

صص ۲۳-۱

تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: مرو دشت استان فارس)

محمد ابراهیم عقیقی *

دانشیار گروه جغرافیا، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران

اسماعیل اژدري

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۴

چکیده

فرونشست سطح زمین از جمله مخاطرات محیطی است که بشر در دهه‌های اخیر به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در دشت‌ها با آن مواجه است. آبخوان دشت مرو دشت نیز در مهر و موم‌های اخیر به صورت چشمگیر با این پدیده روبه‌رو شده است. قرار گرفتن بناهای تاریخی مانند تخت جمشید در این آبخوان، مسئله بررسی فرونشست را حائز اهمیت می‌نماید. هدف از این پژوهشی تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: مرو دشت استان فارس) است. در این پژوهش، به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی از روش زمین‌آمار کریجینگ و برای برآورد میزان فرونشست سطح زمین از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و از تصاویر راداری سنتینل-۱ پرداخته شده است. بعد از تعیین میزان فرونشست برای زوج تصویر مورد نظر میزان فرونشست رخ داده در منطقه مطالعاتی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ مشخص گردید. با توجه به نتیجه به دست آمده از تحلیل تصاویر راداری و با توجه به نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش کریجینگ حداقل میزان فرونشست در منطقه $0.09 \pm$ متر و حداکثر آن $0.344 \pm$ متر است. بیشتر محدوده مورد مطالعه یعنی مساحتی حدود $355/5$ کیلومتر مربع و به نوعی $30/9$ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی کم بوده و مساحتی حدود $67/1$ کیلومتر مربع برابر با $5/5$ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی زیاد است که این قسمت‌ها شامل قسمت شرق دشت مرو دشت اطراف اماکن تاریخی نقش رستم و تخت جمشید (روستاهای شمس‌آباد، حسین‌آباد، شول، جلیلیان و زنگی‌آباد) و بخش کوچکی از شمال محدوده مورد مطالعه (روستاهای درود زن و مابین) می‌باشند. با توجه به تداوم شرایط پدیده نشست در این دشت، تداوم پایش و بررسی سنجش از دوری، احداث و ایجاد ایستگاه‌های اندازه‌گیری ثابت GPS می‌تواند ضمن فراهم آوردن امکان پایش نرخ و دامنه نشست، امکان خوبی برای بررسی نتایج حاصل از روش‌های سنجش از دوری و بهینه کردن این روش‌ها را فراهم نماید.

واژگان کلیدی: فرونشست زمین، تداخل سنجی راداری، تصاویر ماهواره‌ای، مرو دشت.

مقدمه

با ورود ماهواره‌های راداری از دهه ۱۹۹۰، فن تداخل سنجی راداری ماهواره‌ای به عنوان ابزاری جهت پایش جابه‌جایی‌های سطح زمین مورد استفاده متخصصان علوم زمین قرار گرفت (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۹). این روش از نظر صرفه‌جویی در هزینه و زمان، و فراوانی مکانی و زمانی در مقایسه با روش‌های دیگر قابلیت بسیار بالایی دارد؛ تا جایی که امروزه استفاده از فن تداخل سنجی راداری به جای تراز یابی و سامانه مکان‌یابی جهانی در اندازه‌گیری‌های سطح زمین بسیار تداول یافته است (حیدری و همکاران: ۱۴۰۰). تداخل سنجی تفاضلی راداری تغییرات فاز را از دو زوج تصویر راداری که در زمان‌های مختلف اخذ شده‌اند محاسبه می‌کند، و با توجه به آن؛ تغییرات به وجود آمده در پوسته زمین را به صورت کمی و کیفی آشکار می‌کند (خورشیدی و همکاران^۱، ۱۴۰۰) در ایران نیز در چند سال اخیر از این فن در پایش تغییر شکل‌های مختلف سطح زمین استفاده شده است (اصلان و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از مشکلات اساسی و روزافزون به وجود آمده در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران، پدیده فرونشست است (اربان و همکاران، ۲۰۱۸). این پدیده که عبارت است از حرکت قائم یا نشست تدریجی و یا فرورفتن ناگهانی سطح زمین، می‌تواند متأثر از عوامل طبیعی (آتش‌فشان، ریزش زمین در محل سنگ‌های انحلال‌پذیر، گسل، رانش قاره‌ای، چین‌خوردگی و آتش‌سوزی) و عوامل انسانی (استخراج معادن، استخراج آب زیرزمینی و نفت و گاز، و ساخت‌وساز شکل گیرد؛ هرچند محوریت رویداد آن متوجه دو عامل اصلی استخراج آب زیرزمینی و کارستی شدن سنگ‌های انحلال‌پذیر است (دیده‌بان و همکاران، ۱۴۰۰) در مهر و موم‌های اخیر، مناطق مختلفی از دنیا به خصوص نقاط خشک و کم‌باران با این پدیده روبرو شده‌اند (روهینا و همکاران، ۱۴۰۰). نشست زمین بر اثر برداشت بی‌رویه از لایه‌های آبدار زیرزمینی، معضل و مخاطره‌ای است که جوامع ساکن بر آن را در سطوح بین‌المللی تهدید می‌کند. بر اساس برآورد کارشناسان، بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه‌یافته تا در حال توسعه در معرض این پدیده‌اند (سهرابی و عفیفی، ۱۴۰۱؛ علی مرادی و همکاران، ۱۴۰۱). مهم‌ترین علت فرونشست سطح زمین در حوضه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه‌خشک، تراکم سفره‌های آب زیرزمینی در اثر استخراج بی‌رویه از این منابع است (پاچیکو و همکاران، ۲۰۰۶). در ایران نزدیک به شصت دشت وجود دارد که بر اثر اعلام نظر کارگروه فرونشست زمین و حفاظت از منابع آب زیرزمینی بیش از نیمی از آن دشت‌ها مستعد پدیده فرونشست هست (عفیفی و همکاران، ۱۴۰۱). در این راستا، به منظور شناسایی و کاهش پیامدهای احتمالی ناشی از فرونشست زمین، ایجاد یک سامانه پایش دائمی فرونشست ضروری به نظر می‌رسد، به گونه‌ای که ضمن تعیین مناطق مستعد فرونشست، برای مناطق با نرخ نشست بالا، راهکارهایی در نظر گرفته شود و از خسارت‌های جانی و مالی احتمالی جلوگیری شود. (Skenderas D, Loupasakis C, Papoutsis I, Alatzas S, Kontoes C. 2021). برداشت بیش از حد آب از سفره‌های آبی در بیشتر استان‌های ایران در مهر و موم‌های اخیر باعث رخداد پدیده فرونشست در اکثر دشت‌ها و حتی در مواقعی باعث خشک شدن کامل چاه‌ها و نابودی دشت‌ها و تخلیه جمعیت آن‌ها شده است. (فتح الهی و

¹ Pacheco et al, 2006

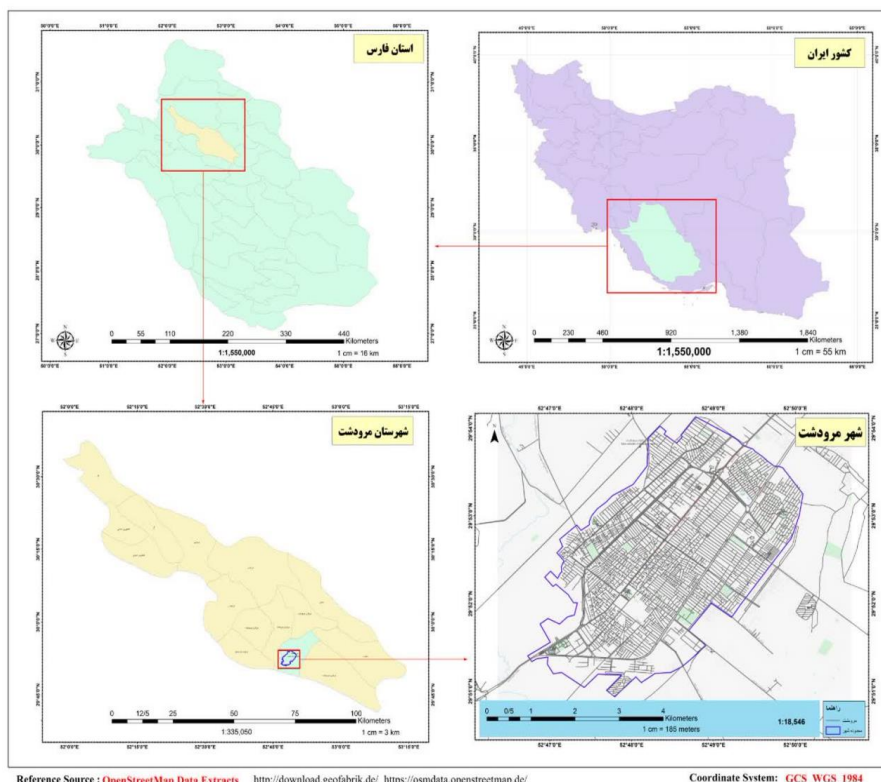
همکاران، ۱۴۰۱) استان فارس و به تبع آن منطقه مرودشت نیز با توجه به شرایط اقلیمی که در آن واقع شده است شرایطی بسیار شکننده دارد. دشت مرودشت به عنوان یکی از مهم ترین دشت های استان فارس در کمربند چین خورده زاگرس و در فاصله ۴۰ کیلومتری شمال شیراز قرار دارد. به دلیل پتانسیل و حاصلخیزی زمین های کشاورزی این منطقه به عنوان قطب اصلی کشاورزی در استان فارس محسوب می شود. (مرادی و همکاران، ۱۴۰۰) توجه به بررسی های انجام شده خشک سالی چند سال اخیر و همچنین کاهش میزان ذخیره سفره های آب زیرزمینی به همراه تداوم برداشت آن، سبب تشدید افت سطح آب زیرزمینی در منطقه شده است. دلیل این موضوع را می توان رشد جمعیت و دسترسی به مکانیزم های جدید حفاری که سبب سهولت برداشت در مکان های مختلف، اعماق زیاد و اقدام به حفاری در سنگ بستر شده است، را نام برد. (قنادیان و همکاران، ۱۴۰۰) همه این عوامل بر کاهش آبدی چاه ها و کیفیت آب آن ها، فرونشست زمین و خسارت به زیرساخت های شهری و روستایی این منطقه را به یک موضوع مهم و البته قابل پیشگیری تبدیل کرده است. (رجبی و همکاران، ۱۴۰۳) در این پژوهش قصد بر آن است تا میزان فرونشست در منطقه برآورد گردد و رابطه آن با چاه های پیژومتری مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت به پیش بینی میزان فرونشست در مهر و موم های آتی پرداخته شود. (مقصودی و همکاران، ۱۴۰۰) با توجه به روش های موجود در این زمینه فن تداخل سنجی راداری به لحاظ هزینه، زمان و وسعت منطقه مورد مطالعه، نسبت به دیگر روش ها از توانایی بسیار بالاتری برخوردار است. (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۲) در پژوهشی با عنوان ارزیابی و پهنه بندی فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تکنیک چند معیاره آر. اس.؛ پرداختند نتایج مطالعه، در بازه زمانی مورد بررسی، ۳۷/۰ میلی متر فرونشست را در شهرستان نمین نشان داد و بیشترین مقدار فرونشست در بخش مرکزی و شمال غرب و شمال شرق شهرستان، متمرکز است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه بندی خطر فرونشست؛ معیارهای افت سطح آب و کاربری اراضی به ترتیب با ضریب وزنی ۱۸۶/۰ و ۱۶۸/۰، مهم ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مطالعاتی می باشند و به ترتیب ۱۶۸/۰ و ۲۲۲/۳۱ کیلومتر مربع از محدوده دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد می باشد که پتانسیل نسبتاً بالای این شهرستان از لحاظ فرونشست را نشان می دهد. (رنجبر باروق و فتح اله زاده، ۱۴۰۲) در پژوهشی با عنوان بررسی ارتباط فرونشست زمین و تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: شهر مشهد) به بررسی فرونشست زمین پرداختند. در این پژوهش با استفاده از تداخل سنجی راداری و روش سری زمانی SBAS در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ در محدوده شهر مشهد با انتخاب ۳۸ تصویر Sentinel-1 با فاصله زمانی مناسب، متوسط سرعت فرونشست و بر خاستگی زمین در محدوده مورد مطالعه برآورد شد. نتایج آنالیز سری زمانی تصاویر نشان داد در شهر مشهد بیشترین میزان جابجایی زمین بین ۷۷- میلی متر تا ۸+ میلی متر بوده است و مناطق دارای فرونشست در بخش های شمال شهر مشهد قرار گرفته اند که بین ۳۰ تا ۷۷ میلی متر فرونشست در سال را ثبت کرده اند. (آقا یاری و همکاران، ۱۴۰۱)، در پژوهشی به برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل) پرداختند در این پژوهشی به منظور ارزیابی فرونشست منطقه از روش تداخل سنجی راداری

