



سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۷
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.10, No.3, Autumn 2018

۳۳-۵۲

مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن

نعیمه احمدی^۱، زهرا موسوی^{۲*}، زهره معصومی^۳

۱. دانشجوی کارشناس ارشد ژئودزی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه زنجان
۲. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
۳. عضو پژوهشکده تغییر اقلیم و گرمایش زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۶/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۸/۱۲

چکیده

در این تحقیق، به منظور بررسی رخداد پدیده فرونشست زمین (تعیین نرخ، محدوده و تغییرات زمانی آن) در دشت خرمدره، از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد. به همین منظور، تصاویر ماهواره ENVISAT اخذ شده در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۵ ابتدا پردازش شده و سپس میدان جابجایی در منطقه با روش آنالیز سری زمانی، بر اساس پراکنش گرهای پایدار محاسبه شد. میدان جابجایی، بیانگر بیشینه تغییر شکل برابر با ۳۵ میلی متر بر سال، در راستای دور شدن از ماهواره را نشان می دهد. برای بررسی نرخ فرونشست در سال های اخیر نیز، تصاویر Sentinel S1 اخذ شده در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۱۴ پردازش و میدان جابجایی در منطقه، با روش آنالیز سری زمانی خط مبنای کوتاه تعیین شد. نتایج حاصله، بیانگر بیشینه نرخ سرعت ۴۹ میلی متر بر سال در راستای خط دید ماهواره در دشت خرمدره است. با فرض عدم وجود تغییر شکل مسطحاتی، بیشینه فرونشست رخ داده ۴۱ میلی متر بر سال، در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ و ۶۹ میلی متر بر سال در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۱۴ است. نتایج حاصل از پروفیل تراز یابی دقیق عبوری از دشت خرمدره نیز، بیانگر بیست سانتی متر بر سال در طی دو اپک مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۰۵ است. همچنین ایستگاه GPS ثابت خرمدره نیز، نشانگر افزایش نرخ فرونشست از ۱۶ میلی متر بر سال در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۰۶ به ۳۶ میلی متر بر سال در بازه زمانی ۲۰۱۳-۲۰۰۹ و افزایش آن به ۵۱ میلی متر بر سال، در بازه زمانی ۲۰۱۳-۲۰۱۷ است. نتایج حاصل از داده های ژئودتیک (تداخل سنجی راداری، GPS و تراز یابی دقیق)، بیانگر افزایش نرخ فرونشست در این دشت است. در ادامه، نتایج به دست آمده از فرونشست با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، با لایه های کاربری اراضی و نیز چاه های منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این بخش، نشان دهنده بالابودن تراکم کاربری اراضی کشاورزی و نیز چاه های بهره برداری در منطقه است. همچنین با استفاده از تحلیل های مکانی، مخاطرات احتمالی فرونشست در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این بخش نیز، بیانگر تأثیر پذیری قسمتی از مسیر خطوط راه آهن، راه های اصلی و بزرگراه از فرونشست است.

کلید واژه ها: فرونشست، دشت خرمدره، تداخل سنجی راداری، سیستم اطلاعات مکانی

۱- مقدمه

نیاز با مشکل مواجه شده است (عبدی‌نژاد، ۱۳۹۰). بنابراین مطالعه پدیده فرونشست در دشت‌های استان زنجان به منظور مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی و بررسی وضعیت فرونشست و خطرات احتمالی ناشی از آن امری ضروری است.

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. از آنجائیکه پدیده فرونشست، پدیده‌ای مکانی است با استفاده از آنالیزهای مکانی و تحلیل‌ها در سیستم اطلاعات مکانی، می‌توان به بررسی عوامل ایجاد کننده فرونشست پرداخت. همچنین به منظور مدیریت و جلوگیری از خسارات ناشی از فرونشست می‌توان با مطالعه رابطه مکانی، میان فرونشست و تأسیسات زیربنایی و نقاط حساس، تصمیم‌گیرندگان را در مدیریت بحران فرونشست یاری نمود.

