

برآورد و مدلسازی فرونشست در دشت سلفچگان با استفاده از داده‌های راداری سنجش از دور و تکنیک اینترفرومتری

محمد رضا مجدی^۱، میثم داودآبادی فراهانی^۱

^۱ گروه مهندسی نقشه برداری، موسسه آموزش عالی حکمت، قم، ایران.

نام نویسنده مسئول:

کامیار گردبگلی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

چکیده

فرونشست یک پدیده زیست‌محیطی و ناشی از نشست گام به گام و یا پایین رفتن ناگهانی سطح زمین می‌باشد. این رخداد در نواحی تجاری، صنعتی و کشاورزی موجب می‌شود خسارات سانحه باری را ایجاد نماید. در اکثر مناطق ایران همبستگی بالایی میان جابه‌جایی زمین و کمتر شدن تراز سطح آبخوان زیرسطحی و در نتیجه تراکم لایه‌های خاک وجود دارد. در این پژوهش با استفاده از دو سری زمانی تداخل سنجی تفاضلی از سنجنده سنتینل متعلق به سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۹، میزان جابه‌جایی در دشت سلفچگان (استان قم) محاسبه گردید. بعد از آن تغییرات سطح آب چاه‌های پیژومتری محدوده با استفاده از اطلاعات موجود چاه‌های منطقه در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه پژوهش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک روند جابه‌جایی در محدوده مورد پژوهش پیش‌بینی گردید و نقشه احتمال فرونشست تهیه گردید. به عنوان متغیر وابسته مدل رگرسیون لجستیک ایجاد گردید. متغیرهای مستقل استفاده شده در برگیرنده لایه های ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی و تراز آب‌های زیرسطحی می‌باشد. خروجی مدل، نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست بوده که در پنج کلاس ایجاد گردید. تخمین، مقایسه و اعتبارسنجی مدل رگرسیون لجستیک با بهره گیری از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) انجام گرفت و دقت ۸۹ درصدی به دست آمد که دقت قابل قبول مدل رگرسیون لجستیک در تولید نقشه احتمال فرونشست در محدوده مورد بررسی می‌باشد. در خروجی مدل مشخص گردید که حدود هشت درصد از منطقه دارای فرونشست با درجه زیاد بوده که وضعیت محدوده را در شرایط نامناسب براساس داده‌ها نشان می‌دهد و نیاز به کنترل و مدیریت به منظور کمتر شدن این اثر تخریبی می‌باشد.

واژگان کلیدی: رادار، سنتینل، رگرسیون لجستیک، فرونشست، سلفچگان.

مقدمه

در بررسی فرونشست، گام اصلی، تشخیص محدوده و نرخ این واقعه است که امروزه این امکان با استفاده از پردازش تصاویر راداری فراهم شده است. از آنجایی که واقعه فرونشست، واقعه ای مکانی است با استفاده از آنالیزهای مکانی و تحلیل ها در سیستم اطلاعات مکانی، می توان به بررسی عوامل ایجادکننده فرونشست پرداخت. همچنین به منظور مدیریت و جلوگیری از خسارات ناشی از فرونشست می توان با مطالعه رابطه مکانی، میان فرونشست و تأسیسات زیربنایی و نقاط حساس، تصمیم گیرندگان را در مدیریت بحران فرونشست یاری نمود.

با راهیابی ماهواره های راداری از دهه ۱۹۹۰، تداخل سنجی راداری ماهواره ای به نام ابراری در راستای پایش جابه جایی های سطح زمین مورد استفاده متخصصان علوم زمین بنا شد (شیرانی، ۱۳۹۲: ۲۳). این شیوه از نظر صرفه جویی در هزینه و زمان و فراوانی مکانی و زمانی در تطبیق با شیوه های دیگر قابلیت خیلی زیادی دارد؛ تا هنگامی که در زمان حال از فن تداخل سنجی راداری به جای ترازبایی و سامانه مکانیابی جهانی در اندازه گیری های میزان زمین بسیار زیاد استفاده شده است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۵).

مارتیکاس و همکاران، (۲۰۱۹) اقدام به تحلیل جابه جایی زمین در محدوده کر در یونان بر اثر استخراج آب های زیرسطحی با استفاده از متد تداخل سنجی مایکروویو یا روزنه دهانه مصنوعی نمودند. در این محدوده در طول ۲۰ سال، ۴۰ متر سطح آب های زیرسطحی کاهش داشته و در بعضی موارد ترک بتن فونداسیون ها و سازه های مسکونی محدوده، نمایانگر بیش از ۱ سانتیمتر در یک دوره استخراج آب بوده است. در این پژوهش از داده های مایکروویو و تداخل سنجی تفاضلی از داده های ALOS-PAL در فاصله زمانی ۱۹۹۲-۲۰۰۰ و ۲۰۰۷-۲۰۰۹ استفاده گردید. به منظور رسیدن به اهداف پژوهش از ۲۹ داده ماهواره ای جهت استخراج اینترفروگرام استفاده گردیده بود. نتایج حاصل از پژوهش نمایانگر ۴ سانتی متر جابه جایی در سال می باشد.

هو و هونگ (۲۰۲۲) اقدام به تحلیل میزان جابه جایی در شهر یونلین تایوان در بازه زمانی سال های ۱۹۹۶-۱۹۹۹ با استفاده از متد تداخل سنجی مایکروویو یا روزنه دهانه مصنوعی نمودند. این شهر در محدوده ساحلی تایوان می باشد که درگیر جابه جایی بالا بوده که دلیل اصلی آن فعالیت کشاورزی می باشد. نتایج حاصل از پژوهش میزان جابه جایی را ۱۴/۳ سانتی متر در سال تخمین زد. نرخ بالای جابه جایی قائم در این محدوده موجب آسیب به زیرساخت های شهری گردیده است.