و تصاویر راداری سنتینل ۱ استفاده شده است. به‌منظور پردازش اطلاعات نیز از نرم‌افزار SARscape 5.2 استفاده شده است و میزان جابه‌جایی و فرونشست از تاریخ ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ محاسبه شده است. شومان و وجدیان (۲۰۱۹)؛ به تشخیص فرونشست در منطقه بد فرانک‌هوسن آلمان با تجزیه و تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری پرداختند. آن‌ها از مانیتورینگ سری زمانی (InSAR) برای نظارت بر فرونشست در این منطقه استفاده کردند. تمام داده‌های موجود باند C، Sentinel-1A در هر دو هندسه صعودی و نزولی در این مطالعه جمع‌آوری شده است. آن‌ها از زیر مجموعه Baseline Small (SBAS) به‌عنوان یک الگوریتم سری زمانی استفاده شد تا میزان فرونشست منطقه مورد مطالعه را به دست آورند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل سری زمانی تا حدی با GNSS و داده‌های تراز شده مقایسه شده است و این مقدار را تأیید می‌کند. آگوستین و همکاران (۲۰۱۹)؛ به شناسایی فرونشست زمین شناسایی دشت کانتو با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای JERS-1 و تداخل‌سنجی SAR پرداختند. این پژوهشی با هدف تخمین فرونشست زمین با استفاده از رادار دیافراگم مصنوعی تداخل‌سنج مصنوعی (InSAR) انجام داده‌اند. هدف پژوهشی در بخش غربی ژاپن، منطقه دشت کانتو واقع شده است، جایی که آب‌های زیرزمینی به‌طور جدی در مقیاس کاملاً وسیع استخراج می‌شوند و هر ساله چند سانتی‌متری فرونشست تولید می‌کنند. در طول منطقه تجزیه و تحلیل، تغییر شکل سطح و آن تشخیص داده شد مربوط به روند فرونشست بود. لئو، آل، یو، جی، چن، بی، وانگ، ی. (۲۰۲۰)؛ در پژوهشی به پایش فرونشست شهری توسط SBAS-InSAR technique با تصاویر SAR چند پلتفرمی: مطالعه موردی دشت پکن، چین پرداختند که بدین منظور از ۴۰ تصویر ماهواره‌ای انویست آیسار و ۲۴ تصویر ماهواره‌ای رادارست ۲ برای ارزیابی تغییر شکل عمودی در این منطقه استفاده Rachida Lyazidi, Mohamed Abdelbaset Hessane, Jaouad Filali Moutei, Mohammed Bahir, (2020) در پژوهشی به توسعه روشی برای تخمین سطح آب زیرزمینی سفره‌های ساحلی در دشت گارب-بوراگ، مراکش تعبیه سیستم‌های بصری MODwater با استفاده از روش‌های سنجش از دور پرداختند این پژوهشی با هدف تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از رادار دیافراگم مصنوعی تداخل‌سنج مصنوعی InSAR انجام گرفت. هدف از این پژوهشی تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: مرو دشت استان فارس) انجام شد.

موقعیت جغرافیایی

دشت مرو دشت در عرض جغرافیایی 29° تا $29^{\circ}52'$ عرض شمالی و طول جغرافیایی 52° تا $52^{\circ}48'$ طول شرقی قرار دارد. محدوده مورد مطالعه که 4040 کیلومتر مربع مساحت و 120 متر ضخامت متوسط آبرفت، حدود 984887 هزار مترمکعب در سال پتانسیل برداشت آب دارد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده خشک‌سالی چند سال اخیر و همچنین کاهش میزان ذخیره سفره‌های آب زیرزمینی به همراه تداوم برداشت آن، سبب تشدید افت سطح آب زیرزمینی در منطقه شده است. دلیل این موضوع را می‌توان رشد جمعیت و دسترسی به مکانیزم‌های جدید حفاری که سبب سهولت برداشت در

مکان‌های مختلف، اعماق زیاد و اقدام به حفاری در سنگ‌بستر شده است، را نام برد. با توجه به داده‌های هواشناسی مقدار بارندگی منطقه ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر در سال، در بازه زمانی ۹۶ تا ۹۹ است که بیشتر بارندگی‌ها از اواسط پاییز تا فصل بهار ثبت گردیده است. محدوده مورد مطالعه دارای شیب حداکثری ۵۷/۷، شیب حداقلی ۰ با میانگین ۱/۴ درجه می‌باشد (شکل ۱)



شکل ۱. موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه

داده‌ها و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

برای پیشبرد اهداف پژوهش، از منابع داده‌ای مختلفی استفاده شده است. یکی از داده‌های اساسی پژوهش تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1 که در سایت سازمان فضایی اروپا در دسترس است، دانلود شد. اطلاعات مربوط منابع آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعاتی که شامل پراکنش چاه‌های پیزومتری و تغییرات سطح ایستابی آن‌ها که از شرکت آب منطقه‌ای استان تهیه شده است. داده‌های میدانی که با استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) به صورت میدانی برداشت شده است. برای آماده‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های موجود از نرم‌افزارهای مختلفی در طول پژوهش استفاده شد.

داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1

تصاویر مورد استفاده در این پژوهش

برای پیشبرد اهداف پژوهش از محصولات سنجنده سنتینل ۱، باند C در بازه زمانی مهر و موم‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ استفاده شده است. این داده از محصولات سطح یک تصاویر SAR، با قدرت تفکیک مکانی ۵ متر و با دوره برداشت ۱۲ روزه است. مشخصات کامل تصاویر مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. زوج تصاویر انتخابی از سنجنده سنتینل

نام اختصاری انتخابی	تاریخ تصویربرداری
SIC	۲۰۱۵/۶/۱۵
SLC	۲۰۲۰/۶/۱۵

پیش‌پردازش تصاویر Sentinel-1

در ابتدای کار تصاویر دریافتی از سازمان فضایی اروپا، توسط نرم‌افزار SARscape به فرم مطلوب و قابل پردازش تبدیل شد، تصاویر خام توسط این نرم‌افزار به فرمت SLC تبدیل شده است. سپس برای جلوگیری از پردازش حجم وسیع داده‌ها تصویر را مطابق محدوده مورد مطالعه برش داده می‌شد، در نهایت تصویر محدوده مطالعاتی جهت تخمین بیس‌لاین مکانی و تهیه اینترفروگرام مورد استفاده قرار می‌گیرد.

داده‌های مربوط به منابع آب

داده‌های مربوط به منابع آبی استفاده شده در این پژوهش اطلاعات مربوط به چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه مطالعاتی است. همچنین تعداد ۲۳ حلقه چاه اکتشافی نیز در منطقه حفر شده است. هر نقطه دارای اطلاعاتی چون طول و عرض جغرافیایی و سطح پیژومتری بوده که جهت کاربرد و تجزیه و تحلیل آن‌ها در نرم‌افزار مورد نظر، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار اکسل آماده شد. در این مطالعه تعداد ۵۶ حلقه چاه به کار گرفته شده است.

محاسبه میزان و نرخ فرونشست

نتایج حاصل از فن تداخل سنجی راداری مطابق موقعیت جغرافیایی با مرز منطقه مطالعاتی یکسان‌سازی شده است و جهت آشکارسازی فرینج‌های مشخص شده در تصاویر بر روی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. میزان فرونشست از طریق فرینج‌های مشخص گردیده و در تصاویر راداری محاسبه می‌شود و نرخ فرونشست برای منطقه مطالعاتی استخراج شده است. همچنین نقاط میدانی برداشت شده با استفاده از GPS نیز برای انجام تحلیل‌های صحت‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت.

