

پایش روند پدیده فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری مطالعه موردی: دشت خانمیرزا، استان چهارمحال و بختیاری

صادق کریمی*

دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

محسن پور خسروانی

دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

آیدا رضانی

کارشناس ارشد مخاطرات محیطی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۱

چکیده

فرونشست سطح زمین از جمله مخاطرات محیطی است که در اثر عوامل مختلف ایجاد شده، و به‌خصوص در سال‌های اخیر خسارت‌های زیادی را به جوامع انسانی وارد نموده است. آبخوان دشت خانمیرزا نیز در سال‌های اخیر به‌صورت چشمگیر با این پدیده روبه‌رو شده است. ایجاد درزو و شکاف‌های وسیع در سطح دشت و خروج گاز از آن‌ها، مسئله بررسی فرونشست را حائز اهمیت می‌نماید. به همین علت پژوهش حاضر سعی دارد ضمن پایش و سنجش میزان فرونشست زمین در دشت خانمیرزا، ارتباط آن را با برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی ارزیابی و تحلیل نماید. بدین منظور جهت بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در طی ۱۰ سال و در دوباره زمانی متفاوت از مدل زمین‌آمار IDW، و برای برآورد میزان فرونشست سطح زمین از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و از تصاویر راداری Sentinel-1A در طی ۵ سال و در سه بازه زمانی متفاوت استفاده شد. نتایج پژوهش حاکی از آن است که، میانگین افت سالیانه آب زیرزمینی در یک بازه زمانی ده‌ساله روند افزایشی داشته بطوریکه میانگین افت در دوره اول مطالعاتی ۲۵/۶۵ و در دوره دوم برابر با ۳۴/۶۶ است. همچنین میزان جابه‌جایی سطح زمین در بازه زمانی کلی ۵ ساله و طی سه دوره مطالعاتی، هم به لحاظ موقعیت مکانی رویداد؛ و هم به لحاظ نرخ جابه‌جایی از یک‌روند کلی تبعیت نمی‌کند. بطوریکه حداکثر میزان فرونشست به ترتیب ۱۳۹ میلی‌متر (دوره دوم)، ۱۲۷ میلی‌متر (دوره سوم) و ۷۷ میلی‌متر (دوره اول)، و بیشترین بالآمدگی به ترتیب ۱۷۱ میلی‌متر (دوره اول)، ۱۱۶ میلی‌متر (دوره سوم) و ۹ میلی‌متر (دوره اول) رخ داده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد میزان جابه‌جایی سطح زمین در بازه‌های زمانی مختلف، متفاوت بوده و از یک‌روند ثابت برخوردار نیست، در حالیکه روند افت سطح آب‌های زیرزمینی در تمام بازه زمانی روند افزایشی داشته است. بر همین اساس طبق نتایج پژوهش ارتباط معناداری بین برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی با مناطق دارای فرونشست در دشت خانمیرزا وجود ندارد.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، بالآمدگی، تداخل‌سنجی راداری، فرونشست زمین، دشت خانمیرزا.

مقدمه

امروزه گسترش مرزهای علم باعث تغییر دیدگاه‌ها نسبت به نحوه توجیه عملکرد مجموعه‌ها گردیده است. تغییر دیدگاه کلاسیک به سیستمی در دانش مخاطرات باعث تحلیل مطلوب‌تر و دستیابی به نتایج چشمگیرتر در برنامه‌ریزی و مدیریت مخاطرات جهت کاهش خسارت‌های ناشی از فرآیندهای مخاطره‌آمیز شده است.

فرونشست زمین یک مخاطره ژئومورفولوژیکی است که شامل یک تغییر شکل کاهنده سطح زمین وابسته به زمان است که می‌تواند توسط عوامل مختلف طبیعی و انسانی ایجاد شود. بر پایه تعریف انستیتو زمین‌شناسی ایالات‌متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندکی باشد (شریفی کیا، ۱۳۹۱: ۵۶). این پدیده به صورت ترک‌هایی در سطح زمین ظاهر می‌شود که به این ترک‌ها شق گفته می‌شود. عواملی چون، فشردگی رسوبات تحت فشار، رسوبات پوشاننده، انحلال سنگ‌های کربناته، حرکات تکتونیکی یا برهم خوردن تنظیمات ایزوستاتیک و... در وقوع پدیده فرونشست زمین مؤثر می‌باشند. لازم به ذکر است که فعالیت‌های بشری مانند، حفاری‌های زیرزمینی (استخراج معدن یا تونل زنی) یا استخراج شدید سیالات زیرزمینی (نفت، گاز، آب) می‌تواند فرآیندهای نشست طبیعی را تحریک یا شدیدتر کند. فرونشست زمین معمولاً تغییر شکل آهسته و تدریجی است که در بعضی موارد می‌تواند به سرعت و ناگهانی نیز روی دهد (بیانچینی و همکاران، ۲۰۱۹: ۲-۱). باید توجه داشت که، فرونشست زمین یکنواخت نیست و بسته به عوامل مختلفی مثل، عوامل زمین‌شناسی، خصوصیات فیزیکی سفره آب، تراکم‌پذیری خاک، نرخ پمپاژ آب زیرزمینی و میزان شارژ مجدد متفاوت است (گوزی و مالینوسکا، ۲۰۲۰: ۶). کمبود منابع آب در بسیاری از مناطق جهان جوامع را به پمپاژ منابع آب زیرزمینی برای مصارف شهری، صنعتی و کشاورزی وابسته کرده است که برداشت مازاد از این منابع آبی فرونشست زمین را تشدید نموده است (حق‌شناس حقیقی و متق، ۲۰۲۱: ۱۵۵). در ایران فرونشست زمین، پیشینه‌ای سی و چند ساله دارد و اینک استان‌های اصفهان، خراسان، تهران، آذربایجان شرقی و غربی و غیره نیز دچار فرونشست است. این مشکل به‌طور روزافزون در استان‌های بیشتری خودنمایی می‌کند. در همه فرونشست‌هایی که در ایران رخ می‌دهد، استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی عاملی مهم در تشدید پدیده فرونشست به‌خصوص در سال‌های اخیر بوده است. فرونشست‌ها می‌توانند به تخریب سیستم‌های آبیاری و نابودی خاک‌های حاصلخیز کشاورزی (با کاهش تخلخل آن‌ها) منجر شوند. این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها و بزرگراه‌ها آسیب‌زده، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساخت ساختمان‌ها آسیب رسانده و موجب شکاف در آن‌ها گردد (پور خسروانی، ۱۳۹۱: ۳). شناخت صحیح و تشخیص علت وقوع

1. Bianchini et al

2. Guzay and Malinowska

این پدیده اهمیت بسیار زیاد و انکار ناپذیری در تحلیل، کنترل و مدیریت آن‌ها خواهد داشت. به همین علت پژوهشگران از روش‌های مختلفی برای سنجش و پایش این پدیده استفاده نمودند که تداخل سنجی راداری بیشترین استفاده را داشته است (کروستو و همکاران؛^۱ ۲۰۰۲؛ چنگ و همکاران؛^۲ ۲۰۰۴؛ مینگشنگ؛^۳ ۲۰۰۸؛ داگینگ و همکاران؛^۴ ۲۰۱۰؛ ابیت و همکاران؛^۵ ۲۰۱۳؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۸). بر همین اساس و با توجه به اهمیت موضوع و تفاوت دیدگاه‌ها در علت رخداد پدیده فرونشست پژوهشگران در سه دهه اخیر تلاش گسترده‌ای برای توجه و روشن ساختن علل فرونشست آغاز کرده و در نقاط مختلف به ارزیابی این پدیده و پیامدهای ناشی از آن پرداخته‌اند. از جمله پور خسروانی و همکاران (۱۳۹۱) ضمن ارائه مفهوم دوالیتی در ژئومورفولوژی بیان می‌کنند که فرونشست زمین در دشت‌های داخلی بیشتر از آنکه مربوط به برداشت از منابع آب زیرزمینی باشد ناشی از تحرکات پوسته‌ای نرم و آن‌هم به صورت زوجی جهت رسیدن به تعادل است. همچنین مهرابی نژاد و پور خسروانی (۱۳۹۷) در پژوهشی تحت عنوان پایش روند پدیده فرونشست دشت انار با استفاده از روش تداخل سنجی راداری نتیجه می‌گیرند که در فاصله زمانی ۸۳ تا ۸۷ بیشترین میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه ۴۰ سانتی‌متر بوده است. در پژوهشی دیگر مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) ضمن پایش بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل یک و تکنیک تداخل سنجی راداری، نتیجه می‌گیرند که بیشینه جابجایی به میزان ۱۵ سانتی‌متر در سال و در جنوب منطقه مورد مطالعه رخ داده است. همچنین مرادی و همکاران (۱۳۹۹) ضمن تحلیل فرونشست زمین در منطقه ۱۸ شهر تهران با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیژومتری نتیجه می‌گیرند که بیشترین میزان فرونشست در یک بازه زمانی دو ساله ۴۳۰ میلی‌متر و در ناحیه یافت‌آباد رخ داده است. ژو و همکاران^۶ (۲۰۱۵) در پژوهشی تحت عنوان تحلیل سری زمانی فرونشست زمین تحت تأثیر انواع مختلف استفاده از زمین در دشت پکن شرقی با استفاده از تداخل سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ نتیجه می‌گیرند که، میزان فرونشست در این بازه زمانی بین ۲۰ تا ۱۲۷ میلی‌متر متغیر بوده است. آن‌ها بیان می‌کنند که نرخ فرونشست با ساختار زمین‌شناسی و ضخامت لایه‌های فشرده خاک همبستگی بالایی دارد. همچنین گلی و همکاران (۲۰۱۹) ضمن ارزیابی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی ناشی از فرونشست زمین در استان فارس با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، میانگین سالانه فرونشست در منطقه مورد مطالعه را ۲۵ سانتی‌متر برآورد می‌کنند. در پژوهشی دیگر فنگکایی و همکاران^۷ (۲۰۲۰) ضمن تجزیه و تحلیل عوامل تأثیرگذار بر فرونشست زمین در دشت شرقی پکن در کشور چین با استفاده از روش SBAS-INSAR نتیجه می‌گیرند که حداکثر میزان فرونشست زمین در دوره‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۰ و ۲۰۱۰-۲۰۱۵