اربان و همکاران^۱ (۲۰۲۱) اقدام به تحلیل نرخ جابه جایی در دلتای مکنون ویتنام نمودند. در این پژوهش با استفاده از ۸۷ داده متفاوت و تداخل سنجی تفاضلی از داده ALOS، متوسط جابه جایی محدوده حدود ۱/۶ سانتیمتر در سال تخمین زده شد. بعد از آن پیوند میان میزان جابه جایی با پراکنش مکانی ۲۹ چاه در ۱۸ موقعیت مکانی مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاکی از پیوند مستقیم میان آن ها بوده و استخراج آب های زیرسطحی دلیل اصلی جابه جایی قائم در محدوده بود.

چن و همکاران^۲ (۲۰۲۰) به شناسایی جابه جایی زمین ناشی از استخراج آبخوان زیرسطحی در پکن (چین) با استفاده از تداخل سنجی راداری ماهواره ای پرداختند. در این پژوهش، از راهبرد Small Baseline In تداخل سنجی تفاضلی به منظور تحلیل و بررسی داده انوی ست بهره گرفت شد. تصاویر Terra در باند X از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ به منظور تحلیل جابه جایی زمین در محدوده پکن استفاده شد. نتایج تحلیل های به دست آمده، بیشینه جابه جایی را در قسمت شرقی پکن با میزان بیش از ۱۰۰ میلی متر در سال نشان داد. مقایسه میان نرخ جابه جایی حاصل از تداخل سنجی تفاضلی و GPS نشان از اختلاف ۲/۹۴ میلی متر در سال با میانگین ۲/۸۴ میلی متر در سال دارد. علاوه بر این میان نقشه های تولیدی که از دو مجموعه اطلاعات متفاوت Envisat و Terra حاصل شد، همبستگی بالایی را داشتند و بعضی از روابط جالب از نظر جابه جایی زمین با سطح آبخوان زیرسطحی، گسل های فعال، ضخامت خاک نرم انباشته و انواع سفره یافت گردید. علاوه بر این، یک رابطه برای فاصله تا چاه های پمپاژ نیز در این کار معرفی شد.

تسیستور و همکاران^۳ (۲۰۱۸) به بررسی انتقالات بر اثر اطلاعات تداخل سنجی رادار در اطراف معدن زغال سنگ Seruci-Nuraxi Figus (واقع در ساردنیه، ایتالیا) پرداختند. در این مطالعه از فن پیشرفته دیفرانسیل افتراقی مصنوعی

¹ Erban et al, 2014² Chen et al, 2016³ Tessitore et al 2018

Interferometric Synthetic DIn برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های مرتبط به معدن زغال‌سنگ بکار گرفته اند. اطلاعات CSK (COSMO-SkyMed)، که در چارچوب سومین برنامه غیرمعمولی پروژه سنجش از محیط‌زیست با بکارگیری از فن PSP-IF تداخل سنجی تفاضلی به‌دست آمده است، به منظور تجزیه و تحلیل تغییر شکل‌های اتفاق افتاده بین سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ در منطقه مورد پژوهش به کار گرفته شد. در دسترس بودن داده‌های به‌دست آمده در هندسه‌های صعودی و نزولی کمک نمود تا به محاسبه مؤلفه جابجایی عمودی دست یافته شود. بر این قاعده، بیشینه جابه‌جایی در حدود ۲۵ سانتی‌متر در فاصله سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ اندازه‌گیری گردید. افزون بر این، پروفایل‌های تغییر شکل عمودی با گذشت زمان نیز به جهت تجزیه و تحلیل توسعه پویا و تغییر شکل زمین انجام گردید. اندازه‌گیری‌های تداخل سنجی تفاضلی اجازه می‌دهد تا اطلاعات مرتبط به توسعه مکانی و زمانی یک پدیده، به منظور درک مکانیسم اثر و بهبود مدیریت بهتر منابع انجام گیرد.

شومان و وجدیان (۲۰۱۹)؛ در پژوهشی این رخداد را در محدوده‌ای در کشور آلمان با تجزیه و تحلیل سری زمانی و با بهره‌گیری از تداخل سنجی بررسی نمودند. آن‌ها از مانیتورینگ سری زمانی و تداخل سنجی تفاضلی به منظور نظارت بر این پدیده در این محدوده استفاده نمودند. تمام داده‌ها از باند Sentinel-1A, C در هر دو حالت صعودی و نزولی در این پژوهش جمع‌آوری شد. دقت تجزیه و تحلیل سری زمانی موجب می‌شود نرخ زیاد فرونشست بخصوص در منطقه‌های دارای رطوبت مشاهده گردد. بنابراین، انتخاب متد مناسب برای تصحیح جوی مورد نیاز می‌باشد. در این پژوهش، تصحیح اتمسفریک بر پایه روش‌های آماری به منظور کمتر شدن تأثیر اتمسفر لحاظ گردید که نتایج آنالیز سری زمانی نشانگر سرعت پایین تغییر شکل زمین و پدیده فرونشست و جابجایی قائم می‌باشد. در دسترس بودن تداخل سنجی تفاضلی این امکان را میداد تا با بکارگیری تجزیه و تحلیل مناسب، جابجایی افقی و عمودی را حدس بزنند. نتایج سرعت کم حرکات زمین با بیشینه اندازه جابه‌جایی ۴۰۱ میلی‌متر در هر سال را نشان داد. نتایج بدست آمده از تجزیه و تحلیل سری زمانی و اطلاعات تراز آب زیرزمینی مقایسه گردید و این نتایج را تأیید نمود.