روش درون یابی

روش درون یابی عکس فاصله وزن دار

درون یابی IDW به طور واضح فرض بر این دارد که نمونه هایی که به هم نزدیک ترند نسبت به روش IDW از مقادیر نمونه های دورتر بیشتر به هم شبیه اند. برای پیش بینی مناطق اندازه گیری نشده، اطراف موقعیت پیش بینی استفاده می کند.

روش های زمین آمار

روش زمین آمار (کریجینگ) همانند تکنیک IDW به مقادیر اطراف سطح پیش بینی وزن اختصاص می دهد. ولی این وزن تنها بر اساس فاصله بین نقاط مشاهده و پیش بینی نبوده بلکه به قرارگیری مکانی کل مقادیر اطراف نقاط اندازه گیری نیز بستگی دارد. جهت محاسبه موقعیت مکانی نقاط نسبت به یکدیگر و تأثیر آن در وزن، بایستی خود همبستگی مکانی محاسبه شود. برای تخمین زمین آماری باید مراحل زیر انجام شود :

الف) محاسبه واریوگرام تجربی؛ ب) برازش مدل؛ ج) ایجاد ماتریس؛ د) پیش بینی.

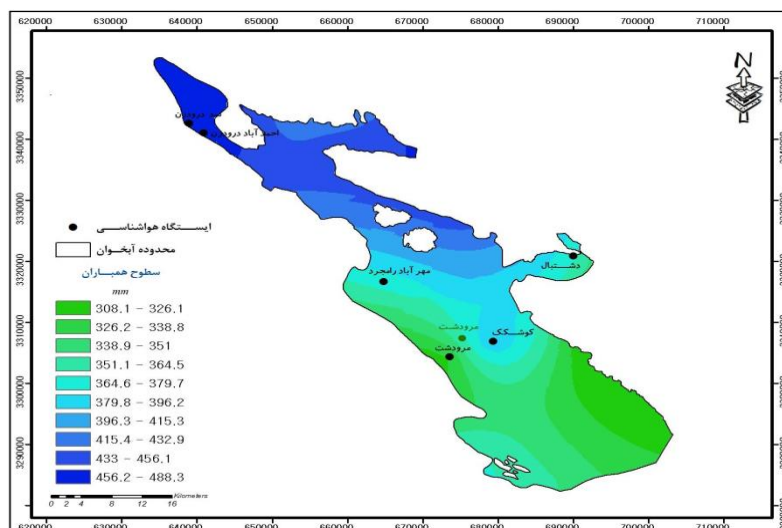
بررسی مطالعات هواشناسی و هیدروژئولوژی در تعیین میزان نرخ فرونشست

تأثیر پارامترهای هواشناسی بر اقلیم یک منطقه منجر به افزایش یا کاهش آب زیرزمینی می شوند. از جمله عامل اصلی ایجاد فرونشست در منطقه مورد مطالعه افزایش برداشت از آب های زیرزمینی می باشد که منجر به بروز خشک سالی های ویرانگری در منطقه نیز شده است. در این قسمت از پژوهشی به بررسی وضعیت پارامترهای هواشناسی و هیدروژئولوژی تأثیرگذار بر نرخ فرونشست پرداخته می شود.

پارامترهای هواشناسی مؤثر در نرخ فرونشست منطقه مورد مطالعه

بارش های منطقه مورد مطالعه

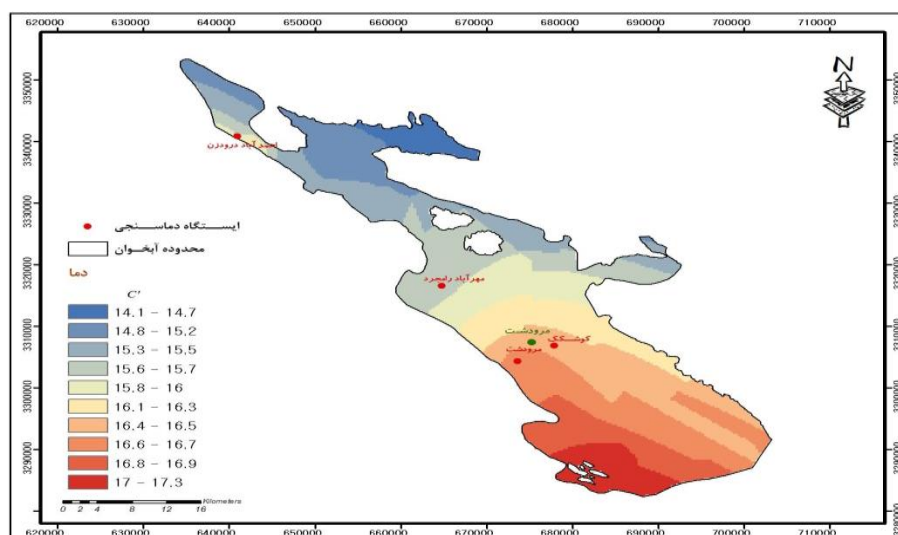
جهت ترسیم نقشه هم بارش دشت مرودشت با در نظر گرفتن همه سطح محدوده پس از بررسی ایستگاه های مرتبط (شیراز، خرم بید، اقلید، سپیدان، ارسنجان، بوانات) جهت دریافت داده ها، با استفاده از روش درون یابی کریجینگ در محیط GIS درون یابی اجرا و نقشه مورد نظر تهیه گردید (شکل ۲). با توجه به نقشه فوق، افزایش باران در قسمت جنوب شرق به سمت شمال غرب افزایشی بوده که این روند با افزایش ارتفاع سطح زمین منطبق می باشد. با توجه به نقشه مذکور حداقل بارش سالانه در دشت مرودشت ۳۰۸/۱ و حداکثر این میزان ۴۸۸/۳ میلی متر می باشد.



شکل ۲. نقشه هم‌باران محدوده مورد مطالعه

دما

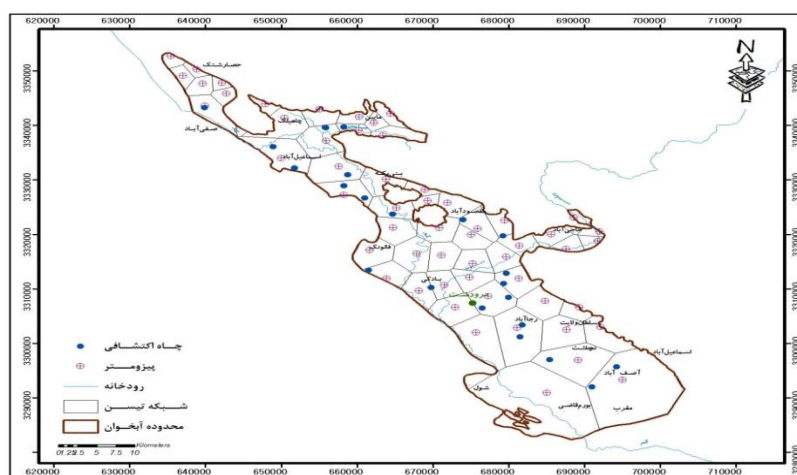
دما به عنوان عنصر از شدت گرما، نقش مهمی در اقلیم منطقه دارد. در مناطق خشک برداشت از آب‌های زیرزمینی بالا می‌رود و این امر شدت فرونشست را تسریع می‌کند. جهت ترسیم نقشه هم‌دما دشت مروودشت با در نظر گرفتن همه سطح محدوده پس از بررسی ایستگاه‌های مرتبط جهت دریافت داده‌ها، با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ در محیط GIS درون‌یابی اجرا و نقشه مورد نظر تهیه گردید با توجه به نقشه فوق، افزایش دما در قسمت شمال به سمت جنوب افزایشی بوده که این روند با کاهش ارتفاع سطح زمین منطبق می‌باشد. با توجه به نقشه مذکور حداقل دما در دشت مروودشت ۱۴/۱ و حداکثر این میزان ۱۷/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. (شکل ۳)



شکل ۳. نقشه هم‌دما محدوده مورد مطالعه

مطالعات هیدرولوژی مؤثر در نرخ فرونشست منطقه مورد مطالعه

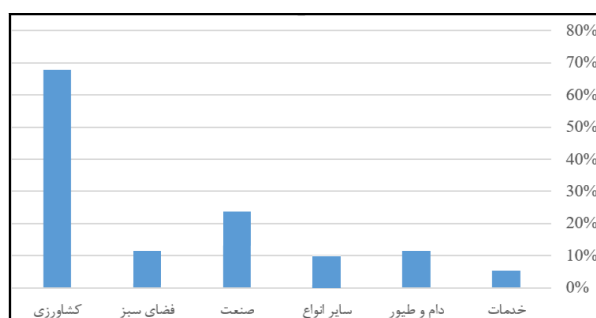
حوضه آبریز دشت مروودشت منشأ اصلی تغذیه سفره آب زیرزمینی بارش، جریان‌های سطحی و مسیل‌ها، منشأ تغذیه سازندهای مجاور دشت مروودشت و آب برگشت شده کشاورزی می‌باشد. تعداد چاه‌های پیزومتری فعال در محدوده مورد مطالعه برابر با ۵۶ حلقه و تعداد ۳۲ حلقه چاه اکتشافی بوده که موقعیت آن‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴. موقعیت پیزومترها و اکتشافی در محدوده مورد مطالعه (منبع: سازمان آب منطقه فارس)

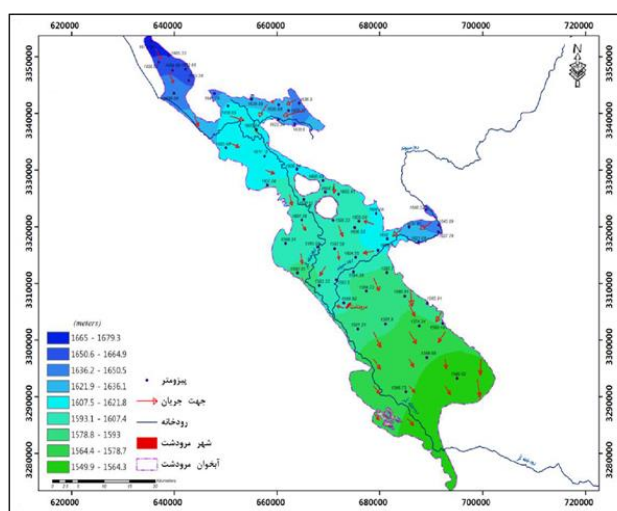
بررسی آب زیرزمینی

در این مرحله آمار ۳۲ حلقه چاه مشاهده‌ای در بازه زمانی (۲۰۲۰-۲۰۱۵) بررسی شد. داده‌های آماری جمع‌آوری و مرتب شدند، سپس روند تغییرات سطح آب هر چاه و روند تغییرات میانگین سطح آب در دشت مورد بررسی قرار گرفته و نمودار آن‌ها ترسیم شد. پس از آن داده‌ها به Arcmap وارد شده و با استفاده از روش درون‌یابی نقشه‌های هم‌سطح و پهنه‌بندی افت و سپس جهت آب زیرزمینی تهیه گردید. با توجه به داده‌های تهیه‌شده از آب منطقه‌ای استان فارس بیشترین درصد مصارف مختلف آب زیرزمینی در دشت مروودشت و حجم استخراج آب در این منطقه به‌منظور مصارف کشاورزی است. (شکل ۵).