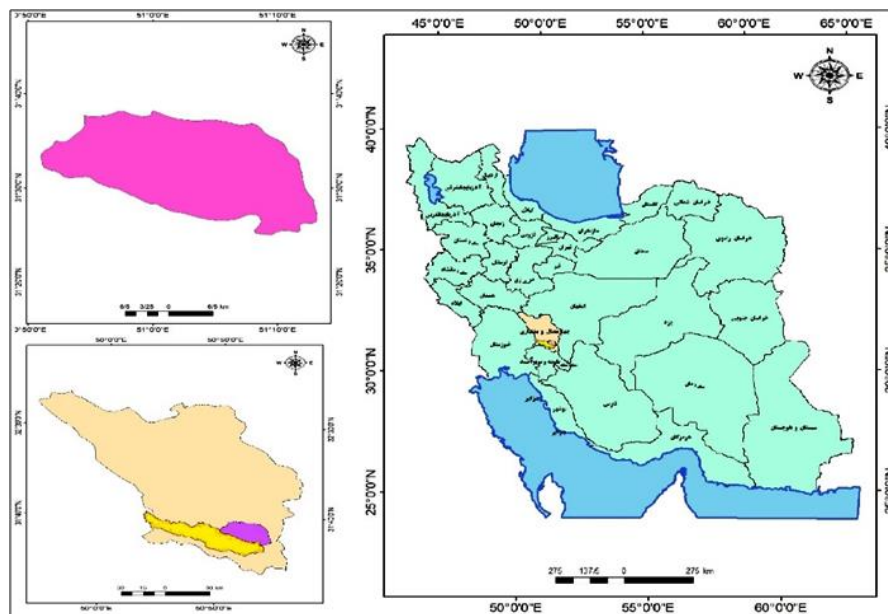
1. Crosetto et al
 2. Chang et al
 3. Mingsheng
 4. Daging et al
 5. Aobpaet et al
 6. Zhu et al
 7. Fngkai et al

به ترتیب به ۱۱۰/۷ و ۱۴۴/۴ میلی‌متر در سال رسیده است. همچنین خرمی و همکاران (۲۰۲۰) ضمن ارزیابی فرونشست زمین در شهر مشهد با استفاده از PS-INSAR نتیجه می‌گیرند که میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ ۱۹/۱ سانتی‌متر در سال می‌باشد. آن‌ها بیان می‌کنند که خصوصیات ژئوتکنیکی منطقه و میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی به شدت بر میزان و توزیع فرونشست تأثیر می‌گذارند. در همین راستا این پژوهش سعی دارد ضمن پایش میزان فرونشست زمین در دشت خانمیرزا، ارتباط آن را با برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی ارزیابی و تحلیل نماید.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

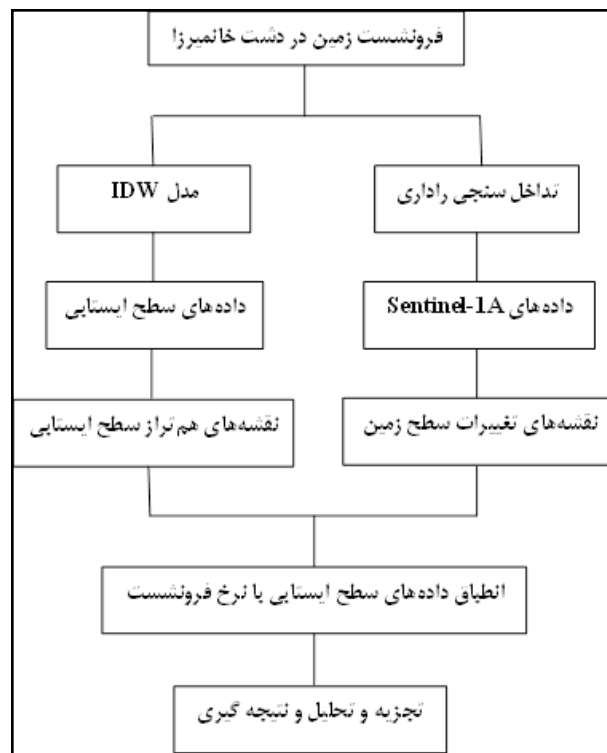
حوضه آبخیز خانمیرزا یکی از زیر حوضه‌های مهم کارون شمالی است که در محدوده ۳۱ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۲۹). این حوضه در جنوب شرقی استان چهارمحال و بختیاری و در نزدیکی شهرستان بروجن واقع شده و از شمال به کوه‌های پازنپیر دودلو، از غرب به الیشان، از شرق به کوه سیوک و از جنوب به کوه کلار و سرخ محدود می‌شود. حوضه خانمیرزا با مساحت ۳۹۲ کیلومتر مربع و محیط ۹۱ کیلومتر دارای شکل کشیده بوده و محور حوضه شرقی- غربی می‌باشد. حداکثر ارتفاع در این حوضه ۲۹۴۰ و حداقل ارتفاع ۱۷۲۵ متر از سطح دریا می‌باشد. مهم‌ترین رودخانه موجود در این حوضه رودخانه خانمیرزا است که پس از عبور از سرتنگ و در نزدیکی زرین درخت، در جهت غربی جریان یافته و از تنگ کلوره گذشته و پس از عبور از شهر لردگان همراه رودخانه لردگان و منج به رودخانه کارون می‌پیوندد (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده‌ها و روش‌ها

به‌منظور پایش نرخ فرورنشست زمین در دشت خانمیرزا از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده است. در واقع تکنیک تداخل سنجی راداری ترکیب تداخل دو موج الکترومغناطیس روی سطح زمین و تکنیک دریچه مصنوعی است. این تکنیک از اطلاعات فاز دو تصویر رادار استفاده کرده و با محاسبه اختلاف فاز میزان جابجایی پوسته زمین را محاسبه می‌کند. در مرحله بعد جهت سنجش ارتباط بین افت سطح آب‌های زیرزمینی با فرورنشست زمین، نقشه‌های هم‌تراز سطح آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی با استفاده از مدل‌های زمین‌آمار در نرم‌افزار Arc GIS تهیه گردید. در مرحله آخر به‌منظور سنجش ارتباط فرورنشستی با روند برداشت دو نقشه فرورنشستی و هم‌تراز سطح ایستابی در نرم‌افزار GoogleEarth بر یکدیگر منطبق شدند. شکل ۲ مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲: مراحل انجام پژوهش

تداخل سنجی راداری

گردآوری داده

انتخاب داده برای پردازش تداخل سنجی اساساً بر مبنای استفاده داده و فاصله زمانی و مکانی مناسب بین آنهاست. انتخاب طول خط مبنا بر اساس هدف کاربرد است. مؤلفه عمودی خط مبنا (عمود بر راستای پرواز) دلالت بر حساسیت توپوگرافی دارد و هر چه بزرگ‌تر باشد سیگنال توپوگرافی را واضح‌تر می‌کند. لذا در نگاشت دگرشکلی، خط مبنای

عمودی حداقل ترجیح داده شده تا مؤلفه فاز توپوگرافی کاهش یابد. فاصله زمانی نیز بستگی به نوع دگرشکلی انتخاب می‌شود. در این پژوهش از ۶ سری داده راداری مربوط به ماهواره Sentinel-1A، سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV، که طی سه دوره زمانی، ۲ دوره تقریباً یک‌ساله و ۱ دوره ۲ساله برداشت شده است، استفاده شد. تحلیل‌های انجام‌گرفته در محیط سیستم عامل ویندوز و با استفاده از نرم‌افزار SNAP انجام گرفت. همچنین مدل ارتفاع رقومی استفاده شده در این پژوهش از نوع SRTM با قدرت تفکیک ۱۰ متر می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات تصاویر سنتینل مورد استفاده در پژوهش

دوره زمانی	نوع ماهواره	تاریخ اخذ تصویر	نوع پردازش تصویر	نوع گذر تصویر	کانال	قطبش	جهت مدار	زاویه مداری	خط مبنا عمودی
دوره اول	Sentinel-1A	۲۰۱۶/۱۱/۱۳	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending	۳۵	۰
	Sentinel-1A	۲۰۱۷/۶/۵	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending	۳۵	-۹۰
دوره دوم	Sentinel-1A	۲۰۱۷/۳/۱۴	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Aessending	۲۸	۰
	Sentinel-1A	۲۰۱۸/۶/۱۳	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Aessending	۲۸	-۱۱
دوره سوم	Sentinel-1A	۲۰۱۸/۱۲/۲۲	IW.SLC	Master	C	VV-VH	Dessending	۳۵	-۱۱
	Sentinel-1A	۲۰۲۱/۲/۹	IW.SLC	Slave	C	VV-VH	Dessending	۳۵	۱۷