آگوستین و همکاران^۱ (۲۰۲۲)؛ در پژوهشی جابه‌جایی زمین را در دشت کانتو با استفاده از داده‌های راداری JERS و تداخل سنجی تفاضلی بررسی نمودند. این تحقیق با قصد تخمین جابه‌جایی زمین با استفاده از رادار دیافراگم مصنوعی و تداخل سنج تفاضلی انجام شد. محدوده مورد بررسی در این مطالعه در بخش غربی ژاپن، محدوده دشت کانتو واقع بود که آب‌های زیرسطحی به‌طور جدی در مقیاس کاملاً وسیع استخراج می‌شوند و هر ساله چند سانتی‌متری کاهش سطح ارتفاعی در منطقه را تولید می‌کنند. در طی تجزیه و تحلیل‌ها تغییر شکل سطح مشخص گردید که مربوط به رخداد فرونشست بود. در نتیجه تحلیل و بررسی‌ها می‌توان بیان نمود که بیشینه جابه‌جایی دشت کانتو در میان دو سال ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ حدود ۲۰۱۴ سانتی‌متر می‌باشد. این نتایج با جابه‌جایی بیان شده از اندازه‌گیری‌ها توسط محققان پیشین مقایسه گردید. از نظر کمی، توافق خوبی میان تداخل سنجی تفاضلی و نتیجه سنجش محققان که به‌صورت زمینی برداشت شده بود، ارزیابی گردید.

شی و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی جابه‌جایی حوضچه‌ها در وینک (واقع در تگزاس) از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ با تجزیه و تحلیل سری زمانی و تداخل سنجی تفاضلی را بررسی نمودند. آن‌ها از تداخل سنجی و سری زمانی به منظور تحلیل و بررسی ۱۶ دسته داده از ماهواره راداری ALOS به منظور تحلیل پایداری زمین استفاده نمودند. نتایج آنها به‌وضوح نشان می‌دهد که دو حوضچه اصلی واقع در محدوده که در سال ۱۹۸۰ و ۲۰۰۲ تشکیل گردیده بود دچار فرونشست شده اند، اما بیشینه جابه‌جایی در دوره‌ای ۴ ساله (۲۰۱۱ - ۲۰۰۷) در محدوده‌ای در حدود ۱ کیلومتری شمال شرقی حوضچه‌ها در وینک می‌باشد. اوج نرخ جابه‌جایی در طول سال ۲۰۱۰-۲۰۰۲ به ۴۰ سانتی‌متر در سال رسید.

هو و همکاران (۲۰۲۱)؛ در پژوهشی جابه‌جایی زمین توسط آنالیز تداخل سنجی تفاضلی در ساحل نام دین چین را شناسایی نمودند. این مقاله شناسایی و تجزیه و تحلیل جابجایی‌ها در این محدوده را بر اساس متدهای تداخل سنجی و افتراقی را دنبال نمود به‌منظور رسیدن به الگوهای تغییر شکل زمین، از فن (Small Baseline Subset) SBAS و نرم‌افزار تخصصی GMT برای تداخل سنجی تفاضلی در این تحقیق استفاده شد. بر اساس این راهبرد از ماه مارس ۲۰۱۷ تا اکتبر ۲۰۱۸، داده‌ها از باند

¹ Augustin et al, 2019

C ماهواره سنتینل دریافت و تحلیل و بررسی گردید تا اطلاعات ارتفاعی زمین در کل ساحل نام دین استخراج شود. نتیجه تحقیق نشان داد که جابجایی‌های محاسبه‌گردیده از ۲۱ تا ۲/۵ میلی‌متر در سال متغیر می‌باشد.

تداخل سنجی تفاضلی راداری تغییرات فاز را از دو زوج تصویر راداری که در زمان‌های مختلف بدست آورده را تخمین می‌زند، و با دقت به آن؛ دگرگونی‌های به وجود آمده در پوسته زمین را به شیوه کمی و کیفی مشخص می‌کند (پاچکو و همکاران^۱، ۲۰۰۶: ۴۸) در ایران هم در چند سال گذشته از این فن در پایش تبدیل تصویرهای متفاوت سطح زمین بهره‌گیری شده است. در این تحقیق تلاش شده است نسبت به شناخت از مناطق شامل فرونشست با بهره‌گیری از تداخل سنجی راداری در دشت سلفچگان پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

