشت آذرشهر به تصویر کشیده شد. نقشه خروجی حاصل از مقادیر مثبت و به رنگ سیاه جابجایی مربوط به حرکت زمین به سمت دید راداری (بالاآمدگی) و مقادیر منفی بیانگر دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری (فرونشست) است. نتایج حاصله در شکل ۸ نمایش داده شده است. بررسی وضعیت فرونشست در ۵ سال اخیر از سال ۲۰۱۶ تا سال ۲۰۲۰ میزان فرونشست افزایش یافته است. مناطق قرمز دارای بیشترین فرونشست ۶ سانتی‌متر را نشان می‌دهد و دارای بالاآمدگی ۶ سانتی‌متری می‌باشد. زمانی که در منطقه فرونشست صورت می‌گیرد، فقط پایین رفتن صورت نمی‌گیرد، بلکه دوالیته یا بالاآمدگی را نیز دارا می‌باشد. بر اساس اطلاعات به دست آمده از نقشه فرونشست دشت آذرشهر مشخص شد که در دوره مطالعه شده میزان فرونشست قابل توجهی را شاهد بودیم. در نقشه فرونشست بیشترین میزان فرونشست در قسمت شمال و جنوب شرقی شهرستان و کمترین میزان آن در شمال غرب و شمال شرق دشت آذرشهر بوده است. بالاترین میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به ترتیب به کاربری‌های مرتع با مقدار ۶ سانتی‌متر، منطقه ساحلی با مقدار ۵ سانتی‌متر و کاربری‌های باغات و مسکونی با مقدار ۴ سانتی‌متر در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین کاربری بایر هم با مقدار یکسان تقریباً ۳ سانتی‌متر کمترین مقدار فرونشست را به خود اختصاص داده‌اند. فرونشست ۴ سانتی‌متری برای کاربری مناطق مسکونی می‌تواند ناشی از تخریب و ساخت‌وسازهای ساختمان‌های بزرگ در بلندمدت باشد که به عنوان بالاآمدگی یا فرونشست در نظر گرفته شده باشد.

## تحلیل رابطه فرونشست و آب‌های زیرزمینی

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 دهه اخیر داشته است. برداشت بیش از حد و عدم وجود تعادل بین تغذیه لایه‌های آبدار و تخلیه آن‌ها باعث شده که سطح ایستابی در منطقه روند نزولی مداومی را دنبال کند. با خالی شدن آب موجود در حفره‌های لایه آبدار و جابجایی آب این حفره‌ها با هوا، باعث کاهش میزان فشار تعادل بین لایه‌ها به هم می‌خورد. به دلیل بر هم خوردن تعادل بین فشار و وزن لایه‌های فوقانی، در اثر نیروی وزن

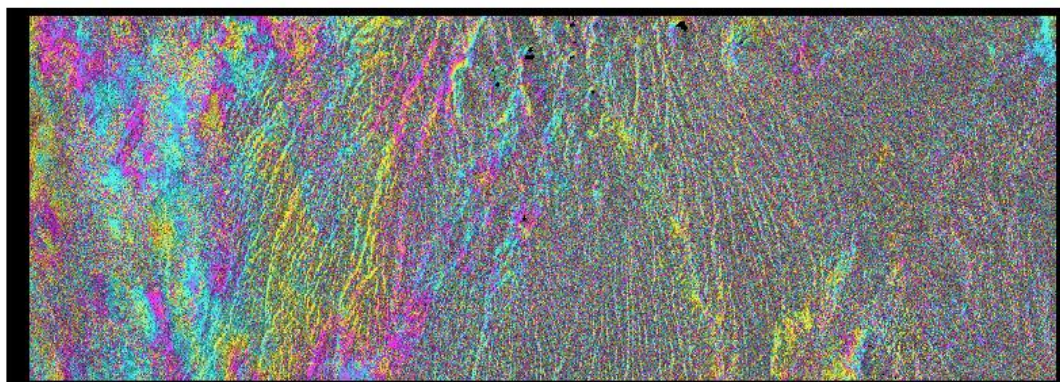
تداخل‌نگار تفاضلی حاصل در برگیرنده مقداری نویز است. عامل به وجود آورنده این نویزها می‌تواند مختلف باشد، دو عامل اصلی در به وجود آمدن آن‌ها تاثیر گذار است (حبیب‌زاده و علی‌المدرسی، ۱۳۹۲). عامل اول مربوط به تفاوت زمانی بین دو تصویر اصلی و وابسته است. گاهی اوقات برخی از تغییرات در منطقه که در بین فاصله 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 (حبیب‌زاده و علی‌المدرسی، ۱۳۹۲). 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 تداخل‌نگار هستیم. در منطقه مورد مطالعه به دلیل مهاجرپذیر بودن شهرستان آذرشهر 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 (شکل ۷)، نتیجه اعمال فیلتر تولید تداخل‌نگار فیلتر شده است که این تداخل‌نگار از لحاظ بصری حاشیه‌های مرتب‌تری نسبت به تداخل‌نگار 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 تداخل‌نگار 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 (حبیب‌زاده و علی‌المدرسی، ۱۳۹۲).

