

ارزیابی سری زمانی فرونشست دشت کرمانشاه با تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر خط مبنای کوتاه (SBAS)

معصومه رجبی - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی.
شهرام روستایی - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی.
سارامطاعی* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

چکیده

بررسی و پایش میدان جابه‌جایی ناشی از تغییر شکل‌های سطح زمین از مطالعات مهم و کاربردی در مباحث مختلف از جمله زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و ژئوفیزیکی است که در پیشگیری و رفتارشناسی سوانح طبیعی از قبیل زلزله، فرونشست و زمین‌لغزش نقش به‌سزایی دارد. در این میان فرونشست زمین یکی از پدیده‌های مخرب ژئومورفولوژیکی است که می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از زیرساخت‌ها و سازه‌ها آسیب برساند. به همین سبب با توجه به پیامدهای مخرب این پدیده، مطالعه و بررسی و حتی ارائه مدلی برای تخمین و پیش‌بینی نرخ فرونشست‌های آینده برای مناطق مستعد فرونشست ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور روش‌های مختلفی برای پایش فرونشست وجود دارد که از میان آن‌ها تکنیک تداخل‌سنجی، یکی از تکنیک‌های مهم و قابل توجه تبدیل شده است. در این پژوهش کوشش بر این است که سری زمانی فرونشست زمین را در دشت کرمانشاه در بازه زمانی ۲۰۱۶ (ژوئن) تا ۲۰۲۱ (ژانویه) با استفاده از ۳۶ تصویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و ۸۸ اینترفروگرام حاصل از آن، با به کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی راداری تحت رویکرد طول خط مبنای کوتاه (SBAS) برآورد شود. نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه نشان‌دهنده بیشینه ۱۰ سانتی‌متر فرونشست زمین در بخش غربی دشت کرمانشاه می‌باشد. بررسی ارتباط بین افت سطح آب‌های زمینی و میزان بیشینه فرونشست در سطح دشت خطی نبودن این رابطه را نشان می‌دهد. که با بررسی جنس زمین در محدوده مطالعاتی به تاثیر همزمان ضخامت رسوبات ریزدانه و افت سطح آب زیر زمینی در منطقه بیشینه پی برده شد.

واژگان کلیدی: فرونشست زمین، تداخل‌سنجی راداری، خط مبنای کوتاه، دشت کرمانشاه.

مقدمه

فرونشست یکی از بحران‌های جهانی است که زمین را مانند یک بیماری در بر می‌گیرد (نصیری‌خانقاه، ۱۳۹۸، ۴). در واقع فرونشست یک پدیده مورفولوژیکی است که در حالت منطقی این پدیده شامل فروریزش یا نشست روبه پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندک نیز باشد (بنیتو^۱، ۲۰۱۸، ۵۷۲ و سولاری^۲ و همکاران، ۲۰۱۸، ۱). به عبارتی فرونشست زمین نتیجه به هم خوردن تعادل بین فشارهای هدایت شده به سوی پایین در جهت قائم و یا کاهش مقاومت درونی مواد (استحکام) و یا ترکیبی از این دو حالت می‌باشد (آقایاری و همکاران، ۱۴۰۰، ۱۱۸). این پدیده تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی مختلفی همچون؛ انحلال تشکیلات زیر سطحی، تراکم رسوبات در اثر استخراج سیالات و ذخایر زیرزمینی و... پدیدار می‌شود (حقیقت‌مهرو همکاران، ۱۳۹۱، ۱۰۵). که به عنوان یک مشکل اساسی همراه با پیامدهای محیطی در بسیاری از نواحی شناخته شده است و در چند سال اخیر نیز در اغلب دشت‌های کشور این پدیده به عنوان یک بحران جدی نمودار شده است که ممکن است مبدل به مخاطره و تهدیدی برای انسان و دستاوردهای انسانی شود (صفاری و همکاران، ۱۳۹۵، ۸۴). فرونشست زمین به آهستگی و به تدریج گسترش می‌یابد و شاید تاثیر خطرهای ناگهانی و فاجعه‌بار مانند سیل و زلزله را نداشته باشد. با این وجود به طور معمول خسارت‌های ناشی از آن ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب هستند (روزبان و همکاران، ۱۳۹۵، ۱). که به واسطه حرکت بسیار کند (چند سانتی‌متر در سال) و بطئی زمین در اغلب مواقع درک و اندازه‌گیری آن به درستی میسر نیست به همین دلیل رویداد این پدیده در اغلب نواحی فقط زمانی شناسایی می‌شود که در مورفولوژی سطحی تاثیر بگذارد و تخریب و خسارت به بار آورد (یاستیکا^۳ و همکاران، ۲۰۲۰، ۲). به همین منظور شناسایی و کاهش پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست نیاز به یک سیستم پایش دارد در حالیکه متاسفانه مطالعات درباره‌ی شناسایی پدیده فرونشست در دشت‌های کشور منسجم و فراگیر نبوده و فقط در برخی نقاط که شرایط حاد و بحرانی است، پژوهش انجام شده است (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۴، ۵۷).

نخسین بررسی‌های علمی در ایران جهت تعیین نرخ فرونشست از حدود دو دهه قبل در دشت رفسنجان که واجد بالاترین سابقه و نرخ نشست بود، آغاز گردید. به نظر می‌رسد بیش از نیمی از دشت‌های کشور در معرض نشست باشد (صفاری و همکاران، ۱۳۹۵، ۸۳). مهم‌ترین عامل فرونشست اغلب دشت‌های ایران، برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی به موازات حاکمیت خشکسالی‌ها در چند دهه اخیر، توسعه بخش صنعت و کشت‌های عموماً با نیاز آبی بیشتر به همراه غالب بودن سیستم آبیاری سنتی می‌باشد (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۲، ۷). فرونشست زمین نیز در مقیاس جهانی در بین سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۵۰ هم‌زمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی به اوج خود رسیده و گزارش‌های متعددی از خصوصاً از نقاط خشک و کم باران در سراسر جهان ارائه گردیده است (رهنما و همکاران، ۱۳۹۳، ۶۳۰). جهت اندازه‌گیری این پدیده روش‌های متعددی ارائه شده است که از جمله آن‌ها تکنیک تداخل‌سنجی راداری می‌باشد. که با ورود ماهواره‌های راداری از دهه ۱۹۹۰، تکنیک تداخل‌سنجی راداری به عنوان یکی از روش‌های پردازش تصاویر راداری در سنجش از دور فعال، ابزاری مفید در پایش جابه‌جایی‌های سطح زمین معرفی شد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۱، ۹۸). به طوری که در طول چندین سال گذشته استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای ارزیابی و نظارت بر فرونشست زمین افزایش یافته است و الگوریتم‌های سری زمانی آن مانند PSI و SBAS، امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های زمین را تا حدی از دقت قابل مقایسه با روش‌های سنتی ژئودتیکی مانند تراز کردن فراهم کرده است (ابوپیت^۴ و همکاران، ۲۰۱۰، ۱). بنابراین با توجه به اهمیت و گستردگی وقوع و خطرات اقتصادی ناشی از وقوع فرونشست زمین، به بررسی جنبه‌های مختلف این موضوع پرداخته‌اند، که عمده این

1. Benito

2. Solari

3. Yastika

4. Aobpaet

مطالعات شامل؛ یاستیکا^۱ و همکاران (۲۰۲۰) فرونشست بطنی زمین را در مناطق وسیعی توسط تکنیک تداخل سنجی تفاضلی با خط مبنای کوتاه^۲ در محدوده بالی جنوبی (اندونزی) شناسایی کرده اند. که نرخ فرونشست سالانه محاسبه شده حاصل از نقشه متوسط فرونشست سالانه به روش تحلیل سری زمانی طول خط مبنای کوتاه برابر با ۲۱ تا ۴۴ میلی متر در سال برآورد شده است. همچنین لیو^۳ و همکاران (۲۰۲۰) فرونشست شهری را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی با خط مبنای کوتاه^۴ و با بهره گیری از تصاویر راداری در محدوده مطالعاتی دشت پکن در چین مورد ارزیابی قرار دادند. که بدین منظور از ۴۷ تصویر ماهواره انویست (ایسار)^۵ و ۲۴ تصویر ماهواره رادارست^۶ برای ارزیابی تغییر شکل عمودی در این منطقه استفاده شد. که نتایج حاصل از تصویر ایسار بدست آمده در طی سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ نشان می دهد که حداکثر تغییر شکل سالانه ۱۰۸,۲۷ میلی متر در سال بوده و میزان جابه جایی زمین را که از داده های رادارست بازیابی شده نشان دهنده حداکثر میزان فرونشست آن حدود ۱۲۸- میلی متر در سال است. هو^۷ و همکاران (۲۰۱۹) جابه جایی ناشی از فرونشست زمین را در کلان شهر فوژو^۸ با استفاده از تکنیک تحلیل سری زمانی به روش تداخل سنجی راداری با خط مبنای کوتاه پس از ساخت مترو ارزیابی کردند. در این پژوهش از ۲۴ تصویر از داده های بانده X سنجنده ترا سار^۹ در بازه زمانی جولای ۲۰۱۳ تا آگوست ۲۰۱۵ و تصاویری از داده های بانده C ماهواره سنتینل ۱ در بازه جولای ۲۰۱۵ تا فوریه ۲۰۱۸ به صورت دو مجموعه استفاده کردند. که نتایج حاصل از پردازش این تصاویر با تکنیک خط مبنای کوتاه نشان دهنده حداکثر فرونشست ۱۲- میلی متر در سال است و در نقشه نهایی فرونشست زمین در منطقه ۸ گودال فرونشست در طول دوره مشاهده پیدا کردند. در ایران نیز حجازی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۱ و ۲ اقدام به اندازه گیری فرونشست زمین در دشت هریس تبریز نموده اند. که به منظور تحلیل سری زمانی فرونشست از ۶ تداخل نگاشت محاسبه شده از ۲۱ تصویر راداری با استفاده از تکنیک خط مبنای کوتاه در بازه زمانی ۴ سال استفاده کردند. به علاوه از روش پراکنش کننده های دائمی^{۱۰} برای برآورد فرونشست و مقایسه با روش خط مبنای کوتاه^{۱۱} بهره گرفتند که نتیجه آن برتری روش خط مبنای کوتاه بر روش پراکنش کننده های دائمی بوده. که به طور کلی نتایج حاصل از برآورد هر دو روش در منطقه نشان دهنده میزان جابه جایی بین ۱۵ تا ۱۵۰ سانتی متر در سال در منطقه مورد مطالعه بوده است. عابدینی و همکاران نیز (۱۴۰۰) فرونشست زمین را در دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل سنجی بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان دهنده بیشترین نرخ فرونشست در باه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۰ حدود ۱۵ سانتی متر در سال در سمت غربی دشت بوده است. همچنین با تهیه نقشه هایی از پهنه بندی آب های زیرزمینی میزان افت ۲,۲۸ متر در سال را برای بازه مطالعاتی ذکر شده محاسبه نمودند که پیامد این افت سطح آب های زیرزمینی سبب ایجاد فرونشست در سطح دشت گردیده است. همینطور اکبری (۱۴۰۰) در پژوهشی از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی برای بررسی و پایش فرونشست در دشت اراک استفاده نمود بدین منظور از ۴۱ تصویر مختلط منفردنگر از سنجنده ایسار ماهواره انویست دریافت کرد. مراحل پردازش این تصاویر توسط نرم افزار انوی^{۱۲} و با استفاده از افزونه ساراسکیپ^{۱۳} بر مبنای چهار تداخل نگار صورت گرفته است. نتایج این ارزیابی ها در این پژوهش