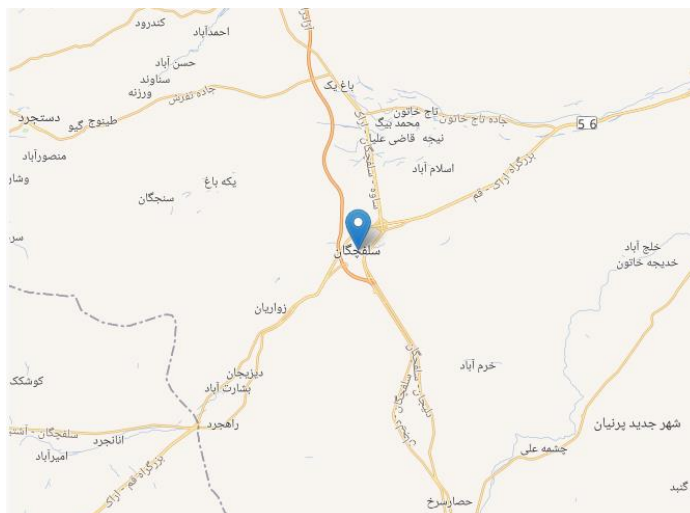
بر حسب هدف، تحقیق موجود جزء تحقیق‌های کاربردی، دسته بندی می‌شوند و روش جمع‌آوری اطلاعات آن کتابخانه‌ای- میدانی است. داده‌های استفاده شده در این تحقیق از سازمان آب منطقه‌ای، سازمان منابع طبیعی و سازمان مدیریت بحران و داندود تصاویر ماهواره‌ای موردنیاز از سایت‌های مرتبط تامین گردید. داده‌های تهیه‌شده حاوی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱، کاربری اراضی تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، مدل رقومی ارتفاعی، نقشه زمین‌شناسی و داده‌های هواشناسی است. به‌طور کلی روش انجام این پژوهش عبارت است از:

۱. تهیه داده‌های راداری ماهواره‌ی Sentinel - 1A که قدرت تفکیک مکانی به‌مراتب بالاتری نسبت به داده‌های معمول در پژوهش‌های پیشین دارد، به همراه داده‌های مورد نظر از نظیر مشخصات تصاویر اخذ شده از آژانس فضایی اروپا.
۲. پردازش داده‌های دریافت شده از طریق نرم‌افزار اسنپ و انوی صورت گرفت، این نرم‌افزار کم و بیش کلیه پردازش‌های اصلی داده‌های راداری ماهواره سنتینل ۱ را مثل انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریکی، تعدیل ویژگی اسپکل، به همراه تداخل سنجی راداری را به‌صورت متن‌باز و همراه با لایسنس معتبر حمایت می‌کند.
۳. بررسی و صحت سنجی نتایج به کمک داده‌های پیزومتری و GPS.
۴. محاسبه نشست به کمک روابط تقریبی ژئوتکنیکی و مقایسه با نتایج پردازش تداخل سنجی راداری.
۵. شناخت مناطق مستعد فرونشست در دوره زمانی مورد نظر با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک

محدوده مورد بررسی

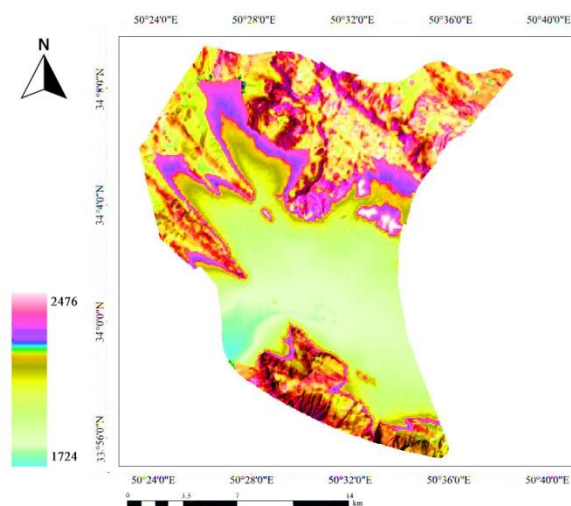
دشت سلفچگان واقع در شهرستان سلفچگان، استان قم می‌باشد. دشت سلفچگان در ۳۵ کیلومتری غرب قم شده، این قسمت غرب استان در مسیر جاده اراک - قم واقع گردیده می‌باشد. دشت سلفچگان را می‌توان یکی از قدیمی‌ترین شهرهای غرب استان قم نامید. این شهرستان در سال‌های اخیر به دلایل مختلفی با فرونشست روبه‌رو بوده است. شکل (۱) موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

¹ Pacheco et al, 2006



نتایج

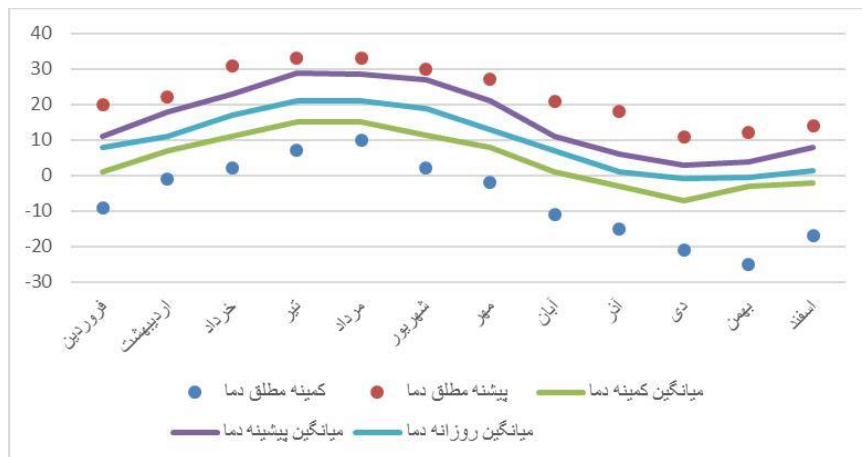
نقشه ارتفاعی محدوده سلفیگان (استان قم)