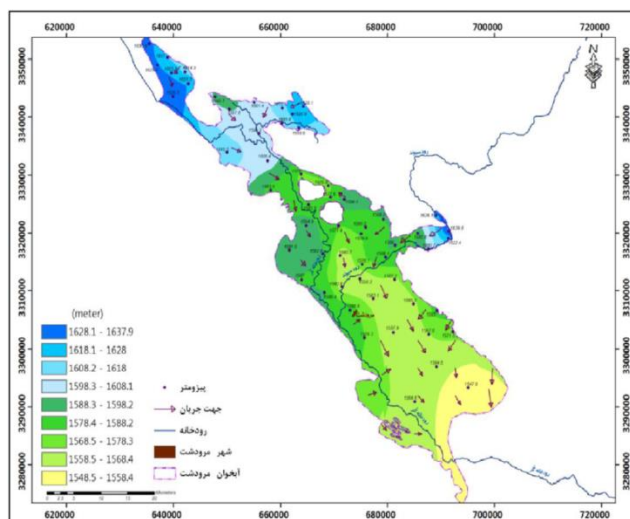


شکل ۵. درصد مصارف مختلف آب زیرزمینی در دشت مروودشت

جهت تهیه نقشه‌های هم‌تراز آب‌های زیرزمینی از روش کریجینگ استفاده شده است. در این روش برای یافتن مقادیر سطح آب در هر نقطه مجهول از مقدار این پارامتر در نقاط مختلف استفاده می‌شود؛ بدین ترتیب که به هر یک از نقاط معلوم، وزنی بر اساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول وجود دارد که نشان می‌دهد میزان تشابه سطح آب نقطه مجهول با هر یک از نقاط معلوم چقدر است. واضح است که هرچه نقاط نزدیک‌تر تشابه بیشتر و نقاط دورتر تشابه کمتری با مقدار پارامتر در نقطه مورد مراجعه دارند، این وزن توسط توان وزن دهی کنترل می‌شود. توان‌های کوچک‌تر در این روش وزن‌ها را به‌طور یکنواختی بین نقاط همسایه توزیع می‌کند. نقشه‌های هم‌سطح آب زیرزمینی ترسیم‌شده برای مهر و موم‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است.



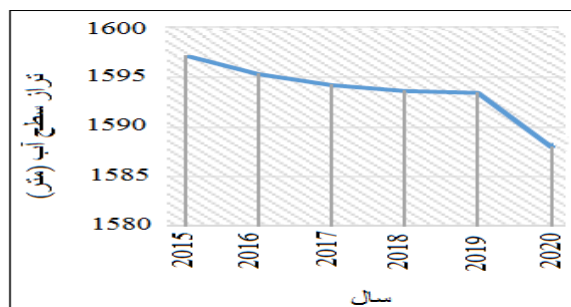
شکل ۶. نقشه هم‌تراز آب‌های زیرزمینی دشت مروودشت سال ۲۰۱۵



شکل ۷. نقشه هم‌تراز آب‌های زیرزمینی دشت مروودشت سال ۲۰۲۰

میزان افت سطح آب زیرزمینی

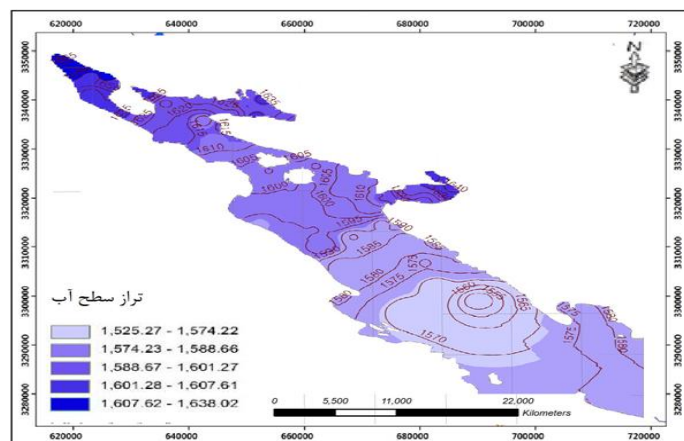
در این پژوهشی، با روش کریجینگ، میزان افت سطح آب زیرزمینی در دهستان کناره بررسی شد. به منظور تولید نقشه افت سطح آب زیرزمینی هیدرو گراف تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ رسم شد.



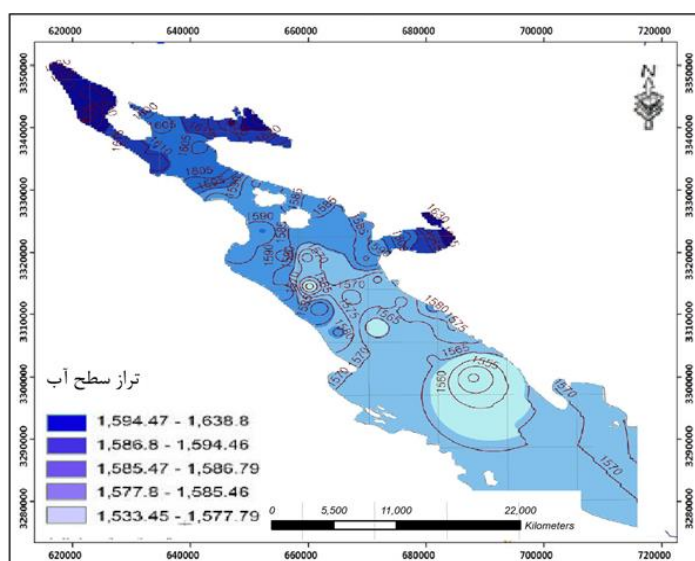
شکل ۸. هیدرو گراف تغییرات زمانی تراز آب چاه‌های مشاهداتی سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰

با توجه به هیدرو گراف واحد تراز سطح آب زیرزمینی دشت دارای روند نزولی می‌باشد. متوسط تراز سطح آب زیرزمینی در سال ۲۰۱۵ برابر با ۱۵۹۵ متر است که با ۷ متر افت به ۱۵۸۸ متر در سال ۲۰۲۰ رسیده است. بر اساس این هیدرو گراف بیشترین افت سطح آب زیرزمینی مربوط به سال ۲۰۲۰ است. (شکل ۸).

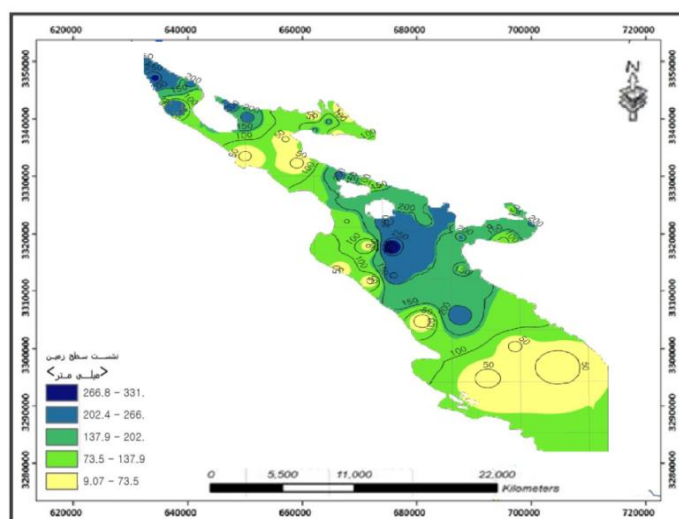
در مطالعات مربوط به علل فرونشست سطح زمین، بررسی نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. شناسایی به موقع و تهیه نقشه تغییرات تراز سطح آب‌های زیرزمینی و شناسایی عامل آن به وسیله روش‌های مشاهده‌ای و سنتی، کاری سخت و زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. امروزه به منظور تخمین متغیرهای مکانی یک منطقه از روش‌های زمین‌آمار استفاده می‌شود (اکبری ۲۰۱۰). به منظور شناخت و ارزیابی آثار برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی دشت مرودشت اطلاعات سطح آب زیرزمینی ۵۶ چاه مشاهده‌ای در محدوده مطالعاتی طی مهر و موم‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ برای تهیه نقشه سطح آب زیرزمینی آبخوان مرودشت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. سپس، برای مطالعه تغییرات کمی آب زیرزمینی، اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی و متوسط سطح آب زیرزمینی چاه‌های شده و با ArcGIS مشاهده‌ای دشت وارد نرم‌افزار استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ نقشه تراز سطح آب‌های زیرزمینی در ۵ سال مختلف رسم و با کسر از یکدیگر نقشه میزان افت سطح آب زیرزمینی دشت برای این دوره ۵ ساله تهیه شد. (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱)



