

محاسبه فرونشست با روش SBAS و بررسی رابطه آن با داده‌های پیژومتری با استفاده از تصاویر

سری زمانی ماهواره SENTINEL-1

علی روزبان^۱، علی اسماعیلی^{۲*}، مهدی معتمد^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور، ۲- استادیار، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران،

۳- استاد، گروه فتوگرامتری و اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه لاینیتس، هانوفر، آلمان

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶)

چکیده

فرونشست پدیده‌ای است بسیار مخرب و خطرناک که علاوه بر خطرات جانی برای انسان‌ها، می‌تواند به تأسیسات زیربنایی شهرها نیز آسیب برساند. یکی از دلایل ایجاد آن استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی هست که به طور گسترده در دشت‌های ایران اتفاق می‌افتد. تداخل سنجی سری زمانی تصاویر راداری یکی از روش‌های مهم برای بررسی دقیق و پیوسته فرونشست است. اما مشکل اصلی این روش حذف پیکسل‌ها با همبستگی پایین در چرخه پردازش است. در این تحقیق برای غلبه بر این مشکل، فرونشست دشت رفسنجان با استفاده از روش سری زمانی SBAS بهبودیافته بر پایه همدوسی بررسی شده است. داده‌های مورد استفاده ۱۵ تصویر ماهواره SENTINEL-1 مربوط به محدوده زمانی مهرماه ۱۳۹۴ تا مهرماه ۱۳۹۵ است و ۵۰ تداخل‌نگاشت تولید شده است. نتایج حاصله توانایی این روش در استفاده از پیکسل‌ها با همبستگی پایین مربوط به مناطق پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار نرخ فرونشست ۲۸۴ میلی‌متر در سال برای محدوده دشت رفسنجان - بهرام و ۲۵۲ میلی‌متر در سال برای محدوده دشت رفسنجان - کشکویه در راستای خط دید ماهواره به دست آمد. برای بررسی رابطه بین نتایج SBAS بهبودیافته و سطح آب چاه‌های منطقه از ضریب همبستگی پیرسون و جهت مدل کردن رابطه از مدل رگرسیون خطی استفاده شد که نتایج بیانگر رابطه خطی مستقیم قوی است. همچنین مدل رگرسیون خطی قابلیت مدل کردن رابطه را با سطح اطمینان ۹۵٪ دارا هست. برای بررسی معنی‌دار بودن مدل رگرسیون خطی از آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) و به منظور بررسی خودهمبستگی باقی‌مانده‌ها از آزمون دوربین - واتسون استفاده شد که نتایج آن معنی‌دار بودن مدل و استقلال مشاهدات را تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: فرونشست، تداخل سنجی سری زمانی، SBAS بهبودیافته، SENTINEL-1، مدل رگرسیون خطی، ضریب

همبستگی پیرسون

۱- مقدمه

بخش کشاورزی است که گاه به دلیل افزایش جمعیت و افزایش تولید محصولات کشاورزی باهدف درآمد بیش‌تر موجب مصرف بی‌رویه و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود. کاهش سطح آب‌های زیرزمینی موجب ایجاد پدیده فرونشست و در برخی مواقع فرو چاله‌هایی در منطقه می‌شود. فرونشست که از آن به‌عنوان زلزله خاموش نیز یاد می‌شود آسیب‌های جبران‌ناپذیری در مناطق شهری (آسیب به زیرساخت‌ها، سازه‌ها و پل‌ها، راه‌ها و خطوط انتقال نیرو)، کشاورزی (کاهش تخلخل خاک‌های حاصلخیز) و همچنین محیط‌زیست (تغییر توپوگرافی و خصوصیات هیدرولوژیکی منطقه، افزایش احتمال سیل خیزی به دلیل کاهش نفوذپذیری خاک و تغییر در وضعیت زمین‌شناختی ایجاد می‌کند.

در ابتدا اندازه‌گیری میزان فرونشست اغلب بر اساس مشاهدات محلی تخمین زده می‌شد. نخستین بررسی‌های علمی برای تعیین میزان فرونشست از حدود دو دهه قبل در دشت رفسنجان که دارای بالاترین سابقه و میزان فرونشست بود آغاز شد [۳]. در سال‌های بعد با فراگیر شدن این مسئله، در سایر

فرونشست پدیده‌ای ریخت‌شناسی است که تحت تاثیر حرکت فرورو زمین پدید می‌آید [۱]. رخداد پدیده فرونشست می‌تواند متاثر از عوامل طبیعی (آتش‌فشان، ریزش زمین در محل سنگ-های انحلال پذیر، گسلش، چین خوردگی) و عوامل انسانی (- استخراج معادن، استخراج نفت و گاز و ساخت و ساز) شکل گیرد؛ با اینحال محوریت رویداد آن متوجه دو عامل اصلی استخراج آب زیرزمینی و کارستی شدن سنگ‌های انحلال پذیر است [۱، ۲]. در منطقه مورد مطالعه دلیل اصلی فرونشست برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی است.

در مناطق نیمه‌خشک، منابع آب زیرزمینی که به‌عنوان یکی از منابع طبیعی پراهمیت هر کشور شناخته می‌شوند به دلیل کمبود آب‌های سطحی بیش‌تر از مناطق دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین مصارف آب‌های زیرزمینی مصرف در

مختلف و روشهای متنوع تلاش کرده اند. معتق و همکاران در سال ۲۰۰۸، فرونشست دشت رفسنجان و پنج دشت دیگر ایران را در محدوده زمانی سال ۲۰۰۵ (تصاویر Envisat) را با استفاده از روش تداخل سنجی راداری InSAR^۴ و داده‌های سطح آب چاه‌ها بررسی کردند. آنها نشان دادند که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی با تغییر شکل سطح زمین در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای مرتبط است. در نهایت، به اهمیت دستیابی به داده‌های هیدرولوژیکی دقیق مانند مکان چاه‌ها، نرخ بهره برداری و نقشه‌های چینه‌شناسی توالی زیرسطحی در مناطق تحت تأثیر فرونشست زمین برای درک بهتر رابطه بین جابه‌جایی‌های سطحی و کاهش سطح آب زیرزمینی اشاره شده است [۵].

در سال ۲۰۱۴ دهقانی و همکاران فرونشست دشت رفسنجان را با استفاده از اطلاعات پوشش گیاهی، نوع خاک و سطح آب چاه‌های پیرومتریک مختلف موجود در منطقه مدل سازی کردند، آنها همچنین با استفاده از مدل تصمیم‌گیری ویژگی‌های چندگانه AHP^۵ برای هر شاخص با توجه به شدت اثر آن بر فرونشست، وزن اختصاص دادند. به‌منظور ارزیابی نتایج مدل‌سازی، از روش DInSAR به عنوان ابزاری قدرتمند برای اندازه‌گیری تغییر شکل زمین استفاده کردند. به این منظور از سه تصویر Envisat مربوط به سال ۲۰۰۵ استفاده شده است. نقشه‌نمایی تولید شده توسط مدل با نقشه جابه‌جایی مشتق شده از DInSAR مقایسه شده است که سازگاری بالای نتایج دو روش بیانگر این است که وزن دهی عوامل فرونشست و ادغام آنها به دقت انجام شده است [۶].

باقری و همکاران در سال ۲۰۱۹ فرونشست دشت رفسنجان را با استفاده از روش SBAS^۶ و یک شبکه عصبی مصنوعی ANN^۷ بررسی کردند. در این مقاله از اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی سیستم آبخوان منطقه به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی و از تصاویر Envisat (June 2004 - August 2007) در روش SBAS استفاده شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که رویکرد شبکه عصبی مصنوعی توانایی شناخت مکانیسم فرونشست زمین را دارد و می‌تواند به عنوان مکمل روش تداخل سنجی راداری استفاده شود، همچنین کاهش سطح آب زیرزمینی عامل موثر بر فرونشست منطقه است [۷].

توکلی و همکاران در سال ۱۳۹۶ روش‌های بازیابی فاز در روش تداخل سنجی راداری متداول را مورد بررسی قرار دادند و به نقاط ضعف و قوت هریک پرداختند. یکی از مهمترین مراحل

نواحی ایران نیز مطالعات گسترده‌ای با روش‌هایی به نسبت متنوع انجام شد. روش‌هایی مانند پایش سنجش از دوری (DInSAR^۱ & GPS^۲)، پایش هیدرولوژیکی و شیوه‌های ژئوتکنیکی از اصلی‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری، مشاهده و پیش‌بینی میزان و دامنه‌ی پدیده‌ی نشست است [۱].

عملیات ترازیابی به‌منظور اندازه‌گیری جابجایی‌های سطح زمین در امتداد قائم از دیرباز انجام می‌گرفته است. لیکن این اندازه‌گیری‌ها به دلیل صرف وقت و هزینه بسیار بالا برای پایش فرونشست کافی به نظر نمی‌رسند. در ادامه با فراگیر شدن ابزار GNSS^۳، استفاده از GNSS برای بررسی فرونشست متداول شد، مزیت این روش دقت بالا نتایج است ولی مشکل این روش اولاً هزینه بالای ایجاد و نگه‌داری ایستگاه‌های دائمی است، دوماً نتایج حاصل از این روش به صورت نقاط گسسته است و به خوبی نمی‌توان دامنه و گستره فرونشست را مشخص کرد [۴].

با ورود ماهواره‌های راداری از دهه ۱۹۹۰، روش تداخل سنجی راداری به عنوان ابزاری مفید در پایش جابجایی‌های سطح زمین ناشی از پدیده‌های مختلف از جمله فرونشست شناخته شد. استفاده از تصاویر راداری و روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) برای بررسی فرونشست، امکان ایجاد نقشه‌های پیوسته برای بررسی میزان و دامنه تغییرات سطح زمین در محدوده مورد نظر را ایجاد می‌کند. دقت مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها نیز در این روش قابل مقایسه با دقت اندازه‌گیری‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی و ترازیابی می‌باشد. همچنین این روش از دیدگاه صرفه جویی در هزینه و زمان در مقایسه با روش‌های دیگر از قابلیت بسیار بالایی برخوردار است [۱].

با در مدار قرارگرفتن ماهواره سنتینل-۱ که اولین مأموریت از پنج مأموریتی است که سازمان فضایی اروپا ESA درحال توسعه دادن آن برای نوآوری Copernicus است، امکان جدیدی در مطالعات دقیق‌تر تغییرات زمین برای محققین این حوزه فراهم شد. مأموریت Sentinel-1 شامل تصویربرداری در باند C در چهار حالت تصویربرداری منحصربه‌فرد با توان تفکیک‌های مختلف (کمتر از ۵ متر) و پوشش تا ۴۰۰ کیلومتر است. سنتینل-۱ امکان دسترسی به داده‌های رایگان با زمان تصویربرداری مجدد کوتاه و پوشش سراسری را فراهم کرد.