در دو دهه اخیر، تکنیک تداخل سنجی راداری به عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه پدیده‌هایی که سبب تغییر شکل سطح زمین می‌شود، به صورت قابل ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (جنت و همکاران، ۱۳۸۸؛ حقیقت مهر و همکاران، ۱۳۸۹؛ شریفی کیا، ۱۳۹۱؛ معتق و همکاران، ۱۳۹۱؛ Motagh et al., 2007, 2017؛ Osmanoglu et al., 2011؛ Qu et al., 2014). شهر مکزیکوسیتی در کشور مکزیک، یکی از مناطقی است که به دلیل برداشت بی‌رویه آب و لایه‌های ضخیم رسوبات در معرض یکی از بالاترین نرخ‌های فرونشست در دنیا است. فرونشست مربوط به شهر مکزیکوسیتی با استفاده از تصاویر ماهواره ENVISAT، بین سالهای ۲۰۰۴-۲۰۰۶ به روش پراکنشگرهای پایدار، به میزان ۳۰۰ میلی‌متر در سال محاسبه شده است (Osmanoglu et al., 2011). نرخ و محدوده رخداد

فرونشست، پایین رفتن سطح زمین در جهت قائم با بردار جابجایی افقی اندک است. این پدیده، تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند استخراج نفت، گاز، آب‌های زیرزمینی، استخراج معادن و مسایل تکتونیکی رخ می‌دهد (جنت و همکاران، ۱۳۸۸)؛ (حقیقت مهر و همکاران، ۱۳۸۹)؛ (شریفی کیا، ۱۳۹۱). فرونشست در هر منطقه، تحت تأثیر یک یا چند عامل از عوامل مذکور است. استخراج آب‌های زیرزمینی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، یکی از مهم‌ترین دلایل فرونشست زمین است که می‌تواند خسارت‌های قابل توجهی به تأسیسات زیربنایی، نقاط حساس و خطوط انتقال نیرو وارد کند (مرتضوی و همکاران ۱۳۸۹).

آب‌های زیرزمینی، یکی از منابع اصلی تأمین آب مورد-نیاز در ایران به عنوان یک کشور با اقلیم خشک و نیمه خشک است. استان زنجان با بارش متوسط ۳۳۰ میلی‌متر در سال، در زمره مناطق نیمه‌خشک ایران به شمار می‌رود. همچنین بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵، متوسط نرخ رشد جمعیت سالانه در استان زنجان برابر با ۰/۸۱ درصد بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). بنابراین با توجه به افزایش جمعیت و همچنین بالا بودن جمعیت روستایی شاغل در بخش کشاورزی، برداشت آب‌های زیرزمینی شش برابر افزایش یافته است، به طوریکه طبق آمارهای در دسترس، میزان پمپاژ سالانه در برخی حوضه‌های آبریز، از ۴۹ میلیون مترمکعب در سال‌های ۱۳۰۰ تا ۱۳۶۰ به ۳۲۰ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۹۰ رسیده است (شرکت آب منطقه‌ای استان زنجان، ۱۳۹۶). افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی موجب افت سطح آب‌های زیرزمینی شده است (عینلو، ۱۳۹۵). از سوی دیگر برخی از آبخوان‌های استان زنجان به عنوان آبخوان ممنوعه اعلام شده و تأمین آب مورد

فرونشست در دشت Xi'an چین نیز، با استفاده از تصاویر تداخل‌سنجی راداری بررسی شد (Qu et al., 2014). به همین منظور، ۶۲ تصویر از ماهواره‌های ALOS، TerrSAR-X و ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۱۲ پردازش شده و میدان سرعت متوسط منطقه مورد نظر در راستای خط دید ماهواره بدست آمد (Qu et al., 2014). نتایج این تحقیق، بیانگر نرخ متوسط ۵۰ میلی‌متر بر سال فرونشست، در طی سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۲ است و آنالیز سری زمانی این تصاویر، نشان‌دهنده افزایش ۲۰۰ درصدی نرخ فرونشست از بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۰۷ به بازه زمانی ۲۰۰۸-۲۰۱۰ است (Qu et al., 2014). در ایران نیز، فرونشست بسیاری از دشت‌ها با استفاده از تداخل‌سنجی راداری بررسی شده است که در اینجا به مطالعات مربوط به دشت‌های مشهد و رفسنجان اشاره می‌کنیم (Motagh et al., 2007, 2017). تصاویر ماهواره ENVISAT از سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ برای بررسی نرخ فرونشست، پردازش و تداخل‌سنجی‌های حاصله، نشانگر رخداد فرونشست در منطقه است. نتایج این تحقیق، بیانگر محدوده بیضی شکل با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در دشت مشهد با بیشینه نرخ ۲۸ الی ۳۰ سانتیمتر در سال است (Motagh et al., 2007). هم‌چنین نرخ و محدوده فرونشست در دشت رفسنجان با پردازش تصاویر از ماهواره‌های ALOS، ENVISAT و Sentinel S1 در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ محاسبه شده است (Motagh et al., 2017). میدان سرعت متوسط در راستای خط دید ماهواره، حاصل از آنالیز سری زمانی، خط مبنای کوتاه تداخل‌سنجی‌های تولیدشده برای این دشت، نشان‌دهنده ۵ سانتی‌متر بر سال نرخ فرونشست به طور متوسط و بیشینه ۳۰ سانتی‌متر در سال برای برخی مناطق است

