

بررسی فرونشست سطح زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری-آبخوان مرودشت

علی‌اصغر آل‌شیخ^۱، زهرا چترسیماب^{۲*}، بهزاد وثوقی^۳، مهدی مدیری^۴ و محمد صادق پاکدامن^۵

^۱ استاد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران، ^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، ^۴ دانشیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر و ^۵ دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹

چکیده

فرونشست سطح زمین از جمله مخاطرات محیطی است که بشر در دهه‌های اخیر به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در دشت‌ها با آن مواجه است. آبخوان دشت مرودشت نیز در سال‌های اخیر به صورت چشم‌گیر با این پدیده روبه‌رو شده است. قرار گرفتن بناهای تاریخی مانند تخت جمشید در این آبخوان، مسئله بررسی فرونشست را حائز اهمیت می‌نماید. پژوهش حاضر، به بررسی رابطه بین میزان فرونشست و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در آبخوان مرودشت پرداخته است. در این پژوهش، به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی از روش زمین‌آمار کریجینگ و برای برآورد میزان فرونشست سطح زمین از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و از تصاویر راداری COSMO-SkyMed استفاده شد. نتایج نشان داد، میانگین افت سالانه آب زیرزمینی برابر با ۴۵ سانتی‌متر می‌باشد. از طرفی، بیشترین میزان فرونشست در منطقه کناره در بین بازه زمانی ۱۳۹۲/۰۷/۰۹ تا ۱۳۹۲/۱۱/۱۲ برابر ۲/۵ سانتی‌متر و حدود ۱۵ درصد منطقه دارای نشست کمتر از یک سانتی‌متر در این دوره زمانی می‌باشد. در این دشت با مقایسه نقشه افت سطح آب زیرزمینی و نقشه جابه‌جایی سطح زمین مشخص می‌شود، در نواحی که افت سطح آب زیرزمینی بیشتر بوده است، بیشترین میزان جابه‌جایی نیز رخ داده است و تقریباً به ازای هر ۴۵ سانتی‌متر افت تراز آب زیرزمینی حدود یک سانتی‌متر زمین در این منطقه دچار نشست می‌شود. مقایسه بین وسعت و الگوی فرونشست حاصل از نتایج تکنیک تداخل‌سنجی راداری با موقعیت، تراکم چاه‌ها و برداشت آب‌های زیرزمینی در این دشت نشان می‌دهد که فرونشست درست در همان مناطقی که تراکم این چاه‌ها و برداشت از منابع آب زیرزمینی زیاد است، اتفاق افتاده است.

واژه‌های کلیدی: استان فارس، دشت مرودشت، زمین‌آمار، کریجینگ، COSMO-SkyMed

مقدمه

آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعتی محسوب می‌شوند. در این مناطق وجود اقلیم‌های نیمه‌خشک و خشک به دلیل بارندگی نامناسب، وقوع خشکسالی‌های

منابع آب زیرزمینی در بخش‌های بزرگی از ایران مرکزی، شرق و جنوب ایران به‌عنوان تنها منبع تأمین

در ناحیه سانتاکلرا^۱ رخ داده است (Rokni و همکاران، ۲۰۱۶).

در سال‌های اخیر، پدیده فرورانشست زمین در دشت‌های زیادی از نقاط خشک و نیمه‌خشک ایران مرکزی و شرق ایران همراه با افت ممتد سطح آب زیرزمینی گزارش شده است و در حال حاضر، آمار دشت‌های کشور که با این پدیده روبرو هستند، به ۲۰۹ دشت می‌رسد (Salehi و همکاران، ۲۰۱۳).

Abbasnejad (۲۰۱۳) به بررسی شرایط و مسائل زمین‌شناسی محیط زیست دشت رفسنجان پرداخت و بیان داشت که به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی، سطح زمین حدود ۴۲ سانتی‌متر نشست می‌نماید. Lashkaripour و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت کاشمر پرداختند و بیان داشتند که در سه دهه اخیر، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی دشت کاشمر باعث افت بیش از ۱۹ متر در سطح آب زیرزمینی شده و هر ساله حدود ۱۶ میلیون مترمکعب بر کسری حجم مخزن افزوده می‌شود.

در چند سال اخیر، پدیده فرورانشست به‌عنوان یک بحران جدی در بسیاری از دشت‌های استان فارس مطرح شده است. هم‌اکنون ۷۰ درصد از دشت‌های این استان در معرض فرورانشست می‌باشند و فرورانشست در هشت دشت از جمله مرودشت، ارژن، شیراز، دشت‌های جنوب خاوری فارس، نقش رستم، دشت کوه سپید در منطقه داراب، پدیده فروچاله در منطقه صفاشهر گزارش شده است (Miraei و همکاران، ۲۰۱۲).

Miraei و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی عوامل اساسی اثرگذار روی پدیده فرورانشست و آسیب‌های ناشی از آن در دشت مرودشت پرداختند و بیان داشتند که افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۳ متر، ضخامت زیاد آبرفت دشت، تغییر ضخامت لایه‌ها در دامنه کوه‌ها و هم‌راستا بودن ترک‌ها و شکاف‌های ایجاد شده با راستای گسل موجود در محدوده این دشت باعث فرورانشست سطح زمین شده است. اندازه‌گیری میزان فرورانشست در سال‌های نخست،

درازدت و نبود رودخانه‌های دائمی سبب شده تا بیش از ۹۰ درصد نیاز آبی از طریق سفره‌های آب زیرزمینی تأمین شود (Lashkaripour و همکاران، ۲۰۰۹).

یکی از پیامدهای مهم برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی متراکم شدن لایه‌ها و نشست زمین است. افت سطح آب زیرزمینی موجب کاهش فشار هیدرواستاتیک سفره شده و بخش جامد یا ساختمان سفره پایداری خود را از دست می‌دهد و باعث جابه‌جایی ذرات و کم شدن فضای بین ذره‌ای می‌شود و در نتیجه، کاهش حجم و متراکم شدن رخ می‌دهد. همواره نشست زمین به‌طور معمول بلافاصله با خروج سیال رخ نمی‌دهد، بلکه در زمانی طولانی‌تر از برداشت اتفاق می‌افتد (Galloway، ۱۹۹۹).