۱-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

محققین زیادی در زمینه محاسبه فرونشست با داده‌های

^۴ Interferometric SAR

^۵ Analytic Hierarchy Process

^۶ Small Baseline Subset

^۷ Artificial Neural Network

^۱ Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar

^۲ Global Position System

^۳ Global Navigation Satellite System

پاولوزک و بورکوفسکی در سال ۲۰۲۰ فرونشست معدن ذغال سنگ را با استفاده از تصاویر Sentinel-1 بررسی کردند. آنها از ادغام روش تداخل سنجی تفاضلی DInSAR و روش SBAS به منظور استفاده از مزایا و غلبه بر معایب هر دو روش و بازیابی تغییر شکل منطقه، استفاده کردند. نتایج بدست آمده نشان داد ادغام این دو روش می‌تواند به طور مؤثر برای نظارت بر فرونشست مربوط به معدن استفاده شود. مقدار $RMSE^4$ بین تغییرات مدل شده و اندازه‌گیری شده با استفاده از روش DInSAR برای جابه‌جایی قائم و افقی به ترتیب ۱۱ و ۱۳ میلی-متر بدست آمد [۱۲].

روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری DInSAR دارای دو مشکل عمده است. اولاً بدلیل حساسیت بالا به خط مبنای مکانی و زمانی در صورت عدم کنترل خط مبنا، پیکسل‌های مشابه بین تداخل نگاشت‌ها دچار ناهمبستگی می‌شوند. ثانیاً در صورت وجود خطا در هر یک از تداخل نگاشت‌های تولید شده، خطا به صورت تجمعی در جابه‌جایی کل انتشار می‌یابد. همچنین برای حذف اثر مصنوعات جوی نیاز به اطلاعات کمکی در مورد بارش و رطوبت هوا دارد. در مقابل، روش تداخل‌سنجی سری زمانی TS-InSAR⁵ اجزای مختلف تداخل‌سنجی را که مربوط به تغییر شکل، خطای توپوگرافی، خطای جو و خطاهای مداری است، جدا می‌کند. همان‌طور که در مقالات اشاره شد اغلب برای مناطق دارای پراکنش‌گر پایدار از روش سری زمانی PSI [۱۳-۱۵] و برای مناطق بدون پراکنش‌گر پایدار از روش سری زمانی SBAS استفاده شده است [۱۶، ۱۷]. مزیت کلیدی SBAS در مقایسه با سایر روش‌های TS-InSAR این است که SBAS برای به حداقل رساندن خط مبنای مکانی و زمانی بین دو مدار برداشت، از جفت‌های مناسب انتخاب شده برای تشکیل تداخل نگاشت استفاده می‌کند. همچنین در این روش اثر مصنوعات جوی با استفاده از فیلتر پایین‌گذر و بالا‌گذر (APS^6) مدل‌سازی می‌شود [۱۲].

در مطالعات پیشین که بر روی دشت رفسنجان صورت گرفته از تصاویر Envisat استفاده شده است، محدودیت این روش وجود ناهمبستگی بین پیکسل‌ها به دلیل فاصله زمانی زیاد بین تصاویر و خط مبنای مکانی بزرگ تصاویر Envisat است. در مقالات [۵، ۶] محدوده زمانی مورد مطالعه کمتر از یک سال می‌باشد و برای محاسبه نرخ فرونشست سالیانه، نتایج بدست آمده به یک سال تعمیم داده شده است که با توجه به متغییر بودن نرخ فرونشست در فصل‌های بارشی و تابستان نتایج بدست آمده دارای دقت

تخمین جابه‌جایی از یک تداخل نگاشت، بازیابی فاز می‌باشد که نتایج را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. پیدا کردن تعداد سیکل های صحیح فاز از دست رفته یک مسئله بحرانی و سخت است. در طی سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای بازیابی فاز در فضای منظم ارائه شده است که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت [۸].

عوئی و همکاران در سال ۲۰۲۰ فرونشست شهر Lucknow در کشور هند را با استفاده از روش تداخل سنجی سری زمانی پراکنش‌گر پایدار PSI¹ و تصاویر Sentinel-1 بررسی کردند. آنها به منظور محاسبه مولفه های افقی و قائم بردار جابه‌جایی سطح زمین، از بردار جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره حاصل از تصاویر سری زمانی پایین‌گذر و بالاگذر استفاده کردند. هر دو جز افقی و قائم سرعت جابجایی با دقت میلی‌متر محاسبه شدند. دلیل اصلی فرونشست در این منطقه برداشت بی‌رویه آب از ذخایر زیرزمینی است [۹].

یاستیکا و همکاران در سال ۲۰۱۹ فرونشست حاصل از معدن ذغال سنگ در اندونزی را برای محدوده زمانی ۱۴ سال بررسی کردند. آنها از تصاویر Envisat-ASAR(2003-2007)، Sentinel-1A(2015-2017) و ALOS-PALSAR(2007-2011) روش تداخل سنجی سری زمانی SBAS استفاده کردند. با توجه به این نکته که ماهواره‌های راداری دارای طول عمر ۵-۷ سال هستند از روش هایپربولیک² برای اتصال نتایج داده ماهواره‌های غیریکسان استفاده کردند. سپس با استفاده از نتایج GPS و شرایط زمین‌شناسی منطقه، اعتبار نتایج SBAS از نظر توزیع مکانی و گذار زمانی مورد بحث قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که روش SBAS می‌تواند روشی مفید برای پایش مستمر فرونشست طولانی مدت باشد [۱۰].

کاترینا و همکاران در سال ۲۰۱۹ نتایج روش تداخل سنجی تفاضلی DInSAR و تداخل سنجی سری زمانی PSI را برای پایش جابه‌جایی حاصل از زمین لغزش مقایسه کردند. داده‌های مورد استفاده تصاویر Sentinel-1 و محدوده مورد بررسی بزرگراه D8 در کشور جمهوری چک بود. نتایج تداخل سنجی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری ژئودتیک و لیزر اسکنر اعتبار سنجی شد. توانایی هر دو روش در شناسایی نقاط دارای جابه‌جایی اثبات شد، ولی نتایج مطلق حاصل از دو روش دارای اختلاف بود. دلیل اصلی این اختلاف تاثیر تاخیر اتمسفری (APD^3) در نتایج DInSAR است. از نظر مقادیر مطلق، نتایج روش PSI مطابقت بیشتری با داده‌های اعتبار سنجی داشت [۱۱].

⁴ Root Mean Square Error

⁵ Time Series InSAR

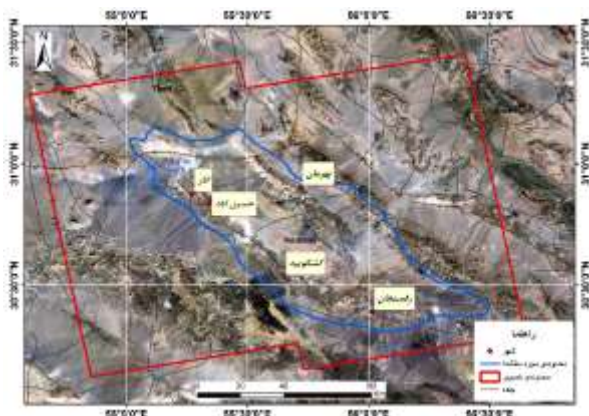
⁶ Atmospheric Phase Screen

¹ Persistent Scatterer Interferometry

² Hyperbolic Method

³ Atmospheric Path Delay

بارندگی سالانه جهان است، در حالی که میانگین بالقوه تبخیر سالانه در منطقه ۳۲۰۰ میلی‌متر است. دشت رفسنجان از سال ۱۳۷۸ به دلیل کاهش ۶۳ درصدی بارندگی دچار خشکسالی هواشناسی شده است [۱۹]. در شکل (۱) دشت رفسنجان و محدوده تصاویر مورد استفاده نمایش داده شده است.



شکل (۱). تصویر گوگل ارث دشت رفسنجان، محدوده تصاویر مورد استفاده (قرمز) و محدوده مورد مطالعه (آبی) در تصویر مشخص شده است.

شکل (۲) الف نشان‌دهنده ساختار زمین‌شناسی محدوده دشت رفسنجان می‌باشد. آخرین و عمده‌ترین دگرشکلی کواترنری در بلوک یزد و صفحه ایران مرکزی منجر به ساختارهای زینی شکل و حوضه رودخانه‌ای در منطقه رفسنجان شده است. جهت‌یافتگی این ساختارها متمایل به NW-SE بوده که توسط مجموعه سیستم‌های گسلی و شکستگی‌ها، کنترل می‌شود. الگوهای ساختاری حاصل، شامل ریخت‌شناسی ناودیس و تاقدیس مانند حوضه بین کوه‌های نوق - بهرمان و کوشکوئیه - رفسنجان است که توسط رسوبات پر شده است. گسل فعال دریوان، مرز شمالی یک بلوک ساختاری شامل واحد‌های زیرینایی مزوزوئیک - پالئوزوئیک را تشکیل می‌دهد. این واحدهای ساختاری ترکیبی از ماسه سنگ‌ها، ارتوکوارتزیت‌ها، شیل‌ها، کنگلومراها و به میزان کمتری سنگ‌های کربناته دونین تا کربونیفر یا کامبرین هستند. در حالی که هر چه از گسل دورتر شویم، این واحدها عمدتاً از جنس سنگ‌های آهکی و رسوبات تخریبی دوران کرتاسه هستند. در جنوب این ناحیه، حوضه نوق - بهرمان توسط ساختارهای زینی شکلی که از سمت شمال به وسیله سیستم گسلی NW-SE کواترنری کنترل می‌شوند، جدا شده است. این سیستم گسلی به دلیل نزدیکی به روستای بهرمان، گسل بهرمان نامگذاری شده است. واحدهای سنگی در این مجموعه سنگ‌های برون‌ریختی به میکرو بلوک‌های به شدت شکسته شده شامل چند صد متر از کربنات‌های دانه درشت و سنگ‌های آهکی کرتاسه بالایی و سنگ‌های آتشفشانی به همراه

کمتری است. همچنین از روش DInSAR در مقالات [۵، ۶] و در مقاله [۷] از روش SBAS استفاده شده است که بیشتر پیکسل‌ها به دلیل همبستگی پایین حذف شده‌اند.