شکل ۹. نقشه هم‌تراز سطح آب سال ۲۰۱۵



شکل ۱۰. نقشه هم‌تراز سطح آب سال ۲۰۲۰



شکل ۱۱. نقشه پراکندگی نشست سطح زمین در مرودشت

بحث و یافته‌ها

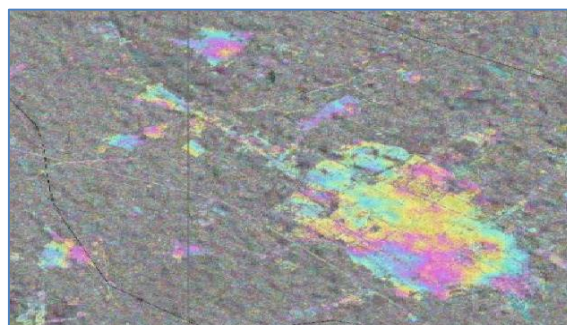
تداخل سنجی تصاویر راداری

انتخاب زوج تصاویر SAR

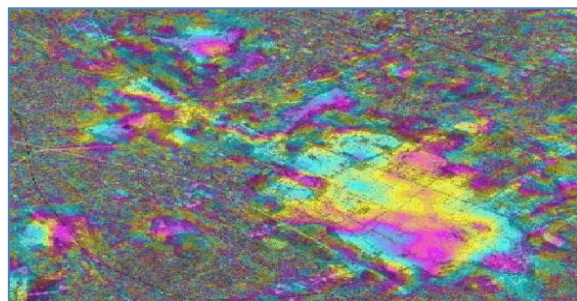
انتخاب صحیح و مناسب زوج تصاویر SAR برای تداخل سنجی اولین و مهم‌ترین مرحله برای شروع عملیات تداخل سنجی راداری است. توجه به عوامل اساسی مانند فرکانس سنجنده مورد استفاده، خط مبنای عمود مکانی، خط مبنای زمانی، همپوشانی مکانی و طیفی در راستای آزمون‌تال برای انتخاب تصویر مناسبی که در تحلیل‌ها نتیجه صحیح را ارائه دهد، ضروری می‌باشد. در این مرحله از پژوهشی، داده‌های SAR از سنجنده سنتینل ۱، در فرم SLC در گذر صعودی و نزولی دانلود شده و اطلاعات مربوط به تصاویر مورد استفاده در جدول ارائه شده است.

ایجاد تداخل نگار

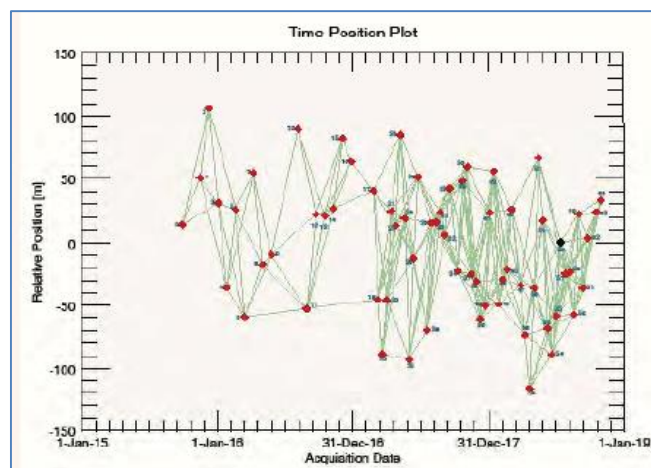
تولید تداخل نگار جهت نمایش اختلاف فاز ناشی از تغییر فاصله بین پدیده و سنجنده در دو عبور متوالی است. میزان ارتفاع در هر نقطه از منطقه در فاصله زمانی تهیه دو تصویر به وسیله بررسی‌های میزان اختلاف فاز بین تصاویر تعیین می‌شود. (شکل ۱۲ و ۱۳ و ۱۴)



شکل ۱۲. تداخل نگار تشکیل شده



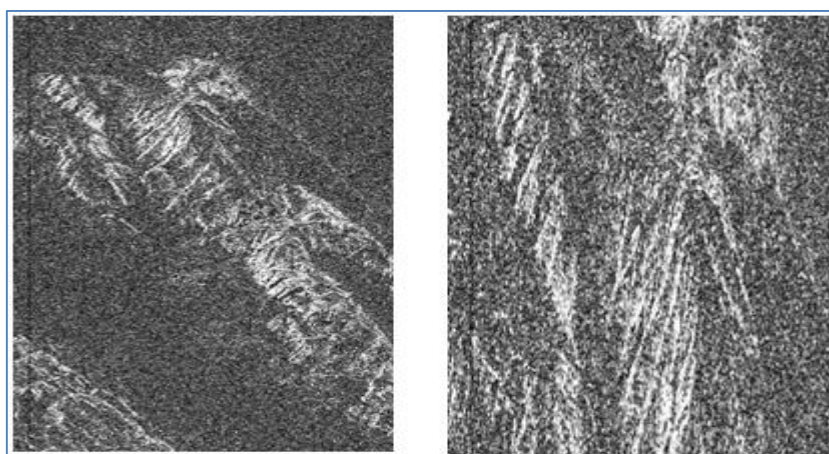
شکل ۱۳. اعمال فیلتر



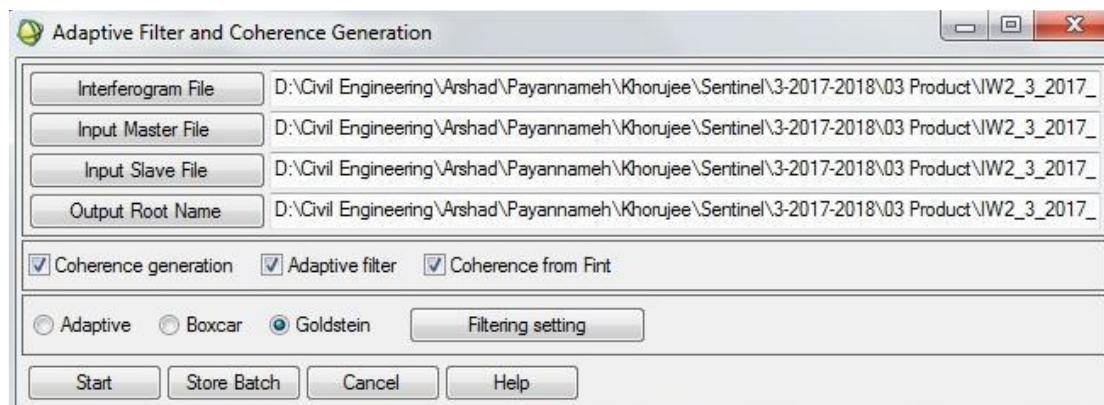
شکل ۱۴. شبکه اینترفروگرام

انجام عملیات وفقی بر روی تداخل نگار تفاضلی

در منطقه مورد مطالعه خط مبنای زمانی طولانی بین دو تصویر، نرخ بالای رشد ساکنین، ساخت‌وساز و فعالیت‌های عمرانی زیاد، وجود زمین‌های کشاورزی و باغات جزو عوامل ایجاد نویز در تصاویر است. به دلیل کارایی بالای فیلتر گلدشتاین، و همچنین بهبود کیفیت و فیلتر کردن تداخل نگارهای تفاضلی تهیه‌شده در مرحله پیشین، از فیلتر گلدشتاین استفاده شد. این فیلتر به صورت انتخابی عمل کرده و عملیات فیلتر را به صورت محلی اجرا می‌نماید. فیلتر گلدشتاین با بهره‌گیری از متغیر عرض باند که به صورت مستقیم از همبستگی توان طیفی تداخل نگار تفاضلی به دست می‌آید، تنظیم می‌گردد. بدین ترتیب که در مناطق با همبستگی پایین با عرض باند زیاد و تعداد پیکسل بیشتر و در مناطق با همبستگی بالا با عرض باند کم و تعداد پیکسل محدود عمل می‌نماید. تداخل نگار تفاضلی فیلتر شده و همچنین تصویر همدوسی با اعمال فیلتر گلدشتاین به دست می‌آید. شکل تصویر تداخل نگار به دست آمده را قبل از اعمال فیلتر و پس از اعمال فیلتر نمایش می‌دهد. (شکل ۱۵ و ۱۶)



شکل ۱۵. تداخل نگار قبل از اعمال فیلتر شکل ۱۶ تداخل نگار پس از اعمال فیلتر



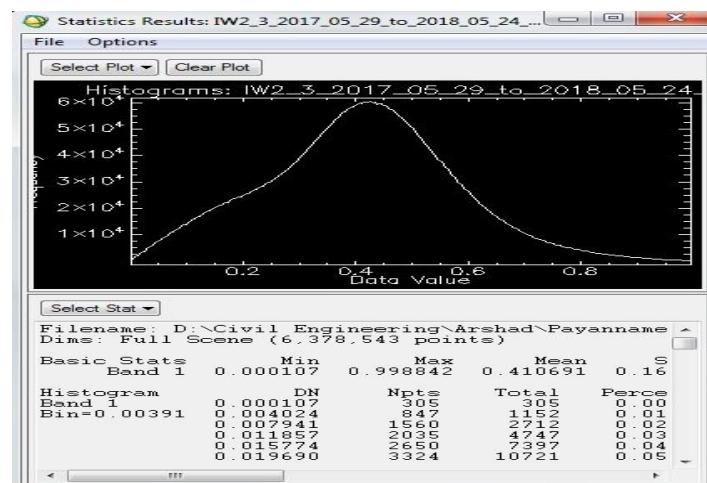
شکل ۱۷. مراحل انجام فیلترگذاری بر روی تداخل نگار توسط افزونه SARscape

ایجاد تصویر همدوس و انجام عملیات فیلترگذاری بر روی تداخل نگار

تصویر همدوس از همبستگی توانی دو تصویر هم مختصات شده SAR به دست می آید، که این نشانگر شاخص همبستگی مقادیر توان سیگنالی در دو تصویر برداشت شده در دو تاریخ مختلف بوده است. مقدار همدوسی دو تصویر بین ۰ تا ۱ متغیر است، ۰ بیانگر بدون همدوسی و ۱ بیانگر همدوسی کامل بین تصاویر است. مقدار همدوسی تصاویر در میزان کیفیت فرایند تداخل سنجی متأثر خواهد بود، چرا پایین بودن مقدار این شاخص برای یک زوج تصویر بیانگر مناسب نبودن آن در فرایند تداخل سنجی بوده است. جهت آشکارسازی تغییرات پدیده های زمینی در فاصله زمانی برداشت دو تصویر، لازم به ذکر است که برای تهیه تصویر همدوسی می تواند از تداخل نگار فیلتر شده و یا تداخل نگار فیلتر نشده استفاده نمود، اما چون حالت اشباع در تداخل نگار فیلتر شده رخ می دهد، تداخل نگار فیلتر نشده نتیجه بهتری را ارائه می دهد. در جدول میزان همدوسی زوج تصاویر استفاده شده از ماهواره Sentinel-1 ارائه شده است. (جدول ۲) (شکل ۱۸).