فرورانشست سطح زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندکی نیز باشد. فرورانشست و شکاف‌های زمین به آهستگی و به تدریج گسترش می‌یابد و خسارات ناشی از این پدیده در زمین ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب است.

بر اساس مطالعات انجام شده در منطقه آریونا، فرورانشست به دو صورت سریع و آهسته اتفاق می‌افتند. حرکات آهسته در مناطق دانه‌ریز رسی که از حالت اشباع خارج شده و تحت نیروی وزن لایه تراکم می‌یابند، به‌وجود آمده و حرکات سریع بیشتر در مناطقی با سنگ کف کارستی رخ داده و به‌عنوان فروچاله معروفند (Waltham، ۱۹۸۹).

پژوهش‌های علمی در مورد فرورانشست زمین برای اولین بار در سال ۱۸۲۵ در بلژیک انجام شد (National coal Board، ۱۹۷۵). در ایالات متحده آمریکا بیش از ۱۷۰۰۰ مایل مربع در ۴۵ ایالت به‌وسیله فرورانشست زمین تحت تاثیر قرار گرفته و بیش از ۸۰ درصد نشست‌ها متاثر از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی بوده است (Galloway و همکاران، ۱۹۹۹). اولین فرورانشست شناسایی شده در اثر بهره‌برداری و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی در ایالت کالیفرنیا آمریکا و

¹ Santa Clara

اینترفروگرام^۲ با بازه‌های زمانی متفاوت را برای محاسبه نرخ این پدیده محاسبه کرد.

Mirshahi و همکاران (۲۰۱۳) برای بررسی فرونشست سطح زمین از تصاویر TerraSAR-X در جنوب غرب شهر تهران استفاده کردند و به منظور پردازش این داده‌ها از دو روش تداخل‌سنجی متداول و باز پراکنش کننده دائمی استفاده کردند. نتیجه آن‌ها نشان داد که چگالی باز پراکنش کننده‌های شناسایی شده با استفاده از این تصاویر در مقایسه با داده‌های پیشین به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. Rezaee و Maleki (۲۰۱۶) برای پیش‌بینی مکان‌های در معرض خطر فرونشست دشت کرمانشاه از آمار ۲۲ ساله ۶۵ چاه مطالعاتی برای تهیه نقشه افت آب زیرزمینی استفاده کردند. سپس، ناحیه‌ای که افت شدید آب داشت، انتخاب و گمانه‌های زمین‌شناسی چاه‌های مطالعاتی این محدوده برای شناسایی بافت رسوب را مورد مطالعه قرار دادند و نقشه حساسیت رسوبات به ایجاد پدیده فرونشست را برای دشت کرمانشاه تهیه نمودند.

این مقاله نیز با هدف پایش و تعیین میزان فرونشست دهستان کناره و تعیین میزان رابطه بین افت تراز آب زیرزمینی و فرونشست تدوین شده است. بررسی میزان فرونشست دهستان کناره به لحاظ این که آثار تاریخی همچون تخت جمشید در آن واقع است، حائز اهمیت است. تا کنون در این دهستان میزان فرونشست سطح زمین از طریق روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری انجام نشده است. همچنین، این مطالعه به بررسی و ارزیابی افت سطح آب زیرزمینی و محاسبه استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی این دشت می‌پردازد و در نهایت، ارتباط بین افت تراز سطح آب زیرزمینی و فرونشست دهستان کناره مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش، متکی بر روش آزمایشگاهی-پیمایشی است. در مرحله اول، روش‌های آزمایشگاهی به منظور پردازش داده‌ها و تصاویر انجام گرفت. سپس، در مرحله بعد مبتنی بر یافته‌های مرحله آزمایشگاهی،

اغلب بر اساس مشاهدات محلی و از روی مقادیر بریده شده لوله‌های جدار چاه‌ها 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. سال‌های بعد با فراگیر شدن این مسئله، از روش‌های مختلفی همچون ترازبایی، GPS و تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری مانند^۱ D-InSAR برای مشاهده و پیش‌بینی میزان و دامنه پدیده نشست استفاده شد (Sharifikia, ۲۰۰۰).

روش GPS به لحاظ دقت، مورد قبول و تایید است، اما به دلایل هزینه زیاد، آسان نبودن تعیین دامنه و گسترش فرونشست توفیق‌آمیز نبوده و تنها چند مورد در دشت تهران، رفسنجان و مشهد مورد مطالعه قرار گرفته است (Motagh و همکاران، ۲۰۰۶). اندازه‌گیری میزان و دامنه پدیده فرونشست با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای روش جدیدی در این خصوص می‌باشد. تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR) تا کنون یکی از دقیق‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌ها برای پایش و نمایش جابه‌جایی‌های زمین می‌باشد. تداخل‌سنجی تفاضلی از اختلاف فاز میان دو تصویر که از یک منطقه، در دو منطقه متفاوت گرفته شده‌اند، به‌منظور برآورد تغییر شکل استفاده می‌کند (Sharifikia, ۲۰۰۰).

در ایران، مطالعه پدیده فرونشست به سبب فراگیری فضایی آن مورد توجه طیف وسیعی از محققان قرار گرفته و در سال‌های اخیر از تکنیک‌های رایج از جمله تداخل‌سنجی راداری برای تخمین میزان فرونشست و بررسی علل این پدیده استفاده شده است. این تکنیک در تحلیل پدیده نشست زمین به‌واسطه این‌که متکی بر تصاویر چند زمانه است، موثر و ارزشمند می‌باشد (Ferretti و همکاران، ۲۰۱۵).