## بحث و یافته‌ها

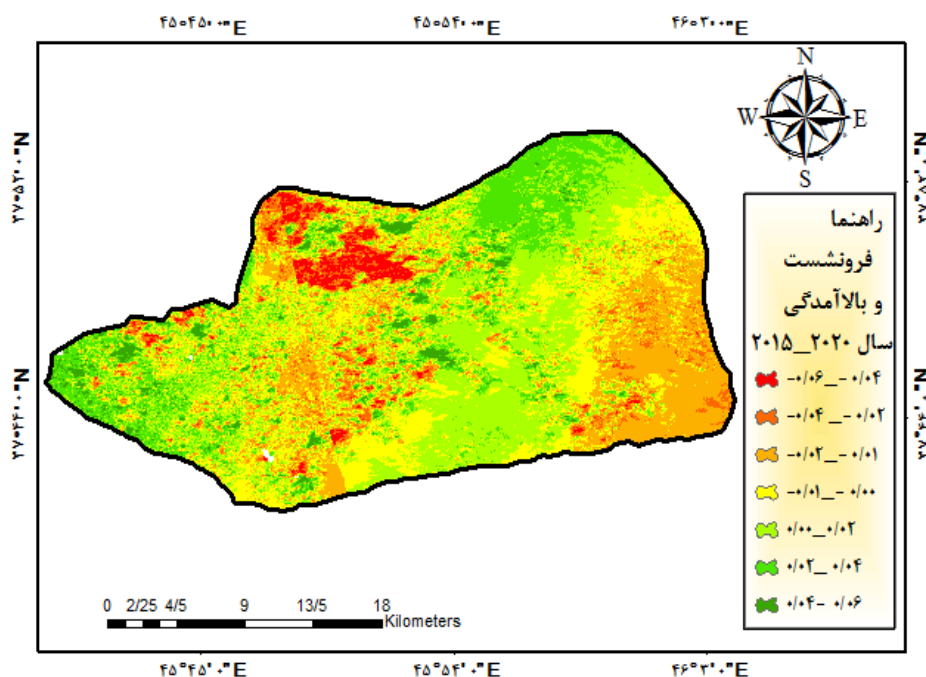
در این پژوهش تمامی فرایندهای پژوهشی از قبیل انتخاب زوج تصویر تا بازیابی فاز جابجایی عمودی سطح دشت آذرشهر صورت گرفت و قابلیت‌های تصاویر جدید و به روز سنتینل ۱ آژانس فضایی اتحادیه اروپا در تهیه مناطق تحت

تخمین زده شده است. اطلاعات مندرج در جدول ۳ نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر ME و RMSE روش کریجینگ از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است که از بین حالت‌های مختلف روش کریجینگ نیز مدل کابسل برای سال ۹۷ دارای بیشترین دقت و برای سال ۹۲ گوسین دارای بیشترین دقت می‌باشد. به منظور پایش سطح تراز آب‌های زیرزمینی نقشه سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برای هر دو سال با روش مدل‌های کریجینگ نتایج از دقت بالایی را نشان می‌دهد. روش K-Bessel با مقدار RMS ۰/۱۳۴، برای سال ۹۷ و روش Gaussian با مقدار RMS ۰/۱۳۵، برای سال ۹۲ که دقیق‌ترین روش شناخته شدند، استخراج شد.