1. Yastika

2. SBAS- D-InSAR

3. liu

4. InSAR-SBAS

5. Envisat ASAR

6. Radar sat-2

7. Ho

8. Fuzhou

9. TerraSAR

10. PSI

11. SBAS

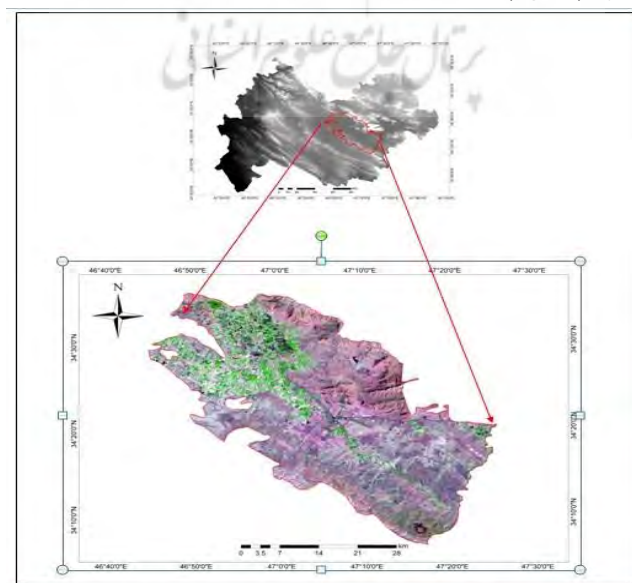
12. ENVI

13. SARscape

نشان دهنده متوسط نرخ فرورانشست کمابیش یک‌سانتی‌متر در سال است. تاکنون هیچ پژوهشی مبنی بر اندازه‌گیری میزان فرورانشست در دشت کرمانشاه ارائه نشده است اما طی سالیان اخیر با توجه به خشکسالی‌های مکرر و افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی، صنعتی شدن، افزایش بهره‌برداری از سطح چاه‌های منطقه سبب شد، که با بررسی این مهم در سطح دشت با نشانه‌های از وقوع این مخاطره از جمله افت آب‌های زیرزمینی، کج شدگی تیرهای چراغ برق، تخریب و فروریزش دیواره چاه‌ها، ترک خوردگی در ابنیه و سازه‌های انسان ساخت در محدوده مورد نظر مواجه شویم. در این پژوهش سعی شده است که سری زمانی فرورانشست دشت کرمانشاه را در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ با استفاده از تصاویر سنجنده ماهواره‌ای سنتینل ۱ و با به کارگیری تکنیک تداخل سنجی راداری تحت رویکرد طول خط مبنای کوتاه برآورد شود. پس از استخراج الگوی رفتار زمانی و مکانی نشست منطقه، سپس جهت تبیین علت فرورانشست رویداده در سطح دشت به بررسی ارتباط بین سری زمانی فرورانشست رخ داده و تغییرات سطح آب‌زیرزمینی در حریم‌چاه‌های برداشت آب و لوگ زمین شناسی آن منطقه پرداخته شد، در نهایت با حضور در منطقه بیشینه فرورانشست زمین به دنبال شواهدی از این پدیده رخ داده در سطح منطقه پرداخته خواهد شد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مختصات ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه و ۳۴ درجه، ۴۰ دقیقه طول و عرض جغرافیایی در شمال و ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه و ۳۴ درجه در جنوب، دارای مساحتی در حدود ۱۶۵۳ کیلومترمربع است. در شمال منطقه سیستم کوهستانی پرآو- بیستون است که جنس این سیستم از آهک توده‌ای یکپارچه متعلق به ژوراستیک و کرتاسه است که مملو از درز و شکاف و شکستگی است (علائی، ۱۳۸۲، ۱۴۴). در جنوب منطقه رشته کوهستانی کوه سفید واقع است جنس این توده در قسمت‌هایی از رادیولاریت‌های ناحیه عمیق دریایی و در برخی از نقاط از ماسه سنگ، شیل، آهک تشکیل شده است. اما دشت کرمانشاه در بین ارتفاعات یاد شده واقع شده، جنس کف دشت از رادیولاریت است که به وسیله رسوبات دوره کواترنر که ضخامت آن در شمال دشت به ۲۰۰ متر می‌رسد پوشیده شده است. ارتفاع متوسط دشت ۱۳۱۳ متر نسبت به سطح دریا می‌باشد. از لحاظ زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی در زون ساختاری زاگرس رورانده و تا حدودی در بخش جنوبی در زاگرس چین‌خورده قرار گرفته است. بخش شمالی عمدتاً از آهک‌های موسوم به سازند بیستون تشکیل شده است و جزو زاگرس رورانده محسوب می‌گردد (شکل ۱).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

جهت انجام مراحل تجزیه و تحلیل این پژوهش از منابع موجود شامل تصاویر راداری (سنتینل ۱^۱)، هیدرولوژی (تراز سطح آب چاه‌های پیژومتر، لوگ زمین‌شناسی چاه‌ها) استفاده شده است. سپس به منظور بررسی داده‌های مرتبط با تصاویر ماهواره-ای از نرم افزارهای اسنپ^۲، ساراسکیپ^۳، انوی^۴، استفاده گردیده است. تمام داده های راداری توسط آژانس فضایی اروپا^۵ ارائه شده است. بدین صورت که نقشه نرخ فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۱۶ (ژوئن) تا (ژانویه) ۲۰۲۱ حاصل از تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری با تصاویر اخذ شده از سنجنده سنتینل ۱ و استفاده از ۳۶ تصویر راداری (جدول ۱) در مسیر مداری صعودی و در گذر ۱۷۴ محاسبه شده است.

جدول ۱: تاریخ تصاویر مورد استفاده

ردیف	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۲۱
۱	۲۰۱۶/۰۸/۰۶	۲۰۱۷/۰۲/۲۷	۲۰۱۸/۰۱/۰۵	۲۰۱۹/۰۱/۱۲	۲۰۲۰/۰۱/۱۹	۲۰۲۱/۰۱/۰۱
۲	۲۰۱۶/۰۷/۲۶	۲۰۱۷/۰۳/۲۳	۲۰۱۸/۰۲/۲۲	۲۰۱۹/۰۳/۲۵	۲۰۲۰/۰۳/۰۷	
۳	۲۰۱۶/۰۹/۱۲	۲۰۱۷/۰۵/۱۰	۲۰۱۸/۰۴/۱۱	۲۰۱۹/۰۵/۱۲	۲۰۲۰/۰۴/۲۴	
۴	۲۰۱۶/۱۰/۳۰	۲۰۱۷/۰۶/۲۷	۲۰۱۸/۰۵/۲۹	۲۰۱۹/۰۶/۲۹	۲۰۲۰/۰۶/۱۱	
۵	۲۰۱۶/۱۲/۱۷	۲۰۱۷/۰۸/۱۴	۲۰۱۸/۰۷/۱۶	۲۰۱۹/۰۸/۱۶	۲۰۲۰/۰۷/۲۹	
۶		۲۰۱۷/۱۰/۱۳	۲۰۱۸/۰۹/۰۲	۲۰۱۹/۱۱/۲۰	۲۰۲۰/۰۹/۱۵	
۷		۲۰۱۷/۱۱/۳۰	۲۰۱۸/۱۰/۳۰		۲۰۲۰/۱۱/۰۲	
۸			۲۰۱۸/۱۲/۰۷		۲۰۲۰/۱۲/۲۰	