انتخاب زوج تصاویر تداخل‌سنجی

انتخاب مناسب و بهینه زوج تصاویر راداری جهت تداخل‌سنجی از مهم‌ترین گام‌های موجود در عملیات تداخل‌سنجی است. در این زمینه، فرکانس سنجنده مورد استفاده، خط مبنای عمود مکانی، همپوشانی مکانی و همچنین همپوشانی طیفی در راستای پرواز (آزیموتال) از عوامل پایه در انتخاب زوج تصاویر است. به‌طور کلی زمانی یک زوج تصویر سنتینل پتانسیل تداخل‌سنجی را دارند که باز پراکنش انرژی برگشته از سطح زمین حداقل در دو آنتن پوشش داده شده باشند یا منطقه مشترک در حداقل دو تصویر راداری موجود باشد. در واقع زمانی خط مبنای عمودی مربوط به دو تصویر از یک مقدار بحرانی (بسته به نوع سنجنده) بیشتر گردد، هیچ اطلاعات فازی نمی‌تواند ذخیره شود، وابستگی سیگنال بین دو تصویر از بین رفته و تداخل‌سنجی غیرممکن می‌گردد. خط مبنای زمانی یا فاصله زمانی بین اخذ دو تصویر نیز از عوامل مهم جهت تشکیل تداخل‌نگار می‌باشد. بدین صورت که با افزایش زمان اخذ دو تصویر امکان بروز تغییر در اهداف زمینی بیشتر گردیده و احتمال وابستگی سیگنال بین دو تصویر کاهش می‌یابد که خود موجب افزایش نویز در تداخل‌نگار حاصل می‌شود و تداخل‌نگار مربوطه ساخته نمی‌شود و یا دارای اطلاعات صحیح نیست. پس اولین گام انتخاب تصاویر مناسب با حداکثر همپوشانی مکانی و زمانی و طیفی و هم‌خوانی سایر پارامترهای مؤثر می‌باشد. با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر ارزیابی میزان فرونشست دشت خانمیرزادر طی ۳ دوره زمانی است از تصاویر ماهواره سنتینل

استفاده شده است. در این پژوهش برای هر دوره زمانی یک زوج تصویر یعنی یک تصویر پایه^۱ و یک تصویر پیرو^۲ از منطقه مورد مطالعه تهیه شد. یعنی در مجموع ۶ تصویر از سنجنده sentinel 1-a از سایت asf.alaska.ir تهیه گردید.

هم مرجع سازی تصاویر^۳

برای انجام این مرحله بسیار مهم پارامترهای مداری هر دو تصویر به همراه مدل رقومی ارتفاعی منطقه و استفاده از نقاط پراکنش گر دائم استفاده می‌گردد. بدین منظور ابتدا محدوده مورد نظر از تصاویر اصلی به خاطر سرعت در پردازش تصاویر جدا شد. پس از برش تصاویر به منظور تصحیح مداری تصویر، فرایند Apply-orbit-file بر روی آن‌ها انجام گردید. سپس از عملگر Back Geocoding استفاده شد. این عملگر دو تصویر جدا شده منطقه از دو بازه زمانی مختلف را با زیر نوار یکسان را با استفاده بردارهایی از دو فرآورده و یک مدل رقومی ارتفاعی ثبت می‌کند. در ادامه به منظور استفاده از یک آزیموت و برد ثابت برای کل تصاویر از عملگر Enhanced Spectral Diversity استفاده گردید.

تولید اینترفروگرام

زمانی می‌توان تداخل سنجی تصاویر راداری را ایجاد کرد که دو تصویر از یک منطقه در زمان‌های متفاوت در دسترس داشته باشیم. بطوریکه هر زوج تصویر راداری قادر به تولید یک تداخل نماست. بنابراین با در دست داشتن n تصویر از منطقه می‌توان $N(n-1)/2$ تداخل نما تولید کرد. تداخل سنجی تصاویر راداری بر پایه اندازه‌گیری یکی از ویژگی‌های امواج الکترومغناطیسی بنام phase استوار است. موج ارسالی به صورت تابع $\sin x$ و موج بازتابی تابع برابر $\sin x + 2$ است. ترکیب موج‌های بازتابی و ارسالی برابر $x/2$ خواهد بود که آن را تفاوت فاز می‌نامند. ترکیب این دو موج، موج برآیند را کنترل می‌کنند. تلفیق دو موج تداخل سنجی راداری یک تصویر اینترفرومتری را تولید می‌کند. البته اینکه کدام تداخل‌نماها می‌توانند دقت مورد نظر را تأمین کنند توسط پارامتری بنام همدوسی تعیین می‌شود. در واقع همدوسی پارامتری مختلط است که مقدار دامنه آن معرف کیفیت تداخل نما بر اساس میزان همبستگی پیکسل‌های متناظر دو تصویر و مقدار فاز آن همان اختلاف فاز دو تصویر یا فاز تداخل نماست، تصویر حاصله می‌تواند نشان‌دهنده دور شدن یا نزدیک شدن به سنجنده باشد، به طوری که از این طریق می‌توان فرونشست یا بالآمدگی در محدوده مورد مطالعه را مشاهده کرد. این تصویر از یکسری پیکسل‌های رنگی تشکیل شده است فرینچ نامیده می‌شود. دو نقطه‌ای که در نوار رنگی قرار گرفته باشند به شرطی که از هیچ نوار رنگی دیگری عبور نکرده باشند به همان میزان جابجایی اتفاق افتاده است. هر فرینچ معادل نصف طول موج است. بنابراین هر پیکسل جابجا شده معادل نصف طول موج خواهد بود.

-
1. Master
 2. Slave
 3. Corigestration

پیکسل‌های زرد، قرمز و آبی به معنای نزدیک شدن به سنجنده هستند و زرد، آبی و قرمز به معنای دور شدن از رادار هستند. اینترفروگرام با ضرب مختلط دو تصویر که نسبت به هم ثبت هندسی شده‌اند به دست می‌آید. حالت کلی ضرب مختلط به صورت رابطه (۱) است:

$$I = M \cdot S^* \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، I اینترفروگرام مختلط، M تصویر Master مختلط و S تصویر Slave مختلط است. به دلیل متفاوت بودن واحد توان تفکیک در راستای رنج و آزیموت، پیکسل‌های اینترفروگرام به شکل مربع نیستند و برای رفع این مشکل بعد از ضرب مختلط یک پروسه میانگین‌گیری پیکسل‌های همسایگی در راستای رنج و آزیموت انجام می‌دهند. این پروسه باعث کاهش نسبت سیگنال به نویز و توان تفکیک مکانی می‌شود.

بازیابی فاز دگرشکلی

همان‌طور که گفته شد فاز اینترفروگرام علاوه بر مؤلفهٔ دگرشکلی شامل مؤلفه‌های توپوگرافی، مداری، اتمسفر و نویز نیز است. برای این منظور ابتدا مدل رقومی ارتفاعی زمین توسط فایل هدر خود خوانده شده و یک فاز مشابه ساخته می‌شود و سپس از اینترفروگرام کسر می‌شود. فاز تداخل سنجی اندازه‌گیری شده کسری از $\pi 2$ است، تعداد سیکل‌های فاز در این اختلاف مسیر مجهول می‌باشد. اختصاص دادن فاز مطلق به هر پیکسل در تصویر با استفاده از پروسه بازیابی فاز انجام می‌شود. این پروسه یکی از بخش‌های پیچیده پردازش تداخل سنجی است که در اجرا با دقت بالا دارای محدودیت می‌باشد. برای اجرای این پروسه روش‌هایی توسعه داده شده که شامل روش ردیابی مسیر و کمترین مربعات است. روش اول بازیابی فاز به صورت پیکسل به پیکسل انجام می‌گیرد و در روش دوم اختلاف گرادیان فازهای نهان شده و بازیابی شده در کل تصویر کمینه می‌شود (فرتی و همکاران؛ ۲۰۰۱). یکی از مهم‌ترین فرآیند محاسبه جابجایی، مرحله اصلاح فاز یا واپیچی فاز می‌باشد. از آنجا که در یک سیستم رادینسی، فاز یک اینترفروگرام می‌تواند فقط به اندازه $\pi 2$ تغییر کند ولی در بعضی مواقع ممکن است تغییرات بیش از این ممکن باشد. فرآیند اصلاح فاز باعث خواهد شد تا مقادیر واقعی پالس مجدداً محاسبه شده و ابهام $\pi 2$ اصلاح شود.

تصاویر سنتینل از ۳ قسمت IW1، IW2 و IW3 تشکیل شده است که هر کدام از این‌ها نیز دارای ۸ تا ۱۰ براست هستند. محدوده مطالعاتی در تصاویر مورد استفاده در قسمت IW1 های و براست های ۳ تا ۷ قرار گرفته‌اند، بنابراین با توجه به اینکه حد فاصل براست‌ها کمی فضای سیاه رنگ وجود دارد از عملگر *Tops deburst* به منظور ادغام ابتدا و انتهای هر کدام از براست‌ها و حذف فضاهای خالی استفاده شده است.