اهمیت این تحقیق در پردازش و بررسی داده‌های رایگان سنجنده Sentinel-1 با بهره‌گیری از روش سری زمانی SBAS بهبودیافته در سال ۲۰۱۶ و با استفاده از روش جدید ثبت هندسی تصاویر داده‌های SAR حالت TOPS است [۱۸]. مزیت این روش در پردازش مناطق دارای پوشش گیاهی است که در این مناطق همبستگی بین پیکسل‌ها پایین است، در حالی که در روش‌های متداول SBAS این پیکسل‌ها از چرخه پردازش بدلیل همبستگی پایین حذف می‌شدند در این روش حتی پیکسل‌ها با همبستگی پایین نیز برای محاسبه جابه‌جایی سطح زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین در مطالعات پیشین از داده‌های GNSS و پیرومتری تنها برای اعتبارسنجی نتایج تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است، درحالی‌که در این تحقیق رابطه بین نتایج حاصل از روش SBAS بهبودیافته و داده‌های پیرومتری منطقه با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی و مدل رگرسیون خطی بین این دو محاسبه شده است. بعلاوه برای بررسی معنی‌دار بودن مدل رگرسیون خطی از آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) و به‌منظور بررسی استقلال مشاهدات از آزمون دوربین - واتسون استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان رفسنجان نمونه‌ای از سکونتگاه‌های انسانی است که از کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش خشکسالی رنج می‌برد. شهرستان رفسنجان و استان کرمان عمده‌ترین تولیدکنندگان و صادرکنندگان پسته در جهان هستند. کشاورزی عمده‌ترین فعالیت اقتصادی شهرستان رفسنجان و مصرف‌کننده اصلی منابع آب است: ۹۹ درصد منابع آبی منطقه رفسنجان از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود که از این میزان ۹۶٫۴ درصد برای مصارف کشاورزی، ۳٫۵ درصد برای مصارف خانگی و ۰٫۱ درصد برای صنعت است. افزایش تقاضای آب در شهرستان رفسنجان نتیجه دو عامل اصلی یعنی توسعه کشاورزی - اقتصادی و تغییرات جمعیتی است. وضعیت تأمین آب در رفسنجان به دلیل اثرات ترکیبی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی بدتر شده است. دشت رفسنجان به دلیل برخورداری از اقلیم خشک و فوق‌خشک در برابر خشکسالی هواشناسی بسیار آسیب‌پذیر است. میانگین بارندگی سالانه رفسنجان ۹۰ میلی‌متر است که کمتر از یک سوم میانگین کشور و یک نهم متوسط

مقایسه با مناطق نزدیک‌تر به کوه‌ها افزایش می‌یابد [۲۰].

۲-۲- داده‌ها

برای بررسی فرونشست دشت رفسنجان از ۱۵ تصویر از سنجنده راداری Sentinel-1 در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۵ تا اکتبر ۲۰۱۶ در حالت تصویر برداری IW استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات تصاویر بیان شده است. روش IW حالت اصلی برداشت بر روی زمین است و اکثر خدمات مورد نیاز را برآورد می‌کند، و داده‌ها را در نوار ۲۵۰ کیلومتر و با قدرت تفکیک ۲۰*۵ متر به دست می‌آورد. روش IW سه زیر نوار را با استفاده از مشاهده عوارض زمین با روش ScanSAR متوالی (TOPSAR) ایجاد می‌کند. محصولات IW در فرمت SLC حاوی سه نوار در هر تصویر هستند. هر نوار شامل یک سری از Burst هاست که هر Burst به عنوان یک تصویر SLC جداگانه پردازش شده است. برای پردازش این تصاویر از نرم‌افزار متن‌باز GMTSAR استفاده شد و برای ایجاد نقشه‌های نهایی از نرم‌افزار ARCGIS استفاده شد.

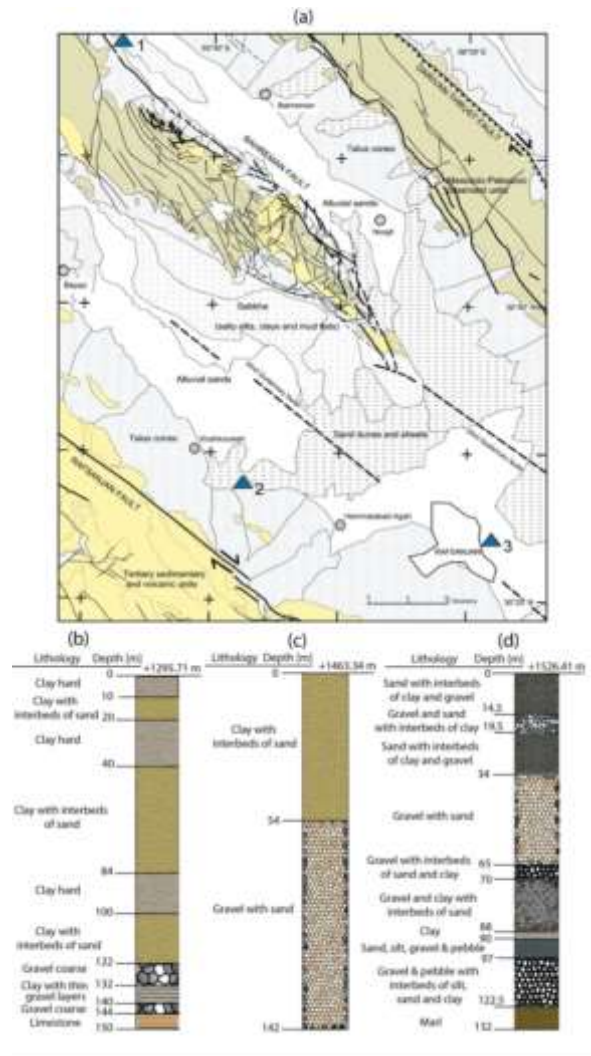
جدول (۱). مشخصات تصاویر مورد استفاده

شماره تصویر	تاریخ تصویر	فرمت تصویر	حالت تصویر برداری	گذر تصویر برداری
۱	۲۰۱۵/۱۰/۰۴	SLC	IW	بالاگذر
۲	۲۰۱۵/۱۰/۲۸	SLC	IW	بالاگذر
۳	۲۰۱۵/۱۱/۲۱	SLC	IW	بالاگذر
۴	۲۰۱۵/۱۲/۱۵	SLC	IW	بالاگذر
۵	۲۰۱۶/۰۱/۰۸	SLC	IW	بالاگذر
۶	۲۰۱۶/۰۲/۰۱	SLC	IW	بالاگذر
۷	۲۰۱۶/۰۲/۲۵	SLC	IW	بالاگذر
۸	۲۰۱۶/۰۳/۲۰	SLC	IW	بالاگذر
۹	۲۰۱۶/۰۴/۱۳	SLC	IW	بالاگذر
۱۰	۲۰۱۶/۰۵/۳۱	SLC	IW	بالاگذر
۱۱	۲۰۱۶/۰۷/۱۸	SLC	IW	بالاگذر
۱۲	۲۰۱۶/۰۸/۱۱	SLC	IW	بالاگذر
۱۳	۲۰۱۶/۰۹/۰۴	SLC	IW	بالاگذر
۱۴	۲۰۱۶/۰۹/۲۸	SLC	IW	بالاگذر
۱۵	۲۰۱۶/۱۰/۲۲	SLC	IW	بالاگذر

۲-۳- SBAS بهبودیافته بر پایه همدوسی

برای پیکسل‌های بدون پراکنده‌ساز برجسته، تغییرات فاز به دلیل ناهمبستگی اغلب به اندازه‌ای زیاد است که سیگنال دریافتی را نامعلوم می‌سازد. با تشکیل تداخل نگاشت بین تصاویر با فاصله زمانی کوتاه و تفاوت کم در زاویه دید و زاویه لوچی^۱، ناهمبستگی از بین رفته و برای برخی از پیکسل‌ها ناهمبستگی به

سنگ‌های رسوبی آئوسن، تقسیم می‌شوند. ناحیه کوشکوئیته - رفسنجان دارای حوضه‌های پر شده از چند صد متر واحدهای رسوبی کواترنری است و بیان‌گر ساختارهای اصلی واقع در SW منطقه مورد مطالعه می‌باشد، که توسط گسل رانده رفسنجان و سنگ‌های آتشفشانی و کنگلومراهای آئوسن محدود شده است [۲۰].



شکل (۲). نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه [۲۰]

سفره‌های آب زیرزمینی در حوضه رفسنجان، مستقیماً از بارش‌ها، چندین رودخانه فصلی، نفوذ به گسل‌ها و شکستگی‌ها و نفوذ سطحی آب به رسوبات دانه درشت تشکیل دهنده این حوضه، تغذیه می‌شوند. شکل (۲) ب نشان‌دهنده شرح توالی سنگ‌شناسی در سه چاه آب‌شناسی و مکان آن‌ها در این مطالعه است. بنابر شکل (۲) ب، ضخامت نهشته دارای نفوذپذیری زیاد، با حرکت به سمت کوه‌های احاطه‌کننده منطقه افزایش می‌یابد. همچنین پروفیل سنگ‌شناسی حاکی از آن است که ضخامت مواد با نفوذپذیری کمتر با حرکت به سمت مرکز دشت‌ها، در

^۱ Squint

واریناس فاز [۲۷] و یا حتی شاخص پراکندگی دامنه [۲۸]. روش SBAS بر مبنای همدوسی، کمتر به نویز در داده ورودی حساس است، و منجر به همبستگی فضایی سیگنال با پوشش متراکم می‌شود. روش کمترین مربعات معکوس وزن دار شده که به هر پیکسل فاز اعمال می‌شود به صورت رابطه (۱) است و مشخصات عبارت‌های استفاده شده در جدول (۲) بیان شده است [۱۸].

$$W \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & \beta B_1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & \beta B_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda / \Delta t_1 & -\lambda / \Delta t_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda / \Delta t_2 & -\lambda / \Delta t_2 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_s \\ \Delta h \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$W = \text{diag} \{ \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n \} \quad (1)$$

جدول (۲). تعریف عبارت‌های مورد استفاده در رابطه (۱)

نماد	توضیح
m_j	جابه‌جایی تجمعی برای هر دوره
d_i	فاز LOS از i امین تداخل‌نگاشت
B_i	خط مبنا عمودی i امین تداخل‌نگاشت
β	ضریب مقیاس به‌دست‌آمده با طول موج رادار و زاویه برخورد موج رادار و فاصله رادار تا زمین
W	ماتریس قطری شامل وزن همدوسی
γ_i	همدوسی تداخل‌نگاشت i ام
Δh	خطای DEM
λ	ضریب نرم‌کنندگی ^۴

اندازه ماتریس هسته داده $[n*s+1]$ است، که n تعداد تداخل‌نگاشت‌ها است و s تعداد فواصل زمانی است. در هنگام انتخاب تداخل‌نگاشت‌ها در تجزیه و تحلیل SBAS، از معیارهای آزادتری استفاده می‌شود. خط مبنای زمانی و خط مبنای مکانی در محدوده بزرگتری قرار می‌گیرد. همه متغیرها در جدول (۲) تعریف شده است. باید توجه داشت که یک روش کمترین مربعات وزن دار^۵ یا روش به حداقل رساندن بر اساس نرم $L-1$ ^۶ می‌تواند برای حل معادله بالا استفاده شود. مسئله معکوس بر پایه پیکسل به پیکسل برای بدست آوردن جابه‌جایی تجمعی $M(t)$ در راستای LOS سری زمانی نهایی InSAR، حل می‌شود. به طوری که $M(t) = \sum_{i=1}^s m_i$ از یک عامل نرم‌کننده برای از بین بردن نوسانات زمانی غیر واقعی بزرگ در سری زمانی تداخل‌سنجی راداری استفاده می‌کند. انتخاب نرم‌کننده زمانی بر جابه‌جایی نهایی سری زمانی تأثیر می‌گذارد. یک مسئله مشترک در مشاهدات تداخل‌سنجی راداری این است که نمونه برداری زمانی

اندازه‌ای کوچک می‌باشد که سیگنال قابل تشخیص است [۲۱].