فرونشست در کشور چین، فرونشست در اکثر شهرهای صنعتی محاسبه شده است. برای نمونه می‌توان به شهر شانگهای اشاره کرد. فرونشست در این شهر با استفاده از تصاویر ماهواره ALOS PALSAR و به روش طول باز کوتاه، ۲۶۳ متر اندازه‌گیری شده است (Ruilin, 2006). حقیقت‌مهر و همکاران با استفاده از روش تجمیع، فرونشست دشت هشتگرد را حدود ۳۵ میلی‌متر در ماه محاسبه کردند (حقیقت‌مهر و همکاران، ۱۳۸۹). در سال ۱۳۹۱، معتق و همکاران با استفاده از تصاویر ماهواره ENVISAT و با روش طول باز کوتاه، فرونشست دشت مهیار جنوبی اصفهان را ۸/۶ سانتیمتر در سال محاسبه کردند (معتق و همکاران، ۱۳۹۱). در این تحقیق، به منظور تعیین محدوده و نرخ فرونشست دشت خرمدره در استان زنجان، از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. در این مقاله، سعی بر این است تا اولین نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری دشت خرمدره به صورت نقشه فرونشست ارائه شود. از آنجایی‌که در برخی از مناطق دارای فرونشست، تغییرات زمانی سرعت نیز مطرح است، علاوه بر تعیین نرخ و محدوده فرونشست به بررسی تغییرات نرخ فرونشست در طول زمان نیز پرداخته شده است. به همین منظور تصاویر ماهواره ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۵ و تصاویر ماهواره Sentinel S1، در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۷ پردازش شده است. در بسیاری از پژوهش‌های مربوط به فرونشست، به دلیل عدم وجود داده‌های ژئودتیک در منطقه مورد مطالعه، امکان اعتبارسنجی مهیا نیست. در این تحقیق، به دلیل قرار گرفتن ایستگاه GPS ثابت در خرمدره و عبور پروفیل ترازیبی دقیق، مقایسه نتایج حاصل از این داده‌ها و بررسی تغییرات زمانی نرخ فرونشست امکان‌پذیر است. از طرف دیگر، تحلیل‌های مکانی ارائه شده در این مقاله

سنجش از دور و GIS ایران
سال دهم ■ شماره سوم ■ پاییز ۱۳۹۷

سری زمانی جابجایی در زمان‌های تصویربرداری وجود دارد: روش خط مبنا کوتاه (Small Baseline Subset) و روش پراکنش کننده دائمی (Persistent Scatterer).

۲-۱-۱- آنالیز سری زمانی به روش خط مبنا کوتاه (SBAS)

در روش آنالیز سری زمانی به روش خط مبنا کوتاه، از زوج تصاویری استفاده می‌شود که مولفه قائم خط مبنا مکانی و خط مبنا زمانی از مقدار بحرانی کمتر باشد. سپس با اعمال روش کمترین مربعات بر روی شبکه تداخل سنج‌های تشکیل شده، مقدار جابجایی هر پیکسل محاسبه می‌شود. برای ارزیابی فاز در طول زمان، ابتدا تعداد $N+1$ تصویر برداشت شده از یک منطقه را در بازه زمانی $\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ در نظر می‌گیریم. با فرض اینکه هر تصویر، حداقل با یک تصویر دیگر در ارتباط باشد، می‌توان تعداد تداخل سنج‌های ممکن (M) را به صورت زیر تعیین کرد (Berardino et al., 2002):

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq N \left(\frac{N+1}{2} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

فاز تفاضلی برای هر پیکسل همدوس با مختصات (x, r) در تداخل سنج λ متشکل از دو تصویر راداری در زمان‌های a و b با صرف نظر کردن از چشمه‌های ناهم‌بستگی بصورت مشخص می‌شود (Berardino et al., 2002):

$$\begin{aligned} \delta\varphi_j^{diff}(x, r) &= \varphi(t_b, x, r) - \varphi(t_a, x, r) \\ \delta\varphi_j^{disp}(x, r) &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_b, x, r) - d(t_a, x, r)] \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در بررسی ارتباط فرونشست، منابع آبی و بررسی خطر-پذیری زیرساخت‌های موجود می‌تواند به مسئولان در تصمیم‌گیری‌های آتی، کمک شایانی کند.