داده‌های ماهواره‌ای راداری TerraSAR-X و COSMO-Sky Med دارای حد تفکیک مکانی و فرکانس تصویربرداری بالا می‌باشند. لذا، میزان فرونشست زمین را می‌توانند با دقت بالایی نشان دهند. با استفاده از این تصاویر، می‌توان چندین

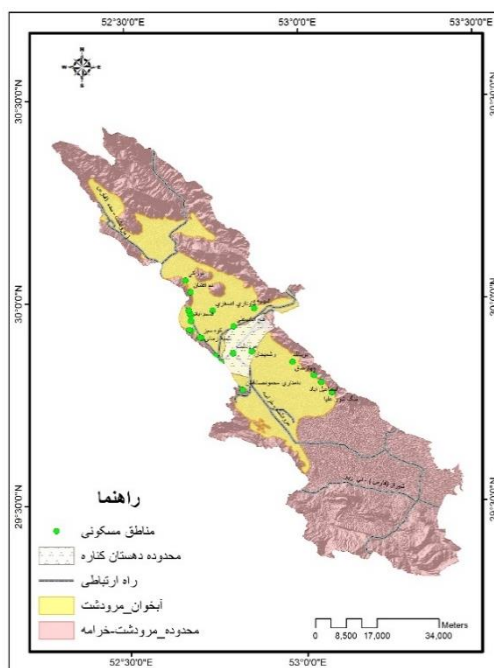
¹ Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar

² Intertfrogam

حوضه آبخیز دو رودخانه اصلی کر و سیوند و رودخانه فرعی دائمی مائین می‌باشد. با وجود ظرفیت بالقوه منابع آب و شرایط آب و هوایی معتدل تا گرم باعث شده که این حوضه به‌عنوان یکی از مناطق مهم کشاورزی در استان فارس و در نیمه جنوبی کشور مورد توجه قرارگیرد. شکل ۱، موقعیت دهستان کناره در دشت مروودشت خرامه را نشان می‌دهد. از لحاظ خاک‌شناسی این منطقه در گروه‌های Haplic Gleysols و Calcaric Cambisols قرار دارد. خاک‌های Calcaric Cambisols دارای افق A اکریک بوده و در عمق ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک آهکی می‌باشند و خاک‌های نواحی Haplic Gleysols دارای خصوصیات گلیک درون ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک می‌باشند و دارای افق کمبیک می‌باشد. بافت خاک در این نواحی لومی رسی می‌باشد و کاربری فعلی این دشت‌ها کشاورزی است.

داده‌های میدانی و ثبتی گردآوری شد. در آخرین مرحله نیز به صحت‌سنجی نتایج پردازش‌های آزمایشگاهی با استفاده از داده‌های پیمایشی و ثبتی انجام گرفت. برای انجام این تحقیق، از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری و مشاهداتی منطقه، تصاویر ماهواره‌ای COSMO-SkyMed که X باند از آژانس فضایی ایتالیا (ASI) تهیه شد و همچنین، نرم‌افزارهای ArcGIS10.4 و Envi 5.3 استفاده شد.

منطقه مورد پژوهش: آبخوان دشت مروودشت در استان فارس در بین طول‌های ۵۲° ۱۶' تا ۵۳° ۳۰' شرقی و عرض‌های ۲۸° ۵۴' تا ۳۰° ۲۶' شمالی قرار دارد. محدوده مطالعاتی جزء دشت مروودشت خرامه می‌باشد که بزرگ‌ترین محدوده مطالعاتی حوضه مهارلو دریاچه بختگان است. مساحت این حوضه ۳۹۴۱ کیلومتر مربع، مساحت دشت حدود ۲۴۵۲،۴۹ کیلومتر مربع و مساحت ارتفاعات آن ۱۴۸۸،۵۱ کیلومتر مربع می‌باشد. این محدوده مطالعاتی شامل



شکل ۱- موقعیت دهستان کناره در دشت مروودشت-خرامه

مشاهده‌ای و سنتی، کاری سخت و زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. امروزه به منظور تخمین متغیرهای مکانی یک منطقه از روش‌های زمین‌آمار استفاده می‌شود (Akbari, ۲۰۱۰).

به منظور شناخت و ارزیابی آثار برداشت بی‌رویه از

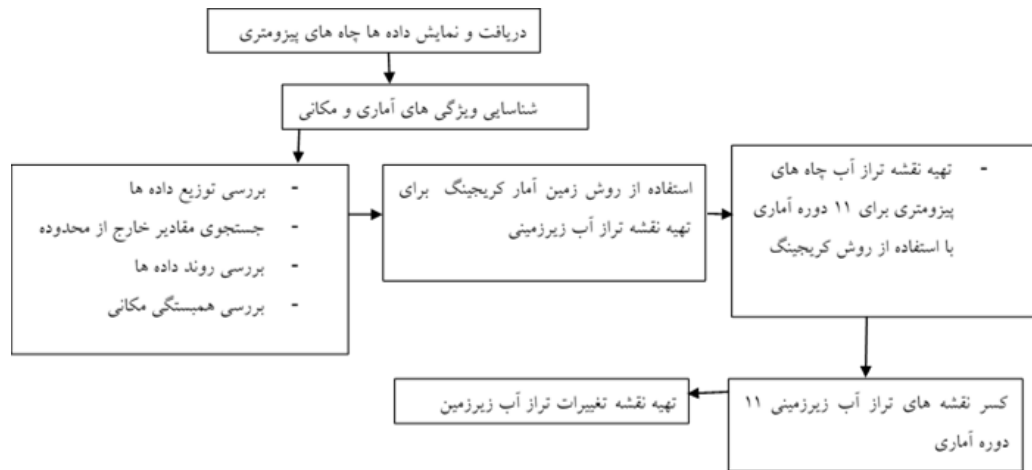
مطالعات هیدروژئولوژی: در مطالعات مربوط به علل فرورنشست سطح زمین، بررسی نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. شناسایی به موقع و تهیه نقشه تغییرات تراز سطح آب‌های زیرزمینی و شناسایی عامل آن به‌وسیله روش‌های

$$\hat{Z}(s_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

که در آن، $Z(s_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در محل i ، λ_i وزن ناشناخته برای مقدار اندازه‌گیری شده در محل i ، s_o محل پیش‌بینی و N تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده است.