لایه‌های فوقانی لایه‌های آبدار فشرده شده و کاهش سطح ایستایی افزایش پیدا کند و چون این کاهش سطح با فرونشست رابطه‌ای مستقیم دارد، شاهد افزایش میزان فرونشست در منطقه بودیم. کاهش میزان استخراج آب از سفره‌های آب زیرزمینی باعث تعدیل در فرونشست منطقه می‌شود. عمده مصرف چاه‌ها در منطقه مربوط به فعالیت‌های کشاورزی 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. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نسبت به داده‌های پرت حساس است. کوچک‌تر بودن این شاخص دلیلی بر دقت بالاتر تخمین‌ها و یا اختلاف کم بین مقادیر واقعی و مقادیر



شکل ۷. فیلتر گولدشتاین با فرمت Fint



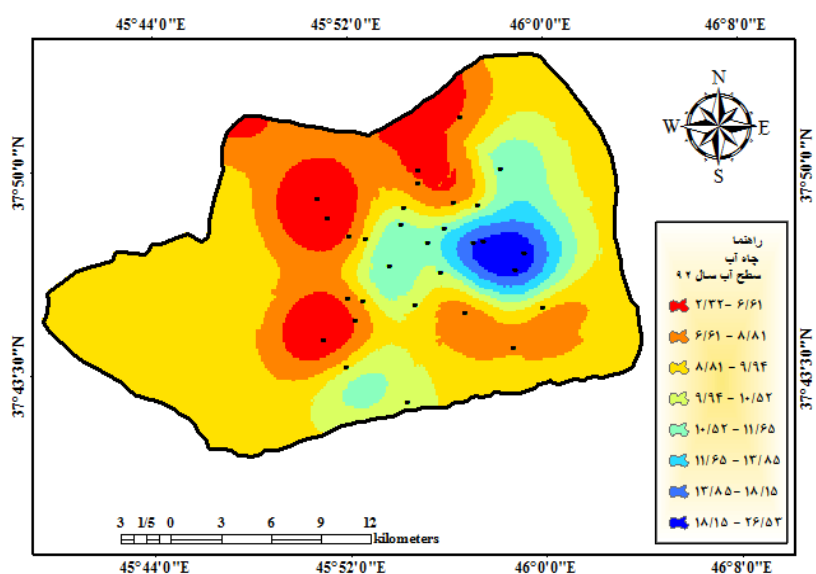
شکل ۸. میزان بالا آمدگی و میزان فرونشست دشت آدرشهر

در این پژوهش، نرخ و دامنه فرونشست استخراج شده به وسیله تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی از طریق اطلاعات چاه‌های پیژومتری مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. به این ترتیب یافته‌های تحقیق به کمک داده‌های چاه‌های پیژومتری و کاربری اراضی مورد کنترل و ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نقشه درون‌یابی شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌دهد.

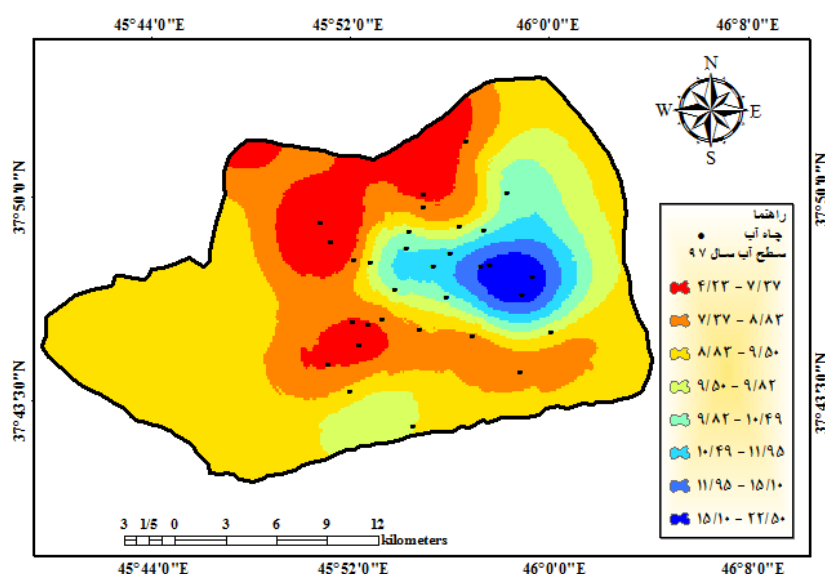
با توجه به سطح آب زیرزمینی دشت علی‌رغم نوسانات فصلی دارای روند نزولی است. همانگونه مشاهده می‌شود در سال ۹۲ سطح آب ۲۶/۵۳ متر بوده است که در طی ۵ سال در سال ۹۷ به ۲۲/۵۰ متر کاهش یافته است که ۴ متر افت سطح آب زیرزمینی در طی ۵ سال را نشان می‌دهد.