۲- مواد و روشها

۲-۱- تکنیک تداخل سنجی راداری

از اوایل دهه ۱۹۹۰، تداخل سنجی راداری به عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه پدیده‌هایی که سبب تغییر سطح زمین می‌شوند معرفی شده است (Massonnet et al., 1998). پوشش مکانی مناسب و قدرت تفکیک بالای تصاویر راداری، این تکنیک را در بین روش‌های موجود برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی مطرح کرده است (Ferretti et al., 2001). اساس کار این روش، استفاده از اطلاعات فاز امواج راداری بازتابی از عوارض سطح زمین است، به نحوی که تغییرات ایجاد شده در سطح زمین باعث اختلاف فاز در دو تصویر رادار اخذ شده در دو زمان مختلف از یک منطقه می‌شود (Massonnet et al., 1998). با استفاده از اختلاف فاز بدست آمده تداخل سنج‌ها ایجاد می‌شوند که شامل مؤلفه‌های ناشی از توپوگرافی، اثر کرویت زمین، تغییر شکل سطح زمین و خطاهای موجود هستند (Hanssen et al., 2001; Massonnet et al., 1998).

$$\Delta\varphi_{int} = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{def} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه‌ی بالا φ_{flat} مولفه فاز زمین مسطح، φ_{topo} سهم فاز توپوگرافی و φ_{def} اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل زمین است. پس از تولید تداخل سنج‌های تفاضلی، نیاز به روشی برای مطالعه تغییر شکل زمین در طول زمان است. در حال حاضر، دو روش کلی برای تحلیل

1. Interferogram

توسط تداخل‌سنجی راداری مطرح می‌شود. همبستگی سیگنال‌های رادار وابسته به توزیع پراکنش‌کننده‌هایی است که در داخل یک پیکسل قرار گرفته‌اند. در این روش، باید پیکسل‌هایی از تصویر شناسایی شود که در مدت زمان اخذ داده‌ها، هم‌دوس باقی بمانند. این نقاط را پراکنش‌کننده‌های پایدار (Persistent Scatter) می‌نامند. فریتی و همکاران در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ از شاخص پراکنندگی دامنه، برای انتخاب نقاط کاندید استفاده کردند (Ferretti et al., 2000).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن μ_A و σ_A به ترتیب انحراف معیار استاندارد و میانگین مقادیر دامنه در یک پنجره هستند. در این روش، یک مدل تقریبی از تغییرات زمانی دگرشکل سطح زمانی، در منطقه مورد مطالعه مورد نیاز است تا مولفه مربوط به دگرشکلی از سایر مولفه‌های تداخل‌سنجی (مانند توپوگرافی، اتمسفر و غیره) قابل تفکیک باشد. بنابراین هوپر، در سال ۲۰۰۶ روش جدیدی، برای پراکنش‌کننده‌های پایدار به نام StaMPS با امکان انتخاب پراکنش‌کننده‌های پایدار، بدون نیاز به مدل اولیه جابجایی، معرفی کرد (Hooper 2006). در این روش پس از تولید تداخل‌سنج‌ها، فاز بازیابی نشده، φ_{int} ، پیکسل α م در تداخل‌سنج α ام را می‌توان به صورت زیر نوشت (Hooper 2006):

$$\begin{aligned} \varphi_{int,x,i} = & \varphi_{def,x,i} + \quad \text{رابطه (۶)} \\ & \Delta\varphi_{\varepsilon,x,i} + \varphi_{atmo,x,i} + \\ & \Delta\varphi_{orb,x,i} + \varphi_{n,x,i} \end{aligned}$$

که در آن φ_{def} تغییرات فاز بدلیل جابجایی پیکسل در راستای خط دید ماهواره، $\Delta\varphi_{\varepsilon}$ باقیمانده فاز توپوگرافی به دلیل خطاهای موجود در مدل ارتفاعی رقومی مورد استفاده، φ_{atmo} فاز متناسب با تغییرات اتمسفری بین