روش کریجینگ را می‌توان گسترده‌ترین روش درون‌یابی دانست که بر پایه مدل‌ها و روابط آماری پایه‌ریزی شده است. لایه رستری تولید شده از این روش، سطحی دقیق را نمایش می‌دهد. روش کریجینگ بر خلاف روش معکوس فاصله که یک روش درون‌یابی محلی است، روش جهانی است؛ به این معنا که در این روش تمام مشاهدات منطقه مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سفره آب زیرزمینی دشت مرودشت اطلاعات سطح آب زیرزمینی ۷۰ چاه مشاهده‌ای در محدوده مطالعاتی طی سال‌های ۸۳ تا ۹۴ برای تهیه نقشه سطح آب زیرزمینی آبخوان مرودشت خرامه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. سپس، برای مطالعه تغییرات کمی آب زیرزمینی، اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی و متوسط سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای دشت وارد نرم‌افزار ArcGIS شده و با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ (رابطه ۱)، نقشه تراز سطح آب‌های زیرزمینی در ۱۱ سال مختلف رسم و با کسر از یکدیگر نقشه میزان افت سطح آب زیرزمینی دشت برای این دوره ۱۱ ساله تهیه شد (شکل ۲).



شکل ۲- فلوجارت تهیه نقشه افت تراز آب زیرزمینی

بایستی به خط زمانی تصاویر نیز دقت شود. این موضوع به کاهش عدم همبستگی و افزایش هم‌دوسی^۱ (نقشه یا تصویری که پیکسل‌های آن نمایانگر درجه همبستگی بین دو سیگنال دریافتی برای دو تصویر می‌باشد) فاز بین دو تصویر بر می‌گردد (Liu و همکاران، ۲۰۱۳).

در تداخل‌سنجی راداری، فاز تصاویر اخذشده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود. از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر جدیدی حاصل می‌شود که تداخل‌سنج نام دارد. این دو تصویر ممکن

تداخل‌سنجی تفاضلی راداری: روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) را اولین بار Goldstein و Werner (۱۹۹۸) ارائه کردند. این روش قادر است که با استفاده از حداقل سه (دو تصویر و یک نقشه DEM) یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت میلی‌متری آشکار کند. در عین حال، این دقت تابع طول موج داده مورد استفاده و معادل نصف آن خواهد بود.

برای انجام روش تداخل‌سنجی تفاضلی، ابتدا مقادیر خط مبنای مکانی بایستی بررسی شود، لازم به ذکر است که علاوه بر خط مبنای مکانی مناسب

¹ Coherence map

به منظور انجام گام به گام این روش، ابتدا دو تصویر به دقت نسبت به هم ثبت هندسی و هردو تصویر با یکدیگر هم مرجع شد. سپس، فاز مصنوعی ایجاد گشت. بدین ترتیب، تداخل‌نگار مسطح شده‌ای حاصل می‌شود. هر فرنج^۱ یک چرخه کامل از آبی (صفر رادیان) تا قرمز (2π رادیان) را نشان می‌دهد و بیانگر سیکل اختلاف فاز است. مقدار هر فرنج برابر با نصف طول موج تصویر راداری مورد استفاده است. مقدار جابه‌جایی در جهت دید ماهواره با شمردن تعداد فرنج‌ها ضرب در $\frac{\lambda}{2}$ به دست می‌آید. جابه‌جایی به دست آمده در جهت دید ماهواره می‌باشد و این جابه‌جایی را باید به جابه‌جایی قائم و افقی تبدیل کرد (روابط ۵ و ۶).

$$U_h = \frac{u}{\sin i} \quad (5)$$

$$U_v = \frac{u}{\cos i} \quad (6)$$

که در آن‌ها، i زاویه دید ماهواره نسبت به قائم می‌باشد و این زاویه از روی سرآیند^۲ تصاویر به دست می‌آید.

خطاهای مداری نیز با برازش یک رویه به مناطقی که فاقد جابه‌جایی هستند، مدلسازی و از اینترفروگرام مورد نظر کم شد. سپس، برای کاهش نویزهای فاز، اینترفروگرام تفاضلی از فیلتر Goldstein و Werner (۱۹۹۸) استفاده شد، این عمل به طور معناداری باعث بهبود کیفیت فرینج‌های تداخل‌نگار می‌شود (رابطه ۷).

$$H(f_x, f_y) = S \{ |Z(f_x, f_y)| \}^\alpha \cdot Z(f_x, f_y) \quad (7)$$

که در آن، f_x و f_y به ترتیب فرکانس‌های فضایی را در range و azimuth نشان می‌دهند، α پارامتر فیلتر است، $Z(f_x, f_y)$ طیف فوریه هر پنجره فیلتر را نشان می‌دهد و $S\{\cdot\}$ اپراتور صاف است که معمولاً به وسیله یک فیلتر پایین‌گذر انجام می‌شود. میزان پارامتر α بین بازده صفر تا یک است. اثر فیلتر با افزایش α افزایش خواهد یافت (Song و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، نوفه‌هایی که به دلیل عدم همبستگی ناشی از پارامترهای مربوط به خط مبنا ایجاد شده است، را حذف می‌نماید.

است، به وسیله یک سکوی هوایی یا فضایی که دارای دو آنتن با فاصله معین اخذ شده باشد (تداخل‌سنجی با عبور منفرد) و یا دو تصویر با فواصل زمانی مختلف از یک سکوی مشابه گرفته شوند (روش تداخل‌سنجی با عبور مکرر).

تداخل‌نگار ایجاد شده قابلیت نمایش تغییرات ارتفاعی و ناهمواری‌ها را دارد. دقت تغییرات مقادیر ارتفاعی (dz) از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$dz = (\lambda P \sin \theta) / 2Bn \quad (2)$$

همان‌طور که رابطه (۲) نشان می‌دهد، تغییرات مقادیر ارتفاعی تابعی از طول خط مبنا Bn ، طول موج یا باند مورد استفاده (λ)، زاویه برخورد (θ) و طول بردار مایل ارتفاع ماهواره تا زمین (P) است.

فاز نهایی ایجاد شده در تداخل‌سنجی که شامل ترم‌های اضافی می‌باشد، به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$\theta_{int} = \omega \{ \theta_{def} + \theta_{atm} + \theta_{orb} + \theta_{\theta} + \theta_N \} \quad (3)$$

که در آن، θ_{def} فاز ناشی از حرکت پیکسل در جهت مسیر دید ماهواره، θ_{atm} اختلاف در تأخیر فاز اتمسفری بین دو تصویر، θ_{orb} فاز باقی‌مانده ناشی از خطای مداری، θ_{θ} فاز باقی‌مانده ناشی از خطای زاویه دید و θ_N فاز نویز ناشی از تنوع در پراکنش‌گرها و نویز حرارتی می‌باشند.