تداخل سنجی راداری مبتنی بر خط مبنای کوتاه (SBAS)

در بررسی فرونشست گام اصلی تشخیص محدوده و نرخ این پدیده است که امروزه این امکان با استفاده از پردازش تصاویر راداری فراهم شده است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷، ۳۴). یکی از روش‌هایی که در اندازه‌گیری فرونشست زمین به کار می‌رود، روش تداخل سنجی راداری است. با ورود ماهواره‌های راداری در دهه نود، این روش به عنوان ابزاری مفید در اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین با دقتی قابل مقایسه با دقت اندازه‌گیری‌های تراز یابی دقیق و سیستم تعیین موقعیت جهانی^۶ در اختیار محققین قرار گرفت است (عزتی و همکاران، ۱۳۹۴، ۵۶). تداخل سنجی راداری با درجه مصنوعی^۷ یک تکنیک سنجش از دور است که به منظور مطالعه حرکات سطح زمین در زمین لرزه ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا ابداع شد. در این تکنیک، دو یا چند تصویر راداری برای تولید مدل رقومی ارتفاعی یا تهیه نقشه جابه‌جایی سطح زمین به کار می‌روند. در این تکنیک، اختلاف فاز بین دو موج متفاوت اندازه‌گیری شده و این اختلاف فاز به تغییر فاصله بین سنجنده و هدف زمینی یا جابه‌جایی سطح زمین نسبت داده می‌شود. تداخل سنجی با درجه مصنوعی، از فاز تشعشع بازتابیده شده استفاده می‌کند و تصاویر مختلط که حاوی مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سنجنده هستند با یکدیگر ترکیب می‌شود و تصویری به نام اینترفروگرام تولید می‌شود (حاجی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲، ۱۷۷). در حالت ایده‌آل، هر اینترفروگرام باید فقط دارای اختلاف فاز ناشی از جابه‌جایی زمین باشد. در حالی که شامل مؤلفه‌های ناشی از توپوگرافی، اثر کرویت زمین، تغییر شکل سطح زمین و خطاهای موجود هستند:

$$\Delta\varphi_{int} = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{def}$$

1. Sentinel-1A

2. SNAP8

3. SARscape5.2

4. ENVI5.3

5. ESA

6. GPS

7. InSAR

در رابطه بالا Φ_{flat} مؤلفه فاز زمین مسطح، Φ_{topo} سهم فاز توپوگرافی و Φ_{def} اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل زمین است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷، ۳۶). هدف نهایی یک رویکرد تداخل سنجی تخمین صحیح فاز جابه‌جایی با حذف کامل یا محدود کردن تا حد امکان سایر اجزاء است (دهقانی و همکاران، ۲۰۱۰، ۳۹).

با توجه به ماهیت پویای پدیده‌ی فرونشست زمین در مقایسه با پدیده‌هایی که به طور ناگهانی اتفاق می‌افتد، مطالعه‌ی روندها و استخراج الگوهای زمانی و مکانی به وقوع پیوسته در گذشته با استفاده از آرشیو داده‌های ماهواره‌ای، می‌تواند در درک و شناخت بهتر وضعیت فعلی کارساز شود. یکی از قابلیت‌های کاربردی تداخل سنجی راداری، تحلیل سری زمانی جابه‌جایی با استفاده از مؤلفه‌های اختلاف فاز مربوط به فاصله‌های زمانی مختلف است. در این راستا رویکردهای مختلفی توسعه داده شده است. یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها، الگوریتم تحلیل سری زمانی زیر مجموعه خط مبنای کوتاه است. روش خط مبنای کوتاه برای تحلیل سری زمانی تداخل سنجی توسط براردینو و همکاران در سال ۲۰۰۲ با هدف تجزیه و تحلیل سری زمانی تغییر شکل سطح زمین پیشنهاد شد. در سال ۲۰۱۰ هانگ و همکاران این روش را اصلاح و روش SBAS را ارائه دادند و در سال ۲۰۱۱ دوبین و همکاران روش N-SBAS را مطرح نمودند. الگوریتم خط مبنای کوتاه برای نظارت بر تکامل زمانی تغییر شکل سطح زمین (فرونشست) توسعه داده شده است (پایی و همکاران، ۱۳۹۹، ۱۱۷). در نوشتار پیش رو با استفاده از داده‌های راداری و به کارگیری تکنیک تداخل سنجی راداری و تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه، سری زمانی پدیده فرونشست زمین در دشت کرمانشاه پایش و اندازه‌گیری می‌شود. روش خط مبنای کوتاه یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای پایش جابه‌جایی در یک منطقه در طول یک سری زمانی می‌باشد. این تکنیک متکی است بر ترکیب مناسب از اینترفروگرام‌های به وجود آمده از زوج تصاویر (راداری) که مشخصه آن خط مبنای کوتاه است. این کوتاهی باعث کاهش ناهمبستگی‌ها در تصاویر می‌گردد (ژئو، ۲۰۱۳، ۵). در روش مذکور تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد. همچنین خط مبنای زمانی آن‌ها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسب داشته باشد. پس از تشکیل تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود.

مراحل پردازش سری زمانی SBAS

پردازش تصاویر سنتینل ۱ در افزونه ساراسکیپ ۵،۲۴ در نرم‌افزار انوی ۵،۳۵ انجام شده است. فرآیند پردازش در چندین مرحله انجام گرفته است که در زیر شرح داده خواهد شد. تصاویر راداری^۶ دریافت شده قابل بارگذاری در نرم‌افزار مذکور نبوده به همین دلیل در ابتدا بایستی تصاویر دانلود شده به فرمت قابل پردازش توسط نرم‌افزار تبدیل شود. جهت انجام این مرحله نیازمند اخذ فایل‌های مداری مربوط به هر تصویر برای تصحیح مداری تصاویر و تبدیل به فرمت مورد نظر هستیم. این فایل‌ها به طور رایگان در سایت آژانس فضایی اروپا قابل دسترسی هستند. با توجه به حجم بالای تصاویر سنتینل و پوشش‌دهی این تصاویر با ابعاد زیاد، زمان پردازش برای کل تصویر بسیار زیاد است در نتیجه به منظور کاهش زمان پردازش در این مرحله تصاویر با توجه به محدوده مورد مطالعه برش داده می‌شوند. یکی از پارامترهای مهم در هندسه اینترفرومتری راداری تعیین خط‌مبنا می‌باشد. در واقع به صورت بردار جابه‌جایی بین دو ایستگاه تصویربرداری در صفحه آنتن، تعریف می‌شود (نصیری‌خانقاه و همکاران، ۱۳۹۸، ۶۴). این بردار