¹. Ferretti et al

حذف اثر توپوگرافی و اعمال نقاط کنترل زمینی^۱

پس از تشکیل اینترفروگرام اولیه با بهره‌گیری از dem srtm با قدرت تفکیک ۱۰ متر اثر فاز مربوط به فاز توپوگرافی حذف می‌گردد.

فرآیند فیلتر کردن

این مرحله با فیلتر کردن طیف تصاویر که منجر به حذف قسمت‌های نا همپوشانی می‌شود باعث کاهش نویز در اینترفروگرام شده و در واقع یک مرحله اختیاری محسوب می‌شود. فیلترهای مورد استفاده در تصاویر SAR نسبت به سایر تصاویر سنجش از دوری دیگر متفاوت هست و باید به این فیلترها به‌عنوان مجموعه‌ای از تصمیمات متفاوت در مناطق مختلف نگاه کنیم.

ساخت فاز مطلق^۲

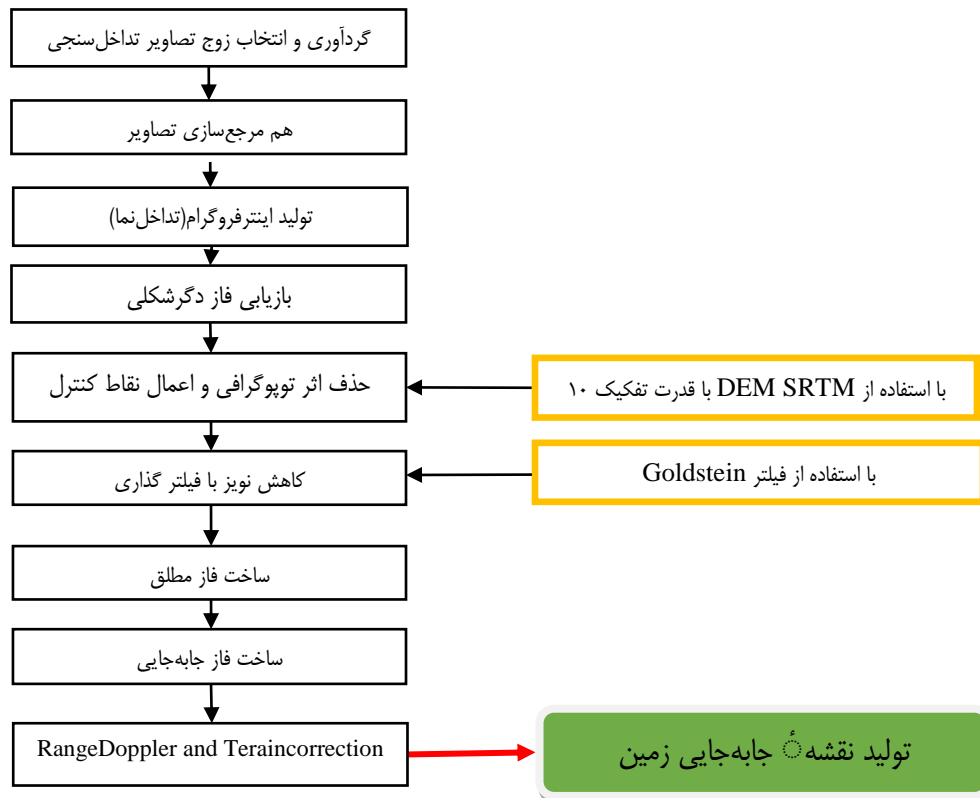
پس از انجام مراحل تداخل سنجی بالا برای تبدیل اختلاف فازها به جابجایی عمودی از یک نرم‌افزار واسطه به نام Snaphu جهت باز کردن فازها استفاده شده است. برای این منظور پس از انجام مراحل تداخل سنجی راداری از اینترفروگرام تهیه شده با استفاده از عملگر Export Snaphu یک Unphase خروجی گرفته شده است. سپس فایل خروجی گرفته شده به‌منظور باز کردن فازها وارد نرم‌افزار Snaphu شده است.

ساخت فاز جابجایی^۳

در مرحله بعدی فازهای باز شده وارد نرم‌افزار شده و با استفاده از یک رابطه اختلاف فاز به‌جا به‌جایی عمودی در سیستم متریک تبدیل می‌گردد.

سپس مرحله Range doppler and terrain correction و در مرحله آخر فاز نهایی با بهره‌گیری از روش شرط نرم‌کنندگی در حل کمترین مربعات مقدار فرونشست به‌صورت میانگین محاسبه شده و اعوجاجات موجود در هندسه تصویربرداری راداری با بهره‌گیری از این روش تصحیح و به مختصات جغرافیایی تبدیل شد و در نهایت نرخ فرونشست در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه استخراج می‌گردد. شکل ۳ مراحل آنالیز داده‌ای راداری را نمایش می‌دهد.

1. Topophase Removal
2. Unwrapping
3. Phase to Displacement

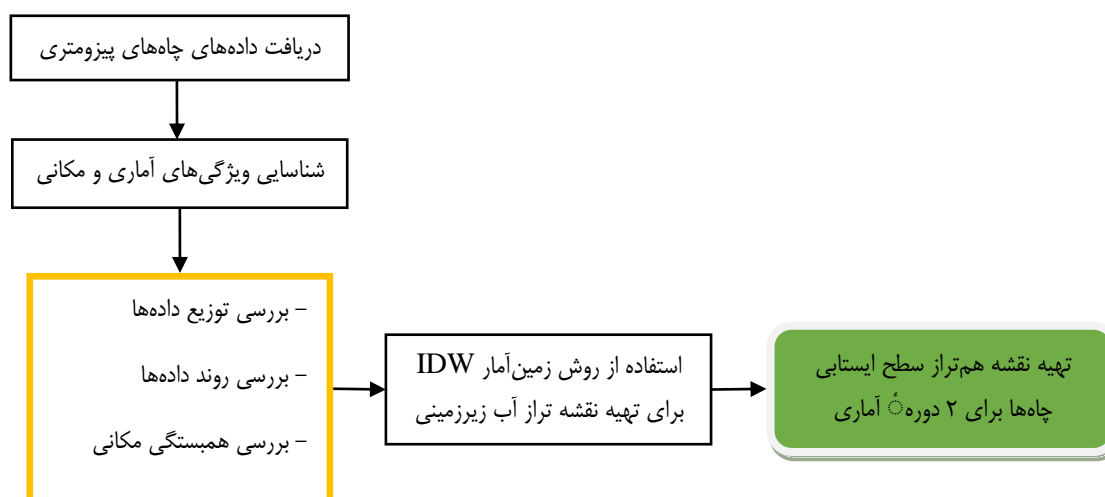


شکل ۳: مراحل انجام تداخل‌سنجی راداری

شیوه بررسی میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی

در این مرحله به منظور شناخت و ارزیابی روند و آثار برداشت بی‌رویه از آبخوان دشت خانمیرزا ابتدا داده‌های مربوط به افت سطح آب‌های زیرزمینی ۱۶ حلقه چاه مشاهده‌ای در منطقه مورد مطالعه از سازمان آب منطقه‌ای استان چهارمحال بختیاری برای یک بازه ۱۰ ساله اخذ گردید و با تقسیم به دو دوره مطالعاتی در سال‌های (۸۷-۹۲) و (۹۳-۹۷) برای تهیه نقشه هم‌تراز سطح ایستابی آبخوان خانمیرزا مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. سپس، برای مطالعه تغییرات کمی آب زیرزمینی، اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی و میانگین سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای دشت وارد نرم‌افزار ArcGIS شده و با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه‌های پهنه‌بندی افت سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه مطالعاتی تهیه گردید (شکل ۴). روش درون‌یابی IDW بر این فرض استوار است که تأثیر پدیده مورد نظر با افزایش مسافت کاهش می‌یابد به بیانی دیگر پدیده پیوسته در نقاط اندازه‌گیری نشده، بیشترین شباهت را به نزدیک‌ترین نقاط برداشت شده دارد، بنابراین برای تخمین نقاط مجهول، نمونه‌های اطراف باید مشارکت بیشتری نسبت به آن‌هایی که در فاصله دورتر قرار دارند، داشته باشند. در این مدل از فاصله به‌عنوان وزن متغیر معلوم در پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود زیرا نقش متغیر پیوسته در تأثیرگذاری با فاصله از مکان نقطه مجهول کاهش می‌یابد. بنابراین هر چه فاصله داده معلوم از نقطه مجهول افزایش می‌یابد، لازم است وزن‌ها بر اساس فاصله کاهش یابد، لذا فاصله‌ها معکوس می‌شود. به بیان دیگر از معکوس فاصله به‌عنوان وزن نقاط اندازه‌گیری شده در پیش‌بینی نقاط مجهول استفاده می‌شود به همین دلیل

است که این مدل Inverse Distance wighted نام گرفته است. از طرف دیگر تأثیر شدت وابستگی مکانی در داده‌ها را با استفاده از توان در معکوس فاصله می‌توان اعمال نمود. درون‌یابی در این شیوه به این ترتیب برآورد می‌شود که محدوده مورد نظر تبدیل به ماتریسی با سلول‌های هم‌اندازه می‌شود. مختصات مکانی این ماتریس روشن است و دارای واحد اندازه‌گیری می‌باشد. برای مثال دارای سلول‌های 50×50 متری است. در این شبکه مقدار متغیر در سلول‌هایی معلوم است یا به عبارتی اندازه‌گیری شده است و در سایر سلول‌ها این میزان نامعلوم است. سلول‌هایی که ارزش آن نامعلوم است با استفاده از سلول‌های اطراف در یک شعاع مشخص برآورد می‌شود (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۳، ۹).