در واقع این روش بر پایه انتخاب تداخل‌نگاشت‌های مناسب بین تصاویر دریافتی رادار جهت اجرای تداخل‌سنجی راداری و تعیین میزان جابه‌جایی سطح زمین می‌باشد. معیار مورد استفاده در این روش انتخاب جفت تصاویری است که طول خط مبنای مکانی آن‌ها کوچک باشد. به عبارت دیگر تنها تداخل‌نگاشت‌هایی تشکیل می‌شوند که جفت تصویر آن‌ها مربوط به مسیرهای نزدیک به هم هستند و اختلاف مکانی بین مدارهایشان کوچک است [۲۲].

روش SBAS در بازیابی تغییرات زمانی در راستای LOS^۱ مؤثر است، ولی در مناطق پوشش گیاهی به دلیل ناهمبستگی، کمتر مؤثر است [۲۳-۲۵]. پیکسل‌ها با ناهمبستگی بالا (همدوسی پایین) به طور معمول از تحلیل حذف می‌شوند، در نتیجه منجر به کاهش پوشش مکانی در نقشه‌ی نهایی تداخل‌سنجی راداری می‌شود. ترمیم بهتری از ناهمبستگی می‌تواند انجام شود که در آن همدوسی فاز، یا متریک‌های دیگری از کیفیت سیگنال برای وزن دهی به مشاهدات فاز استفاده می‌شود [۲۶]. همدوسی معمولاً با بررسی واریانس فاز پیکسل در یک پنجره فضایی تعیین می‌شود [۲۷].

همدوسی پایین، مربوط به افزایش سطح نویز در فاز تداخل‌سنجی راداری اندازه‌گیری شده است. سامانه‌های پردازش تداخل‌سنجی راداری معمولاً از یک حد آستانه همدوسی برای پوشاندن (ماسک) پیکسل‌های نویزی استفاده می‌کنند. اما در روش SBAS بهبودیافته، حتی آنهایی که ناهمبسته هستند رفع ابهام فاز^۲ می‌شوند، و پتانسیل معرفی خطای رفع ابهام فاز اضافی را دارند. اگرچه، سیگنال‌ها در پیکسل‌های ناهمبسته در تجزیه و تحلیل‌های سری زمانی وزنشان کم خواهد شد.

در روش بهبودیافته، روش معمولی SBAS با معرفی همدوسی فاز تداخل‌نگاشت‌ها به مسئله معکوس بهبودیافته است [۱۸]. در حال حاضر به جای دور انداختن داده‌های نویزی در کسری از تداخل‌نگاشت‌ها، پیکسل‌ها با همبستگی پایین نیز در زنجیر پردازش حفظ می‌شوند و به داده فاز مشاهده شده بر اساس همدوسی برای هر پیکسل در هر تداخل‌نگاشت با استفاده از ماتریس وزن (W)، وزن داده می‌شود. همدوسی با در نظر گرفتن دامنه تابع همبستگی پیچیده برای هر تداخل‌نگاشت تفاضلی کامل برآورد می‌شود. الگوریتم‌های جایگزین برای ارزیابی کیفیت سیگنال را می‌توان برای این منظور استفاده کرد، مانند

³ Amplitude dispersion index

⁴ Smoothing factor

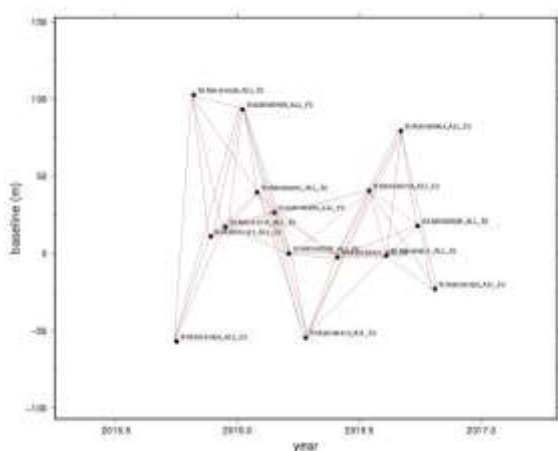
⁵ Weighted least squares

⁶ Minimization based on L-1 norm

¹ Line Of Sight

² Phase unwrapping

برای ثبت هندسی، تصویر اخذ شده در تاریخ ۲۰۱۶/۰۳/۲۰ به‌عنوان تصویر اصلی برای ثبت هندسی ۱۴ تصویر دیگر انتخاب شده است. بیشترین خط مبنا عمودی بین تصویر اصلی و فرعی ۱۰۲ متر و مربوط به تصویر ۲۰۱۵/۱۰/۲۸ است. پس از ثبت هندسی تصاویر، تداخل‌نگاشت‌ها تشکیل شده‌اند. بیش‌ترین خط-مبنای زمانی ۱۴۴ روز و بیشترین خط‌مبنای مکانی ۱۵۹ متر است. در شکل (۳) نمودار خط مبنا عمودی - زمان نشان داده شده است. در این شکل جفت تصاویرهای مورد استفاده برای ایجاد تداخل‌نگاشت با خط قرمز به هم وصل شده‌اند.



شکل (۳). نمایش خط مبنا مکانی و زمانی تداخل‌نگاشت‌ها

۱-۲- رگرسیون خطی

در مرحله بعدی از داده‌های پیژومتری چاه‌های آب دشت رفسنجان برای بررسی رابطه بین تغییرات سطح آب چاه‌ها و فرونشست استفاده شده است. برای این منظور ابتدا از ضریب همبستگی پیرسون^۱ برای محاسبه میزان همبستگی بین داده‌های پیژومتری و نتایج حاصل از روش SBAS بهبودیافته، استفاده شده است.

ضریب همبستگی پیرسون، جزء آزمون‌های آماری پارامتریک محسوب می‌شود که نشان دهنده درجه رابطه خطی بین دو متغیر است و توسط کارل پیرسون ارائه شده و آن را با حرف r نشان می‌دهند. مقدار آن بین دو عدد $+1$ و -1 تغییر می‌کند. مقدار قدر مطلق ضریب همبستگی، شدت یا درجه رابطه بین دو متغیر و علامت آن (مثبت یا منفی) جهت رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد [۳۲].

به‌منظور تعیین و پیش‌بینی رابطه بین میزان فرونشست با سطح آب چاه‌ها از مدل رگرسیون خطی ساده استفاده شده است که در آن میزان فرونشست به‌عنوان تابعی وابسته از میزان

منظم نیست. برای دادن یک وزن مساوی در نرم‌کننده زمانی به هر دوره در سری زمانی، یک عامل نرم‌کننده مرتبه اول دیفرانسیلی (λ) که با فاصله زمانی مربوطه از مشاهدات InSAR فاصله بندی شده است، اعمال شده است. در انتها یک فیلتر گوسی بالاگذر به هر تداخل‌نگاشت تفاضلی رفع ابهام شده به‌منظور بهبود اعمال شده است [۱۸].

مشکل اصلی در تحلیل سری زمانی، ثبت هندسی مجموعه بزرگی از تصاویر و تراز کردن این مجموعه با مدل فاز توپوگرافی است. ما از رویکردی استفاده می‌کنیم که تعداد زیادی تصویر فرعی با یک تصویر اصلی تراز می‌شوند. بعد از انجام ثبت هندسی، تداخل‌نگاشت با یک جفت تصویر از هر کدام از تصاویر مجموعه می‌تواند ایجاد شود.

روش استاندارد برای هم‌تراز کردن تصویر بر روی داده TOPS به دو دلیل کارایی ندارد. اول، روش قدیمی تنها می‌تواند دقت هم‌ترازی ۰٫۱ پیکسل را بدست آورد، اما هم‌ترازی باید برای نگه داشتن عدم تطابق بین مرز Burst‌ها کمتر از ۲٫۸ میلی‌متر، بهتر از ۰٫۱ پیکسل باشد. دوم چون طیف سمت داده حالت TOPS فرکانس‌های بالاتر از فرکانس نمونه برداری ناپکوئیست داده SLC دارد، تابع ضربی درون‌یابی استاندارد کارایی مناسب ندارد. دو مشکل اساسی در تداخل‌نگاشت حاصل از این روش وجود دارد که باید حل شود. اول عدم تطابق واضح در هشت مرز بین نه Burst است. دوم این که درون‌یابی ساده از تصویر فرعی با استفاده از تابع ضربی درون‌یابی دو بعدی منجر به صورت نوار نوار در آمدن در هر Burst می‌شود. مشکل این است که SLC طیف‌هایی دارد که در محدوده‌ی فرکانس ناپکوئیست نه بار می‌پیچد همچنان که رادار از پایین تا بالای Burst را اسکن می‌کند [۲۹].

غلبه بر این دو مشکل به دو روش جدید نیاز دارد: هم‌ترازی هندسی بر اساس مدار دقیق و Deramp کردن داده SLC قبل از درون‌یابی. داده‌های SAR ماهواره Sentinel-1 با دقت مداری بالا ایجاد شده‌اند (۲-۳ سانتی‌متر در حالت عمود بر پرواز، ۵ سانتی‌متر در حالت امتداد پرواز)، این دقت بالا ثبت هندسی قوی برای حذف تقریباً همه عدم تطابق فاز در مرز Burst‌ها را امکان پذیر می‌سازد [۳۰، ۳۱]. باید توجه داشت که دقت این روش خیلی بهتر از ۰٫۱ پیکسل است پس همدوسی تداخل‌نگاشت بین تصویر اصلی و فرعی باید بهینه شود. یک نتیجه قابل توجه از این روش ثبت هندسی این است که تصاویر فرعی زیادی را می‌توان به یک تصویر اصلی تراز کرد و بعد از این هم‌ترازی هر دو تصویر فرعی می‌تواند برای تشکیل تداخل‌نگاشت با همدوسی بالا استفاده شود.

^۱ Pearson Correlation Coefficient

آب چاه‌ها (متغیر مستقل) تعیین می‌شود.

باشند امکان استفاده از رگرسیون وجود ندارد. به‌منظور بررسی استقلال مشاهدات (استقلال مقادیر باقی‌مانده یا خطاها) از یکدیگر از آزمون دوربین - واتسون^۲ استفاده می‌شود.