جدول ۲. میزان همدوسی زوج تصاویر استفاده شده از ماهواره Sentinel-1

نام اختصاری انتخابی	ماکزیمم	مینیمم	میانگین
SIC	۰/۹۹۹۰	۰	۰/۳۴۳۰
SLC	۰/۹۷۹۷	۰/۰۰۰۱	۰/۴۶۰۱

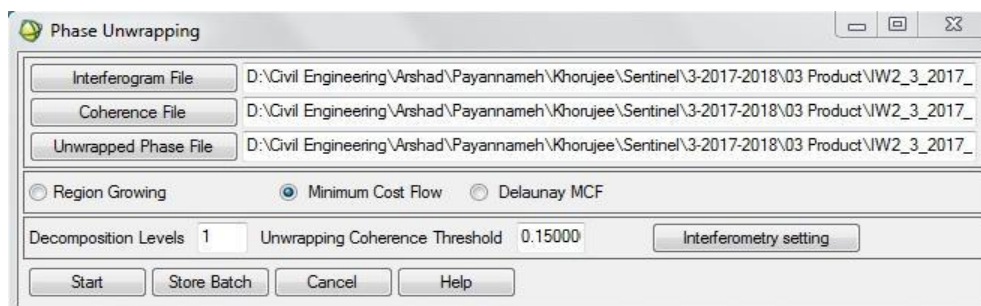


شکل ۱۸. اطلاعات مربوط به زوج تصاویر استفاده شده از ماهواره Sentinel-1

از آنجایی که تصویربرداری ماهواره Sentinel-1 در طول موج C صورت می‌گیرد و $5/6$ سانتیمتر طول موج این باند می‌باشد به همین دلیل در هنگام برخورد با پوشش گیاهی تحت تأثیر قرار گرفته و نسبت به رطوبت نیز حساس می‌باشد لذا با توجه به موارد ذکر شده میزان همدوسی بین تصاویر Sentinel-1 دچار کاهش می‌باشد.

تصحیح مقادیر فاز

تصحیح مقادیر فازی یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مرحله در فرایند تهیه نقشه فرونشست است. فاز تداخل سنج فقط پیمانه‌ای از 2π را بیان کند. اما درباره جابجایی سطح زمین امکان دارد که تغییر فاز بیشتر از 2π باشد، در این مواقع نیز در تداخل نگار حاصل مقادیر بیشتر از 2π مجدداً به صورت یک چرخه تکرار خواهد شد و الگوریتم‌های اصلاح فازی سعی در حل ابهام 2π می‌کنند. تا امروزه الگوریتم‌های مختلف و پیچیده‌ای توسط محققین ارائه شده که با توجه به نوع داده و منطقه مطالعاتی هر کدام مزیت‌های خاص خود را دارا بوده‌اند. کاربردی‌ترین و به بیان دیگر عمومی‌ترین الگوریتم‌هایی که در این زمینه به کار گرفته شده الگوریتم رشد ناحیه‌ای (Region Growing) و جریان با کمترین هزینه (Minimum cost flow) بوده است الگوریتم جریان با کمترین هزینه سازگاری بیشتری با مناطقی دارد که همبستگی پایینی در تصاویر همدوس داشته است. در پژوهش حاضر به دلیل پایین بودن مقدار همبستگی در تداخل نگارهای تولید شده از روش دوم استفاده شده است. مقادیر آستانه این الگوریتم هم با توجه به میانگین مقدار همبستگی در تصویر همدوسی مورد محاسبه قرار گرفت. شکل ۱۹ مراحل تصحیح مقادیر فاز توسط افزونه SARscape را نمایش می‌دهد. شکل ۲۰ نیز تصحیح فاز بر روی زوج تصاویر استفاده شده از ماهواره Sentinel-1 را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۹. مراحل تصحیح مقادیر فاز توسط افزونه SARscape

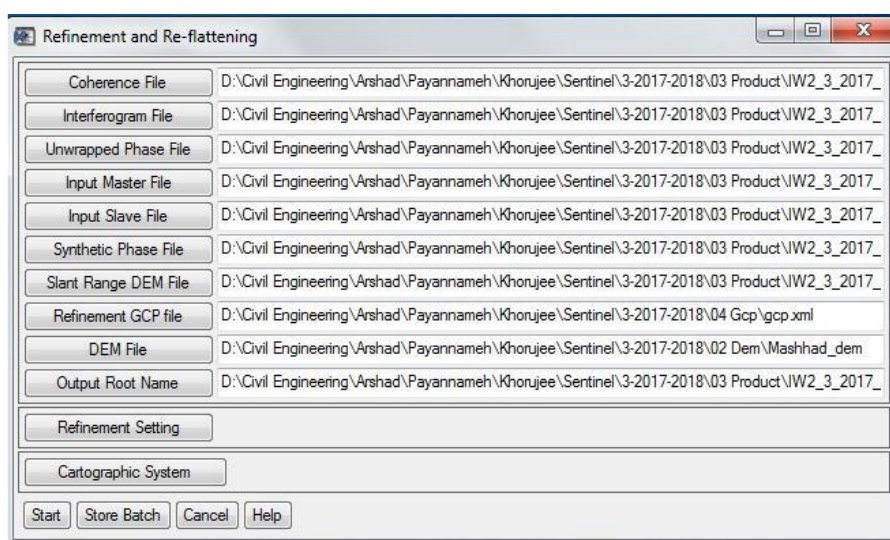


شکل ۲۰. تصحیح فاز بر روی زوج تصاویر استفاده شده از ماهواره Sentinel-1

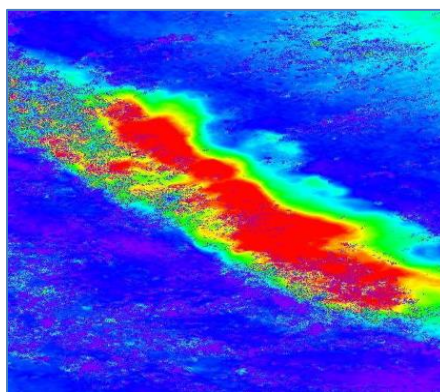
پالایش و تصحیح مضاعف

قبل از انجام تبدیل تغییرات فاز، باید فازهای مزاحم باقی مانده از اثرات توپوگرافی و جابجایی‌های مداری از فاز موجود حذف گردند. انجام این تصحیحات بر روی تداخل نگارهایی که نشان‌هایی از لرزش سکو در فرم پلکان یا به عبارت دیگر ramp دارند، ضروری است و باید انجام شود. بهتر است این تصحیحات حتی بر روی داده‌های دقیق و عدم لرزش در سکو نیز انجام شود. این تصحیح بر روی فاز تصحیح شده در مرحله پیش انجام می‌شود و با کمک مدل رقومی ارتفاعی منطقه، فاز مصنوعی تولید شده در مراحل پیش، مدل رقومی ارتفاع تبدیل شده به مختصات هندسی تصویربرداری راداری SRDEM و به عبارتی دیگر مختصات مایل، تصویر همدوسی تولید شده در مرحله پیش، پارامترهای مداری تصویر پایه و پیرو SAR و همچنین تعدادی نقاط کنترل زمینی این عمل صورت می‌گیرد. در نتیجه این اصلاح فازی، فاز مطلق تولید می‌شود که نشان‌دهنده جابجایی‌های اتفاق افتاده در سطح زمین در بازه زمانی برداشت دو تصویر راداری می‌باشد. فرایند مذکور بر روی تداخل نگارهای حاصل از سنجنده سنتینل ۱ اعمال شده است. تغییرات ناگهانی یا Phase Jump، موجود در تصویر تصحیح

شده آنچه مسلم است. جابجایی ناگهانی مقادیر باید مورد بررسی و کنترل قرار گیرد، ساختارهای زمین‌شناسی و مرفولوژیکی و تغییرات سطحی پوسته زمین به‌عنوان پرش فاز در نظر گرفته شده و اصلاح شود. مراحل پالایش و تصحیح مضاعف بر روی زوج تصاویر توسط افزونه SARscape را نمایش می‌دهد. فرآیند مذکور بر روی تداخل نگار حاصل از ماهواره Sentinel-1 اجرا شده و در قالب شکل‌های ۲۱ و ۲۲ ارائه می‌شود.



شکل ۲۱. مراحل پالایش و تصحیح مضاعف بر روی زوج تصاویر استفاده شده از ماهواره Sentinel-1 توسط افزونه SARscape

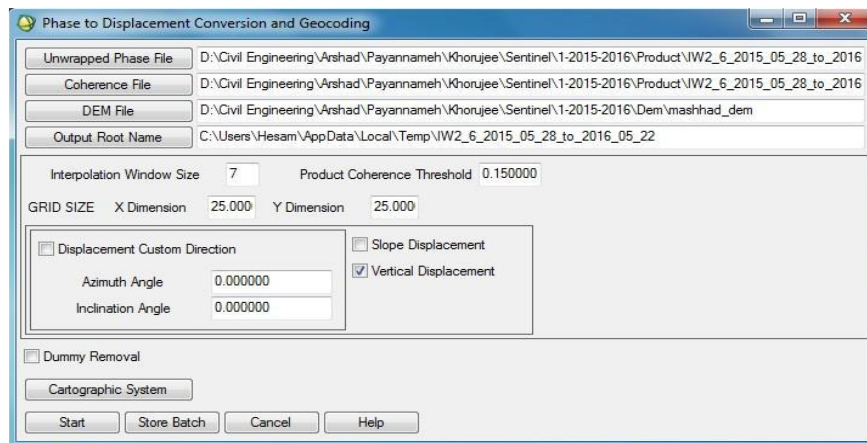


شکل ۲۲. پالایش و تصحیح مضاعف بر روی فاز اصلاحی زوج تصاویر استفاده شده از ماهواره Sentinel-1