شکل ۴: فلوچارت تهیه نقشه افت تراز آب زیرزمینی

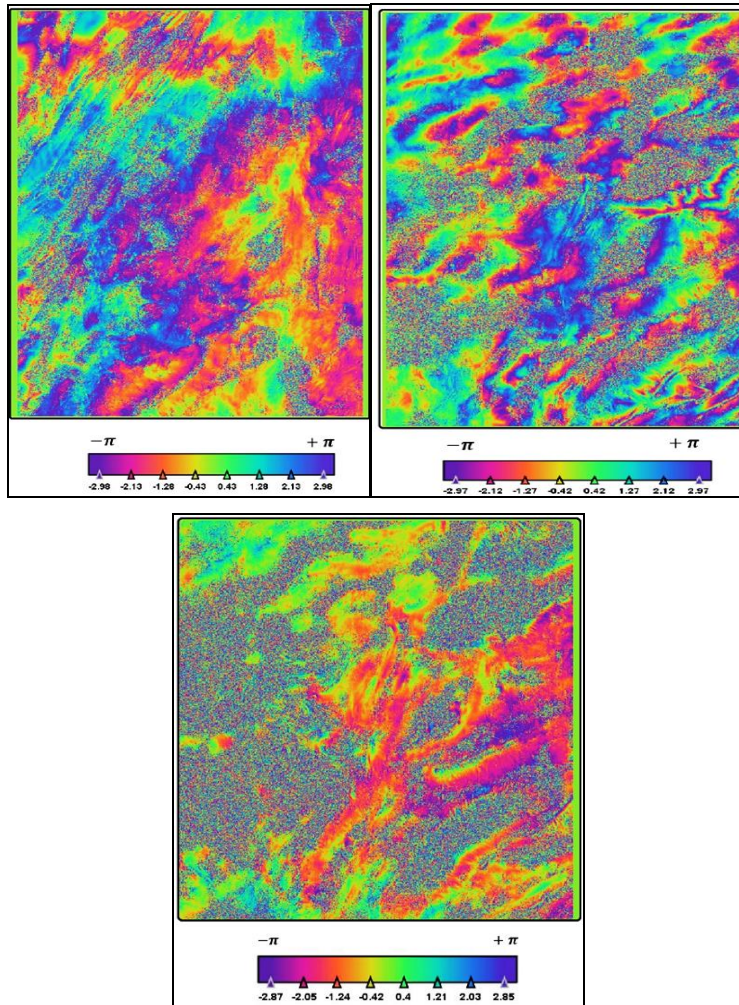
شیوه استنتاج ارتباط بین سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین

در مرحله بعد به منظور سنجش ارتباط بین افت سطح آب‌های زیرزمینی با فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه اقدام به تهیه نقشه‌های خطوط هم‌تراز (کنتور) افت سطح ایستابی چاه‌های مطالعاتی با استفاده از همان لایه‌های درون‌یابی تهیه گردید تا بتوان با انطباق با تداخل‌نگاشت‌های تهیه شده از منطقه در نرم‌افزار گوگل ارث رابطه این دو مورد بررسی قرار گیرد.

بحث و یافته‌ها

تهیه تداخل‌نگاشت منطقه مورد مطالعه

بر اساس ارتباط بین تصاویر پیرو و تصویر پایه جفت تصاویر مناسب به لحاظ کوتاه‌ترین خط مکانی و زمانی، جهت تولید تداخل‌نگاشت مشخص شده است. با اعمال روش تداخل‌سنجی به صورت سری زمانی بر روی تصویر اخذشده در هر دوره، تعداد ۳ تداخل‌نگاشت از محدوده مورد مطالعه استخراج شد. تداخل‌نگاشت‌های به دست آمده نشانگر فاز تجمعی منطقه مورد مطالعه که بین Π - و Π + در نوسان است، می‌باشد (شکل ۵).

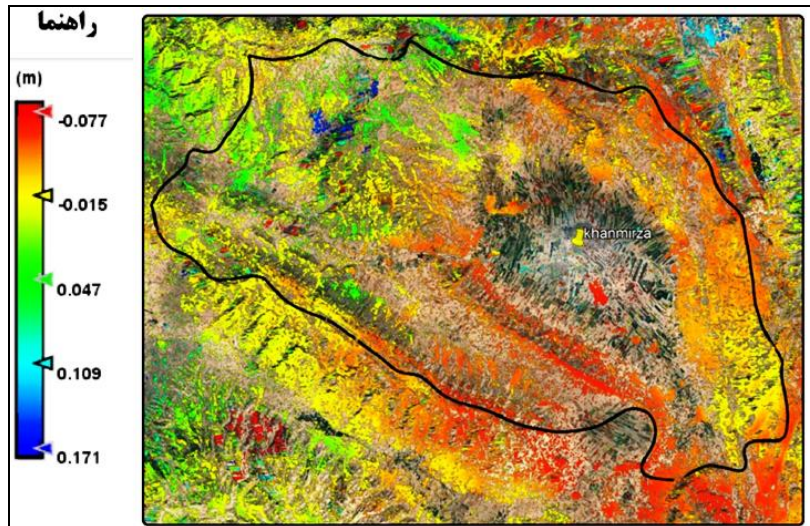


شکل ۵: تداخل‌نگاشت‌های به دست آمده از منطقه مورد مطالعه

آنالیز نرخ فرونشست منطقه مورد مطالعه

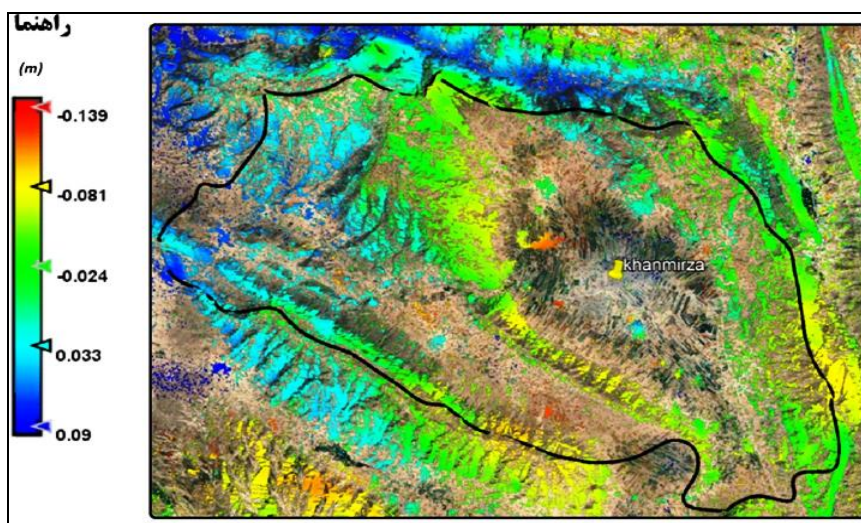
آنالیز داده‌های راداری حوضه خانمیرزا در بازه زمانی ۲۰۱۶/۱۱/۱۳ تا ۲۰۱۷/۶/۵ در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نرخ جابجایی در منطقه مورد مطالعه از ۱۷۱+ میلی‌متر تا ۷۷- میلی‌متر در این بازه زمانی متغیر است. جابجایی‌های رخ داده در جهت دید ماهواره است به طوری که اعداد مثبت نشانگر نزدیک شدن سطح به ماهواره و بالآآمدگی و اعداد منفی نشانگر فاصله گرفتن سطح از ماهواره و پایین رفتگی است. جهت نمایش بهتر تغییرات سطح زمین و ارتباط آن با توپوگرافی منطقه مورد مطالعه این تغییرات بر روی تصویر به دست آمده از Google Earth قرار گرفته است. طبق این نقشه حداکثر فرونشست به میزان ۷۷ میلی‌متر با رنگ قرمز نشان داده شده است. این میزان برای نقاط زرد رنگ به ۱۵ میلی‌متر می‌رسد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است نقاط قرمز رنگ تقریباً بر مرکز دشت منطبق است و با فاصله گرفتن از مرکز دشت نرخ فرونشست کاهش پیدا می‌کند. همچنین آنالیز

تصاویر در حاشیه دشت حاکی از بالآمدگی در برخی از نقاط است. به طوری که در منطقه مورد مطالعه نقاط آبی رنگ حداکثر بالآمدگی با به میزان ۱۷۱ میلی متر در این بازه زمانی نشان می دهد.