عامل W نشان‌دهنده این است که فاز دریافتی، مقداری بین π و $-\pi$ دارد. از آن‌جا که ماهواره تعداد سیکل‌های صحیح امواج را ثبت نمی‌کند، یکی از مهمترین و در عین حال مشکل‌ترین مراحل در تداخل‌سنجی راداری برآورد تعداد سیکل‌های صحیح است که به این عمل، بازیابی فاز می‌گویند.

میزان فاز ناشی از جابه‌جایی به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$\theta_{def} = -\frac{4\pi}{\lambda} D_{def} \quad (4)$$

که در آن، θ_{def} جابه‌جایی دو نقطه از سطح زمین نسبت به حالت اولیه و در جهت دید ماهواره می‌باشد.

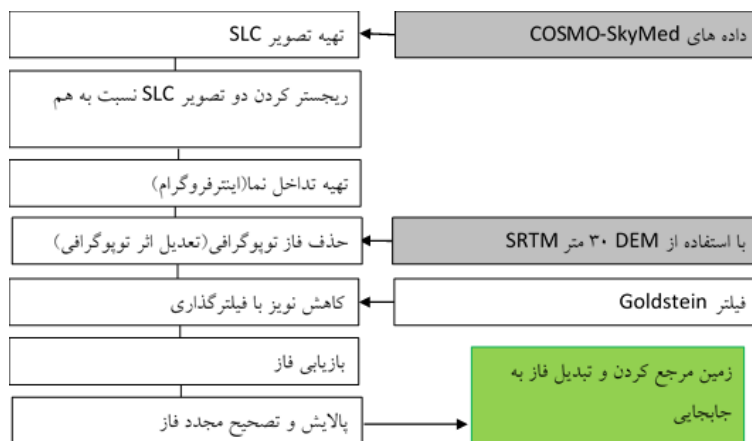
تکنیک مورد استفاده در این پژوهش، روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با گشودگی ترکیبی دو عبوره مکرر (Two Pass DInSAR) است. در روش دو عبوره تنها از دو تصویر برای محاسبه دگرشکلی استفاده و مدل ارتفاعی رقومی برای حذف مؤلفه توپوگرافی وارد پردازش می‌شود.

¹ Fringe

² Header

روش Minimum Cost Flow (MCF) استفاده شد. سپس، به وسیله مدل ارتفاعی رقومی زمین مرجع شد و در نهایت، جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره را در دو راستای بالارو و پایین به‌دست آمد (شکل ۳).

فاز تفاضلی دارای ابهام اندازه‌گیری در تعیین جابه‌جایی سطح زمین به‌نام پیچش است. از آن‌جا که تغییرات فاز به‌صورت مضربی از 2π اندازه‌گیری می‌شود، لذا لازم است، این فاز برای مقادیر بزرگ‌تر از 2π بازبایی شود و برای بازبایی فاز (Unwrap) از

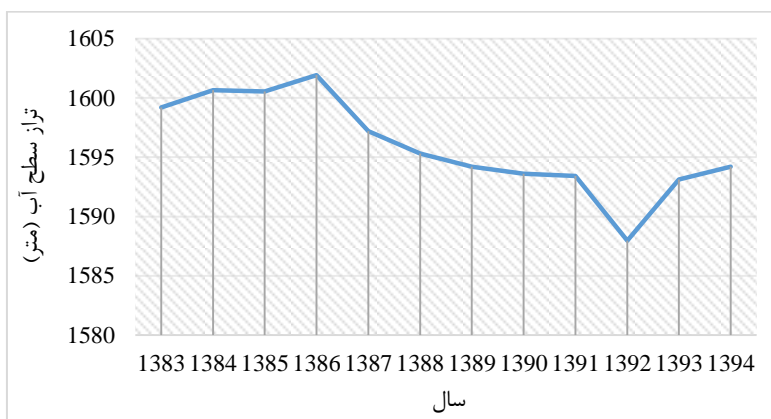


شکل ۳- فلوچارت تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی

هیدروگراف تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۴ رسم شد (شکل ۴).

نتایج و بحث

در این تحقیق، با روش کریجینگ، میزان افت سطح آب زیرزمینی در دهستان کناره بررسی شد. به منظور تولید نقشه افت سطح آب زیرزمینی



شکل ۴- هیدروگراف تغییرات زمانی تراز آب چاه‌های مشاهداتی سال ۸۳ تا ۹۳ آبخوان مرودشت-خرامه

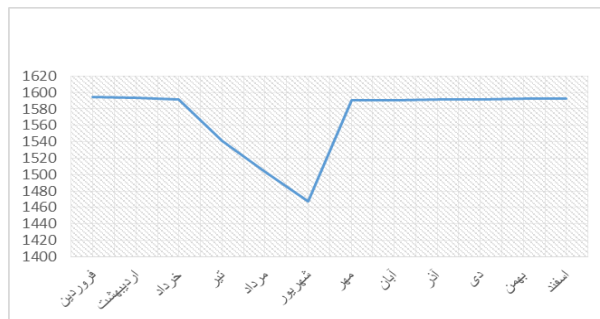
۱۳۹۲ است.

با توجه به هیدروگراف تغییرات زمانی تراز آب که بیشترین کاهش تراز سطح آب را در سال ۱۳۹۲ نشان می‌دهد، به بررسی جداگانه تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در این سال پرداخته شد. به همین منظور، هیدروگراف تراز سطح آب زیرزمینی این سال به تفکیک ماه‌ها رسم شد (شکل ۵).