شکل (۲): نقشه ارتفاعی محدوده مورد مطالعه

وضعیت دمای منطقه

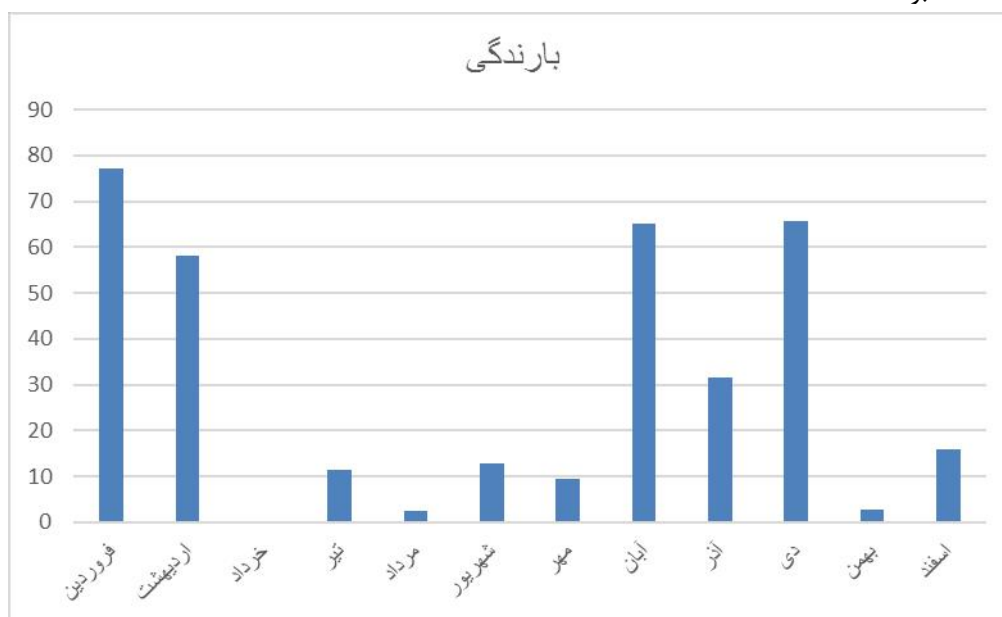
دشت سلفچگان از بهار و تابستانی معتدل و زمستانی بسیار سرد برخوردار می‌باشد. طبق آمار موجود در بازه زمانی (۱۳۹۳-۱۳۹۸)، درجه حرارت سالیانه آن ۱۰/۴ درجه سانتیگراد برآورد شده است.



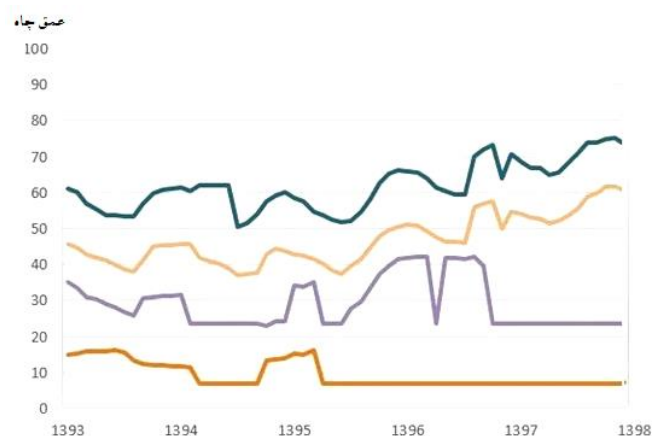
شکل (۳): رژیم دمایی سلفچگان از سال ۱۳۹۳-۱۳۹۸

وضعیت بارندگی منطقه

شهرستان سلفچگان در میان تمام فصل‌ها دارای زمستان‌های پر بارانی است، این فصل ۴۸٪ از کل بارش سالانه را به خود اختصاص داده است. فصول پاییز و بهار با بارشی حدود ۳۲/۵ و ۱۹ درصد از بارش سالانه دومین و سومین فصول پر باران در شهرستان مورد مطالعه بوده است.



شکل (۴): متوسط بارش ماهی مختلف در بازه زمانی (۱۳۹۳-۱۳۹۸)



شکل (۵): تغییرات میزان افت سطح آبهای زیرزمینی چاههای نمونه از تعداد مورد مطالعه دشت سلفچگان از سال ۱۳۹۳-۱۳۹۸