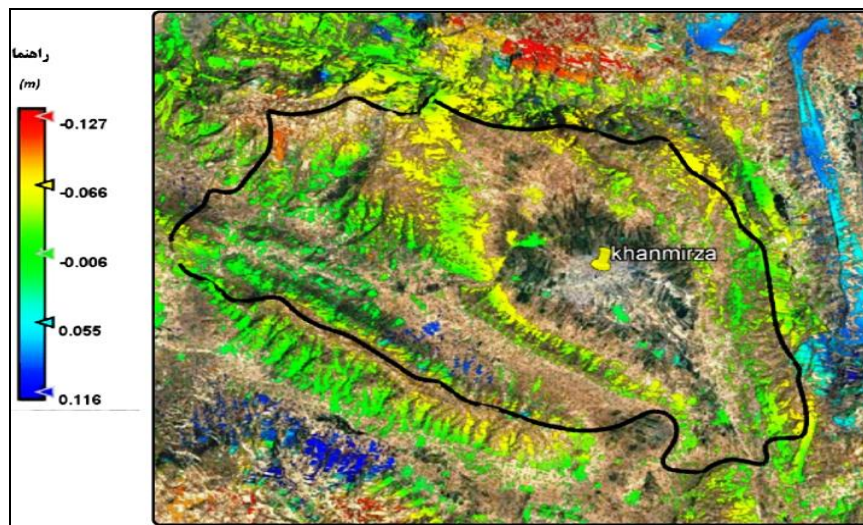
شکل ۶: نرخ جابجایی حوضه خانمیرزا در بازه زمانی (۲۰۱۶/۱۱/۱۳-۲۰۱۷/۶/۵)

همچنین شکل (۷) نرخ جابجایی سطح زمین را در حوضه خانمیرزا در بازه زمانی ۲۰۱۷/۳/۱۴ تا ۲۰۱۸/۶/۱۳ نشان می دهد. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است نرخ جابجایی در این بازه زمانی از +۹ میلی متر تا -۱۳۹ میلی متر متغیر است. به طوری که نقاط نارنجی رنگ نشان دهنده بیشترین میزان فرونشست می باشند که عمدتاً در مرکز و بخش جنوبی منطقه مطالعاتی قرار گرفته اند. همچنین نقاط آبی رنگ بیشترین میزان بالآمدگی را نشان می دهند که عمدتاً در حاشیه دشت و در بخش های شمالی و شرقی منطقه قرار گرفته اند.



شکل ۷: نرخ جابجایی در حوضه خانمیرزا در بازه زمانی (۲۰۱۷/۳/۱۴-۲۰۱۸/۶/۱۳)

نرخ تغییرات سطح زمین در حوضه خانمیرزا را در بازه زمانی ۲۰۱۸/۱۲/۲۲ تا ۲۰۲۱/۲/۹ در شکل (۸) نمایش داده شده است. طبق این تصویر نرخ جابجایی در حوضه خانمیرزا در این بازه زمانی از ۱۱۶+ میلی‌متر تا ۱۲۷- میلی‌متر تغییر می‌کند؛ به طوری که نقاط قرمز رنگ حداکثر میزان فرونشست را نشان می‌دهند که تراکم آن‌ها در شمال منطقه بیشتر از نقاط دیگر است. همچنین حداکثر میزان بالآمدگی در ارتفاعات جنوبی و شرقی منطقه مورد مطالعه است که با نقاط آبی‌رنگ نشان داده شده است.



شکل ۸: نرخ جابجایی حوضه خانمیرزا در بازه زمانی (۲۰۱۸/۱۲/۲۲-۲۰۲۱/۲/۹)

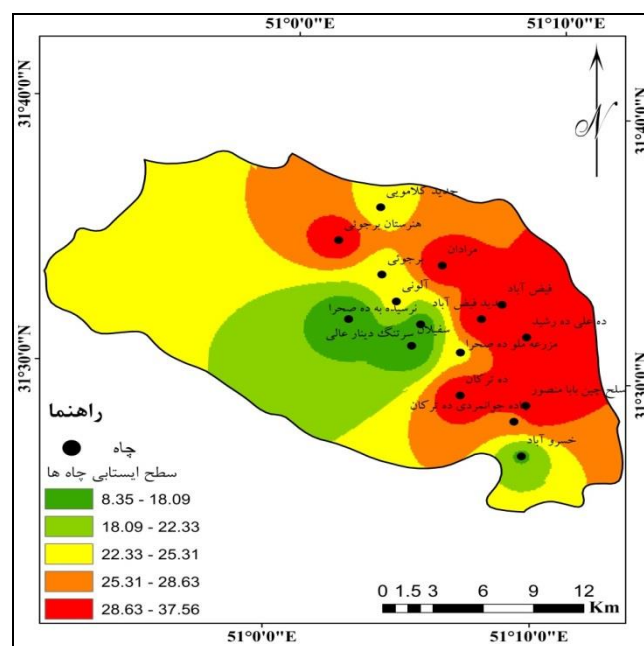
بررسی روند تغییرات آب‌های زیرزمینی در حوضه خانمیرزا

با توجه به اینکه در حوضه خانمیرزا برداشت از آب‌های زیرزمینی یکی از علل مهم فرونشست در این دشت عنوان شده است، به منظور تبیین روند تغییرات تراز آب زیرزمینی، روند کلی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در ۱۶ حلقه چاه در منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. (جدول ۲). با توجه به این‌که داده‌های مربوط به سنجیده Sentinel در بازه‌های زمانی (۲۰۱۷/۶/۵ تا ۲۰۱۶/۱۱/۱۳)، (۲۰۱۸/۶/۱۳ تا ۲۰۱۷/۳/۱۴) و (۲۰۲۱/۲/۹ تا ۲۰۱۸/۱۲/۲۲) است. بازه زمانی این داده‌ها به عنوان مبنایی جهت انتخاب بازه زمانی مربوط به تحلیل چاه‌های پیزومتری انتخاب شد. اما از آنجایی که عمدتاً پدیده فرونشست با یک تأخیر زمانی نسبت به افت سطح آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد، به همین علت اطلاعات مربوط به سطح آب چاه‌ها از سال ۱۳۸۷-۱۳۹۷ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت (جدول ۱). سپس نقشه پهنه‌بندی افت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل IDW در دو بازه زمانی قبل (اولین سری زمانی) و بعد از (آخرین سری زمانی) تصاویر اخذ شده از منطقه مورد مطالعه در دو بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷، نمایش داده شده است. شکل (۹) میانگین افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت خانمیرزا در بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲ را نشان می‌دهد (شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری، ۱۳۹۹).

جدول ۲: مشخصات چاه‌های نمونه در منطقه مورد مطالعه

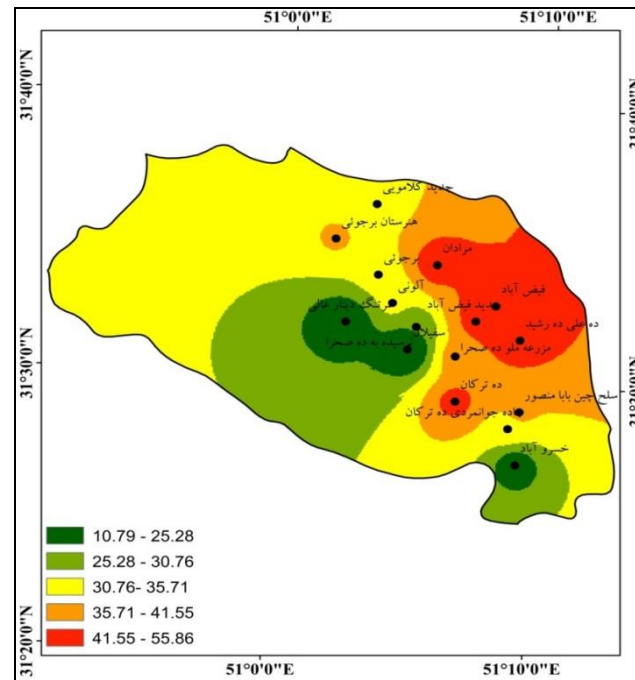
شماره	نام چاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین سطح ایستابی	میانگین سطح ایستابی
				سال‌های (۸۷-۹۲)	سال‌های (۹۳-۹۷)
۱	آلونی	506755	3490174	24.02	32.8
۲	برجوئی	505793	3492005	23.68	32.97
۳	جاده جوانمردی ده ترکان	514192	3482170	25.37	33.19
۴	جدید کلامویی	505466	3496693	23.45	32.84
۵	خسروآباد	514767	3479776	17.27	20.06
۶	ده ترکان	510902	3483824	34.16	45.05
۷	ده علی ده رشید	514622	3488089	31.84	46.64
۸	سرتنگ دینار عالی	503988	3488787	9.64	14.53
۹	سفیلان	507829	3487133	8.34	10.77
۱۰	سلح چین بابا منصور	514833	3483324	37.58	37
۱۱	فیض آباد	513038	3490284	32.79	55.88
۱۲	مرادان	509343	3492829	33.91	48.94
۱۳	مزرعه ملو ده صحرا	510753	3486820	24.45	38.14
۱۴	نرسیده به ده صحرا	508285	3488657	15.22	25.43
۱۵	هنرستان برجوئی	503099	3494267	33.01	36.58
۱۶	جدید فیض آباد	511872	3489213	35.73	43.85

طبق نقشه بخش‌های شرقی دشت دارای بیشترین افت سطح آب بوده که شامل چاه‌های فیض آباد، ده علی رشید، ده ترکان، سلح چین بابا منصور و ... بوده‌اند که با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند. به‌طور کلی کاهش سطح آب زیرزمینی در دشت خانمیرزا تا حد زیادی از غرب به شرق حالت صعودی داشته است.