جدول ۳. آماره‌های RMSE و ME در روش‌های مختلف درون‌یابی شهرستان آذرشهر برای سال ۹۲ و ۹۷

روش زمین آمار	سال	مدل واریوگرام	ریشه دوم میانگین مربع خطا	ME
کریجینگ	۹۲	گوسین	۰/۱۳۵	-۰/۰۰۰۹
کریجینگ	۹۷	کا-بسل	۰/۱۳۴	-۰/۰۰۴۴



شکل ۹. نقشه درون‌یابی سطح آب سال ۲۰۱۵

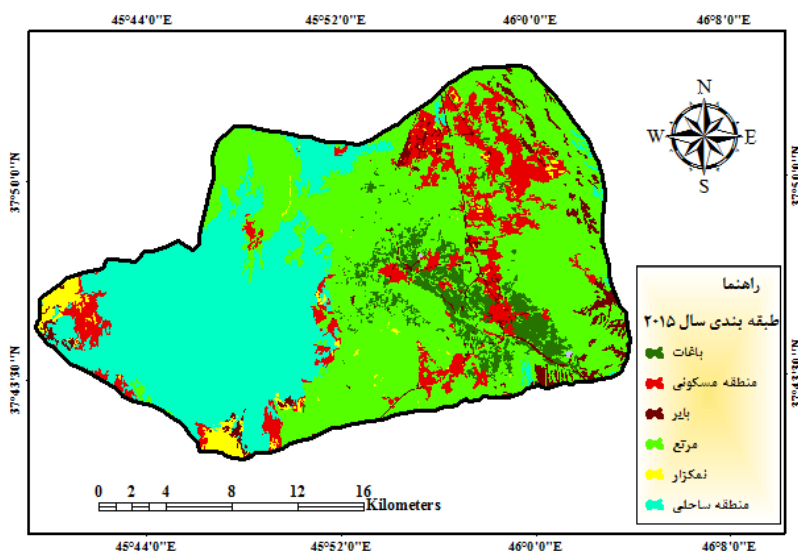


شکل ۱۰. نقشه درون‌یابی سطح آب سال ۲۰۲۰

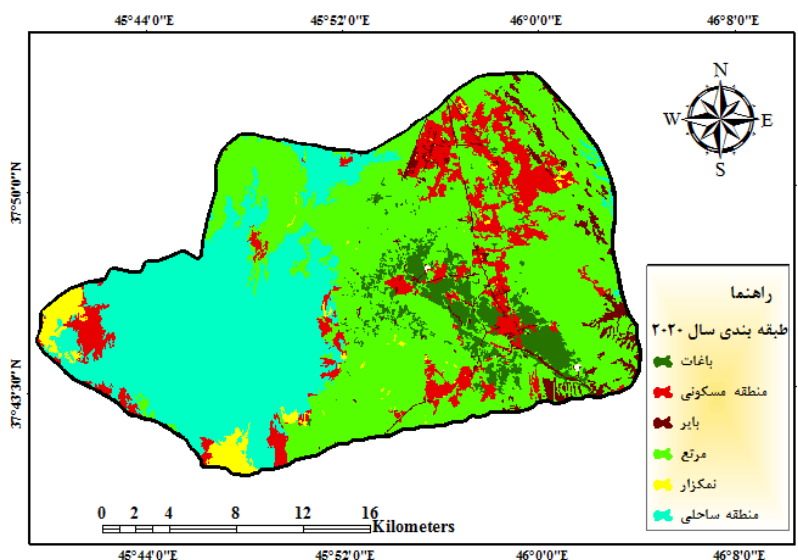
## تحلیل رابطه فرونشست و کاربری اراضی

نتایج حاصل از انطباق نقشه کاربری اراضی (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) و نقشه فرونشست در جدول ۴ نشان داد که بالاترین میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به ترتیب به کاربری‌های مرتع با مقدار ۶ سانتی‌متر، منطقه ساحلی با مقدار ۵ سانتی‌متر و کاربری‌های باغات و مسکونی با مقدار ۴ سانتی‌متر در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین کاربری بایر هم با مقدار یکسان تقریباً ۳ سانتی‌متر کمترین مقدار فرونشست را به خود اختصاص داده‌اند. فرونشست ۴ سانتی‌متری برای کاربری مناطق مسکونی می‌تواند ناشی از تخریب و ساخت‌وسازهای ساختمان‌های بزرگ در