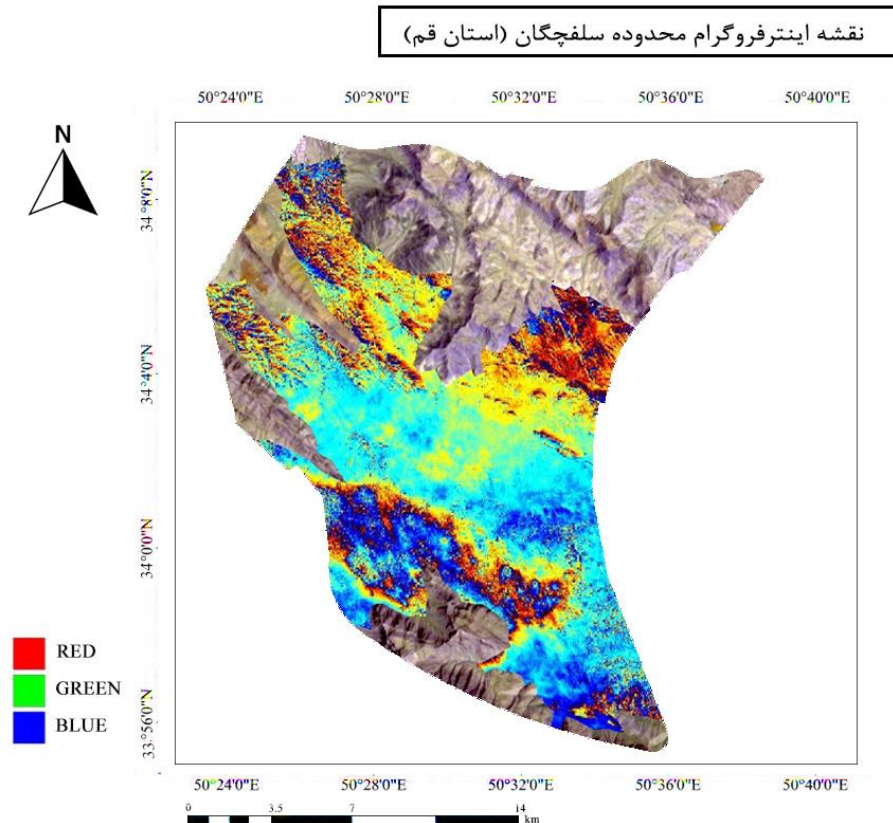
خط مبنای زمانی به فاصله زمانی بین اخذ دو تصویر گفته می‌شود این پارامتر نیز یکی دیگر از عوامل مهم در تشکیل تداخل نگار است، به این صورت که اگر فاصله زمانی بین اخذ دو تصویر زیاد باشد ممکن است تغییراتی در اهداف زمینی صورت بگیرد که این مسئله موجب کاهش یا احتمال کاهش وابستگی سیگنالی بین دو تصویر شده و باعث افزایش نویز در تداخل نگار می‌شود. این مشکل در مناطقی با پوشش گیاهی بیشتر اتفاق می‌افتد که برای جلوگیری از این مسأله باید زوج تصاویر در ماه‌های مشابه و به دور از فصول زراعی انتخاب گردند. پارامترهای مطرح شده با توجه به پارامترهای مداری سنجنده و ویژگی‌های منطقه مطالعاتی مورد توجه کاربران قرار می‌گیرند. اصولاً ویژگی‌های مربوط به همپوشانی مکانی و طیفی به ترتیب ۵۰ و ۹۰ درصد در راستای آزمایشات در نظر گرفته می‌شود (چاموندسوری و همکاران، ۲۰۰۸). در این پژوهش داده‌های SAR دانلود گردید اطلاعات مربوط به است (جدول (۱)).

جدول (۱): زوج تصاویر انتخابی از سنجده سنتینل

نام اختصاری انتخابی	تاریخ تصویربرداری
SIC	۲۰۱۴/۶/۲۵
SLC	۲۰۱۹/۶/۵

تولید تداخل نگار

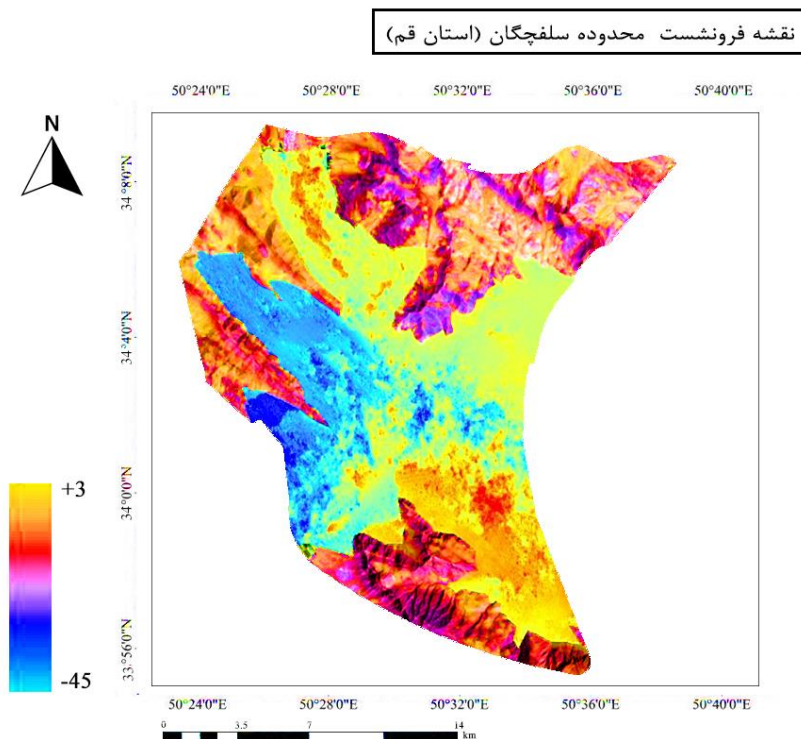
منظور از تداخل نگار این است که اختلاف فاز ناشی از تغییر فاصله بین پدیده و سنجنده را در دو عبور متوالی نمایش دهد. فاصله یک نقطه یا پدیده خاص بر روی زمین از سنجنده در دو عبور متفاوت، با محاسبه اختلاف فازی بدست آمده از دو تصویر در فرم مختلط، محاسبه می‌گردد. فاز به دست آمده از این ضرب مختلط یک فاز تفاضلی است و حاصل فازهای مربوط به توپوگرافی، فاز اصلاح شده در نتیجه تغییرات مداری، فاز مربوط به اختلال اتمسفر و در نهایت فاز حاصل از جابجایی احتمالی پوسته سطحی زمین می‌باشد.