که در آن λ طول موج رادار، $\varphi(t_a, x, r)$ فاز پیکسل در زمان a و $\varphi(t_b, x, r)$ فاز پیکسل در زمان b ، $d(t_a, x, r)$ و $d(t_b, x, r)$ جابجایی‌های سطحی انباشتی در راستای خط دید ماهواره (LOS) به ترتیب در دو زمان t_a و t_b هستند. با فرض اینکه جابجایی در زمان اولین تصویر برابر با صفر باشد ($d(t_0, x, r) = 0$)، سری زمانی جابجایی برای زمان‌های $i = 1, \dots, N$ برای پیکسل (x, r) برابر با $d(t_i, x, r)$ است که مولفه فاز آن مساوی با $\varphi(t_i, r, x) \approx \frac{4\pi d(t_i, r, x)}{\lambda}$ خواهد بود. مقادیر فاز مجهول در یک بردار N مولفه‌ای (N تعداد تصاویر) را به صورت $\varphi = [\varphi(t_1), \dots, \varphi(t_N)]^T$ و مقادیر فاز اندازه‌گیری شده در یک بردار M مولفه‌ای (M تعداد تداخل‌سنج) را به صورت $\delta\varphi = [\delta\varphi(t_1), \dots, \delta\varphi(t_M)]^T$ می‌توان نوشت. رابطه زیر سیستم ماتریسی M معادله N مجهولی که مقادیر فاز اندازه‌گیری شده را به مقادیر فاز در طول زمان مرتبط می‌کند.

$$A\varphi = \delta\varphi \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه A ماتریس ضرایب، φ بردار مجهولات (تغییرات فاز در زمان) و $\delta\varphi$ بردار معلومات (مقادیر فاز اندازه‌گیری شده در هر تداخل‌سنج) را نشان می‌دهد. از معکوس‌سازی این رابطه، به روش کمترین مربعات، می‌توان سری زمانی فاز و در نهایت نرخ جابجایی را برای هر پیکسل محاسبه کرد.

۲-۱-۲- آنالیز سری زمانی به روش پراکنش-کننده‌های پایدار (PS)

در تداخل‌سنجی تفاضلی، عدم هم‌بستگی زمانی و مکانی به عنوان محدودیتی برای پایش تغییر شکل

که در رابطه بالا $K_{\varepsilon,x}$ ثابت تناسب است. با جایگذاری رابطه ۹ در رابطه ۸ خواهیم داشت:

رابطه (۱۰)

$$\varphi_{int,x,i} - \bar{\varphi}_{int,x,i} = B_{\perp,x,i} K_{\varepsilon,x} + \varphi_{n,x,i} - \bar{\varphi}'_{n,x,i}$$

از آنجایی که ترم اول سمت راست رابطه ۱۰، تنها ترم متناسب با خط مبنا است، می توان ضریب ثابت $K_{\varepsilon,x}$ برای پیکسل x را با استفاده از تمام تداخل سنج های تشکیل شده، به روش کمترین مربعات محاسبه کرد. کمیت γ_x بر پایه کوهرنس زمانی، برای پیکسل x را به صورت زیر تعریف می کنیم (Hooper 2006):

رابطه (۱۱)

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp\{j(\varphi_{int,x,i} - \bar{\varphi}_{int,x,i} - \Delta\hat{\varphi}_{\varepsilon,x,i})\}$$

که N تعداد تداخل سنج های تولید شده و $\Delta\hat{\varphi}_{\varepsilon,x,i}$ برآورد محاسبه شده برای $\Delta\varphi_{\varepsilon,x,i}$ است. با فرض کوچک بودن مقدار $\bar{\varphi}_{int,x,i}$ ، γ_x بیانگر پایداری فاز پیکسل x ام بوده و می تواند معیاری برای شناسایی و انتخاب پیکسل های PS باشد. بنابراین پارامتر γ_x بیانگر پایداری فاز در پیکسل x است و به عنوان معیاری برای انتخاب پیکسل های PS استفاده شود. به عبارت دیگر پیکسل های با مقدار بزرگتر γ_x احتمال PS شدن بیشتری دارند. از آنجایی که این روش آنالیز سری زمانی، بدون اطلاعات در مورد کاندیدهای PS شروع می شود، طی یک روند تکراری پیکسل های با γ_x بیشتر شناسایی می شود. در انتخاب کاندیدهای PS از شاخص پراکندگی دامنه استفاده می شود. در این مرحله PS های نهایی با استفاده از میزان استحکام فاز حاصل از آنالیز فاز انتخاب شده و رفتار این پیکسل ها در طول زمان به صورت سری

دو گذر ماهواره، $\Delta\varphi_{orb}$ باقیمانده خطای مداری و φ_n مولفه نویز ناشی از نویز گرمایی و خطا در ثبت هندسی است، پیکسل هایی به عنوان PS انتخاب می شوند که مولفه نویز به قدری کوچک باشد که سیگنال اصلی را نپوشاند (Hooper 2006).