مفهوم مستقل بودن به این معنی است که نتیجه یک مشاهده تأثیری بر نتیجه مشاهدات دیگر نداشته باشد. در رگرسیون، بیشتر در مواقعی که رفتار متغیر وابسته در یک بازه زمانی مورد مطالعه قرار می‌گیرد ممکن است با مشکل مستقل نبودن خطاها برخورد کنیم به این نوع ارتباط در داده‌ها خودهمبستگی می‌گویند. در صورت وجود خودهمبستگی در خطاها نمی‌توان از رگرسیون خطی استفاده کرد.

آماره دوربین واتسون بین ۰ تا ۴ هست. اگر بین باقیمانده‌ها همبستگی متوالی وجود نداشته باشد، مقدار این آماره باید به ۲ نزدیک باشد. اگر به صفر نزدیک باشد نشان‌دهنده همبستگی مثبت و اگر به ۴ نزدیک باشد نشان‌دهنده همبستگی منفی هست. در مجموع اگر این آماره بین ۱,۵ تا ۲,۵ باشد جای نگرانی نیست.

۳- نتایج

نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی با استفاده از روش SBAS بهبودیافته بر پایه همدوسی برای ۵۰ تداخل‌نگاشت از ۱۵ تصویر که در بخش‌های قبل ذکر شد به شرح زیر هست.

در شکل (۴) تعداد ۱۴ تصویر که بیانگر میزان فرونشست تجمعی در راستای LOS با واحد میلی‌متر است در هر تاریخ اخذ تصویر نسبت به تصویر اول نمایش داده شده است. این نتایج حاصل از حل معادلات سری زمانی توضیح داده شده هستند و تصویر اول در تاریخ ۲۰۱۵/۱۰/۰۴ به‌عنوان مبدأ برای به‌دست‌آوردن جابه‌جایی تجمعی در نظر گرفته شده است و به همین دلیل در این تاریخ جابه‌جایی تجمعی که صفر می‌شود نمایش داده نشده است. تصاویر در سیستم مختصات جغرافیایی ارائه شده است و همچنین تاریخ تصاویر، شهرها و جاده‌های موجود در منطقه مورد بررسی در نقشه مشخص شده است. ترکیب رنگی استفاده شده Jet نام دارد و مناطق قرمز رنگ بیانگر جابه‌جایی به سمت ماهواره، مناطق سبز رنگ بدون جابه‌جایی و مناطق آبی‌رنگ بیانگر جابه‌جایی دور از ماهواره (فرونشست) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با پیشرفت زمان مناطق زرد و قرمز رنگ کاهش یافته و در انتهای بازه زمانی یک سال، میزان فرونشست تجمعی افزایش یافته است و تنها شامل مناطق دارای فرونشست و بدون جابه‌جایی است. در واقع در بازه زمانی یک‌ساله دشت رفسنجان دارای فرونشست شدید در مناطق کشاورزی می‌باشد.

بررسی معنی‌دار بودن مدل رگرسیون با استفاده از آزمون تحلیل واریانس صورت می‌گیرد. تحلیل واریانس^۱ و روش‌های تجزیه واریانس، یک دسته از مدل‌های آماری هستند که قادرند اختلاف بین گروه‌ها یا دسته‌ها را بررسی کنند. اساس کار در تحلیل واریانس، تجزیه واریانس متغیر وابسته به دو بخش است، بخشی از تغییرات یا پراکندگی که توسط مدل رگرسیونی قابل نمایش است و بخشی که توسط جمله خطا تعیین می‌شود. فرض کنید مدل رگرسیونی به صورت زیر داریم [۳۲]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + e \quad (2)$$

که β_i پارامترهای مدل و e نیز جمله خطا است. پس در این حالت اگر مجموع مربعات کل را SST، مجموع مربعات خطا را SSE و مجموع مربعات رگرسیون را SSR بنامیم، می‌توان رابطه (۳) را نوشت:

$$SST = SSR + SSE \quad (3)$$

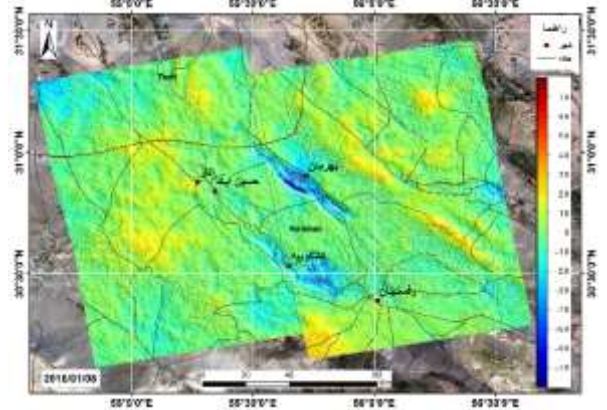
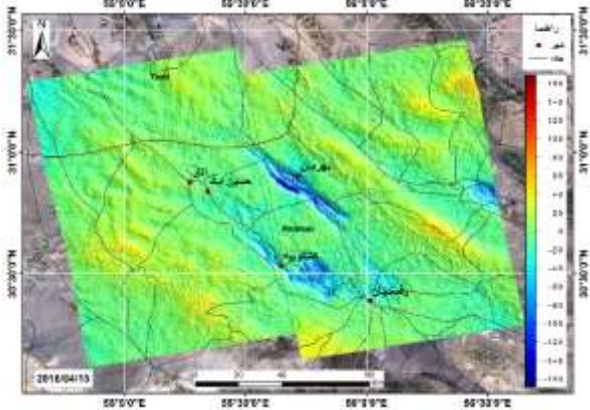
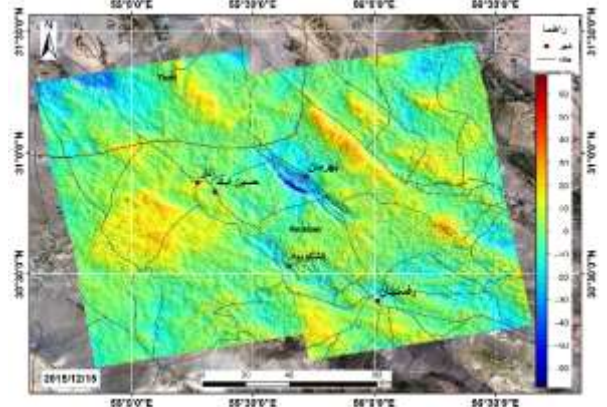
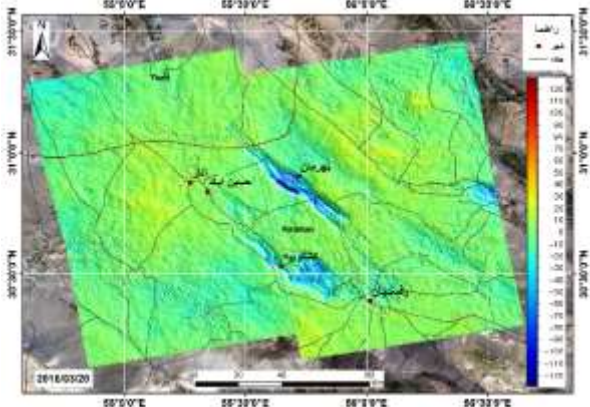
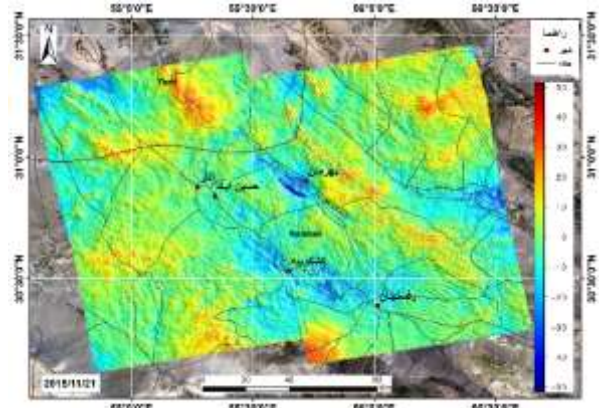
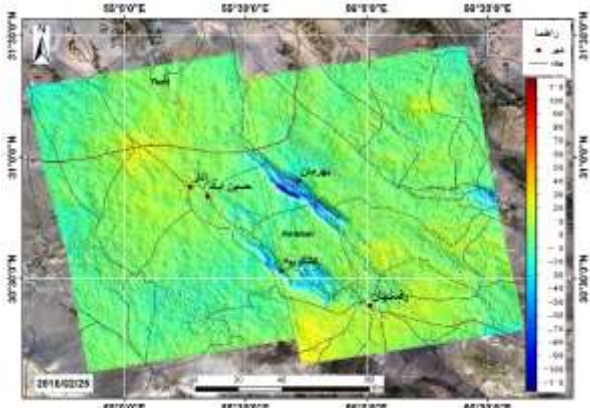
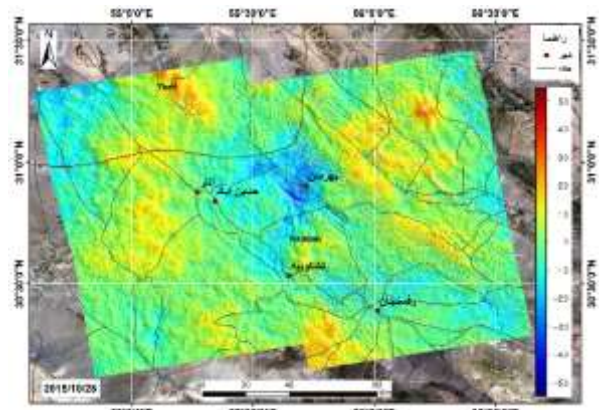
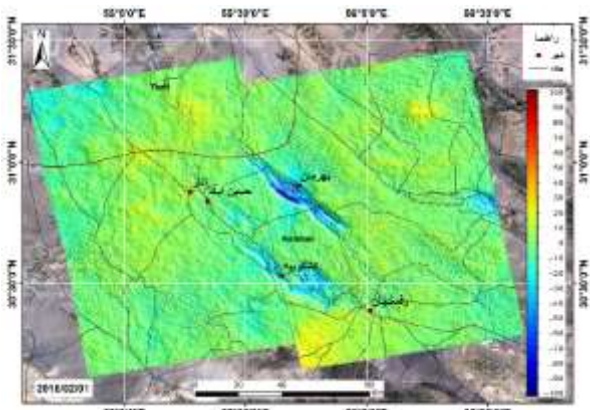
در صورتی که مدل رگرسیون مناسب باشد، انتظار داریم سهم SSR از SST بیشتر باشد، به‌طوری که بیشتر تغییرات متغیر وابسته توسط مدل رگرسیون توصیف شود. برای محاسبه واریانس از روی هر یک از مجموع مربعات کافی است، حاصل را بر تعداد جملاتشان تقسیم کنیم. به‌این ترتیب مقادیرهای جدیدی به نام‌های (میانگین مربعات خطا) (MSE) و (میانگین مربعات رگرسیون) (MSR) به وجود می‌آیند. به‌طور کلی میانگین مربعات از تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی آن به دست می‌آید. بر همین مبنا مقدار آماره F از تقسیم میانگین مربعات رگرسیون بر میانگین مربعات خطا به دست می‌آید.