بلندمدت باشد که به عنوان بالآمدگی یا فرونشست در نظر گرفته شده باشد. رویداد مخاطره فرونشست در سکونت‌گاه‌ها علاوه بر ایجاد خسارت فراوان به ابنیه و تأسیسات، جمعیت‌های انسانی ساکن را نیز تهدید می‌کند. به نحوی که رویداد آن می‌تواند با تلفات انسانی از طریق تخریب ابنیه‌ها منجر به فاجعه شود. فروریزش ناگهانی زمین و تخریب و ریزش سازه‌های آسیب‌پذیر از سوانح محتمل ناشی از عوارض فرونشست است که در نواحی شهری با تلفات انسانی رو به رو می‌باشد. این سوانح در موارد خاصی به سبب تراکم جمعیت زیاد و یا گسترش شعاع اراضی فروریخته می‌تواند تلفات سنگین و جبران‌ناپذیری داشته باشد.



شکل ۱۱. نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۵



شکل ۱۲. نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰

جدول ۴. مشخصات آماری فرونشست کاربری‌ها

کاربری	فرونشست	بالا آمدگی	میانگین	انحراف معیار
باغات	-۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۹
منطقه مسکونی	-۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷
بایر	-۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸
مرتع	-۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۱
نمکزار و شورزار	-۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹
منطقه ساحلی	-۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۱

### نتیجه‌گیری

محور اصلی تحقیق حاضر اندازه‌گیری نرخ فرونشست زمین در دشت آذرشهر در بازه زمانی سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی است. به این منظور دو زوج تصویر سری زمانی از ماهواره سنتینل ۱ بکار گرفته شده است. نتایج بررسی وضعیت فرونشست در ۵ سال اخیر از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۲۰ در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرونشست ۶ سانتی‌متر می‌باشد. بر اساس اطلاعات به دست آمده از نقشه فرونشست دشت آذرشهر مشخص شد که در دوره مطالعه شده میزان فرونشست قابل توجهی را شاهد بودیم. در نقشه فرونشست بیشترین میزان فرونشست در قسمت شمال و جنوب شرقی شهرستان و کمترین میزان آن در شمال غرب و شمال شرق دشت آذرشهر بوده است. به منظور سازگاری نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری با دیگر داده‌های تکمیلی از کاربری اراضی و همچنین چاه‌های پیژومتری در سطح دشت آذرشهر استفاده شد. هم‌نهادسازی نقشه‌های فرونشست با لایه‌های کاربری اراضی نیز موید رخداد بیشینه عرصه نشست نشان داد که بالاترین میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به ترتیب به کاربری‌های مرتع با مقدار ۶ سانتی‌متر، منطقه ساحلی با مقدار ۵ سانتی‌متر و کاربری‌های باغات و مسکونی با مقدار ۴ سانتی‌متر در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین کاربری بایر هم با مقدار یکسان تقریباً ۳ سانتی‌متر کمترین مقدار فرونشست را به خود اختصاص داده‌اند. 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 دهه اخیر داشته است. برداشت بیش از حد و عدم وجود تعادل بین تغذیه لایه‌های آبدار و تخلیه آن‌ها باعث شده که سطح