1. Dehghani

2. Zhou

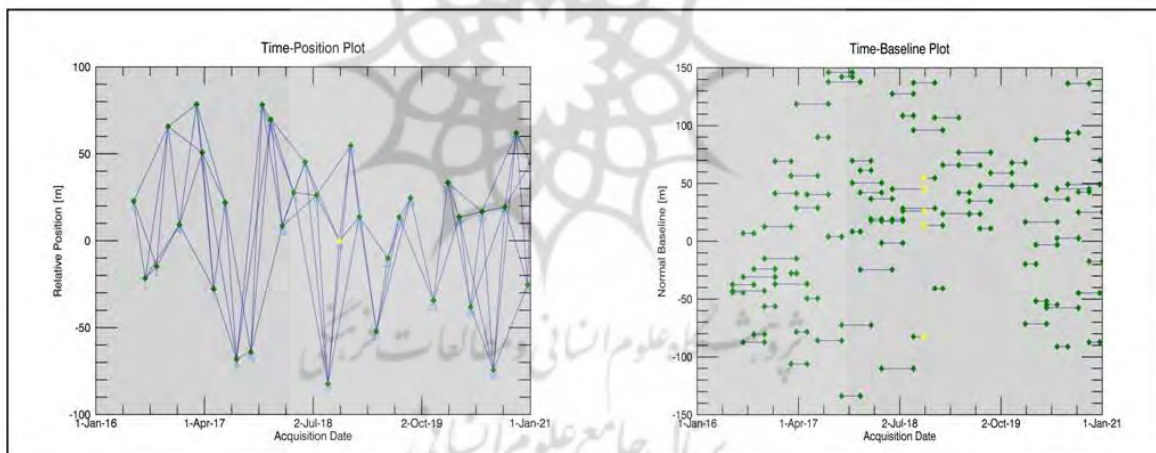
3. SENTINEL/1

4. SARscape5.2

5. ENVI5.3

6. SLC

خط مبنا شامل خط مبنای زمانی و خط مبنای مکانی می‌باشد. در مرحله تشکیل اینترفروگرام‌ها تعیین میزان مناسب این دو خط مبنا تاثیر بسیاری بر روی کیفیت نتیجه دارد. به همین منظور در این مرحله خط مبنای مکانی و زمانی تصاویر تعیین و گراف خط مبنای مکانی و زمانی تشکیل می‌شود (شکل ۲). از نظر تئوری بایستی ماهواره در گذر بعد دقیقا منطقه مورد پوشش در گذر قبل را بپوشاند تا طول خط مبنا صفر شود. اما این اتفاق به ندرت اتفاق می‌افتد چرا که ماهواره به جای مسیر مستقیم، در تیوپ حرکت می‌کند. لذا به طول خط مبنای کوچک در تصاویر اکتفا می‌شود (اکبری، ۱۳۱، ۱۴۰۰). خط مبنای مکانی بدین معناست که منطقه هدف از دو مدار مختلف در یک زمان تصویربرداری شود این مورد برای تصاویر اخذ شده مورد نظر خط مبنایی، کمتر از ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. اما خط مبنای زمانی، تصویر منطقه هر دو از یک نقطه و فقط با اختلاف زمانی می‌باشد که حداکثر آن برای تولید اینترفروگرام‌ها ۱۵۰ روز تعیین شده است. به طور کلی هرچه میزان خط مبنا به صفر نزدیک باشد موجب افزایش همبستگی تصاویر و کاهش ناهم‌دوسی می‌شود. بعد از تعیین خط مبنای زمانی و مکانی برای پردازش اینترفرومتری به یک تصویر با یک تاریخ مشخص به عنوان تصویر اصلی^۱ نیازمندیم تا بقیه تصاویر نسبت به آن پردازش شود. انتخاب تصویر اصلی بر این اساس صورت گرفته که باید دارای کمترین مقدار خط مبنای عمودی، زمانی و داپلر باشد. در این پژوهش انتخاب تصویر اصلی توسط نرم‌افزار اسنپ^۸ صورت گرفته است و با توجه به شرایط مذکور تصویر با تاریخ (۲۰۱۸/۱۰/۲۰) به عنوان تصویر اصلی انتخاب شده است. در نهایت یک شبکه‌بندی از اینترفروگرام تشکیل شده و با در نظر گرفتن خط مبنای میان اینترفروگرام‌ها تنها ۸۸ اینترفروگرام انتخاب شده که هر دو معیار مکانی و زمانی مناسب را داشته باشد.



شکل ۲: شبکه بندی خط مبنای زمانی و مکانی

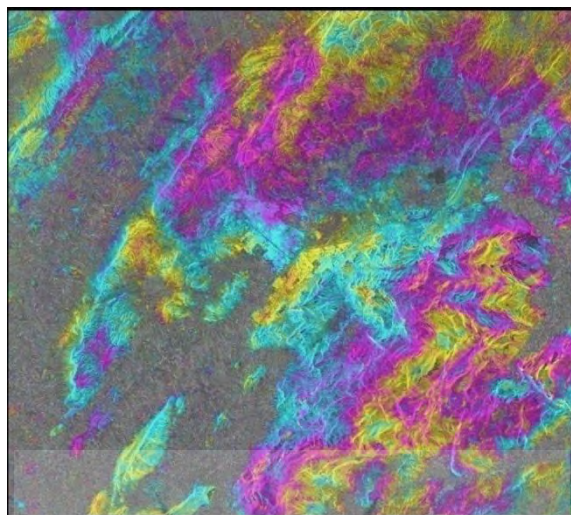
سپس با توجه شبکه‌بندی ایجاد شده اقدام به تشکیل اینترفروگرام، تصحیح فازی و بازیابی فاز می‌کنیم. از آنجا که اینترفروگرام‌های اولیه علاوه بر مؤلفه فاز جابه‌جایی دارای مؤلفه‌های دیگری از جمله مؤلفه فاز توپوگرافی، مؤلفه نویز، مؤلفه اتمسفر، مؤلفه خطاهای مداری می‌باشد می‌بایست به منظور دستیابی به فاز جابه‌جایی و در نتیجه برآورد میزان جابه‌جایی سطح زمین تمامی این مؤلفه‌ها حذف یا حداقل کسر شود تا فاز نهایی که تنها حاصل از تغییرات جابه‌جایی زمین است به دست آید. جهت انجام این موارد ابتدا به منظور تعدیل اثر توپوگرافی از روی اینترفروگرام‌ها به یک مدل رقومی ارتفاعی از منطقه مورد نظر نیازمند هستیم که بدین منظور از مدل رقومی استرچی‌دم^۲ استفاده می‌کنیم این تصویر به صورت آنلاین از نرم‌افزار گلوبال مپ^۳ اخذ شده و به فرمت قابل پردازش در نرم‌افزار انوی تبدیل شده است.

¹ Super master

² Aster GDEM

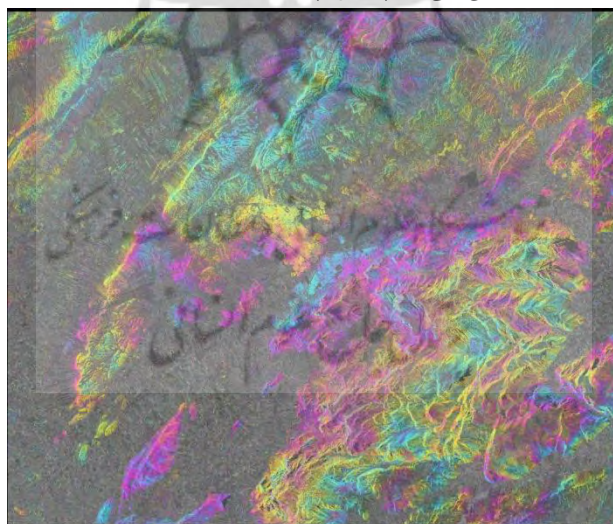
³ Global Mapper

با حذف اثر توپوگرافی، اینترفروگرام‌ها تا حدودی اصلاح فاز شده اما هنوز مؤلفه فاز نویز بر روی آن‌ها باقی مانده و حذف نشده است (شکل ۳).



شکل ۳: اینترفروگرام بدون اثر توپوگرافی (به عنوان نمونه ۲۰۱۶۰۶۰۸_۲۱۰۷۲۰۱۶)

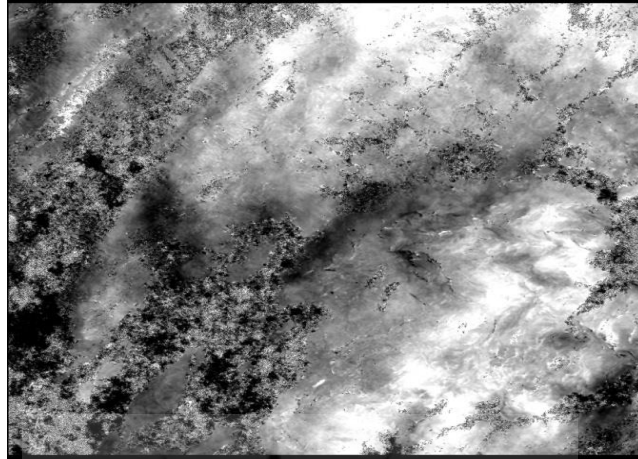
جهت حذف اثر نویز، با اعمال فیلتر گلدشتاین که فیلتر تطبیقی است اقدام به کاهش اثر نویز می‌کنیم، این فیلتر ماهیت داده‌ها و مقادیر فاز را تغییر نمی‌دهد و صرفاً درون‌یابی انجام می‌دهد. و در حقیقت فرینچ‌ها را قابل روئیت می‌کند و نویزهای مربوط به دوره‌های زمانی خط مبنا را کاهش می‌دهد (شکل ۴).



شکل ۴: اینترفروگرام با اعمال فیلتر تطبیقی (به عنوان نمونه ۲۰۱۶۰۶۰۸_۲۱۰۷۲۰۱۶)

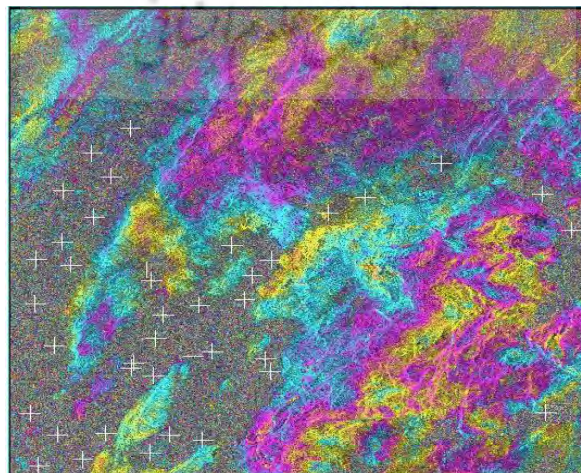
پس از حذف سایر مؤلفه‌ها از اینترفروگرام قبل از اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی عملیات بازیابی فاز انجام گردد. بازیابی فاز فرآیندی است که طی آن مقدار فاز مطلق با بیشترین دقت از مقدار اصلی فاز بازیابی می‌شود در واقع مشاهدات اصلی به صورت فاز نسبی است که ضریب 2π از فاز مطلق مجهول است و فاز اینترفروگرام تنها می‌تواند به صورت 2π باشد. به

این دلیل هر زمان تغییر فاز بزرگتر از 2π باشد، بازیابی فاز دوباره شروع می‌شود و چرخه خود را تکرار می‌کند. که به زبان ساده بازیابی فاز ابهام فاز را به 2π می‌رساند که از الگوریتم جریان با کمترین هزینه^۱ به منظور بازیابی فاز استفاده شد (شکل ۵).