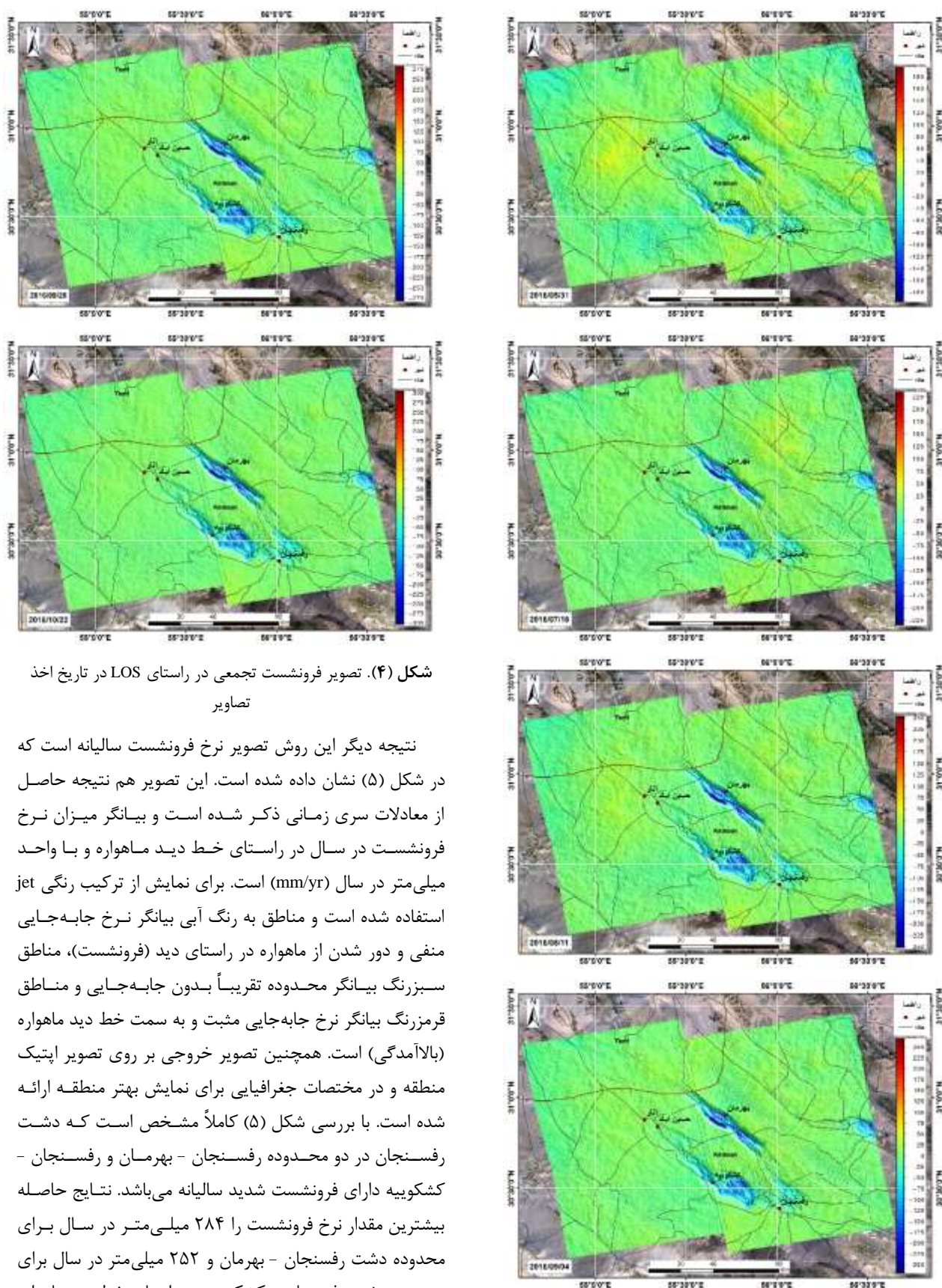
از آنجایی که نسبت میانگین مربعات دارای توزیع آماری F است با مراجعه به جدول این توزیع و محاسبه صدک مربوطه، چنانچه متوجه شویم که مقدار محاسبه شده برای F بزرگتر از مقدار جدول توزیع فیشر با F و $p-1$ درجه آزادی در صدک $1-\alpha$ است، پس مدل رگرسیون توانسته بیشتر تغییرات متغیر وابسته را در خود جای دهد در نتیجه مدل مناسبی توسط روش رگرسیونی ارائه شده. در اینجا α احتمال خطای نوع اول، p تعداد پارامترهای رگرسیون خطی و n تعداد مشاهدات در نظر گرفته شده است [۳۲].

یکی از مفروضاتی که در رگرسیون مدنظر قرار می‌گیرد، استقلال خطاها (تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله رگرسیون) از یکدیگر است. در صورتی که فرضیه استقلال خطاها رد شود و خطاها با یکدیگر همبستگی داشته

² Durbin-Watson Tes

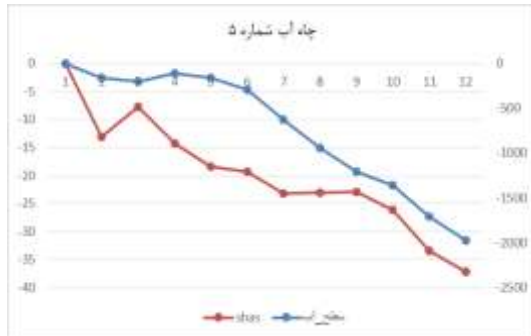
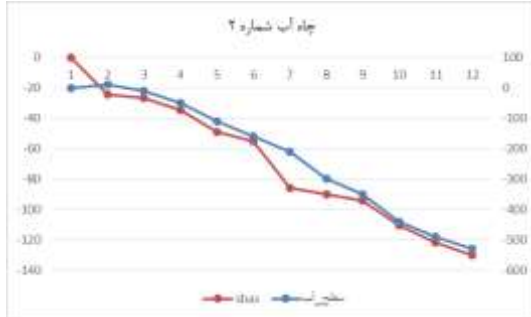
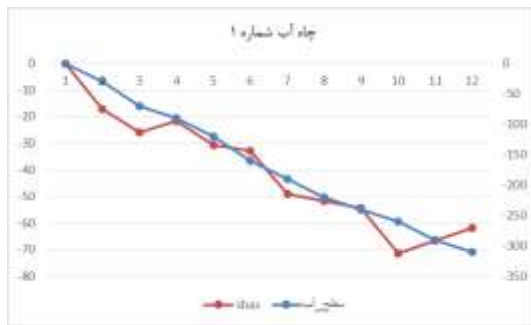
¹ Analysis of Variance (ANOVA)



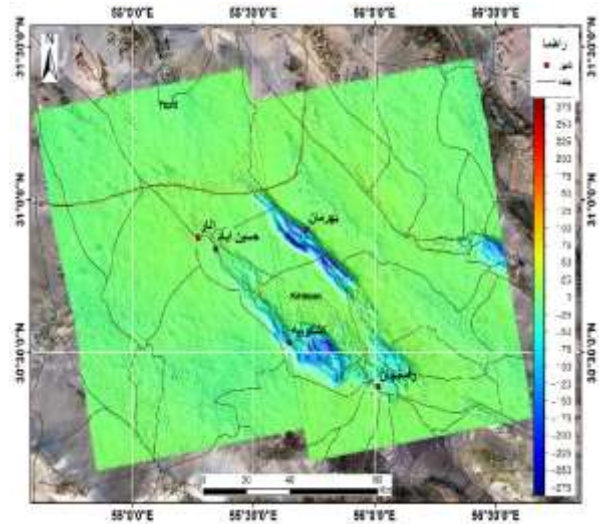


شکل (۴). تصویر فرونشست تجمعی در راستای LOS در تاریخ اخذ تصاویر

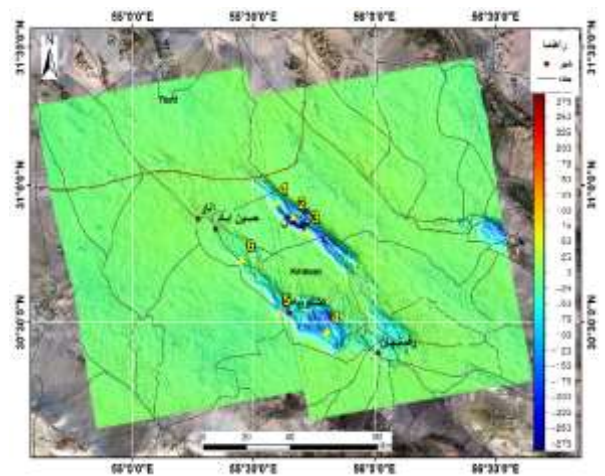
نتیجه دیگر این روش تصویر نرخ فرونشست سالیانه است که در شکل (۵) نشان داده شده است. این تصویر هم نتیجه حاصل از معادلات سری زمانی ذکر شده است و بیانگر میزان نرخ فرونشست در سال در راستای خط دید ماهواره و با واحد میلی‌متر در سال (mm/yr) است. برای نمایش از ترکیب رنگی jet استفاده شده است و مناطق به رنگ آبی بیانگر نرخ جابه‌جایی منفی و دور شدن از ماهواره در راستای دید (فرونشست)، مناطق سبزرنگ بیانگر محدوده تقریباً بدون جابه‌جایی و مناطق قرمز رنگ بیانگر نرخ جابه‌جایی مثبت و به سمت خط دید ماهواره (بالآمدگی) است. همچنین تصویر خروجی بر روی تصویر اپتیک منطقه و در مختصات جغرافیایی برای نمایش بهتر منطقه ارائه شده است. با بررسی شکل (۵) کاملاً مشخص است که دشت رفسنجان در دو محدوده رفسنجان - بهرمان و رفسنجان - کشکویه دارای فرونشست شدید سالیانه می‌باشد. نتایج حاصله بیشترین مقدار نرخ فرونشست را ۲۸۴ میلی‌متر در سال برای محدوده دشت رفسنجان - بهرمان و ۲۵۲ میلی‌متر در سال برای محدوده دشت رفسنجان - کشکویه در راستای خط دید ماهواره نشان می‌دهند.



برای بررسی رابطه بین تغییرات سطح آب چاه‌ها که از اطلاعات پیژومتری چاه‌های آب منطقه به دست آمده و تغییرات سطح زمین که از روش SBAS بهبود یافته به دست آمده، شش چاه آب انتخاب شده است که در شکل (۶) بر روی تصویر نرخ فرونشست سالیانه منطقه مورد مطالعه مشخص شده است.