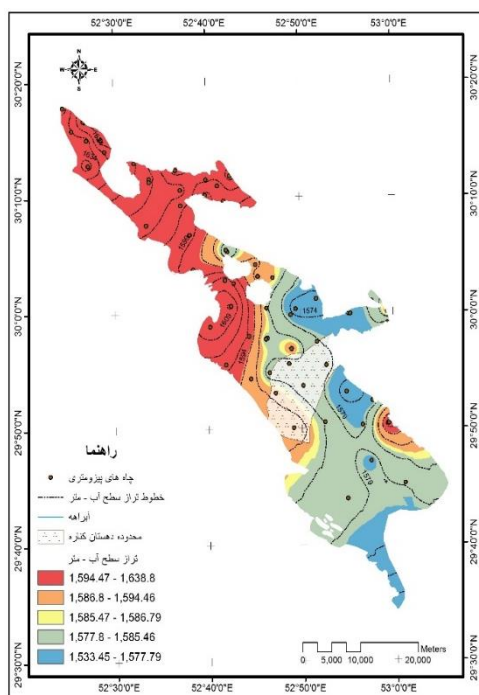
با توجه به هیدروگراف واحد تراز سطح آب زیرزمینی دشت دارای روند نزولی می‌باشد. متوسط تراز سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۳ برابر با ۱۵۹۹ متر است که با پنج متر افت به ۱۵۹۴ متر در سال ۱۳۹۳ رسیده است. بنابراین، افت متوسط سالانه تراز آب ۴۵ سانتی‌متر است. بر اساس این هیدروگراف بیشترین افت سطح آب زیرزمینی مربوط به سال

شده و شکل ۸، تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت مرودشت خرامه در یک دوره ۱۱ ساله به‌دست آمد.

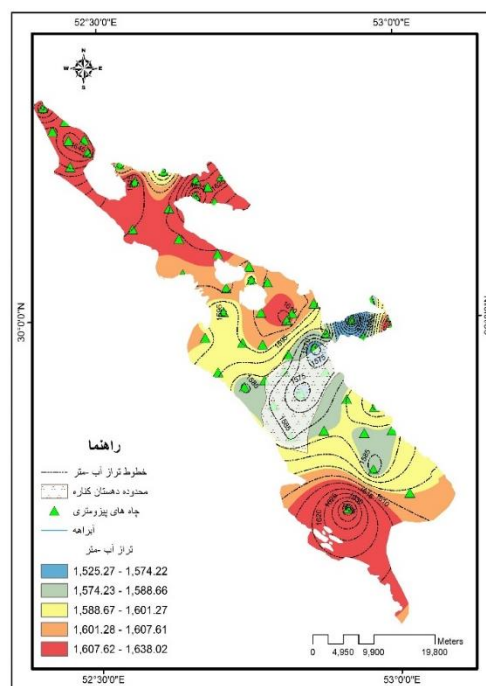
شکل ۶، تراز آب زیرزمینی را در سال ۱۳۸۳ و شکل ۷، تراز آب زیرزمینی را در سال ۱۳۹۴ نشان می‌دهد. سپس، در محیط نرم‌افزاری ArcGIS10.4 نقشه‌های تراز آب زیرزمینی ۱۱ دوره به‌دست آمده از هم کم



شکل ۵- هیدروگراف تغییرات زمانی تراز آب چاه‌های مشاهداتی سال ۹۲ آبخوان مرودشت-خرامه



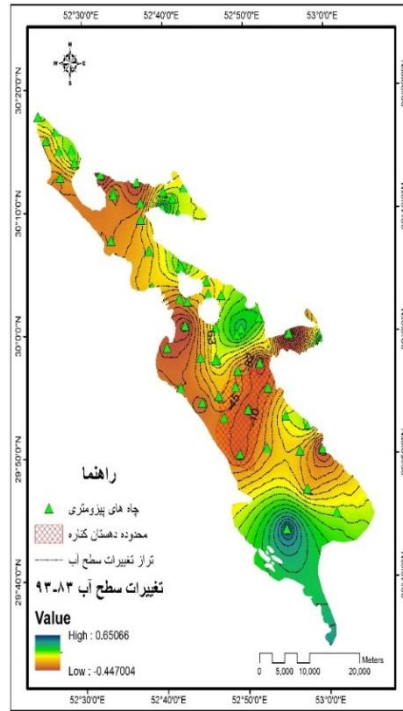
شکل ۷- تراز سطح آب سال ۱۳۹۴



شکل ۶- تراز سطح آب سال ۱۳۸۳

شد (جدول ۱ و شکل ۱۰). برای بهبود کیفیت فرینچ‌ها از فیلتر Goldstein و Werner (۱۹۹۸) استفاده شد (شکل ۱۱). در نهایت، نقشه جابه‌جایی منطقه به‌دست آمد. یافته‌ها موید رخداد فرونشست به میزان حداکثر ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد. همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، حدود یک درصد مساحت دهستان کناره فرونشست یک تا ۲/۵ سانتی‌متر و حدود ۱۴ درصد حوضه دارای فرونشست کمتر از یک سانتی‌متر در این دوره زمانی می‌باشند (شکل ۱۲).

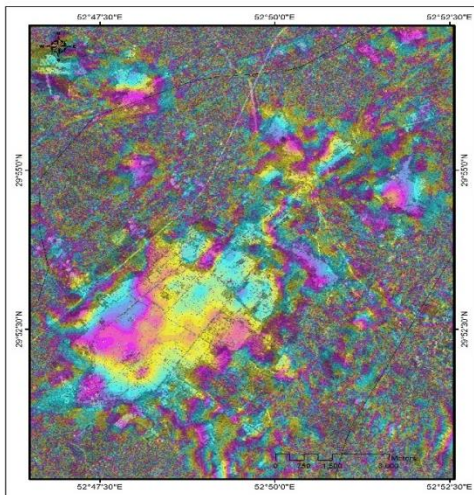
برای بررسی میزان و دامنه فرونشست در دهستان کناره از روش تداخل‌سنجی تفاضلی داده‌های راداری استفاده شد. تصاویر در دوره‌های زمانی منطبق بر تقویم زراعی و فصل‌های بارانی مورد پردازش قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از بررسی خط مبنای زمانی و مکانی در تصاویر COSMO-SkyMed از بین ۱۱ زوج تداخل‌نگار تشکیل شده، تصویر ۲۰۱۳/۱۰/۰۱ به‌عنوان تصویر اصلی (Master) و تصویر ۲۰۱۴/۰۲/۱۰ به‌عنوان تصویر فرعی (slave) انتخاب