شکل ۵: تصویر بازیابی فاز (به عنوان نمونه ۲۰۱۶۰۶۰۸_۲۱۰۷۲۰۱۶)

در مرحله بعد بایستی اینترفروگرام‌ها کنترل مجدد و مسطح شوند، در این مرحله تمامی خروجی‌ها یک بار دیگر فراخوانده می‌شود تا تمام خروجی‌ها این بار هم چک شوند. سپس اثر فاز ناشی از انحنای بیضوی زمین از تداخل‌نا حذف می‌شود و فقط فرینچ‌های مربوط به جابه‌جایی باقی می‌ماند، به این عمل مسطح ساختن تداخل‌نا می‌گویند. این بخش برای تبدیل و تصحیح اطلاعات فاز بازیابی نشده به مقادیر ارتفاع یا جابه‌جایی بسیار مهم است. که سبب می‌شود مدار تصحیح شود، مقادیر فاز مطلق محاسبه شود و رمپ‌های فاز ممکن حذف شود. یکی از پارامترهای مهم برای اجرای این مرحله معرفی نقاط کنترل زمینی^۲ است که در آن نقاطی را به عنوان نقاط مینا جهت تعیین میزان جابه‌جایی انتخاب می‌کنیم با فرض اینکه این نقاط هیچ‌گونه جابه‌جایی ندارند. هر نقطه انتخابی باید دارای دو ویژگی باشند اول اینکه توپوگرافی در محل انتخاب نقطه وجود نداشته باشد و دوم اینکه جابه‌جایی در آن نقطه مورد نظر وجود نداشته باشد (شکل ۶).

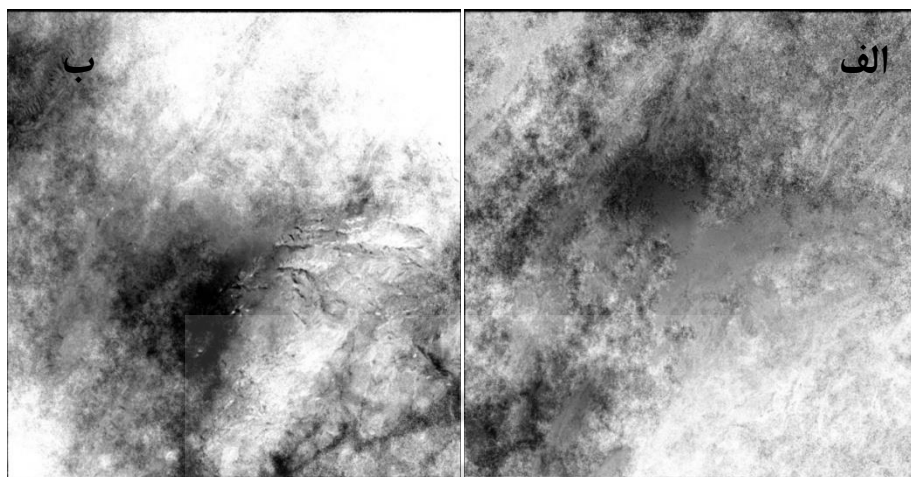


^۱ MCF

^۲ GCP

شکل ۶: نقاط کنترل زمینی بر روی اینترفروگرام

پس از کنترل و مسطح ساختن اینترفروگرام‌ها براساس نقاط کنترل زمینی مقادیر مطلق فاز بازیابی و مسطح شده در مرحله قبل، به جابه‌جایی تبدیل می‌شود (شکل ۷) و نقشه سرعت و سری زمانی متوسط جابه‌جایی سالانه برحسب میلی‌متر در سال به دست آمده است که با اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر تصحیحات اتمسفری بر روی آن‌ها انجام می‌شود (شکل ۸).

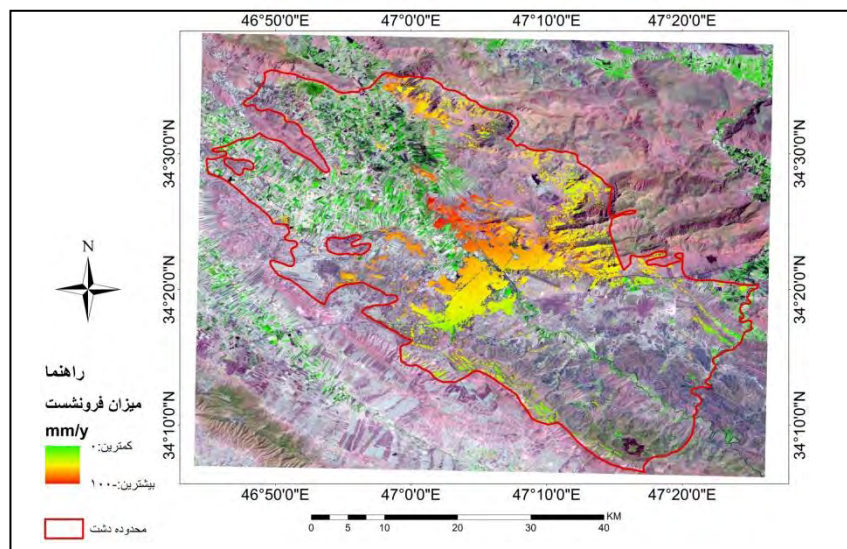


شکل ۸: الف: نرخ متوسط سالانه فرونشست ب: متوسط سرعت فرونشست

اما این نقشه هنوز زمین مرجع نشده است به عبارتی مختصات صحیح زمینی به آن نسبت داده نشده است و جابه‌جایی به دست آمده در راستای دید سنجنده می‌باشد به همین سبب در مرحله آخر نقشه جابه‌جایی به دست آمده براساس طول و عرض جغرافیایی هر نقطه زمین مرجع شده و جابه‌جایی‌های آن به جابه‌جایی عمودی تبدیل می‌شود که نتیجه آن نقشه جابه‌جایی با سیستم مختصات جغرافیایی می‌باشد.

بحث و یافته‌ها

روش تداخل‌سنجی راداری در پژوهش‌های بسیاری در مناطق مختلف جهان بارها به منظور اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته است. و با توجه به دقت و کارایی نتایج به دست آمده توسط این پژوهش‌ها در اعتبار این روش در اندازه‌گیری فرونشست زمین تردیدی وجود ندارد. به همین سبب در منطقه مورد نظر نیز به منظور بررسی میزان فرونشست احتمالی رویداده در سطح منطقه از این روش استفاده شد. با توجه به محدودیت موجود در روش تداخل‌سنجی راداری که در بازه زمانی بلند مدت دچار خطای عدم همبستگی زمانی می‌شود، جهت بررسی الگوی رفتاری سطح زمین در بلند مدت از روش تحلیل سری زمانی به شیوه خط مبنای کوتاه استفاده شد. برای انجام این مهم از میان تصاویر و اینترفروگرام‌ها متعدد، ۳۶ تصویر راداری از سنجنده سنتینل ۱ در باز زمانی ۲۰۱۶ (ژوئن) تا ۲۰۲۱ (ژانویه) انتخاب و به شیوه کمترین خط مبنای ۸۸ اینترفروگرام که خط مبنای مکانی و زمانی مناسب داشته اند انتخاب شدند و در فرآیند تداخل‌سنجی مورد پردازش قرار گرفتند. پس از به دست آوردن تصاویر اینترفروگرام می‌بایست نویزهای موجود در تداخل‌نگاشت حذف شده تا نویز باقی‌مانده تنها ناشی از جابه‌جایی‌های سطح زمین باشد که نتیجه آن نقشه متوسط جابه‌جایی‌های سطح زمین در بازه زمانی مورد نظر می‌باشد (شکل ۱۱).



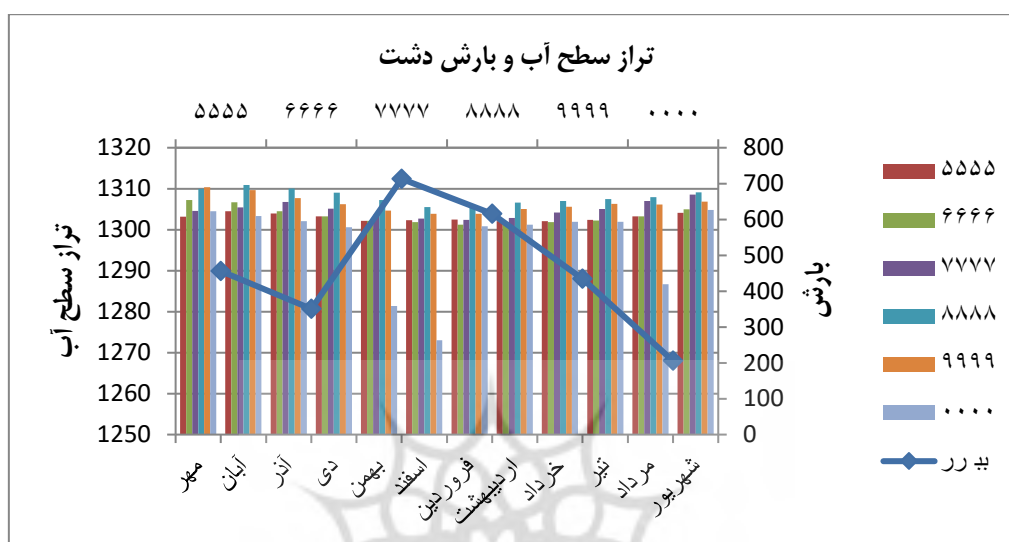
شکل ۱۱: متوسط فرونشست سالانه

ارزیابی نقشه به دست آمده حاکی از حداکثر فرونشست ۱۰۰- میلی‌متر در سال در بخش‌های غربی دشت می‌باشد به طوری که هر چه از این بخش‌ها به اطراف می‌رویم میزان فرونشست کاهش می‌یابد. جهت بررسی علت فرونشست احتمالی ناشی از کاهش نزولات جوی و به تبع آن برداشت بی‌رویه از سطح آب‌های زیرزمینی در سطح دشت، ارتباط بین دو عامل فرونشست زمین و میزان برداشت سطح آب‌زیرزمینی، توسط داده‌های چاه‌های پیژومتر سطح دشت مورد ارزیابی قرار گرفت.