شکل (۵). تصویر نرخ فرونشست سالیانه دشت رفسنجان



شکل (۶). محل چاه‌های آب مورد بررسی

در شکل (۷) نمودار تغییرات سطح آب چاه‌ها به رنگ آبی و میزان فرونشست محاسبه شده با روش SBAS بهبود یافته به رنگ قرمز برای شش چاه در محدوده دشت رفسنجان نشان داده شده است. در این نمودارها محور افقی بیانگر زمان (مهر ۱۳۹۴ تا مهرماه ۱۳۹۵) و محور عمودی اصلی و فرعی به ترتیب بیانگر میزان جابه‌جایی زمین و تغییرات سطح آب چاه با واحد میلی‌متر است.

بیشتری بین متغیر وابسته و مستقل است. مقدار P-value نشان دهنده معنادار بودن رابطه است و اگر کوچکتر از ۰,۰۵ باشد، نشانگر معنی دار بودن آزمون آماری (رد فرض صفر یا بی معنی بودن ضریب همبستگی) در سطح خطای ۰,۰۵ یا سطح آزمون ۰,۰۵ است که برای تمامی چاه‌های مورد بررسی به غیر از چاه آخر این مقدار کمتر از ۰,۰۵ است. در ستون آخر مقادیر Durbin-Watson ذکر شده است. کران بالا و پایین آماره دوربین - واتسون، بر اساس سطح خطای ۰,۰۵ و یا سطح آزمون ۰,۰۵ برای ۱۲ مشاهده و با یک متغیر مدل ($N=12, k=1$)، به ترتیب برابر با ۱,۳۳ و ۰,۹۷ است. برای چاه‌های آب شماره یک، دو و چهار مقدار d بیشتر از کران بالای آن می‌باشد پس نمونه تصادفی، شهادی بر داشتن خودهمبستگی مثبت (Positive Autocorrelation) بین باقی‌مانده‌ها ارائه نکرده است. پس دلیلی بر رد صفر توسط این نمونه تصادفی وجود ندارد. در اینجا منظور از خودهمبستگی یا همبستگی سریالی مثبت، آن است که جهت تغییرات خطاها یکسان است یعنی اگر، یکی از باقی‌مانده‌ها یا مقادیر خطا افزایش یابد، احتمال آنکه دیگری نیز افزایش داشته باشد، زیاد خواهد بود. همچنین برای چاه‌های شماره سه و پنج مقدار d بین کران بالا و پایین آن قرار دارد و تنها مقدار بحرانی برای چاه شماره شش است که مقدار d از کران پایین کوچکتر است و بیانگر خودهمبستگی مثبت است.

جدول (۴). تحلیل واریانس ANOVA

شماره چاه	SST	SSR	SSE	F	Sig.
شماره ۱	۵۳۷۵,۷۸	۵۰۱۹,۵۴	۳۵۶,۲۴	۱۴۰,۹۰۲	۰,۰۰۰
شماره ۲	۱۹۹۳۰,۶۶	۱۸۹۵۴,۷۸	۹۵۷,۸۸	۱۹۴,۳۳۳	۰,۰۰۰
شماره ۳	۱۴۹۰۴,۰۳	۱۳۲۷۰,۱	۱۶۳۳,۹۳	۸۱,۲۱۶	۰,۰۰۰
شماره ۴	۱۰۱۶۳,۸۴	۸۹۵۹,۴۸	۱۲۰۳,۳۵	۷۴,۴۵۴	۰,۰۰۰
شماره ۵	۱۱۷۳,۳۳	۹۳۲,۷۰	۲۴۰,۶۲	۳۸,۷۶۱	۰,۰۰۰
شماره ۶	۱۹۱۸,۹۰	۳۷۷,۰۴	۱۵۴۱,۸۶	۲,۴۴۵	۰,۱۴۹

در جدول (۴) مقادیر SST، SSR و SSE به ترتیب بیانگر مجموع مربعات کل، مجموع مربعات رگرسیون و مجموع مربعات خطا می‌باشد و برای تمامی چاه‌ها به غیر از چاه آخر مقدار SSR از SSE بیشتر است که بدین معنی است مدل رگرسیون به دست آمده برای پنج چاه آب مناسب است. در ستون پنجم مقدار آماره آزمون معنی داری مدل که همان آماره F است ذکر شده است که با مقدار حاصل از جدول توزیع فیشر با $p=1$ و $n-p-1=10$ درجه آزادی (n تعداد مشاهدات و p تعداد پارامترهای مدل) مقایسه می‌شود. مقدار F با درجه آزادی ۱۰ و همچنین سطح معناداری ۰,۰۵ (سطح اطمینان ۹۵٪) از جدول توزیع فیشر برابر



شکل (۷). نمودار تغییرات سطح چاه‌های آب در مقایسه با تغییرات فرونشست حاصل از روش SABS برای شش چاه آب مورد بررسی. (محور افقی بیانگر زمان از مهر ۱۳۹۴ تا مهر ۱۳۹۵ و محور عمودی اصلی و فرعی به ترتیب بیانگر میزان جابه‌جایی زمین و تغییرات سطح آب چاه با واحد میلی‌متر است)

با مشاهده نمودارها، رابطه خطی بین تغییرات سطح زمین و سطح آب قابل مشاهده است. در انتها برای بررسی رابطه بین تغییرات سطح آب و میزان فرونشست ابتدا از آزمون همبستگی پیرسون و سپس برای تعیین رابطه بین آنها از مدل رگرسیون خطی استفاده شده است. هر یک از شش چاه آب به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفتند. ضرایب همبستگی و پارامترهای مدل رگرسیون خطی برای هر چاه آب در حالی که داده‌های سطح آب به عنوان متغیر مستقل و نتایج SBAS بهبود یافته به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده، محاسبه شده‌اند. نتایج این بررسی در جداول (۳) تا (۵) ذکر شده است.

جدول (۳). خلاصه مدل رگرسیون خطی

شماره چاه	R	R ²	Adj. R ²	P-value	Durbin-Watson
شماره ۱	۰,۹۶۶	۰,۹۳۴	۰,۹۲۷	۰,۰۰۰	۲,۰۱۷
شماره ۲	۰,۹۷۵	۰,۹۵۱	۰,۹۴۶	۰,۰۰۰	۱,۴۲۴
شماره ۳	۰,۹۴۴	۰,۹۸۰	۰,۸۷۹	۰,۰۰۰	۱,۰۸۲
شماره ۴	۰,۹۳۹	۰,۸۸۲	۰,۸۷۰	۰,۰۰۰	۲,۱۶۵
شماره ۵	۰,۸۹۲	۰,۷۹۵	۰,۷۷۴	۰,۰۰۰	۱,۱۲۱
شماره ۶	۰,۴۴۳	۰,۱۹۶	۰,۱۱۶	۰,۱۴۹	۰,۵۳۱

در جدول (۳) مقادیر ضریب همبستگی (R) بیانگر میزان همبستگی بین متغیر مستقل و وابسته می‌باشد و همان‌طور که قابل مشاهده است برای تمامی چاه‌ها به غیر از چاه آخر دارای همبستگی قوی است. ضریب تعیین (R^2)، این یافته نشان می‌دهد که متغیر مستقل چه میزان متغیر وابسته را پیش‌بینی می‌کند. همچنین ضریب تعیین تصحیح شده ($Adj.R^2$) نشان می‌دهد که چه مقدار از کل تنوع (واریانس) متغیر وابسته توسط متغیر مستقل توجیه شده است. هرچه مقدار این سه پارامتر به یک نزدیک‌تر باشد، مدل رگرسیون مناسب‌تر است و بیانگر رابطه

زمین در محل چاه است. درحالی که مقدار ضریب استاندارد شده جدول ۵ نشان‌دهنده قابلیت محاسبه مقدار Y از طریق X است. برای مثال برای چاه شماره یک که مقدار ضریب استاندارد شده آن برابر ۰,۹۶۶ است، بنابراین ۹۶ درصد از مقدار Y از طریق X محاسبه می‌شود.

برای بررسی این موضوع که چرا مدل رگرسیون خطی استفاده شده برای چاه آب شماره شش مناسب نیست، اطلاعات پیژومتری آن از ابتدای سال ۱۳۹۲ تا مهرماه ۱۳۹۵ مورد بررسی قرار گرفت و در شکل (۸) با واحد میلی‌متر نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۸) سطح آب چاه در دوره‌های بارندگی مختلف به دلیل کنترل و کاهش میزان برداشت آب از چاه، افزایش داشته است. در بازه زمانی یک‌ساله (مهرماه ۱۳۹۴ تا مهرماه ۱۳۹۵) مورد بررسی ما، در محدوده‌ای که سطح آب در حال افزایش بوده جابه‌جایی زمین روبه‌پایین بوده و فرونشست در حال افزایش بوده است و به همین دلیل میزان همبستگی بین دو داده کاهش یافته و مدل رگرسیون خطی به دست آمده مناسب نبوده است. در نتیجه هرچند در بازه‌های زمانی مختلف سطح آب در چاه موردنظر افزایش یافته است ولی میزان فرونشست کاهش پیدا نکرده که به نظر می‌رسد به دلیل فرونشست طولانی در محدوده چاه موردنظر میزان خلل و فرج زمین کاهش یافته و در بازه زمانی کوتاه قابل جبران نیست.



شکل (۸). نمودار تغییرات سطح آب چاه شماره شش. (محور افقی بیانگر زمان از فروردین ۱۳۹۲ تا مهر ۱۳۹۵ و محور عمودی بیانگر تغییرات سطح آب چاه با واحد میلی‌متر است)

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق از یک روش ترکیبی پردازش تصاویر راداری تداخل‌سنجی و تحلیل‌های آماری برای محاسبه فرونشست دشت رفسنجان استفاده کرده است. با استفاده از روش توضیح داده شده برای ثبت هندسی تصاویر Sentinel-1 بر اساس اطلاعات مداری دقیق و همچنین Deramp کردن داده SLC قبل از درون‌یابی مشکل عدم تطابق واضح مرز بین Burstها و نوار شدگی Burstها برطرف می‌شود. روش SBAS بهبودیافته با قراردادن حتی پیکسل‌های با همبستگی پایین در چرخه پردازش

با ۴,۹۶ است. برای همه چاه‌ها به غیر از چاه آخر مقدار F از ۴,۹۶ بیشتر است. ستون آخر هم سطح معناداری مدل را نمایش می‌دهد که باید کمتر از ۰,۰۵ باشد. بر اساس مقادیر این جدول مدل‌های به دست آمده برای پنج چاه آب با اطمینان ۹۵٪ معنا دار بوده و بر اساس داده‌های سطح آب قادر به بیان تغییرات سطح زمین می‌باشد.