ایستابی در منطقه روند نزولی مداومی را دنبال کند. با خالی شدن آب موجود در حفره‌های لایه آبدار و جابجایی آب این حفره‌ها با هوا، باعث کاهش میزان فشار تعادل بین لایه‌ها به هم می‌خورد. به دلیل بر هم خوردن تعادل بین فشار و وزن لایه‌های فوقانی، در اثر نیروی وزن لایه‌های فوقانی لایه‌های آبدار فشرده شده و کاهش سطح ایستابی افزایش پیدا کند و چون این کاهش سطح با فرونشست رابطه‌ای مستقیم دارد، شاهد افزایش میزان فرونشست در منطقه هستیم. کاهش میزان استخراج آب از سفره‌های آب زیرزمینی باعث تعدیل در فرونشست منطقه می‌شود. عمده مصرف چاه‌ها در منطقه مربوط به فعالیت‌های کشاورزی است. تغییر در الگوی آبیاری باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی از الگوی سنتی به الگوی مدرن نظیر آبیاری قطره‌ای و بارانی می‌تواند باعث کاهش میزان آب مصرفی می‌شود و نتیجه آن کاهش استخراج چاه‌ها است و همچنین جلوگیری از حفر چاه‌های جدید در منطقه مانع از افزایش برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی می‌شود و این دو عامل باعث می‌شود که روند کاهشی سطح ایستابی کند شود که به طور مستقیم بر روی روند فرونشست منطقه تأثیرگذار است و می‌تواند از سرعت آن کم کند و حتی در بهترین حالت روند آن را متوقف کند. در سال‌های اخیر، مخاطره فرونشست به عنوان یکی از چالش‌های پیش روی برنامه‌ریزان مطرح شده است. موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده که تا بیشتر دشت‌های آن، مستعد وقوع فرونشست باشد. نتایج حاصله نشان داد با توجه به سطح آب زیرزمینی دشت علیرغم نوسانات فصلی دارای روند نزولی است. نرخ و دامنه فرونشست استخراج شده به وسیله تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی از طریق اطلاعات چاه‌های پیژومتری مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. به این ترتیب یافته‌های تحقیق به کمک داده‌های چاه‌های پیژومتری و کاربری اراضی مورد کنترل و ارزیابی قرار

دامغان سطح آب زیرزمینی به طور مداوم در حال پایین آمدن و مقدار نشست زمین در حال افزایش می‌باشد. لذا پمپاژ از چاه‌های در واقع در نواحی باریک بالا باید کاهش یابد. در پژوهشی دیگر صفاری و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج- شهریار به این نتیجه رسیدند که روند تغییرات ناشی از برداشت آب حدود ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. میزان افت ۲۲ متر طی ۱۲ سال می‌باشد. میزان برداشت آب از چاه‌ها حدود ۶۰۵ میلیون مترمکعب می‌باشد.