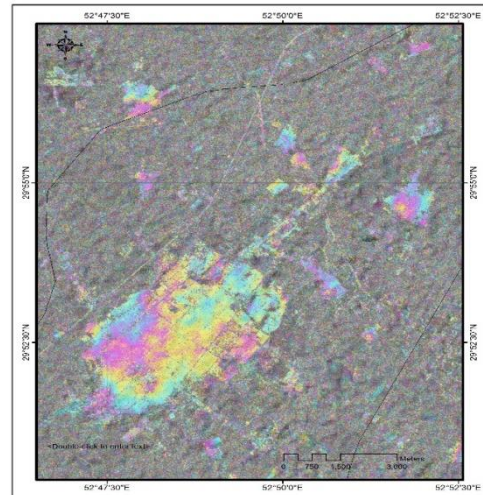
شکل ۸- تغییرات تراز آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۴

جدول ۱- نتایج حاصل از خط مبنای مکانی و زمانی نسبت به تصویر ۲۰۱۳/۱۰/۰۱

Data	Spatial Baseline	Temporal Baseline	Doppler Diff	I Ambiguity
۲۰۱۳/۱۰/۰۵	۲۷	۴	-۶۱۰/۵	۲۱۹/۲۳
۲۰۱۳/۱۰/۱۷	۷۷/۰۶	۱۶	-۵۶/۷	۷۸/۵۵
۲۰۱۳/۱۰/۲۱	-۳۸۵/۸۶	۲۰	۶۹۳/۵	۱۵/۶۸
۲۰۱۳/۱۱/۰۶	۵۵۰/۸	۳۶	-۷۵۱/۵	۱۰/۹۹
۲۰۱۳/۱۱/۳۰	-۷۳۰/۶	۶۰	-۶۸۰/۳	۸/۲۸
۲۰۱۳/۱۲/۰۸	-۳۶۹/۲۳	۶۸	-۶۲۶/۵	۱۶/۳۹
۲۰۱۳/۱۲/۱۶	۸۵۷/۷۷	۷۶	-۵۷۰/۵	۷/۰۹
۲۰۱۳/۱۲/۲۰	۵۴۸/۹۶	۸۰	-۸۲/۱۴	۱۱/۰۲
۲۰۱۳/۱۲/۲۴	۴۲۷/۰۱	۸۴	-۶۵۳/۶	۱۴/۱۷
۲۰۱۴/۰۲/۱۰	-۱۲۱/۷۳	۱۳۲	-۷۵۰/۳	۴۹/۷۳



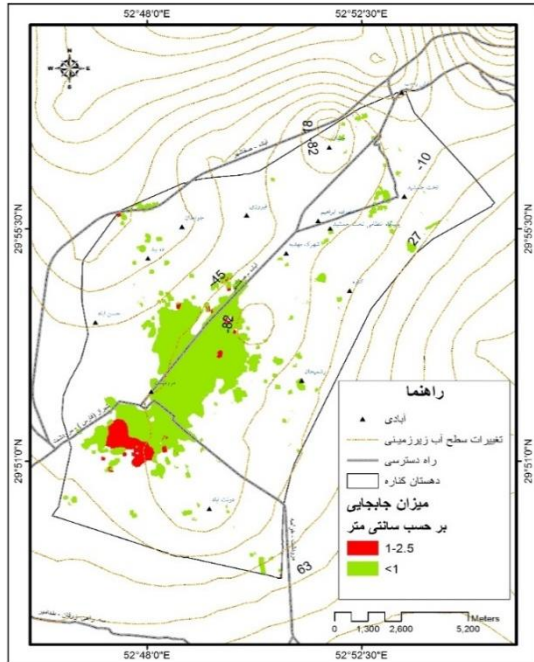
شکل ۱۱- اعمال فیلتر Goldstein و Werner (۱۹۹۸)



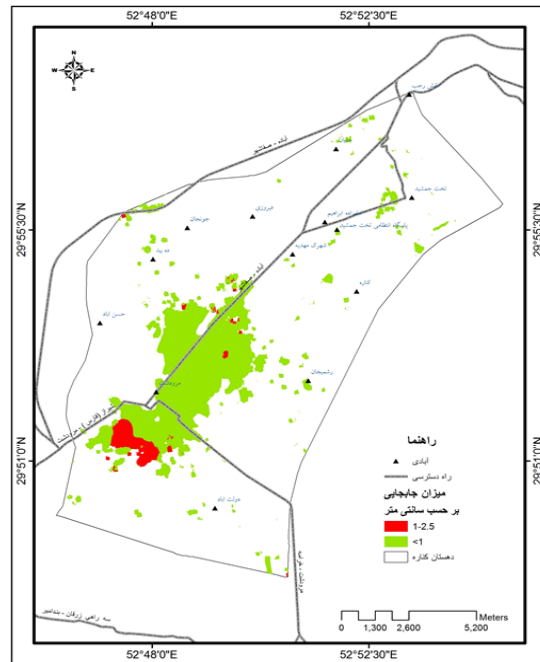
شکل ۱۰- تداخل‌نگار تشکیل شده

جدول ۲- مساحت و درصد میزان سطح فرورنشست در دهستان کناره

میزان فرورنشست (cm)	مساحت (ha)	درصد
۱-۲/۵	۲۰۳/۷	۱/۱۲
کمتر از ۱	۲۶۶۷/۱	۱۴/۷



شکل ۱۳- نقشه میزان جابه‌جایی و افت تراز آب در دهستان کناره



شکل ۱۲- نقشه میزان جابه‌جایی

استان فارس و همچنین، مستند به بررسی‌های Yamani و همکاران (۱۹۹۹) و Mirae و همکاران (۲۰۱۲) بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی می‌باشد. کانون حداکثری نشست منطبق بر بخش جنوبی دشت است (شکل ۸) و نواحی مرکزی دشت و مناطق نزدیک به آثار تاریخی در این بازه زمانی نشست کمتر از یک سانتی‌متر را نشان می‌دهند. در نهایت، یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد، در این دشت به ازای هر ۴۵ سانتی‌متر افت سطح آب زیرزمینی، فرورنشستی به میزان یک سانتی‌متر پدید خواهد آمد.