تبیین ارتباط بین میزان افت سطح تراز آب با ایجاد فرونشست در منطقه

برداشت آب‌های زیرزمینی و عدم جایگزینی آن موجب کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر خاک در لایه‌های زیرین می‌گردد. این افزایش تنش مؤثر در نهایت منجر به تراکم لایه‌های تراکم‌پذیر واقع در سفره‌های آب‌زیرزمینی می‌شود (خرمی و همکاران، ۱۳۹۸، ۱۳۸۷). به این صورت که اگر آب بیش از حد از آبخوان استخراج شود، به خصوص در نواحی که لایه‌های رس دارند، متراکم شدن لایه‌های خاک به دلیل افت فشار آب باعث ایجاد حالت غیرقابل بازگشت می‌شود و توانایی خاک برای حفظ و نفوذ آب از دست می‌رود (هو و همکاران، ۱۳۲۳، ۲۰۱۶). بدین منظور در این تحقیق به جهت برآورد میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و میزان فرونشست حاصل از آن در محدوده مطالعاتی از اطلاعات مربوط به ۵۴ چاه پیژومتر موجود در سطح دشت در بازه زمانی ۱۳۹۵-۱۴۰۰ استفاده شد. بدین صورت که پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تراز سطح آب‌های زیرزمینی، این اطلاعات از لحاظ کمی مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله با حذف داده‌های پرت، مشکوک و طبقه‌بندی آن‌ها به منظور تهیه نقشه میزان افت سطح تراز آب عملیات درون‌یابی بر روی داده‌ها انجام شد. با توجه به اینکه در عملیات درون‌یابی فرض بر نرمال بودن داده‌هاست (قهرودی، ۱۳۸۷، ۷۰). در ابتدا داده‌های مورد نظر را با توجه به نرمال بودن و توزیع فضایی آن‌ها با استفاده از روش واریوگرام مورد بررسی قرار داده شد و سپس نمودار هیدروگراف با توجه به تراز سطح آب چاه‌های پیژومتر در سطح دشت و میزان بارندگی سالانه در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ ترسیم کردیم. این نمودار بیان‌کننده کاهش بارندگی حدودی ۲۰۰ میلی‌متر در این بازه زمانی کم می‌باشد همچنین روند کاهشی سطح تراز آب دشت تقریباً در تمامی ماه‌ها در بازه زمانی مورد نظر مشاهده می‌شود که این به معنی

افت سطح تراز آب در سطح دشت در این بازه زمانی ۶ساله می‌باشد. به طور کلی سطح تراز آب دشت در این بازه زمانی در سال ۱۳۹۵ در سطح ۱۳۰۲ متر به ۱۲۹۶ متر در سال ۱۴۰۰ رسیده است یعنی حدود ۶متر افت سطح تراز آب در سطح دشت مشاهده می‌شود (شکل ۹).



شکل ۹: تراز سطح آب و بارش دشت کرمانشاه

سپس به منظور تهیه نقشه تراز سطح آب، پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، اقدام به انتخاب مناسب‌ترین روش جهت درون‌یابی نقاط می‌کنیم که معیار انتخاب مقدار کمتر میانگین مربع خطاها^۱ می‌باشد. میزان میانگین خطاهای هر روش براساس جدول (۲) مشخص شده است.

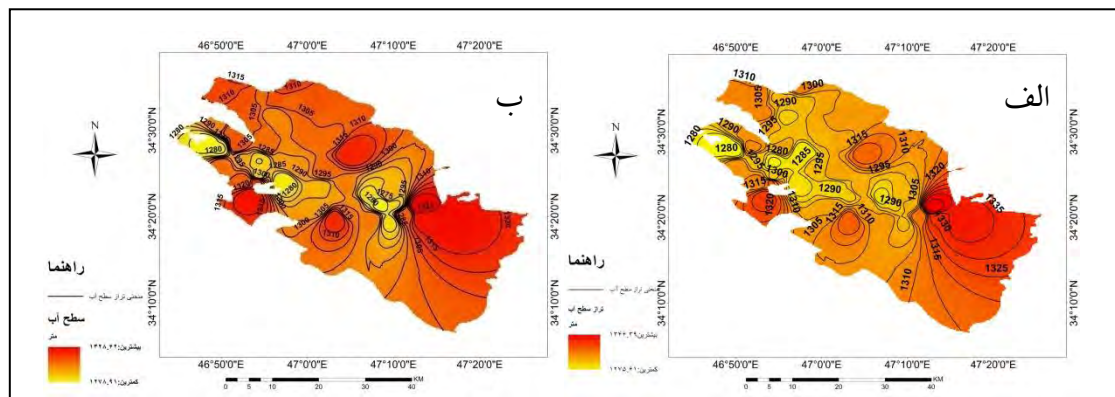
جدول ۲: مقدار میانگین مربع خطاها

RMSE	IDW (توان ۳)	IDW (توان ۳)	IDW (توان ۴)	IDW (توان ۵)	KRIGING
تراز سطح آب ۱۳۹۵	۱۳.۶۸	۱۱.۱۱	۱۰.۸۴	۱۰.۷۴	۱۰.۹۶
تراز سطح آب ۱۴۰۰	۱۰.۵۰	۹.۶۶	۹.۴۷	۹.۱۲	۹.۸۱
لوگ زمین‌تناسی	۶.۴۹	۶.۷۳	۶.۶۶	۷.۱۳	۶.۵۰

در نهایت دو نقشه تراز سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۵ با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله^۲ با توان ۵ (میانگین مربع خطاها: ۱۰,۷۴) و نقشه تراز سطح آب سال ۱۴۰۰ با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله با توان ۵ (میانگین مربع خطاها: ۹,۱۲) درون‌یابی شده است (شکل ۱۰).

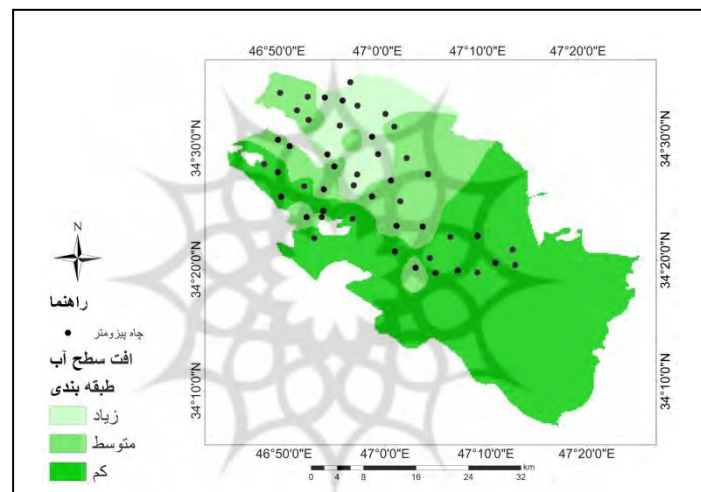
^۱RMSE

^۲ IDW



شکل ۱۰: تراز سطح آب چاه‌های پیژومتر سال الف) ۱۴۰۰ و ب) ۱۳۹۵

با تفاضل‌گیری بین این دو نقشه که در محیط ARCGIS انجام گرفت. نقشه نهایی میزان افت سطح آب زیرزمینی در دوره ۶ساله به دست آمده است (شکل ۱۲).



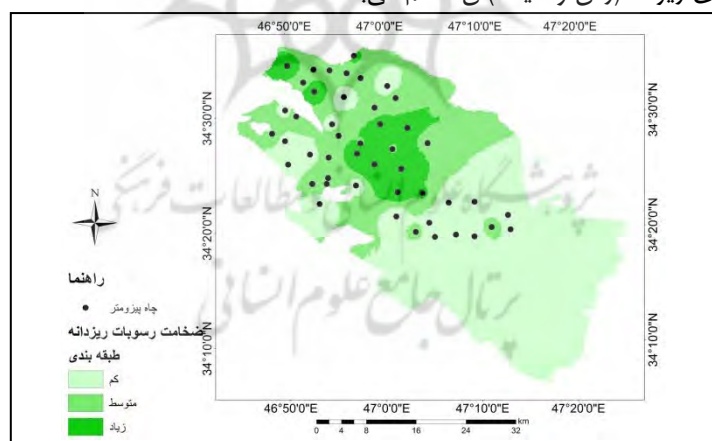
شکل ۱۲: نقشه طبقه‌بندی افت تراز سطح آب

این نقشه نشان دهنده بیشینه افت حدود ۱۵ متر در سطح چاه‌هایی است که در محدود شمال غربی دشت قرار دارد. این مناطق به سبب شیب و ارتفاع منطقه هرچه از حاشیه کوه‌ها در قسمت شمالی دشت به سمت بخش‌های مرکزی دشت حرکت می‌کنیم سطح تراز آب پایین‌تر می‌رود و تبع آن عمق چاه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در بخش‌های مرکزی نسبت به کوه‌های اطراف به خصوص در محدوده بی‌شینه افت به سبب مساعد بودن شرایط، از نظر م سطح بودن زمین امکان توسعه کشاورزی فراهم شده که نتیجه آن برداشت بیش از حد آب زیرزمینی و افت سطح تراز آب بوده است. به طور کلی نتایج بیان‌کننده‌ی این مساله می‌باشد که بخش‌های غربی و شمال‌غربی منطقه نسبت به مناطق شرقی و جنوب شرقی شکل شدیدتری از افت را دارا می‌باشد. در نهایت با بررسی و مقایسه دو نقشه میزان فرونشست حاصل از تداخل سنجی راداری و میزان افت سطح آب هم‌خوانی قابل ملاحظه‌ای بین مناطق دارای بیشینه فرونشست و مناطق دارای بیشترین میزان افت سطح آب مشاهده نمی‌شود. در حالی که مناطقی که دارای میزان افت متوسطی از سطح تراز آب است مانند بخش غربی دشت حداکثر میزان نشست مشاهده می‌شود. به همین سبب با توجه به این موضوع که تنها عامل مؤثر در فرونشست ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی نمی‌باشد. لذا به بررسی عامل مهم دیگری نیز پرداخته شد. بدین منظور لوگ زمین‌شناسی چاه‌های پیژومتر سطح دشت کرمانشاه جهت بررسی جنس زمین، از سازمان آب منطقه‌ای اخذ شده است.