در رابطه ۶ فرض می شود که ترم های مربوط به φ_{def} ، φ_{atmo} و $\Delta\varphi_{orb}$ به صورت مکانی در مقیاس طولی L همبسته باشند و ترم های $\Delta\varphi_{\varepsilon}$ و φ_n در همان مقیاس طولی دارای ناهمبستگی و میانگین صفر باشند. اگر موقعیت PS قبلا مشخص باشد، متوسط فاز نقاط قرار گرفته داخل دایره به مرکزیت پیکسل x ام و به شعاع L برابر است با:

$$\bar{\varphi}_{int,x,i} = \bar{\varphi}_{def,x,i} + \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\bar{\varphi}_{atmo,x,i} + \Delta\bar{\varphi}_{orb,x,i} +$$

$$\bar{\varphi}_{n,x,i}$$

که در این رابطه علامت بار، بیانگر متوسط مقادیر داخل دایره و $\bar{\varphi}_n$ میانگین $\varphi_n + \Delta\varphi_{\varepsilon}$ است که فرض می شود مقدار کوچکی باشد. تفاضل رابطه ۶ از رابطه ۷ برابر است:

$$\varphi_{int,x,i} - \bar{\varphi}_{int,x,i} = \Delta\varphi_{\varepsilon,x,i} + \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\varphi_{n,x,i} - \bar{\varphi}'_{n,x,i}$$

که در این رابطه $\bar{\varphi}'_n$ مجموع $\bar{\varphi}_n$ به اضافه اختلاف مقادیر میانگین داخل دایره و مقادیر هر پیکسل x برای سه مولفه φ_{def} ، φ_{atm} و φ_{orb} خطای وارده از مدل ارتفاعی رقومی با خط مبنای عمودی B_{\perp} متناسب است و به صورت زیر می توان نوشت:

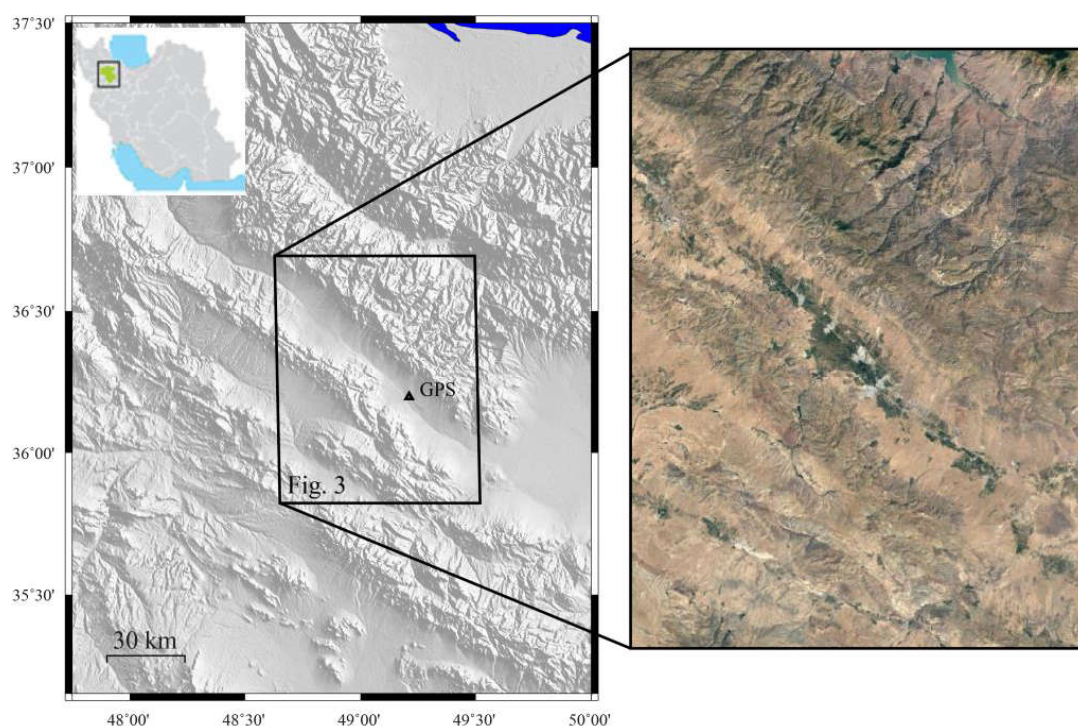
$$\Delta\varphi_{\varepsilon,x,i} = B_{\perp,x,i} K_{\varepsilon,x} \quad \text{رابطه (۹)}$$

زمانی بررسی می‌شود (Hooper 2006).