تبدیل فاز به نقشه جابجایی

پس از عملیات تصحیح مضاعف فاز، می‌توان فاز مطلق حاصل را به مقادیر جابه‌جایی یا نقشه جابه‌جایی تبدیل و زمین مرجع کرد. این فرایند با استفاده از تبدیلات ژئودتیک و معادله داپلر انجام می‌شود. نقشه نهایی به دست آمده نشانگر شدت میزان جابجایی به ازای هر پیکسل در واحد متریک می‌باشد که به میلی‌متر، سانتی‌متر و... این جابجایی قابل نمایش است. در نقشه‌های تهیه‌شده مقادیر مثبت جابجایی مربوط به بالاآمدگی زمین و به عبارت دیگر حرکت سطح زمین به سمت دید

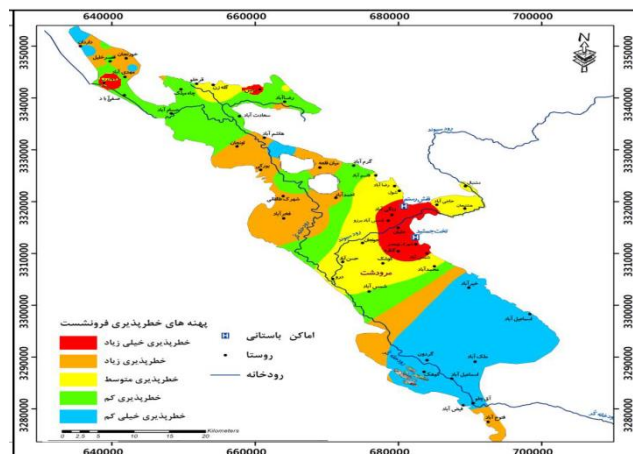
راداری و مقادیر منفی بیانگر فرونشست و یا دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری است. شکل ۲۳ مراحل تبدیل فاز به جابه‌جایی توسط افزونه SARscape را ارائه می‌دهد.



شکل ۲۳. مراحل تبدیل فاز به جابه‌جایی توسط افزونه SARscape

طبقه‌بندی و تحلیل فضایی فرونشست با استفاده از روش کریجینگ

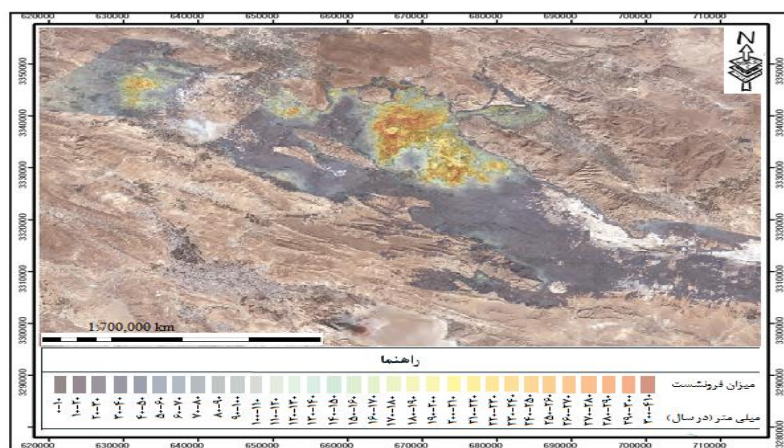
جهت طبقه‌بندی و تحلیل فضایی فرونشست در محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش کریجینگ، لایه‌های رستری تغییرات آب زیرزمینی و مطالعات هواشناسی تهیه‌شده در مراحل قبل با استفاده از تابع Reclassify در گروه Spatial Analyst در نرم‌افزار ArcGIS10.2 طبقه‌بندی شده و نتیجه به صورت شکل ۲۴ نمایش داده شده است.



شکل ۲۴. طبقه‌بندی و تحلیل فضایی فرونشست با استفاده از روش کریجینگ

با توجه به هیدرو گراف واحد و تغییرات به وجود آمده در حجم ذخیره آبی آبخوان همراه با شواهد به دست آمده با استناد به این داده‌های آماری که با استفاده از نرم‌افزار اکسل تجزیه و تحلیل شده‌اند و نیز مشاهدات میدانی نشان می‌دهند که تراز سطح آب زیرزمینی در طی دوره مورد مطالعه به میزان ۵۴ سانتی‌متر سالانه افت داشته است. این رقم تا حد

قابل اطمینانی با میزان فرونشست به دست آمده از روش تداخل سنجی راداری همبستگی دارد. به عبارتی، سالانه در ازای هر ۵۴ سانتی متر پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی به طور متوسط دو سانتی متر سطح اراضی منطقه مورد مطالعه دچار فرونشست تدریجی می‌شود. بعد از تعیین میزان فرونشست برای زوج تصویر مورد نظر میزان فرونشست رخ داده در منطقه مطالعاتی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ مشخص گردید. با توجه به نتیجه به دست آمده از تحلیل تصاویر راداری که در شکل شماره و اطلاعات تکمیلی آن در جدول شماره ارائه شده است. با توجه به نقشه فوق و نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش حداقل میزان فرونشست در منطقه ۰/۰۹ متر و حداکثر آن ۰/۳۴۴ متر می‌باشد. محدوده حدود ۲,۸۷۵ کیلومتر مربع مساحت و دارای بیشترین مقدار نرخ فرونشست سالانه تا ۴۲ سانتی متر در سال می‌باشد که شامل ۲۹۳ روستا و مرکز جمعیتی از جمله روستاهای با بیشترین جمعیت به ترتیب شامل روستاهای کناره، فتح‌آباد، زنگی‌آباد، خیرآباد توالی، کوشک و ... است. جمعیت متأثر از فرونشست حدود ۱۴۲۰۰۰ نفر می‌باشد. همچنین در این محدوده، راه آهن اصفهان - شیراز به طول حدود ۵۵ کیلومتر و خطوط انتقال نیرو به طول حدود ۲۴۰ کیلومتر قرار دارد. بیشتر محدوده مورد مطالعه یعنی مساحتی حدود ۳۵۵/۵ کیلومتر مربع و به نوعی ۳۰/۹ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی کم بوده و مساحتی حدود ۶۷/۱ کیلومتر مربع برابر با ۵/۵ درصد دارای پتانسیل خطرپذیری خیلی زیاد می‌باشد که این قسمت‌ها شامل قسمت شرق دشت مرو دشت اطراف اماکن تاریخی نقش رستم و تخت جمشید (روستاهای شمس‌آباد، حسین‌آباد، شول، جلیلیان و زنگی‌آباد) و بخش کوچکی از شمال محدوده مورد مطالعه (روستاهای درود زن و مابین) می‌باشند. (شکل ۲۵ و جدول ۳)



شکل ۲۵ میزان فرونشست در محدوده مورد مطالعه

جدول ۳. مقادیر فرونشست و وضعیت خطرپذیری در محدوده مورد مطالعه

مقدار فرونشست (متر)	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	خطرپذیری
۰/۲۳۵ - ۰/۳۴۵	۳۵۵/۵	۳۰/۹	خیلی کم
۰/۱۷۵ - ۰/۲۳۵	۲۹۴/۲	۲۳/۲	کم
۰/۱۳۵ - ۰/۱۷۵	۲۷۵/۷	۲۱/۶	متوسط
۰/۰۸۵ - ۰/۱۳۵	۲۲۹/۹	۱۹/۸	زیاد
۰/۰۱۰ - ۰/۰۸۵	۶۸/۱	۴/۵	خیلی زیاد
جمع	۱۲۲۳/۴	۱۰۰	-

نتیجه گیری

این پژوهش به تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر ماهواره‌ای در دشت مرو دشت پرداخته است. ترکیب روش‌های تداخل سنجی راداری با پوشش وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالا، سامانه‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی زیاد و ترازایی دقیق با دقت بسیار بالا روش مناسبی برای بررسی حرکات سطح زمین می‌باشد. در این پژوهش، به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی از روش زمین‌آمار کریجینگ و برای برآورد میزان فرونشست سطح زمین از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و از تصاویر راداری سنتینل-۱ پرداخته شده است. روش تداخل سنجی تفاضلی راداری در این پژوهشی، دارای قابلیت مناسبی برای تعیین میزان و دامنه فرونشست در محدوده دشت مرو دشت می‌باشد. عامل فرونشست در این دشت مانند سایر دشت‌های استان فارس و همچنین، مستند به بررسی‌های عابدینی و همکاران ۱۴۰۲ و شومان و وجدیان ۲۰۱۹ بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی می‌باشد. بعد از تعیین میزان فرونشست برای زوج تصویر مورد نظر میزان فرونشست رخ داده در منطقه مطالعاتی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ مشخص گردید. با توجه به نتیجه به دست آمده از تحلیل تصاویر راداری و با توجه به نقشه فوق و نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش کریجینگ حداقل میزان فرونشست در منطقه ۰/۰۰۹ متر و حداکثر آن ۰/۳۴۴ متر می‌باشد. با توجه به هیدرو گراف واحد و تغییرات به وجود آمده در حجم ذخیره آبی آبخوان همراه با شواهد به دست آمده با استناد به این داده‌های آماری که با استفاده از نرم‌افزار اکسل تجزیه و تحلیل شده‌اند و نیز مشاهدات میدانی نشان می‌دهند که تراز سطح آب زیرزمینی در طی دوره مورد مطالعه به میزان ۵۴ سانتی‌متر سالانه افت داشته است. این رقم تا حد قابل اطمینانی با میزان فرونشست به دست آمده از روش تداخل سنجی راداری همبستگی دارد. به عبارتی، سالانه در ازای هر ۵۴ سانتی‌متر پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی به‌طور متوسط دو سانتی‌متر سطح اراضی منطقه مورد مطالعه دچار فرونشست تدریجی می‌شود. محدوده حدود ۲,۸۷۵ کیلومتر مربع مساحت و دارای بیشترین مقدار نرخ فرونشست سالانه تا ۴۲ سانتی‌متر در سال می‌باشد که شامل ۲۹۳ روستا و مرکز جمعیتی از جمله روستاهای با بیشترین جمعیت به ترتیب شامل روستاهای کناره، فتح‌آباد، زنگی‌آباد، خیرآباد توالی، کوشک و ... است. جمعیت متأثر از فرونشست حدود ۱۴۲۰۰۰ نفر می‌باشد. همچنین در این محدوده، راه آهن اصفهان - شیراز به طول حدود ۵۵ کیلومتر و خطوط انتقال نیرو به طول حدود ۲۴۰ کیلومتر قرار دارد. بیشتر محدوده مورد مطالعه یعنی مساحتی حدود ۳۵۵/۵ کیلومتر مربع و به نوعی ۳۰/۹ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی کم بوده و مساحتی حدود ۶۷/۱ کیلومتر مربع برابر با ۵/۵ درصد دارای پتانسیل خطرپذیری خیلی زیاد می‌باشد که این قسمت‌ها شامل قسمت شرق دشت مرو دشت اطراف اماکن تاریخی نقش رستم و تخت جمشید (روستاهای شمس‌آباد، حسین‌آباد، شول، جلیلیان و زنگی‌آباد) و بخش کوچکی از شمال محدوده مورد مطالعه (روستاهای درود زن و مابین) می‌باشند. با توجه به این که در آبخوان مرو دشت و نزدیکی آن ایستگاه GPS وجود ندارد، برای تأیید نتایج به دست آمده از شواهد صحرایی در منطقه استفاده شد. بالا ماندن جداره فلزی میله چاه‌های عمیق، ارتفاع یافتن میله‌های چاه‌های اکتشافی و نیز شکاف‌های عمودی و افقی در دیوار ساختمان‌ها و باعث تخریب برخی از اراضی کشاورزی و کانال‌های