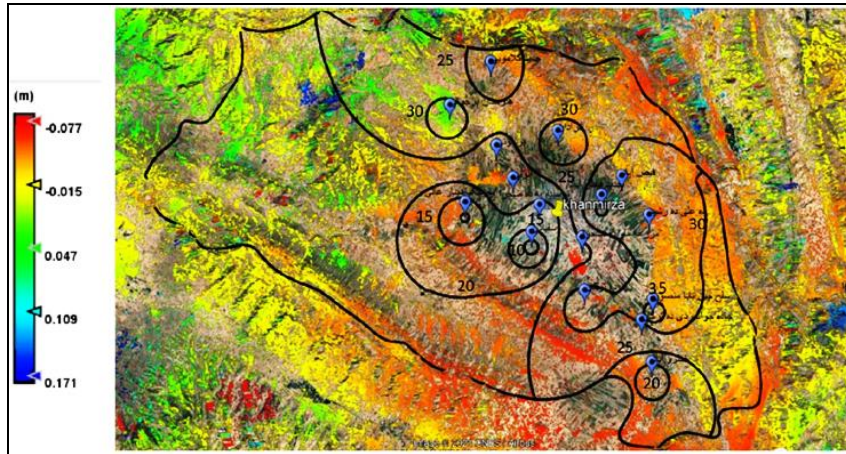
شکل ۹: نقشه افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت خانمیرزا در بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲

شکل (۱۰) میانگین افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت خانمیرزا را در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ نمایش می‌دهد. طبق این نقشه بیشترین افت سطح آب مربوط به بخش‌های شرق و شمال شرقی دشت می‌باشد.



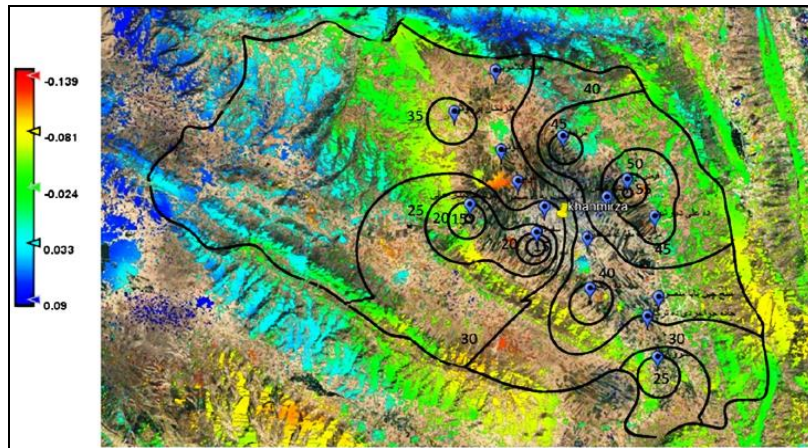
شکل ۱۰: نقشه افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت خانمیرزا در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷

در مرحله بعد جهت بررسی ارتباط بین فرونشست با برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی در حوضه خانمیرزا همپوشانی و انطباق نقشه‌های نرخ فرونشست با افت سطح آب‌های زیرزمینی در بازه‌های زمانی مختلف انجام شد. شکل ۱۱ انطباق نقشه جابجایی سطح زمین با منحنی‌های هم‌تراز افت سطح آب‌های زیرزمینی در حوضه خانمیرزا را در بازه زمانی ۲۰۱۶/۱۱/۱۳ تا ۲۰۱۷/۶/۵ نشان می‌دهد. آنالیز این نقشه حاکی از آن است که بیشترین افت سطح آب‌های زیرزمینی در این بازه زمانی در بخش‌های شرقی منطقه رخ داده است، در صورتی که حداکثر نرخ فرونشست در این بازه زمانی مربوط به بخش‌های جنوبی و مرکزی حوضه است.



شکل ۱۱: نقشه انطباق جابجایی سطح زمین با افت سطح آب‌های زیرزمینی حوضه خانمیرزا در بازه زمانی (۲۰۱۶/۱۱/۱۳-۲۰۱۷/۶/۵)

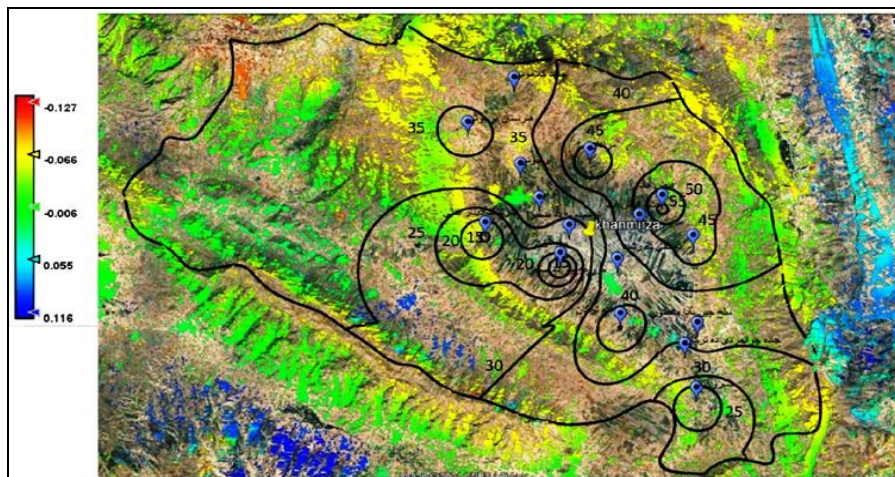
انطباق میزان جابجایی سطح زمین با افت سطح آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۱۷/۳/۱۴ تا ۲۰۱۸/۶/۱۳ در منطقه مطالعاتی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. آنالیز این نقشه حاکی از آن است که، با وجود کاهش بیشتر سطح آب در این بازه زمانی نسبت به دوره قبل شدت فرونشست کمتر بوده است از طرفی هیچ انطباق معناداری بین مناطق دارای بیشترین فرونشست با بیشترین افت سطح آب زیرزمینی مشاهده نمی‌شود. به طوری که حداکثر افت سطح آب‌های زیرزمینی به میزان ۴۰ تا ۵۰ متر که در بخش‌های شرقی دشت اتفاق افتاده منطبق بر بخش‌هایی از حوضه است که فرونشست کمتری را تجربه کرده‌اند یا حتی در برخی مناطق بالاآمدگی داشته‌اند.



شکل ۱۲: نقشه انطباق جابجایی سطح زمین با افت سطح آب‌های زیرزمینی حوضه خانمیرزا در بازه زمانی (۲۰۱۷/۳/۱۴-۲۰۱۸/۶/۱۳)

در شکل (۱۳) که نقشه فرونشست منطقه با افت سطح آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۱۸/۱۲/۲۲ تا ۲۰۲۱/۴/۹ انطباق داده شده است. نتایج آنالیز این تصویر نشان می‌دهد که با وجود حفظ روند افت سطح آب‌های زیرزمینی در این بازه زمانی شدت فرونشست نسبت به دوره‌های قبل کمتر بوده است. از طرفی با اینکه حداکثر میزان فرونشست مربوط به

بخش‌هایی از شمال غرب منطقه بوده است اما حداکثر افت سطح آب‌های زیرزمینی مربوط به بخش‌های شرق و شمال شرق منطقه بوده است.



شکل ۱۳: نقشه انطباق جابجایی سطح زمین با افت سطح آب‌های زیرزمینی حوضه خانمیرزا در بازه زمانی (۲۰۲۱/۲/۹-۲۰۱۸/۱۲/۲۲)

نتیجه‌گیری

فرآیندهای مخاطره آمیز مجموعه‌ای از پدیده‌ها و روابط بین آن‌ها می‌باشند که در ارتباط با هم عمل کرده و توانایی خسارت به انسان و متعلقات آن را دارا می‌باشند. نکته مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت فرآیندهای مخاطره آمیز شناخت صحیح و تشخیص علل وقوع آن‌هاست که اهمیت بسیار زیاد و انکار ناپذیری در تحلیل، کنترل و مدیریت آن‌ها خواهد داشت. پدیده فرونشست زمین از جمله پدیده‌های مخاطره آمیزی است که خسارت‌های زیادی را به بار می‌آورد پس شناخت علت اصلی وقوع آن کمک زیادی به مدیریت و کنترل آن خواهد نمود. تقریباً اکثر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، برداشت مازاد از سفره‌های آب زیرزمینی را علت تامه این پدیده معرفی می‌نمایند. حال آنکه اگر در یک مطالعه سیستماتیک، مؤلفه‌های زیادتری در ارتباط با این پدیده ارزیابی گردد نتایج متفاوتی حاصل شود. در همین راستا این پژوهش میزان فرونشست و عوامل مؤثر بر وقوع این پدیده در دشت خانمیرزا در استان چهارمحال بختیاری را ارزیابی و تحلیل نموده است. به همین علت با توجه به مبانی نظری سوسپیدانس و شناسایی عوامل مؤثر بر رخداد این پدیده، برخلاف پژوهش‌های قبلی که فقط ارزیابی خود را معطوف به کف دشت کرده‌اند، سعی گردید در یک ارزیابی سیستماتیک کل حوضه (دشت و ارتفاعات حاشیه آن) با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری پایش گردید. نتایج پژوهش نشان داد که، در بازه زمانی ۲۰۱۶/۱۱/۱۳ تا ۲۰۱۷/۶/۵ در مقابل فرونشست ۷۷ میلی‌متری کف دشت، بالآمدگی ۱۷۱ میلی‌متری در ارتفاعات حاشیه دشت اتفاق افتاده است. یا در بازه زمانی ۲۰۱۷/۳/۱۴ تا ۲۰۱۸/۶/۱۳ در مقابل فرونشست به میزان ۱۳۹ میلی‌متر در کف دشت، بالآمدگی ۹ میلی‌متری در ارتفاعات حاشیه‌ای رخ داده است؛ همچنین در بازه زمانی ۲۰۱۸/۱۲/۲۲ تا ۲۰۲۱/۲/۹ در برابر فرونشست ۱۲۷ میلی‌متری کف دشت، بالآمدگی ۱۱۶ میلی‌متری ارتفاعات حاشیه دشت اتفاق افتاده است.