جدول (۵). ضرایب مدل رگرسیون خطی

شماره چاه	ضرایب استاندارد نشده β_0	ضرایب استاندارد نشده β_1	ضرایب استاندارد شده β_1	Sig.
شماره ۱	-۶,۰۶۵	۰,۲۰۷	۰,۹۶۶	۰,۰۰۰
شماره ۲	-۲۲,۳۹۲	۰,۲۱۰	۰,۹۷۵	۰,۰۰۰
شماره ۳	-۲۵,۱۹۹	۰,۲۵۴	۰,۹۴۴	۰,۰۰۰
شماره ۴	-۱,۸۲۹	۰,۰۴۹	۰,۹۳۹	۰,۰۰۰
شماره ۵	-۱۰,۱۷۰	۰,۰۱۳	۰,۸۹۲	۰,۰۰۰
شماره ۶	-۲۳,۷۰۱	۰,۰۳۶	۰,۴۴۳	۰,۱۴۹

جدول (۵) ضرایب رگرسیونی، عرض از مبدأ و اندازه آنها را نشان می‌دهد. ستون دوم مقدار ثابت عرض از مبدأ برای هر مدل مربوط به هر چاه را بیان می‌کند. ستون سوم مقدار ضرایب استاندارد نشده (واقعی) متغیر مستقل را نشان می‌دهد. از آنجاکه در یک مدل متغیرهای مستقل دارای واحد یکسان نیستند از ضرایب استاندارد شده استفاده می‌شود که در ستون چهارم ذکر شده است که بیانگر این است چه میزان از متغیر وابسته توسط هریک از متغیرهای مستقل بیان می‌شود. در ستون آخر هم سطح معنی داری مدل بیان شده که باز هم برای پنج چاه مقدار آن کمتر از ۰,۰۵ می‌باشد.

در نهایت با استفاده از اطلاعات به دست آمده می‌توان مدل رگرسیون خطی هر چاه آب را به دست آورد و با استفاده از آن مقدار متغیر وابسته که همان تغییرات سطح زمین (فرونشست) است را محاسبه کرد. معادله رگرسیون خطی ساده برای چاه‌های شماره یک تا شش در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

جدول (۶). معادله رگرسیون خطی ساده

شماره چاه	ضرایب استاندارد نشده β_0	ضرایب استاندارد نشده β_1	معادله رگرسیون خطی ساده برای چاه‌ها
شماره ۱	-۶,۰۶۵	۰,۲۰۷	$Y = -۶,۰۶۵ + ۰,۲۰۷X$
شماره ۲	-۲۲,۳۹۲	۰,۲۱۰	$Y = -۲۲,۳۹۲ + ۰,۲۱۰X$
شماره ۳	-۲۵,۱۹۹	۰,۲۵۴	$Y = -۲۵,۱۹۹ + ۰,۲۵۴X$
شماره ۴	-۱,۸۲۹	۰,۰۴۹	$Y = -۱,۸۲۹ + ۰,۰۴۹X$
شماره ۵	-۱۰,۱۷۰	۰,۰۱۳	$Y = -۱۰,۱۷۰ + ۰,۰۱۳X$
شماره ۶	-۲۳,۷۰۱	۰,۰۳۶	$Y = -۲۳,۷۰۱ + ۰,۰۳۶X$

که در آن X مقدار سطح آب چاه و Y مقدار جابه‌جایی سطح

- M. Khomehchian, "A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran," *Canadian journal of civil engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 452-464, 2001.
- [5] M. Motagh *et al.*, "Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation," *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 16, 2008.
- [6] M. Dehghani, M. Rastegarfar, R. A. Ashrafi, N. Ghazipour, and H. R. Khorramrooz, "Interferometric SAR and geospatial techniques used for subsidence study in the Rafsanjan plain," *Am J Environ Eng*, vol. 4, no. 2, pp. 32-40, 2014.
- [7] M. Bagheri, M. Dehghani, A. Esmaeily, and V. Akbari, "Assessment of land subsidence using interferometric synthetic aperture radar time series analysis and artificial neural network in a geospatial information system: a case study of Rafsanjan Plain," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, p. 044530, 2019.
- [8] A. Tavakkoli-Estahbanati, M. Dehghani, and A. R. Amiri-Simkooei, "Assessment of Conventional Unwrapping Methods Presented to Unwrap Interferometric Phases," (in Persian), *Journal of "Radar"*, vol. 5, no. 3, pp. 1-14, 2017.
- [9] S. Awasthi, K. Jain, V. Mishra, and A. Kumar, "An approach for multi-dimensional land subsidence velocity estimation using time-series Sentinel-1 SAR datasets by applying persistent scatterer interferometry technique," *Geocarto International*, pp. 1-32, 2020.
- [10] P. Yastika, N. Shimizu, and H. Abidin, "Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2017 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data," *Advances in Space Research*, vol. 63, no. 5, pp. 1719-1736, 2019.
- [11] K. Fárová, J. Jelének, V. Kopačková-Strnadová, and P. Kycl, "Comparing DInSAR and PSI techniques employed to Sentinel-1 data to monitor highway stability: A case study of a massive dobkovičky landslide, Czech Republic," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 22, p. 2670, 2019.
- [12] K. Pawluszek-Filipiak and A. Borkowski, "Integration of DInSAR and SBAS Techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 2, p. 242, 2020.
- [13] E. Bedini, "Land Subsidence Assessment by Using Persistent Scatterer Interferometry of Sentinel-1 Data: A Study of Vienna City, Austria," *International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 604-611, 2021.
- [14] J. M. Delgado Blasco, M. Fomelis, C. Stewart, and A. Hooper, "Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 2, p. 129, 2019.
- [15] P. J. D'Aranno, A. Di Benedetto, M. Fiani, M. Marsella, I. Moriero, and J. A. Palenzuela Baena, "An Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Infrastructure Monitoring," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 6, p. 1052, 2021.
- [16] O. Orhan, "Monitoring of land subsidence due to

و اختصاص وزن به هر پیکسل بر اساس همدوسی آن مشکل حذف پیکسل‌های ناهمبسته در چرخه پردازش را رفع کرده است و نقشه‌های فرونشست با پوشش مکانی پیوسته ایجاد می‌شوند. در نتیجه برای مناطق دارای پوشش گیاهی که رفتار پراکنشی پیکسل‌ها با گذر زمان همواره در تغییر است و امکان استفاده از روش PSI نیست، مناسب است.

به‌منظور بررسی رابطه بین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و میزان فرونشست از ضریب همبستگی پیرسون و جهت مدل کردن رابطه از مدل رگرسیون خطی استفاده شد که نتایج بیانگر رابطه خطی مستقیم قوی بین این دو بود. همچنین مدل رگرسیون خطی قابلیت مدل کردن رابطه بین این دو متغیر را با ضریب همبستگی بالا و ضریب اطمینان ۹۵٪ دارا می‌باشد. معنی‌دار بودن مدل رگرسیون به دست آمده با استفاده از آزمون تحلیل واریانس و استقلال مشاهدات از یکدیگر با استفاده از آزمون دوربین - واتسون تأیید شد.

نتایج حاصل از سری زمانی بیانگر افزایش فرونشست تجمعی در بازه زمانی مورد مطالعه (مهرماه ۹۴ تا مهرماه ۹۵) و نرخ فرونشست سالانه نسبت به سال‌های گذشته بر اساس مطالعات پیشین است. نتایج بیانگر حداکثر فرونشست ۲۸۴ میلی‌متر در سال در راستای LOS در منطقه رفسنجان - بهرمان و ۲۵۲ میلی‌متر در سال در منطقه رفسنجان - کشکویه است. در محدوده‌هایی هرچند مقدار سطح آب‌های زیرزمینی با کنترل میزان برداشت آب و افزایش بارندگی، افزایش یافته است، اما میزان فرونشست همچنان روبه‌افزایش است که بیانگر این موضوع است که در بازه زمانی کوتاه‌مدت فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی قابل جبران نیست و نیاز به زمان بیشتری دارد. جهت پیش‌بینی میزان فرونشست سال‌های آینده از طریق اطلاعات سطح آب‌چاه‌ها استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری عمیق پیشنهاد می‌گردد. همچنین باتوجه به اینکه بیشتر محدوده مورد بررسی شامل مناطق پوشش گیاهی هست استفاده از تصاویر L-band (که دارای طول‌موج‌های بلندتری هستند) و مقایسه آن با نتایج تصاویر Sentinel-1 پیشنهاد می‌شود.

۵- مراجع

- [1] M. Sharifikia, "Determining the extent and amplitude of land subsidence using radar interferometry (D-InSAR) method in Nogh-Bahrman plain " (in Persian), *The Journal of Spatial Planning*, vol. 16, no. 3, pp. 55-77, 2012.
- [2] R. E. Hunt, *Geologic hazards: a field guide for geotechnical engineers*. CRC Press, 2007.
- [3] M. Toufigh and B. Sabet, "Prediction of future land subsidence in Kerman, Iran, due to groundwater withdrawal," in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1996, vol. 8, no. 33, p. 344A.
- [4] S. M. Mousavi, A. Shamsai, M. H. E. Naggari, and

- [24] R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorquí, P. Berardino, and E. Sansosti, "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 7, pp. 1377-1386, 2004.
- [25] T. R. Lauknes, H. A. Zebker, and Y. Larsen, "InSAR deformation time series using an-norm small-baseline approach," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 1, pp. 536-546, 2011.
- [26] P. Agram and M. Simons, "A noise model for InSAR time series," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 120, no. 4, pp. 2752-2771, 2015.
- [27] P. A. Rosen *et al.*, "Synthetic aperture radar interferometry," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 3, pp. 333-382, 2000.
- [28] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.
- [29] D. Sandwell, R. Mellors, X. Tong, M. Wei, and P. Wessel, "Gmtsar: An InSAR processing system based on generic mapping tools," *Scripps Institution of Oceanography*, ۲۰۱۱.
- [30] E. Sansosti, P. Berardino, M. Manunta, F. Serafino, and G. Fornaro, "Geometrical SAR image registration," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 10, p. 2861, 2006.
- [31] N. Miranda, "Definition of the TOPS SLC deramping function for products generated by the S-1 IPF," *Eur. Space Agency, Paris, France, Tech. Rep*, 2014.
- [32] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*, Sixth Edition ed. John Wiley & Sons, 2010.
- excessive groundwater extraction using small baseline subset technique in Konya, Turkey," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 193, no. 4, pp. 1-17, 2021.
- [17] S. Yalvac, "Validating InSAR-SBAS results by means of different GNSS analysis techniques in medium-and high-grade deformation areas," *Environmental monitoring and assessment*, vol. 192, no. 2, pp. 1-12, 2020.
- [18] X. Tong and D. Schmidt, "Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method," *Remote Sensing of Environment*, vol. 186, pp. 405-415, 2016.
- [19] S. Mehryar, R. Sliuzas, A. Sharifi, and M. Van Maarseveen, "The water crisis and socio-ecological development profile of Rafsanjan Township, Iran," *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 199, pp. 271-285, 2015.
- [20] M. Motagh *et al.*, "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements," *Engineering Geology*, vol. 218, pp. 134-151, 2017.
- [21] F. Gatelli, A. M. Guamieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati, and F. Rocca, "The wavenumber shift in SAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 4, pp. 855-865, 1994.
- [22] S. Usai, *A New Approach for Longterm Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry*. TU Delft, Delft University of Technology, 2001.
- [23] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383, 2002.