شکل (۶): نقشه اینترفروگرام تولیدشده از تصویر رادار

تعیین میزان فرونشست در منطقه مطالعاتی

بعد از تعیین میزان فرونشست برای زوج تصویر مورد نظر میزان فرونشست رخ داده در منطقه مطالعاتی در بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ مشخص گردید. با توجه به نتیجه به دست آمده از تحلیل تصاویر راداری که در شکل شماره (۶) و نقشه کلاس‌بندی شده آن در شکل شماره (۷) ارائه شده است، تغییر سطح در منطقه بین سطح ۳+ داشته‌ایم بجز مناطق پایکوهی به علت جمع شدن رسوبات تا ۴۵- سانتیمتر بوده است. مطابق نقشه موجود مناطق بالاآمده در غرب مساحت اندکی از منطقه را به خود اختصاص داده است و به‌صورت لکه‌های پراکنده در راستای گسل موجود در منطقه مشاهده می‌شود. مناطق دارای فرونشست در بخش‌های شمالی و جنوبی و به‌صورت لکه‌هایی در بخش‌های مرکزی منطقه پراکنش یافته است مناطق فرونشینی در جنوب و مرکز دقیقاً منطبق بر چاه‌های پیرومتری بوده که به دلیل کاهش سطح آبهای زیرزمینی و استفاده بیش از حد آن در صنعت و کشاورزی بوده است. با برداشتی که از اطلاعات موجود در نقشه کلاس‌بندی می‌شود.



شکل (۷): نقشه فرونشست منطقه مطالعاتی دشت سلفچگان

نتیجه گیری

با توجه به تحلیل‌های انجام شده و نتایج حاصله از پردازش تصاویر راداری منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ مشخص شد (شکل شماره ۴-۵)، که تغییرات سطح زمین بین ۳ تا ۴۵- سانتیمتر بوده است. مناطق دارای فرونشست نیز در قسمتی از شمال و جنوب و به صورت لکه‌های پراکنده در قسمت‌های مرکزی منطقه اتفاق افتاده است. با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول شماره (۴-۲)، مناطق با فرونشست ۳ تا ۱۱-، ۱۱- تا ۱۸- و ۱۸- تا ۲۳- سانتی‌متر هر کدام به ترتیب مساحتی بالغ بر ۱۷۷۴، ۵۶۲۰ و ۱۰۴۰۳ هکتار که به ترتیب معادل ۶/۸۷، ۲۱/۷۷ و ۴۰/۳۰ درصد از کل منطقه را شامل می‌شوند. مناطق با فرونشست ۲۳- تا ۲۷- و ۲۷- تا ۴۵- سانتیمتر نیز هر کدام به ترتیب مساحتی بالغ بر ۵۴۹۵ و ۲۵۱۹ هکتار که به ترتیب معادل ۲۱/۲۸ و ۹/۷۵ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص داده است.

بررسی لایه پراکنش چاه‌های مورد مطالعه با نقشه فرونشست حاصل از تصاویر راداری ارتباط مستقیم بین فرونشست سطح زمین با کاهش سطح آب‌های زیرزمینی را اثبات می‌کند. با بررسی سطح آب‌های زیرزمینی در طول ۶ سال (شکل ۲-۴ و جدول ۲-۴)، افزایش عمق چاه‌ها در تمامی چاه‌ها به روشنی مشخص است همچنین اشاره به رابطه ۸-۴ که سطح آب بیشترین تاثیر را بر روی فرونشست دارد و از طرفی دیگر پراکنش مکانی چاه‌ها دقیقاً منطبق بر مناطق با فرونشست متوسط و بیشتر بوده است. کلاس با خطر متوسط از نظر مکانی در مناطق دامنه‌ای-دشتی پراکنش داشته و مانند هاله‌ای دشت مرکزی منطقه را در داخل خود جای داده است، این کلاس مساحتی حدود ۹۵۶۰ هکتار معادل ۳۸/۳ درصد از کل مساحت را به خود اختصاص داده است. کلاس با خطر زیاد در مجاورت مناطق با خطر متوسط و در مرکز منطقه مطالعاتی قرار دارد، این کلاس نیز مساحتی بالغ بر ۸۲۰۱ هکتار معادل ۳۲/۹ درصد از مساحت کل را شامل شده است. کلاس‌های با خطر متوسط، زیاد و خیلی زیاد در مناطق دشتی بیشترین پراکنش مکانی را داشته، از طرفی نقاط چاه‌های عمیق در بخش‌های دشتی حفر شده‌اند که افزایش سطح آب‌های زیرزمینی با فرونشست رابطه مستقیمی دارد.

هدف اصلی این پژوهش بررسی خطر فرونشست زمین و پهنه‌بندی آن در دشت سلفچگان با استفاده از فن تداخل سنجی راداری به منظور آشکارسازی میزان فرونشست در سال‌های اخیر و سپس پهنه‌بندی آن با استفاده از روش رگرسیون لجستیک

بوده است در راستای اهداف پژوهش ابتدا یک زوج تصویر با بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ از سنجنده سنتینل در عبورهای صعودی و نزولی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل تداخل سنجی راداری در این پژوهش نشان داد که تغییر سطح در منطقه بین ۳ تا ۴۵- سانتیمتر بوده است. مناطق بالآمده در غرب منطقه و به‌صورت لکه‌های پراکنده‌ای در راستای یک در بخش‌های میانی منطقه مشاهده شده است. مناطق دارای فروشت نیز در بخش‌های شمالی و جنوبی و به‌صورت لکه‌هایی در بخش‌های مرکزی منطقه پراکنش یافته است مناطق فرونشینی در جنوب و مرکز دقیقاً منطبق بر چاه‌های پیزومتری بوده است که از دلایل آن کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و استفاده بیش از حد آن در صنایع و کشاورزی بوده باشد.