۲-۲- داده‌ها و روش تحقیق

شهرستان خرمدره در قسمت جنوبی استان زنجان و در میان دشت آبرفتی نسبتاً مسطح و وسیعی قرار گرفته که ارتفاع آن از سطح دریا، ۱۵۷۵ متر است. این دشت، از لحاظ ساختاری در البرز غربی واقع شده و از روند کلی زون ساختاری البرز-آذربایجان تبعیت می‌کند. گسترده-ترین واحدهای منطقه متعلق به نهشته‌های آبرفتی کواترنری و ولکانی انوسن است. کهن‌ترین واحدهای سنگی منطقه سازندهای کهر، بایندر، سلطانیه و توده‌ی نفوذی گرانیت دوران و جدیدترین آنها پادگانه‌های آبرفتی و نهشته‌های رودخانه‌ای کواترنری است. شهرستان خرمدره از نظر وسعت، کوچکترین شهرستان

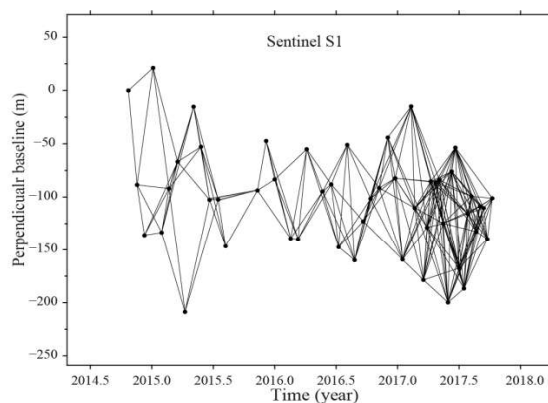
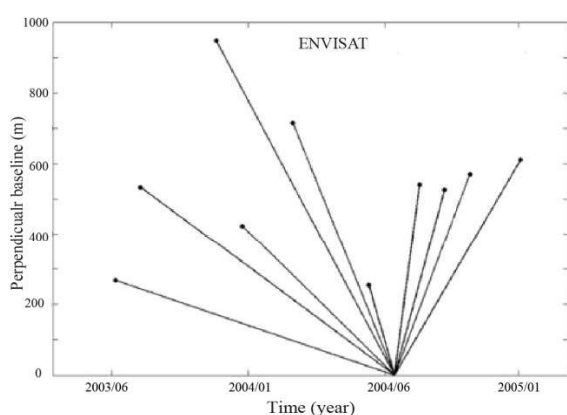
استان زنجان و به لحاظ تراکم نسبی جمعیت در سطح استان، رتبه اول را داراست. در سال‌های اخیر، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی این دشت، رشد چشمگیری داشته که بیشترین برداشت از این منابع در بخش کشاورزی صورت گرفته است (شرکت آب منطقه‌ای استان زنجان، ۱۳۹۶). بر اساس آخرین آماربرداری در سال ۱۳۸۲، چاه‌های بهره‌برداری شده منطقه مورد مطالعه، ۶۶۲ چاه فعال است که عمدتاً برای مصارف کشاورزی و شرب استفاده می‌شود و سالانه حدود ۲۴۷/۷ میلیون متر مکعب از منابع آب زیرزمینی توسط این چاه‌ها مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. با توجه به داده‌های در دسترس از چاه‌های اکتشافی، میزان افت هیدروگراف واحد دشت، بین سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۰ در حدود ۱۰ متر است (جلیلی، ۱۳۹۲).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه قرار گرفته بر روی مدل ارتفاعی رقومی

تداخل سنج‌های تولید شده از فیلتر گلدستاین استفاده شد (Goldstein & Werner 1998). پس از تصحیح تداخل سنج‌ها، برای تعیین میدان جابجایی منطقه از آنالیز سری زمانی از روش StaMPS استفاده شد. به همین منظور ۱۱ تصویر سنجنده فوق، برای تشکیل ۱۰ تداخل سنج نسبت به یک تصویر اصلی بکار رفته است. شکل ۲، نشانگر خط مبنای مکانی تصاویر اخذ شده در طول زمان است. در روش StaMPS از روش تحلیل دامنه و فاز برای شناسایی پیکسل‌های PS استفاده شد. به همین منظور، آستانه استفاده شده برای شاخص پراکندگی دامنه، ۰/۴ انتخاب شد (Hooper 2006). این آستانه به صورتی تعیین می‌شود که احتمال انتخاب PS‌های واقعی را افزایش داده و احتمال انتخاب پیکسل‌های با فاز تصادفی کاهش یابد.