این نتایج دلیلی بر این مدعاست که تغییرات سطح زمین در محدوده مطالعاتی ناشی از حرکات پوسته‌ای نرم آن هم به صورت زوجی جهت رسیدن به تعادل است. به عبارت دیگر فرونشست زمین در یک سیستم تعادلی و هم‌زمان با پدیده بالآمدگی در ارتفاعات مجاور آن‌ها صورت می‌گیرد که مصداقی بارز از مفهوم ژئودالیتی در این منطقه است. نتایج پژوهش در رابطه با نقش برداشت مازاد از منابع آب تحت‌الارضی در فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی حاکی از آن است که، در تمام بازه‌های زمانی مورد مطالعه ارتباط معناداری بین مناطق دارای حداکثر میزان فرونشست و مناطق دارای حداکثر افت سطح آب زیرزمینی وجود ندارد. به طوری که در بازه زمانی ۲۰۱۶/۱۱/۱۳ تا ۲۰۱۷/۶/۵، بیشترین افت سطح آب‌های زیرزمینی در بخش‌های شرقی منطقه، و حداکثر نرخ فرونشست در بخش‌های جنوبی و مرکزی منطقه رخ داده است. یا اینکه در بازه زمانی ۲۰۱۷/۳/۱۴ تا ۲۰۱۸/۶/۱۳ حداکثر افت سطح آب‌های زیرزمینی به میزان ۴۰ تا ۵۰ متر در بخش‌های شرقی رخ داده که فرونشست کمتری را تجربه کرده‌اند؛ همچنین در بازه زمانی ۲۰۱۸/۱۲/۲۲ تا ۲۰۲۱/۲/۹، با وجود حفظ روند افت سطح آب‌های زیرزمینی شدت فرونشست نسبت به دوره‌های قبل کمتر بوده است. از طرفی با اینکه حداکثر میزان فرونشست مربوط به بخش‌هایی از شمال غرب منطقه بوده است، اما حداکثر افت سطح آب‌های زیرزمینی مربوط به بخش‌های شرق و شمال شرق منطقه بوده است.

با توجه به نتایج پژوهش هرچند برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی علت تأمه فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه نیست، اما این پدیده در سال‌های اخیر موجب تشدید فرونشست در محدوده مطالعاتی و سایر دشت‌های داخلی ایران شده است. به همین علت در برنامه‌ریزی و مدیریت پدیده فرونشست باید ضمن پایش و کنترل برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی یکی از عوامل مؤثر در تشدید این پدیده، باید سایر عوامل همچون حرکات پوسته‌ای و تکتونیک را هم مد نظر قرار داد.

منابع

- ۱- پور خسروانی، محسن. (۱۳۹۱): دوالیتی در ژئومورفولوژی، استاد راهنما دکتر محمدحسین رامشت، رساله دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی دانشگاه اصفهان.
- ۲- پور خسروانی، محسن؛ رامشت، محمدحسین؛ المدرسی، سید علی. (۱۳۹۱): دوالیتی در ژئومورفولوژی، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۸۱، ۶۳-۷۲.
- ۳- رضایی، مجتبی؛ وفاخواه، مهدی؛ قرمزچشمه، باقر. (۱۳۹۵): تغییرپذیری مکانی سیل‌خیزی با استفاده از روش عکس‌العمل سیل واحد در حوزه آبخیز خانمیرزا، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۲، ۱۲۸-۱۳۹.
- ۴- شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری (۱۳۹۹): داده‌های مربوط به پیژومتری چاه‌های آب زیرزمینی دشت خانمیرزا.
- ۵- شریفی کیا، محمد (۱۳۹۱): تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-Insar) در دشت نوق- بهرمان، نشریه جهاد دانشگاهی، دوره شانزدهم، شماره ۳، صص ۷۷-۵۵.
- ۶- صالحی متعهد، فهیمه. دهقانی، مریم. (۱۳۹۸): ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل‌سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۳، شماره ۳، صص ۴۶۳-۴۳۵.

- ۷- قاسمی، مرضیه، مهدوی، علی، جعفر زاده، علی‌اکبر. (۱۳۹۳): مقایسه دو روش درون‌یابی Kriging و IDW برای تهیه نقشه خاک، دومین کنفرانس ملی مخاطرات محیط‌زیست زاگرس، تهران، <https://civilica.com/doc/373196>
- ۸- مرادی، آیدین؛ عمادالدین، سمیه؛ آرخ، صالح؛ رضایی، خلیل. (۱۳۹۹): تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیژومتری (مطالعه موردی منطقه شهری ۱۸ تهران)، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هفتم، شماره ۱، ۱۷۶-۱۵۳.
- ۹- مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ احمدی، حسن. (۱۳۹۸): بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی، تحقیقات منابع آب ایران، دور ۱۵، شماره ۱، ۲۲۹-۳۱۳.
- ۱۰- مهرابی‌نژاد، علی؛ پور خسروانی، محسن. (۱۳۹۷): پایش روند پدیده فرونشست دشت انار با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و ارتباط آن با برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی، چاپ در مجموعه مقالات نخستین همایش ملی آینده‌نگاری راهبردی در حوزه علوم جغرافیایی و مطالعات شهری- منطقه‌ای، کرمان، صص ۱۳۴-۱۲۳.
- 11- Aobpaet, Anuphoa. Miguel Caro, Cuenca. Andrew, Hooper. Itthi, Trisirisatayawong. (2013): Insar Timeseries Analysis Of Land Subsidence In Bangkok, Thailand. Int. J. Remote Sens., 34, 2969-2982, Doi: 10.1080/01431161.2012.756596.
- 12- Bianchini, S, Solari, L, Del Soldato, M, Raspini, F, Montalti, R, Ciampalini, A, And Nicola Casagli (2019): Ground Subsidence Susceptibility (GSS) Mapping In Grosseto Plain (Tuscany, Italy) Based On Satellite Insar Data Using Frequency Ratio And Fuzzy Logic. Remote Sensing, 11, 2015, Pp 1-27
- 13- Chang, Chung-P. Chang, T.Y. Chih-Tien, Wang. Kue, C.H. Chen, Kun-Shan. (2004): Land Surface Deformation Corresponding To Seasonal Ground- Water Fluctuation, Determining By SAR Interferometry In The SW Taiwan. Math, Comput, Sim, 67: 351- 359.
- 14- Crosetto, M. Carl, CT. Bruno, C. Castillo, M. (2002): Subsidence Monitoring Using SAR Interferometry: Reduction Of The Atmospheric Effects Using Stochastic Filtering. Geophysical Research Letters, 29(9): 261-264.
- 15- Daging, Ge. Wang, Yan. Zhang, Ling. Xia, Ye. Wang, Yi, Gue, Xiaofang. (2010): Using Permanent Scatterer In SAR To Monito Land Subsidence Along High Speed Rall Way-The First Experiment In China. ESA SP-677.
- 16- Fngkai, Li. Huili, G. Beibei, C. Chaofan,Z And Lin, G. (2020): Analysis Of The Contribution Rate Of The Influencing Factors To Land Subsidence In The Eastern Beijing Plain/China Based On Extremely Randomized Trees (ERT) Method. Remote Sensing 12: 1- 21.
- 17- Goli, A. Moradi, M. Dehghani, M. (2019): Land Subsidence Vulnerability Assessment Of Rural Seelements In Fars Provice. Research And Rural Planning, 8: 91-106.
- 18- Guzay, A, Malinowska, A.(2020): State Of The Art And Recent Advancements In The Modelling Of Land Subsidence Induced By Groundwater Withdrawal. Water Journal, 12, 2051. PP 1-41
- 19- Haghshenas Haghghi, M & Motagh, M.(2021): Landsubsidence Hazard In Iran Revealed By Country-Scale Analisis Of Sentinel-1 Insar, The International Archive Of The Photogrammetry, Remotesensing And Spatial Information. Vol. XLIII Pp 161-655.
- 20- Khorami, M. Abrishami, S. Maghsodi, Y. Alizadeh, B. Perrissin, D. (2020): Extreme Subsidence In Apopulated City (Mashhad) Detected By PS INSAR Considering Ground Water With Drawal And Geotechnical Propertice. Nature Research, 19: 1-16.
- 21- Mingsheng, L. (2008): Subsidence Measurement With PS-Insar Techniques In Shanghai Urban, The International Archives Of The Photogrammetry. Remote Sensing And Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7.
- 22- Zhu, L. Gong, H. Teatini, P. Li, X. Wang, R. Chan, B. And Dai, Zh. (2015): Land Subsidence Due To Grandwater Withdrawal In The Northern Beijing Plain, China. Engineering Geology, 28: 109-122.