### منابع

- پرهیزکار، س.، اژدری، خ.، کاظمی، غ.، امام‌قلی‌زاده، ص (۱۳۹۴) پایش‌بینی افت سطح آب و ارزیابی فرونشست زمین در آبخوان دامغان با ترکیب مدل‌های جی ام اس و جی ای پی. مجله علوم دانشگاه تهران، دوره ۵، شماره ۱، ص ۸۰-۳۶.
- حسین‌زاده، م.، نوحه‌گر، ا (۱۳۹۰) بررسی تأثیر خشکسالی دو دهه اخیر بر منابع آب زیرزمینی دشت میناب و وقوع پدیده فرونشینی. مجله علوم محیطی، شماره ۹، ص ۹۷-۱۱۱.
- دوچشمه گرگیج، ع (۱۳۹۴) هیدروژئولوژی آبخوان دشت آذرشهر و مدل‌سازی کمی آن با استفاده از مدل‌های ترکیبی و پویایی سیستم، پایان‌نامه دوره دکترا، دانشگاه تبریز.
- داوودی‌جم، م (۱۳۸۹) تعیین دامنه و تغییرات زمان با استفاده از InSAR در دشت مهیار، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۲۵ ص.
- رجب‌پور، ح (۱۳۸۲) هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی دشت آذرشهر، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۲۰ ص.
- روزیان، ع.، اسماعیلی، ع.، معتق، م (۱۳۹۵) بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و با به کارگیری تصاویر سنجنده، دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- شریفی‌کیا، م (۱۳۹۱) تعیین میزان فرونشست زمین به کمک تداخل‌سنجی راداری در دشت نوق و بهرمان، مجله آمایش و فضا، دوره ۱۶، شماره ۳، ص ۷۷-۵۶.
- صالحی، ر.، غفوری، م.، لشکری‌پور، غ.، دهقانی، م (۱۳۹۲) بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، مجله مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۳، شماره ۳، ص ۴۷-۵۷.
- صفاری، ا.، جعفری، ف.، توکل، م (۱۳۹۵) پایش و فرونشست زمین و ارتباط آن با آب زیرزمینی مطالعه موردی دشت گرفته است. با توجه به سطح آب زیرزمینی دشت علیرغم نوسانات فصلی دارای روند نزولی است. همانگونه مشاهده می‌شود در سال ۹۲ سطح آب ۲۶/۵۳ متر بوده است که در طی ۵ سال در سال ۹۷ به ۲۲/۵۰ متر کاهش یافته است که ۴ متر افت سطح آب زیرزمینی در طی ۵ سال را نشان می‌دهد. ایجاد چنین شرایط و وضعیتی در رویداد پدیده فرونشست و پیامدهای مخاطره‌آمیز و فاجعه‌بار آن برای کشور، قبل از هر چیز 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 سوی 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 در تعدیل زیرساخت‌های ایجابی فراهم گردد. و نهایتاً برای پیشگیری و کاستن و تعدیل حجم و دامنه فاجعه محتمل از این مخاطره، دستگاه‌های ذیربط تمامی مقررات و استانداردهای لازم ساخت‌وساز را برای نواحی در معرض فرونشست، مورد بازنگری قرار داده و اساس را بر شرایط نوین تعریف نمایند. در پژوهشی مشابه اصغری و محمدزاده (۱۴۰۰)، با روش مشابه با پژوهش حاضر با استفاده از نرم-افزار ساراسکیب و تصاویر راداری سنتینل ۱ اقدام به بررسی فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب زیرزمینی در دشت شهریار با استفاده از داده سنتینل ۱ مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نرخ فرونشست ۱۱ سانتی‌متر را نشان داد. همچنین رابطه بین فرونشست و تغییرات مقدار سطح آب-های زیرزمینی نشان داد که در سال ۲۰۱۵ سطح آب ۷۵/۸۵ متر بوده است که در طی ۶ سال در سال ۲۰۲۰ به ۶۸/۵۲ متر کاهش یافته است. که نشان می‌دهد در طی شش سال ۷ متر افت آب زیرزمینی را نشان داد. در تحقیقی مشابه پرهیزکار و همکاران (۱۳۹۴)، اقدام به بررسی پیش‌بینی افت سطح آب و ارزیابی فرونشست زمین در آبخوان دامغان با ترکیب مدل‌های جی ام اس و جی ای پی نمودند. نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که با افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۹۵ سانتی‌متر و ۳۴۳ سانتی‌متر، نشست زمین به ترتیب به میزان ۴/۳۵ و ۴/۳۹ سانتی‌متر خواهد بود. این تحقیق نشان داد که در دشت