آبیاری شده، همچنین، باعث تغییر شیب زمین در برخی نواحی شده است که به‌طور مستقیم نشان‌دهنده نشست سطح این دشت می‌باشد. با توجه به موقعیت مکانی شهر مرودشت و آثار تاریخی که در آبخوان مرودشت واقع شده است و نقشه نشست به دست آمده، مشخص می‌شود که این مناطق در معرض نشست قرار دارند. در این دشت، تداوم پایش و بررسی سنجش از دوری، احداث ایستگاه‌های اندازه‌گیری ثابت GPS می‌تواند ضمن فراهم آوردن امکان پایش نرخ و دامنه نشست، امکان خوبی برای بررسی نتایج حاصل از روش‌های سنجش از دوری و بهینه نمودن این روش‌ها را فراهم نماید. نتایج این پژوهشی بدون داشتن اطلاعات دقیق و مکفی از لایه‌بندی و دانه‌بندی آن‌ها و همچنین، شبکه سنجش GPS و تنها بر اساس تحلیل تصاویر رادار و متد تداخل سنجی انجام شده و نتایج دارای مطابقت مناسبی با تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشد.

منابع

- ۱- اصغری سراسکانرود، صیاد، ریاحی نیا، مریم (۱۳۹۹): پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در دشت خرم‌آباد با استفاده از دو روش منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی سال نهم شماره ۲ پاییز ۱۳۹۹.
- ۲- آقا یاری لیل، عابدینی موسی، اصغری سراسکانرود صیاد (۱۴۰۱): برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل) فصل‌نامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی دوره ۱۱، شماره ۱، تیر ۱۴۰۱.
- ۳- اکبری الهام، شیرانی کوروش، قاضی فرد اکبر. (۲۰۱۰): بررسی نقش کاهش آب زیرزمینی در فرونشست دشت دامنه. دومین همایش ملی افق‌های نوین در توانمندسازی و توسعه پایدار معماری، عمران، گردشگری، انرژی و محیط‌زیست شهری و روستایی.
- ۴- حیدری مظفر، مرتضی. شهوند. مرتضی (۱۴۰۰): پهنه‌بندی دشت کبوتر آهنگ به‌منظور احداث سد زیرزمینی به روش ترکیب نقشه‌های فازی. فصل‌نامه اطلاعات جغرافیایی دوره ۳ شماره ۱۱۷ بهار ۱۴۰۰.
- ۵- خورشیدی علی کردی محمدصادق، حقیقت معصومه. طالب بیدختی ناصر نیکو محمدرضا (۱۴۰۰): مدل حل اختلاف چندهدفه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر مبنای رویکرد برنامه‌ریزی ارمانی مجله مهندسی منابع آب سال دوازدهم شماره ۴۳ زمستان ۱۳۹۸.
- ۶- دیده‌بان، خلیل؛ فیضی زاده، بختیار و خلیل ولی زاده کامران. (۱۴۰۰): بررسی تأثیر جابه‌جایی سطح زمین بر ساختمان‌های تخریبی در شهر بم با استفاده از تکنیک‌های فازی شیء‌گرا و تداخل سنجی راداری. علمی پژوهشی مدیریت بحران، ۸(۱)، ۳۳-۴۴.
- ۷- رجیبی معصومه، روستایی شهرام. (۱۴۰۳): مطالعاتی سارا ارزیابی سری زمانی فرونشست دشت کرمانشاه با تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر خط مبنای کوتاه (SBAS) فصل‌نامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۱۳، شماره ۱ تیر ۱۴۰۳.
- ۸- رنجبر باروق، زهرا، و فتح اله زاده، محمد (۱۴۰۲): بررسی ارتباط فرونشست زمین و تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: شهر مشهد) فصل‌نامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۲، شماره ۲.
- ۹- روهینا آیت، احمدی حسن، معینی ابوالفضل. شهرپور (۱۳۹۹): مکان‌یابی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی با استفاده از منطق بولین و روش Ahp در آبخیز امام‌زاده جعفر گچساران. فصل‌نامه پژوهش‌های آبخیزداری دوره ۳۳، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۲۹ زمستان ۱۳۹۹ صص ۲-۱۶.
- ۱۰- سهرابی وحید، عقیفی محمدابراهیم (۱۴۰۱): ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی در دشت شهر بابک با استفاده از مدل مدالوس و داده‌های سنجش از دور. فصل‌نامه اکو سیستم‌های طبیعی ایران دوره ۱۴ شماره ۱ شماره پیاپی ۵۱ خرداد ۱۴۰۲ صص ۳۸-۵۹.

- ۱۱- عابدینی موسی. آقایی لایلا. پیروزی لایلا. (۱۴۰۲): ارزیابی و پهنه بندی فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تکنیک چند معیاره آر. اس، فصل نامه پژوهش های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۱۲ شماره ۲.
- ۱۲- عقیفی محمدابراهیم سهرابی وحید (۱۴۰۱): پایش یخچال های اشترانکوه حوضه آبریز گهر لرستان و ارتباط آن با کاهش پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر Modis و شاخص Ndsi بین مهر و موم های ۱۳۸۰-۱۳۹۵. فصل نامه اکو سیستم های طبیعی ایران دوره ۱۳. شماره ۳ شماره پیاپی ۴۹ آذر ۱۴۰۱ ص ۷۵.
- ۱۳- عقیفی محمدابراهیم علی نژاد خلیل موغلی مرضیه (۱۴۰۱): ارزیابی زیست محیطی بیابان زایی در حوضه آبخیز شهر اصفهان با استفاده از مدل مدالوس و داده های سنجش از دور. فصل نامه کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در برنامه ریزی. دوره ۱۳ شماره ۴. شماره پیاپی ۵۰ اسفند ۱۴۰۱.
- ۱۴- علی مرادی هزیر. روحی مقدم عین. ... (۱۴۰۱): پیش بینی و پهنه بندی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل های سیستم اطلاعات جغرافیایی Gis و روش های یادگیری ماشین مطالعه موردی دشت زاهدان. فصل نامه هیدرولوژی سال هفتم شماره ۲ زمستان ۱۴۰۱.
- ۱۵- فتح الهی، نرگس، آخوندزاده، مهدی، بحرودی، عباس. (۱۴۰۰): بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل سنجی رادار. فصل نامه سپهر، دوره ۲۷، شماره ۱۰۵، بهار ۹۷، صص ۳۳-۳۴.
- ۱۶- قنادی، محمدامین، عنایتی، و خصالی. (۱۴۰۰): تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و فن تداخل سنجی راداری. فصل نامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۷(۱۰۸)، ۱۰۹-۱۲۱.
- ۱۷- مرادی ع، عمادالدین س، آرخی س، رضایی. (۱۴۰۰): تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه ژئوتکنیک و پیژومتريک (مطالعه موردی: منطقه ۱۸ شهری تهران). مجله تحلیل فضایی مخاطرات زیست محیطی. ۲۰۲۰؛ ۷(۱): صص. ۱۷۶-۱۵۳.
- ۱۸- مقصودی، یاسر، امانی، رضا، احمدی، حسن. (۱۴۰۰): بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و فن تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی. سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸.

- 19- Agustian, Y., Hasan, F., & Siddiq, R. H. B. A. (2019): Land Subsidence Of Kanto Plain Detection Using JERS-1 SAR Interferometry.
- 20- Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C., & Renard, F. (2019): Investigating Subsidence In The Bursa Plain, Turkey, Using Ascending And Descending Sentinel-1 Satellite Data. Remote Sensing, 11(1), 85.
- 22- Erban, L. E., Gorelick, S. M., & Zebker, H. A. (2018): Groundwater Extraction, Land Subsidence, And Sea-Level Rise In The Mekong Delta, Vietnam. Environmental Research Letters, 9(8), 084010.
- 23- Liu, L., Yu, J., Chen, B., Wang, Y. (2020): Urban Subsidence Monitoring By SBAS-Insartechique With Multi-Platform SAR Images: A Case Study Of Beijing Plain, China, European Journal Of Remote Sensing
- 24- Pacheco, Jesus, Jorge Arzate And Eduardo Rojas And Moises Arroyo And Vsevolod Yutis And Gil Ochoa. (2006): Delimitation Of Ground Failure Zones Due To Land Subsidence Usind Gravity Data And Finite Element Modelling In The Queretaro Valley, Mexico. Engineering Geology, 84
- 25- Rachida Lyazidi, Mohamed Abdelbaset Hessane, Jaouad Filali Moutei, Mohammed Bahir, (2020): Developing A Methodology For Estimating The Groundwater Levels Of Coastal Aquifers In The Gareb-Bourag Plains, Morocco Embedding The Visual MODFLOW Techniques In Groundwater Modeling System, Groundwater For Sustainable Development, 1.
- 26- Schumann, R., & Vajedian, S. (2019): Detection Of Subsidence In Bad Frankenhausen With Time Series Analysis Of Interferometric Radar.
- 27- Skenderas D, Loupasakis C, Papoutsis I, Alatzas S, Kontoes C. (2011): Investigation Of Land Subsidence Phenomena In The Wider Tirana (Albania) Region By Applying Persistent Scatterer Interferometry Techniques, EGU 21 12199.