با توجه به این‌که در آبخوان مرودشت و نزدیکی آن ایستگاه GPS وجود ندارد، برای تایید نتایج به‌دست آمده از شواهد صحرایی در منطقه استفاده شد. بالا ماندن جداره فلزی میله چاه‌های عمیق، ارتفاع یافتن میله‌های چاه‌های اکتشافی و نیز شکاف‌های عمودی و افقی در دیوار ساختمان‌ها و باعث تخریب برخی از اراضی کشاورزی و کانال‌های آبیاری شده، همچنین، باعث تغییر شیب زمین در

هیدروگراف واحد و تغییرات به‌وجود آمده در حجم ذخیره آبی آبخوان همراه با شواهد به‌دست آمده با استناد به این داده‌های آماری که با استفاده از نرم‌افزار اکسل تجزیه و تحلیل شده‌اند و نیز مشاهدات میدانی نشان می‌دهند که تراز سطح آب زیرزمینی در طی دوره مورد مطالعه به میزان ۴۵ سانتی‌متر سالانه افت داشته است. این رقم تا حد قابل اطمینانی با میزان فرورنشست به‌دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری همبستگی دارد. به‌عبارتی، سالانه در ازای هر ۴۵ سانتی‌متر پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی به‌طور متوسط یک سانتی‌متر سطح اراضی دهستان کناره دچار فرورنشست تدریجی می‌شود.

نتیجه‌گیری

روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در این تحقیق، دارای قابلیت مناسبی برای تعیین میزان و دامنه فرورنشست در محدوده دشت مرودشت-خرامه می‌باشد. عامل فرورنشست در این دشت مانند سایر دشت‌های

ضمن فراهم آوردن امکان پایش نرخ و دامنه نشست، امکان خوبی برای بررسی نتایج حاصل از روش‌های سنجش از دوری و بهینه نمودن این روش‌ها را فراهم نماید. نتایج این تحقیق بدون داشتن اطلاعات دقیق و مکفی از لایه‌بندی و دانه‌بندی آن‌ها و همچنین، شبکه سنجش GPS و تنها بر اساس تحلیل تصاویر رادار و متد تداخل‌سنجی انجام شده و نتایج دارای مطابقت مناسبی با تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشد.

برخی نواحی شده است که به‌طور مستقیم نشان‌دهنده نشست سطح این دشت می‌باشد. با توجه به موقعیت مکانی شهر مرودشت و آثار تاریخی که در آبخوان مرودشت واقع شده است و نقشه نشست به‌دست آمده، مشخص می‌شود که این مناطق در معرض نشست قرار دارند. با توجه به تداوم شرایط پدیده نشست در این دشت، تداوم پایش و بررسی سنجش از دوری، احداث و ایجاد ایستگاه‌های اندازه‌گیری ثابت (GPS) می‌تواند

منابع مورد استفاده

1. Abbasnejad, A., and A.R. Shahidasht. 2013. Vulnerability of Sirjan Plain due to aquifer over abstraction. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 3(7): 23-43 (in Persian).
2. Akbari, M., M.R. Jarge and H. Madani Sadat. 2010. Assessment of decreasing of groundwater-table using Geographic Information System (GIS), case study: Mashhad Plain Aquifer. *Water and Soil Conservation*, 16(4): 16-29 (in Persian).
3. Bracegirdle, A., R. Mair and N. Hand Talor. 1993. Subsurface settlement profiles above tunnels in clay. *Géotechnique*, 43(2): 315-320.
4. Ferretti, A., D. Colombo, A. Fumagalli and F. Novali. 2015. InSAR data for monitoring land subsidence: time to think big. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372: 331-334.
5. Galloway, D., D.R. Jones and S.E. Ingebritsen. 1999. Land subsidence in the United States. U.S. Geological Survey Circular, 177 pages.
6. Goldstein, R.M. and C.L. Werner. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25: 4035-4038.
7. Lashkaripour, G.R., M. Ghafoori and H.R. Rostami Barani. 2009. An investigation on the mechanism of earth-fissures and land subsidence in the western part of Kashmar Plain. *Sedimentary Facies*, 1(1): 25-39 (in Persian).
8. Liu, P., Z. Li, T. Hoey, C. Kincal, J. Zhang, Q. Zeng and J.P. Muller. 2013. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 253-264.
9. Miraeae, S., H. Rahnema, M. Binesh and M. Eliasi. 2012. Geotechnical study of land subsidence due to groundwater abstraction and uncontrolled development. 1st National Conference on Civil Engineering, Zibakenar, Iran (in Persian).
10. Mirshahi, F., M.J. Valadanzoe, M. Dehghani and M. Hashemi. 2013. Measurement of ground subsidence using radar interferometry technique using TerraSAR-X image. 20th Geomatics Conference, Tabriz (in Persian).
11. Motagh, M., Y. Djamour, T. Walter, Z. Moosavi, S. Arabi and J. Zschau. 2006 Mapping the spatial and temporal pattern of land subsidence in the city of Toos, northeast Iran, using the integration of InSAR, continuous GPS and precise levelling. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 07881.
12. National Coal Board. 1975. Subsidence engineer's handbook. National Coal Board Mining Department London, 111 pages.
13. Rezaee, P. and A. Maleki. Forecast locations at risk of subsidence plain Kermanshah. 2016. *Journal of Spatial Planning*, 20(1): 20-36 (in Persian).
14. Rokni, J., R. Hossinzadeh, G.R. Lashkaripour and S.A. Velayati. 2016. Survey of land subsidence, perspective and geomorphology developments in the denser plains, case study: Neyshabour Plain. *Arid Regions Geographic Studies*, 6(24): 21-38 (in Persian).
15. Salehi, R., M. Ghafoori, G.R. Lashkaripour and M. Dehghani. 2013. Evaluation of land subsidence in southern Mahyar Plain using radar interferometry. *Irrigation and Water Engineering*, 3(11): 11-29 (in Persian).
16. Sharifikia, M. 2000. Determining the extent and amplitude of land subsidence using radar interferometry (D-InSAR) method in Nogh-Bahrman Plain. *The Journal of Spatial Planning*, 16(3): 26-43 (in Persian).
17. Song, R., H. Guo, G. Liu, Z. Perski, H. Yue, C. Han and J. Fan. 2015. Improved Goldstein SAR

- interferogram filter based on adaptive-neighborhood technique. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12: 140–144.
18. Waltham, A.C. 1989. *Ground subsidence*. Blackie, 202 pages.
19. Yamani, M., E. Najafi and M.H. Abedini. 1999. Relationship between land subsidence and groundwater level drop in Qarabolagh Plain of Fars Province. *Joghrafia Journal*. 1: 19-36 (in Persian).