ارزیابی بافت رسوبات تشکیل دهنده سطح دشت

پس از مشاهده نتایج حاصل از نشست و بررسی ارتباط آن با میزان افت سطح آب می‌توان دریافت که لزوماً در هر نقطه‌ای که افت شدید سطح تراز آب وجود دارد به معنای وجود فرونشست بیشتری نیست. به همین دلیل بایستی به دنبال پارامتر مؤثر دیگری گشت که از جمله مهمترین آن جنس زمین می‌باشد. با توجه به اینکه برای وقوع فرونشست در یک ناحیه علاوه بر کاهش فشار آب منفذی، ضخامت لایه‌های ریزدانه (رس و سیلت) مؤثر است. با تهیه لوگ زمین‌شناسی، چاه‌های پیژومتر موجود در سطح دشت مورد بررسی قرار گرفت و با به دست آوردن ضخامت لایه‌های ریزدانه (رس و سیلت) هر چاه اقدام به پهنه‌بندی این داده‌ها در سطح دشت شد. با استفاده از معیار کمترین مقدار میانگین مربع خطاها (جدول ۱) روش وزن‌دهی معکوس فاصله با توان ۲ (میانگین مربع خطاها: ۶,۴۹) به عنوان بهترین روش جهت درون‌یابی انتخاب شده است (شکل ۱۳).

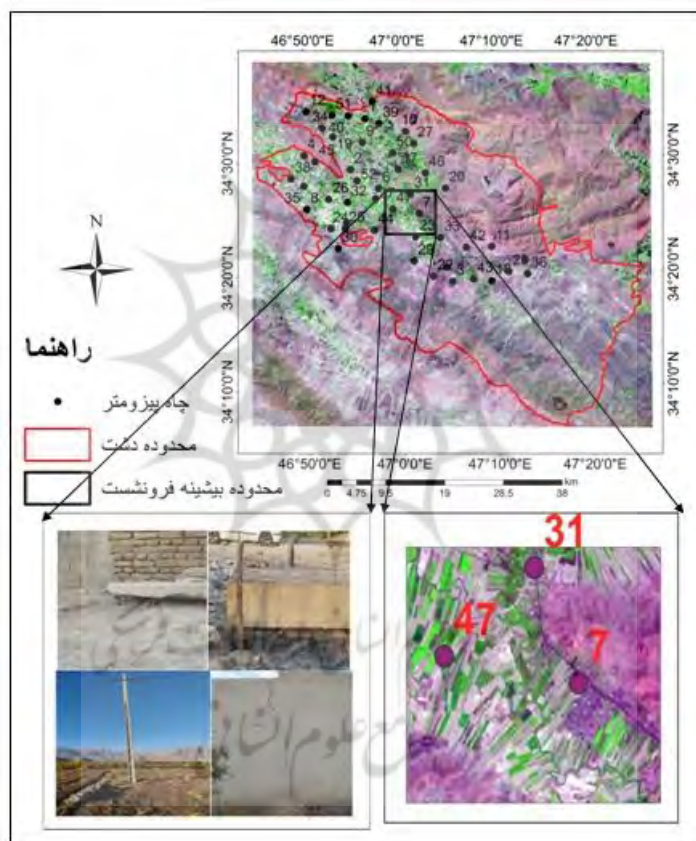
رسوبات ریزدانه از جمله رس و سیلت نسبت به عبور آب نفوذناپذیری شدیدی دارد و معمولاً حجمی از رطوبت را برای دهه‌های زیادی نگهداری می‌کنند و در صورت خشک شدن منقبض می‌شوند که موجب افزایش استعداد پذیری نشست سطح می‌شود به همین منظور لوگ مین‌شناسی چاه‌ها بررسی و ضخامت رسوبات ریزدانه با درجه خلوص (۸۵ تا ۱۰۰ درصد) تعیین شده سپس با درون‌یابی داده‌ها با روش وزن‌دهی معکوس فاصله نقشه ضخامت رسوبات ریزدانه به دست آمده است (شکل ۱۳). با بررسی تطابق میزان فرونشست روی داده در سطح دشت و نقشه پهنه‌بندی رسوبات ریزدانه موجود و نقشه میزان افت سطح آب‌های زیر‌زمینی این مساله به خوبی به تصویر کشیده می‌شود که برای روی دادن فرونشست باید هر دو شرط افت شدید و لایه‌های ریزدانه وجود داشته باشد. به طوری که در برخی مناطق با وجود افت شدید تراز آب، هیچ فرونشست قابل ملاحظه‌ای رخ نداده است که با بررسی اطلاعات دانه‌بندی لایه‌های زیرین این مناطق ضخامت لایه‌های ریزدانه (رس و سیلت) آن‌ها کم می‌باشد.



شکل ۱۳: طبقه‌بندی ضخامت رسوبات

نقشه فوق نشان دهنده‌ی بیشترین میزان ضخامت رسوبات ریزدانه در بخش‌های غربی محدوده دشت می‌باشد. بررسی ارتباط بین میزان فرونشست و افت سطح تراز آب و میزان ضخامت رسوبات ریزدانه بیان‌کننده‌ی این موضوع مهم می‌باشد که بیشینه فرونشست در مناطقی رویداده است که علاوه بر افت سطح تراز متوسط آب، ضخامت رسوبات ریزدانه در آن منطقه زیاد باشد، همچنین مناطقی که میزانی از افت سطح تراز آب را تجربه کرده‌اند، اما فرونشست قابل توجهی در آن روی نداده مانند بخش حاشیه شمال غربی و شرقی دشت ارزیابی ضخامت رسوبات آن نشان دهنده‌ی ضخامت رسوبات ریزدانه کم می‌باشد. این مناطق تحت تاثیر، قرارگرفتن در حاشیه کوه بیستون پراو و مجاورت با رودخانه قره سو در بخش شرقی و رودخانه رازآور در بخش شمال غربی دارای رسوبات درشت دانه بیشتری می‌باشند. به طور کلی با در نظر

گرفتن شواهد هیدروژئولوژی و میزان و سرعت تغییر شکل حاصل از فرونشست به دست آمده از تداخل سنجی می‌توان هم‌خوانی قابل ملاحظه‌ای بین مناطق دارای فرونشست و مناطق دارای افت متوسط سطح آب با ضخامت رسوبات ریزدانه زیاد مشاهده نمود. سپس با مشاهدات میدانی در محدوده بیشینه فرونشست زمین به دست آمده حاصل از پردازش تصاویر راداری و تحلیل سری زمانی آن به دنبال شواهدی مبنی بر رویداد این پدیده در این محدوده نشانه‌هایی از جمله ترک خوردگی دیوار منازل مسکونی، کج شدگی تیرهای چراغ برق، خالی شدن خاک زیر بتن‌ها چاه‌های عمیق و نیمه عمیق، ترک خوردگی در محدوده چاه‌های آب مشاهده شد (شکل ۱۴). در تصویر زیر چاه‌های محدوده بیشینه فرونشست و این شواهد به تصویر کشیده شد میزان ضخامت رسوبات در چاه‌های منطقه بیشینه که شامل چاه شماره ۷ و ۳۱ و ۴۷ می‌باشد به ترتیب عبارت اند از ۲۸ متر، ۲۰ متر و ۳۶ متر رسوبات ریزدانه با درجه خلوص ۸۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد.