- Habibzadeh Harris, M., Al-Modarresi, A., Sarkargar Ardakani, A (2013) Study of subsidence in Shahriar using D-In SAR technique, Master Thesis, Islamic Azad University, Yazd Branch: 64-63
- Faizizadeh, B., Hilali, H (2010) Comparison of base pixel, object-oriented and effective parameters in land use coverage classification in West Azarbaijan Province. *Geographical Research Journal*, 71: 73-84.
- Gadirzadeh, A (2002) Geological map and mineral exploration of the country and mineral geological exploration of the country.
- Ghannadi, M., Enayati, H., Khesali, E (2019) Generating Digital Elevation Model of the Earth Using Sentinel-1 Images and Interferometry. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(108): 109-121. doi: 10.22131/sepehr.2019.34623
- Galloway, D. L., Burbey, T. J (2011) Regional land subsidence accompanying groundwater extraction: *Hydrogeol*, 19: 1459-1486
- Massonnet, D., Feigl, K (1998) Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 441-500
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshianase Haghigi, M., Wetzel, H., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. and Arabi, S (2017) Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain southeastern Iran, using InSAR time – series and in situ measurements. *Engineering Geology*, 218: 134-151.
- Motaghi, M. Y., Djamour, T. R., Walter, H. U., Wetzel, J., Zschau, and S., Arabi (2006) Land subsidence in Mashhad Valley, north-east Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x.
- Pacheco, J. J., Arzate, E., Rojas, M., Arroyo, V., Yutsis, and Ochoa, O (2006) Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data. *Engineering Geology*, 84(40636): 143-160.
- Rahgosha, M., Pourqazi, G (2008) Water hardness and its possible role on the spread of kidney stones in the Azarshahr region of northwestern Iran. *Nasam Bamdad*, 2: 91-106.
- Raucoules, D., Colesanti, C., Carnec, C (2007) Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *Elsevier Comptes Rendus Geoscience*, 339: 289-302.
- Tomas, R., G. Herrera, J., Delgado, J. M., Lopez-Sanchez, J. J., Mallorquí and J. A., Mulas (2009) Ground subsidence study based on DInSAR data: calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain). *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j. enggeo 2009.11.004.
- شهریار و کرج، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۲، ص ۸۲-۹۳.
- قنادی، م.، یحسائی، ا.، عنایتی، ح (۱۳۹۷) تولید مدل رقومی زمین با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری، مجله اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، شماره ۱۰۸، ص ۱۱۴-۱۳۲.
- کوک، آ.، دورکمپ، ج.، (۱۳۷۷) ژئومورفولوژی و مدیریت محیط. ترجمه شاپور گودرزی، جلد اول، تهران، انتشارات سمت، ۲۴۸ ص.
- لشکری‌پور، غ. ل.، غفوری، م.، رستمی بارانی، ح (۱۳۸۷) بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر، مجله رخساره‌های رسوبی، سال اول، شماره ۱، ص ۹۵-۱۱۱.
- مقصودی، ی.، امانی، ر.، احمدی، ح (۱۳۹۸) بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی پراکنش گرهای دائمی، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال ۱۵، شماره ۱، ص ۲۹۹-۳۱۳.
- Avallone, A., A. Zollo, P., Briole, C., Delacourt and F., Beauducel (1999) Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26(15): 2303-2306.
- Asghari, S., Mohamadzadeh shishegaran, M (2021) Estimation of subsidence using radar interferometry technique and groundwater parameters and land use (Case study: shahryar plain). *Quantitative Geomorphological Research*, 10(1): 40-54. doi: 10.22034/gmpj.2021.258196.1229
- Chatterjee, R. S., Fruneau, B., Rudan, J. P., Roy, P. S., Frison, P., Lakhera, R. C., Dadhlwal, V. K., Saha, R (2006) Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990 asobserved from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, 102: 176-185.
- Chung, Y. R., Chen, G., Yue, and Angelier, J (2005) Estimation of subsidence using GPS measurements and related hazard: the Pingtung Plain. *Southwestern Taiwan*, 337: 1184-1193.
- Dehghani, M., ValadanZoej, M. J., Entezam, I., Saatchi, S., Shemshaki, A (2011) Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by overexploitation of groundwater. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4: 56-73.
- Ding, X. L., Chen, Q. Y (2004) Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (10): 1151-1156.

Zebker, H. A., Rosen, R. M., Goldstein, A., Gabriel, Werner, C. L (1994) on the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 99: 19617-19634.

Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang. R (2015) Land subsidence due to groundwater Withdrawal in the northern Beijing plain China *Engineering Geology*.



## Estimation of subsidence in Azarshahr plain using radar interferometry and analysis of effective groundwater parameters and land use

S. Asghari Sarasekanrood<sup>1\*</sup> and M. Mohamadzadeh shishegaran<sup>2</sup>

1- Assoc. Prof., Dept., of Physical Geography, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

2- Ph. D. student Physical Geography, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

\* s.asghari@uma.ac.ir

Recieved: 2021/4/5 Accepted: 2021/10/17

### Abstract

One of the dangers that has occurred in many areas in recent years is the dangers of subsidence. Identifying areas prone to subsidence and estimating its rate plays an important role in managing and controlling this phenomenon. In this study, in order to identify and measure subsidence in Azarshahr plain, Sentinel radar images of 2015 and 2020 were used and in order to process information, SARSCAPE software was used. According to the results, the maximum subsidence rate in 5 years in the region is estimated at 6 cm. The relationship between subsidence and changes in the amount of groundwater level showed that in a period of 5 years, the groundwater level has decreased by 4 meters, which has led to land subsidence in the study area. The highest subsidence rates in the period 2015 to 2020 are in the following categories: rangeland uses with a value of 6 cm, coastal area with a value of 5 cm and garden and residential uses with a value of 4 cm. Also, the use of mountains with the same amount of approximately 3 cm has the lowest amount of subsidence. 4 cm subsidence for residential use can be caused by demolition and construction of large buildings in the long run.

**Keywords:** Subsidence, Radar Interference, Sentinel 1, Azarshahr Plain