در پایان برای ارائه بهتر تحقیقات آتی و مدیریت منابع موجود در داشت دامنه و جلوگیری از خسارات احتمالی به زیرساخت‌های این منطقه پیشنهاد میشود، در صورت دسترسی به اطلاعات‌های مایکروویو یا روزنه دهانه مصنوعی با مدت زمان کوتاه تر، به جهت افزایش دقت در تخمین میزان جابه‌جایی از آن‌ها استفاده گردد.

منابع

- [۱] آروین، عبدالخالق، وهابزاده کبریا، قربان، موسوی، سید رمضان، بختیاری کیا، مسعود، ۱۳۹۸. مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال دهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۸، صص ۱۹-۳۳.
- [۲] اسکانی کزازی، غلامحسین، حامدی، مریم، لاله سیاه پیرانی، میترا، ۱۳۸۹. فرونشست زمین، بحران، ریسک و مدیریت آن، مجموعه مقالات همایش ملی جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.
- [۳] اصلاح، مهدی، ۱۳۹۴، کاربرد روش‌های نوین سنجش‌ازدور و تداخل سنجی راداری در مقایسه با سایر روش‌های کلاسیک در تحلیل رانش زمین، همایش یافته‌های نوین در هوافضا و علوم وابسته، تهران، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران،
- [۴] پور خسروانی، محسن، ۱۳۹۴، بررسی و تحلیل علت فرونشست دشت‌ها و اثرات آن، اولین کنفرانس بین‌المللی علوم جغرافیایی، شیراز، موسسه عالی علوم و فناوری خوارزمی،
- [۵] حافظی مقدس، ناصر، غفوری، محمد، ۱۳۸۸. زمین‌شناسی زیست محیطی. چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
- [۶] حقیقت مهر، پریرسا، ولدان زوج، محمدجواد، تاجیک، رضا، جباری، رضا، صاحبی، محمود رضا، اسلامی، رضا، گنجیان، مصطفی، دهقانی، مریم، ۱۳۹۱. تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سامانه موقعیت‌یابی جهانی. علوم زمین، پاییز ۹۱، سال بیست و دوم، شماره ۸۵، صص ۱۰۵-۱۱۴.
- [7] Fruneau, B. & Sarti, F., 2000- Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: Isolation from atmospheric artefacts using correlation, Geophysical Research Letters, 27(24): 3981-۳۹۸۴.
- [8] Garsia - Rodriguze M.J., Malpica J.A, Benito B., Diaz, M.2008. Susceptibility assessment of earthquake - triggered landslide in EI Salvador using .logistic regression geomorphology, Vol. 95, PP: 172-۱۹۱
- [9] Hao, Q. N., & Takewaka, S. (2019, September). Detection of Land Subsidence in Nam Dinh Coast by Dinsar Analyses. In International Conference on Asian and Pacific Coasts (pp. 1287-۱۲۹۴). Springer, Singapore.
- [10] Heywood, C. E., 1997- Piezometric-extensometric estimations of specific storage in the Albuquerque Basin, New Mexico, in U.S. Geological Survey Subsidence Interest Group Conference: Proceedings of the technical meeting, U.S. Geological Survey Open-File Report 97-۴۷, pp. 21-۲۶.

- [11] Hoffman, J., Galloway, D. L., Zebker, H. A. & Amelung, F., 2001- Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry, *Water Resour. Res.*, 37(6): 1551-۱۵۶۶.
- [12] Hua, R. L., Z. Q. Yueb, L. C. Wanga & S. J. Wang, "Review on Current Status and Challenging Issues of Land Subsidence in China", *Elsevier Science-Engineering Geology*, Vol. 76, Pp. 65-۷۷, 2004.
- [13] Huanyin, Y., R. Hanssen, F. Leijen & P. Marinkovicand, Land Subsidence Monitoring in City Area by Time Series Interferometric SAR Data, National Natural Science Foundation of China (40301032), KGW Project Report, 2005.
- [14] Lanari, R., Lundgren, P., Manzo, M. & Casu, F., 2004- Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters*, 31, doi:10.1029/2004GL021294.
- [15] Lanari, R., Lundgren, P., Manzo, M. & Casu, F., 2004- Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters*, 31, doi:10.1029/2004GL021294. *Landscape and Urban Planning*, 75(1): 69-۸۰.
- [16] Lee, S., Sambath Touch. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei romal area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models, the journal of environmental geology, Vol. 50, PP: 847-۸۵۵.
- [17] Li.C . Tang.X , Tuhua.M , (2006) , Land subsidence caused by groundwater exploitation in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain, China , Springer, *Hydrogeology Journal* 14: 1652-1665. Located, Assess on September 2011: <http://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165>.
- [18] Lusch, D. P. (1999). Introduction to microwave remote sensing. *Center for Remote Sensing and Geographic Information Science Michigan State University*.
- [19] Margarita, M., F. Georgi, Y. Ilia & I. Plamen, UNESCO- bas Project of Land Subsidence Research in the Region of the Sofia, Skopje and Tirana Cities, *Geoindicators*, Pp. 31-۳۳, 2005.
- [20] Mertikas, S. P., Papadaki, E. S., & Paleologos, E. (2009, November). Radar Interferometry for Monitoring Land Subsidence due to over-pumping Ground Water in Crete, Greece. In *Proceedings of the fringe workshop, Frascati, Italy* (Vol. 30).
- [21] Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzell, H. U., Zschau, J. & Arabi, S., 2006- Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, leveling and GPS, *Geophys. J. Int.*, 168, doi: 10.1111/j.1365