شکل ۱۴: نقشه چاه‌های محدوده بیشینه و شواهد میدانی فرونشست زمین

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سری زمانی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه برآورد شد. بیشینه فرونشست محاسبه شده در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، ۱۰ سانتی‌متر در سال می‌باشد که مساحتی در حدود ۱,۶۷ درصد از مساحت کل را در بر می‌گیرد. سپس جهت تبیین علت فرونشست رخ داده در سطح منطقه به بررسی ارتباط بین میان افت سطح آب‌های زیرزمینی با فرونشست در سطح منطقه پرداختیم. سپس با ارزیابی ۵۴ چاه پیژومتر موجود در سطح دشت این موضوع مشاهده شده که محدوده‌ی بیشینه فرونشست زمین با حداکثر افت سطح آب منطبق نبوده است. به همین سبب به دنبال عامل مؤثر دیگری در سطح دشت بودیم که با بررسی ضخامت رسوبات ریزدانه (رس و سیلت) در محدوده‌ی بیشینه فرونشست شاهد ضخامت زیاد رسوبات ریزدانه بودیم که افت متوسطی از سطح آب در حدود ۶ متر در سال را تجربه کرده است. بنابراین همواره نمی‌توان رابطه‌ی خطی بین افت سطح آب و فرونشست زمین را

متصور شد. این موضوع در خصوص چاه‌های پیرحیاتی و قرانچی و نظرآباد (۷،۴۷،۳۱) صدق می‌کند. این چاه‌ها که در منطقه بیشینه قرار دارد دارای ضخامت رسوباتی به ترتیب ۲۸ متر، ۲۰، و ۳۷ متر با درجه خلوص ۸۵ تا ۱۰۰ درصد رسوبات ریزدانه می‌باشد همچنین میزان افت سطح تراز آب سطح این چاه‌ها برای بازه زمانی ۶ ساله ۵ متر برای چاه شماره ۷ و ۶ متر برای چاه شماره ۳۱ و ۲،۵ متر برای چاه شماره ۴۷ اندازه‌گیری شده است. سپس با مشاهدات میدانی در محدوده بیشینه فرونشست‌زمین به دست آمده حاصل از پردازش تصاویر راداری و تحلیل سری زمانی، به دنبال شواهدی مبنی بر رویداد این پدیده در این محدوده نشانه‌هایی از جمله ترک خوردگی دیوار منازل مسکونی، کج شدگی تیرهای چراغ برق، خالی شدن خاک زیر بتن‌ها چاه‌های عمیق و نیمه عمیق، ترک خوردگی در محدوده چاه‌های آب مشاهده شد. با توجه به آنچه بیان شد می‌توان نتیجه گرفت که دشت کرمانشاه نیز مانند بسیاری از دشت‌های کشور از نظر افت سطح آب و رخداد پدیده فرونشست وضعیت نامطلوبی را تجربه می‌کند. از آن جاییکه تاکنون پژوهشی مبنی بر اندازه‌گیری دقیق میزان فرونشست دشت کرمانشاه صورت نگرفته تحقیق حاضر نشان‌دهنده‌ی آغاز بحران فرونشست در دشت کرمانشاه می‌باشد که نیازمند مدیریت و کنترل این بحران پیش از گسترش و شدت این بحران در سطح دشت می‌باشد.

منابع

- احمدی، نعیمه، موسوی، زهرا، معصومی، زهره، ۱۳۹۷، مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن، سنجش از دور و GIS، سال دهم، شماره سوم، صص ۳۳-۵۲.
- آقایی، لیلا، عابدینی، موسی، اصغری سراسکانرود، صیاد، ۱۴۰۰، برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل)، پژوهش‌های ژئوکی، سال یازدهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۱، صص ۱۱۷-۱۳۲.
- اکبری، محمود، ۱۴۰۰، پایش فرونشست زمین تحت تاثیر عوامل زمین‌شناسی و منابع آب با روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: شهر اراک) نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دهم، شماره ۳، بهار ۱۴۰۰، صص ۱۱۶-۱۳۱.
- پاپی، رامین، عطارچی، سارا، سلیمانی، مسعود، ۱۳۹۹، تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (شهرستان شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیر زمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری، جغرافیا و پایداری محیط ۳۴ (۱۳۹۹) صص ۱۲۸-۱۰۹.
- حاجی‌زاده، عبدالحسین، نظام‌محله، محمدعلی، فرزانه، سعید، رستگار، عبدالمطلب، سیدرضایی، هدا، ۱۳۹۲، مبنای سنجش از دور مایکروویو (تداخل سنجی) با تاکید بر علوم زمین، انتشارات ماهواره، ۱۳۹۲، صص ۱۷۷.
- حجازی، اسدالله، رضائی مقدم، محمدحسین، ولیزاده کامران، خلیل، موسوی کجباد، ندا، ۱۴۰۱، آشکارسازی فرونشست زمین جهت پایداری دشت هریس با استفاده از تصاویر راداری و روش‌های *sbas* و *ps*، جغرافیا و پایداری محیط ۴۳ (۱۴۰۱) صص ۱۰۳-۸۹.
- حقیقت‌مهر، پریسا، ولدان زوج، محمدجواد، تاجیک، رضا، جباری، سعید، صاحبی، محمودرضا، اسلامی، رضا، گنجیان، مصطفی، دهقانی، مریم، ۱۳۹۱، تحلیل سری زمانی فرونشست دشت هشتگرد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سامانه موقعیت یاب جهانی، مجله علوم زمین، سال بیست و دوم، شماره ۸۵، صص ۱۰۵-۱۱۴.
- خرمی، محمد، ابریشمی، سعید، مقصودی، یاسر، ۱۳۹۷، تعیین فرونشست شهر مشهدیه روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دائمی، نشریه مهندسی عمران امیر کبیر، دوره ۵۱ شماره ۶ سال ۱۳۹۸، صص ۱۱۸۷-۱۲۰۴.
- رهنما، حسین، میراث، سهراب، ۱۳۹۳، آب‌های زیرزمینی و مخاطره فرونشست سطح زمین در دشت‌های ایران، پنجمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران‌های طبیعی، ۶۲۹-۶۵۱.
- روزبان، علی، ۱۳۹۵، بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (*d-insar*) و با بکارگیری تصاویر سنجنده جدید سنتینل، با راهنمایی اسماعیلی، علی، معتق، مهدی، پایان نامه کارشناسی ارشد.

- شریفی کیا، محمد، ۱۳۹۱، تعیین میزان و دامنه فرونشست به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-INSAR) در دشت نوق-بهرمان، علوم انسانی و آمایش فضایی، دوره شانزدهم، شماره ۳، صص ۵۵-۷۷.
- صادقی، زهرا، ولدان زوج، محمدجواد، دهقانی، مریم، ۱۳۹۲، تلفیق دو روش متفاوت تداخل سنجی راداری بر پایه پراکنش-کننده‌های دائمی به منظور پایش فرونشست، علوم زمین، سال بیست و دوم، شماره ۹۰، صص ۴۵-۵۴.
- صفاری، امیر، جعفری، فرهاد، ۱۳۹۵، سنجش مقدار و پهنه بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی دشت کرج-شهریار، فصلنامه جغرافیای ایران، سال چهاردهم، شماره ۴۸، صص ۸۲-۹۳.
- عابدینی، موسی، ۱۳۹۲، بررسی علل فرونشست دشت اردبیل و اثرات آن در محدوده شهر، فصلنامه علمی و پژوهشی، جغرافیای طبیعی، سال بهار ۱۳۹۲ ق شماره ۱۹، صص ۷۱-۸۴.
- عزتی، سودابه، ۱۳۹۴، بررسی فرونشست زمین در اثر برداشت از آب‌های زیرزمینی به روش تداخل سنجی راداری، مطالعه موردی: دشت شبستر-صوفیان، به راهنمایی ولیزاده کامران، رسولی، علی اکبر، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- علایی طالقانی، محمود، ۱۳۸۲، ژئومورفولوژی ایران، تهران، نشر قومس، چاپ اول، صص ۱۴۴.
- قهرودی تالی، منیژه، ۱۳۸۷، درآمدی بر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، انتشارات پیام نور، نسخه آزمایشی، ص ۷۰.
- نصیری خانقاه، علیرضا، شریفیان عطار، رضا، ۱۳۹۸، کاربرد تداخل سنجی رادار در مطالعه فرونشست، انتشارات مهر جالی‌نوس، ۱۳۹۸، صص ۴ و ۶۴.
- Aobpaet, A., Caro Cuenca, M., Hooper, A., Trisirisatayawong, I. (2010). Land Subsidence Evaluation Using Insar Time Series Analysis In Bangkok Metropolitan Area, Proc. 'Fringe 2009 Workshop', Frascati, Italy, 30 November –4 December 2009 (ESA SP-677, March 2010).
- Benito-Calvo A., Gutiérrez F., Martínez-Fernández A., Carbonel D., Karampaglidis T., Desir, G., Sevil J., Guerrero J., Fabregat I., García-Arnay Á. (2018). 4D monitoring of active sinkholes with a terrestrial laser scanner (TLS): a case study in the evaporite karst of the ebro valley, NE Spain. *Remote Sensing*, 10(4): 571-585.
- Dehghani, M., ValadanZoej, M. J., Enteza, I., Saatchi, S. & Shemshaki, A. (2010). Interferometric Measurements of Ground Surface Subsidence induced by verexploitation of Groundwater., *Journal of Applied Remote Sensing*, vol.4, 041864, doi:10.1117/1.3527999.
- Hu, B., Chen, J., Zhang, X. (2019). Monitoring the Land Subsidence Area in a Coastal Urban Area with InSAR and GNSS, *Sensors* 2019, 19, 3181.
- Liu, L., Yu, J., Chen, B., Wang, Y. (2020). Urban subsidence monitoring by SBAS-InSAR technique with multi-platform SAR images: a case study of Beijing Plain, China, *European Journal of Remote Sensing*.
- Solari, L., Del Soldato, M., Bianchini, S., Ciampalini, A., Ezquerro, P., Montalti, R., Raspini, F., Moretti, S. (2018). From ERS1/2 To Sentinel-1: Subsidence Monitoring In Italy In The Last Two Decades. *Journal Frontiers in Earth Science*.
- Yastika, P., Shimizu, N., Pujianiki, N., Temaja, I., Antara, I., Osawa, T. (2019). Detection of silent subsidence over extensive area by SBAS DInSAR: a case study of Southern Bali, Indonesia, *E3S Web of Conferences* 153, 02003, 2020, 530 CORECT-IJJSS 2019.
- Zhou, Z. (2013). The applications of InSAR time series analysis for monitoring long term surface change in peatlands, University of Glasgow.
- Ho, DST. D., Tran, C. Q., Nguyen, A (DRand Le., (2016). Measuring ground subsidence in Hanoi city by radar interferometry) *Science and Technology Development Journal*, 19 (2)122-129