به منظور مطالعه و بررسی فرونشست منطقه خرمدره (شکل ۱)، از داده‌های راداری مسیر پایین‌گذر (شماره‌ی ۴۶۴) سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT در باند C از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ استفاده شده است. طول موج این سنجنده، ۵/۶ سانتی‌متر و زاویه فرود سیگنال، ۲۳/۵ درجه نسبت به امتداد قائم است. برای پردازش این تصاویر از نرم‌افزار کد باز StaMPS/MTI تحت سیستم عامل لینوکس استفاده شد. پس از تشکیل تداخل سنج‌ها، مولفه فاز متناسب با توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر حذف شد (Farr & Kobrick 2000). اثر کرویت زمین نیز با استفاده از اطلاعات مداری شامل موقعیت دقیق مداری ماهواره ERS1/2 و ENVISAT تصحیح شد. به منظور کاهش نویز و افزایش نسبت سیگنال به نویز در



شکل ۲. خط مبنای مکانی و زمانی تصاویر مورد استفاده. محور افقی خط مبنای زمانی و محور قائم خط مبنای قائم را نشان می‌دهد. هر نقطه نشان دهنده یک تصویر و هر خط نمایانگر یک تداخل سنج است.

شده است. شکل ۲، خط مبنای مکانی شبکه تداخل سنج‌ها را در طول زمان نشان می‌دهد. اثر کرویت زمین با استفاده از پارامترهای مداری دقیق و فاز ناشی از توپوگرافی زمین با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر تصحیح شد (Farr & Kobrick 2000). در این مطالعه برای محاسبه

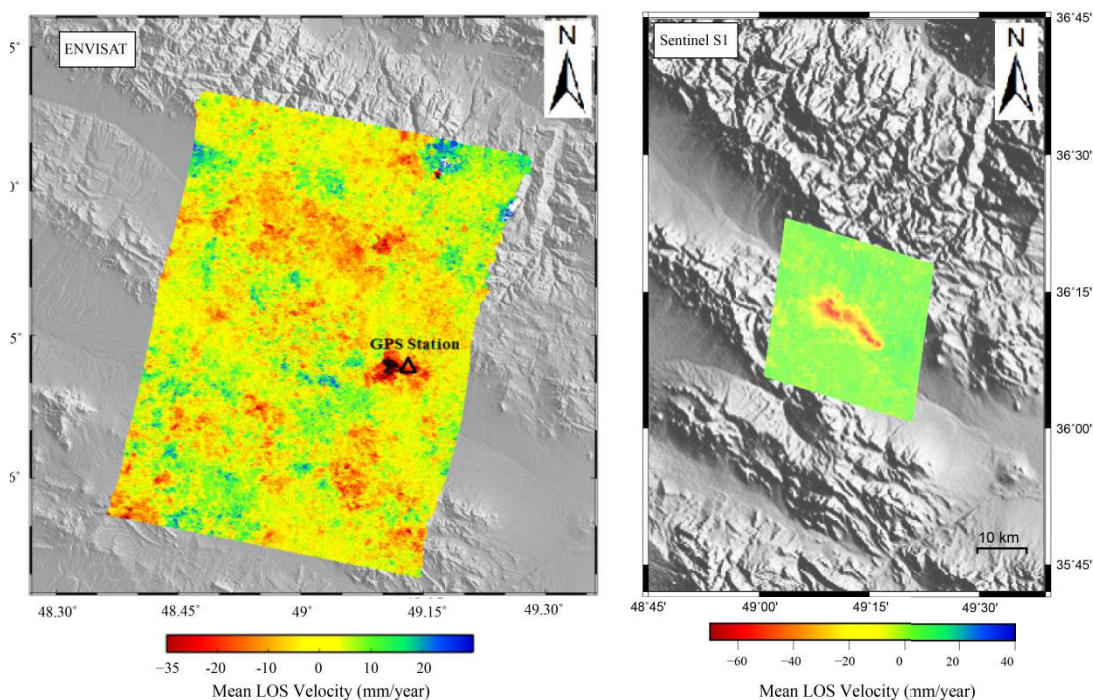
برای محاسبه میدان جابجایی دشت خرمدره در سال‌های، تصاویر Sentinel S1 اخذ شده از ۲۵ اکتبر ۲۰۱۴ تا ۹ اکتبر ۲۰۱۷ پردازش شد. در این مطالعه از نرم‌افزار GMTSAR (Sandwell et al., 2011) برای تولید ۲۳۶ تداخل سنج با مؤلفه قائم، خط مبنای کمتر از ۱۲۰ متر و خط مبنای زمانی کمتر از ۱۳۰ روز استفاده

با توجه به این نقشه، بیشینه نرخ متوسط تغییر شکل در منطقه مورد مطالعه ۳۵ میلی‌متر بر سال، در راستای دور شدن از ماهواره در جهت خط دید ماهواره است. همچنین برای محاسبه میدان جابجایی منطقه در سالهای اخیر، تصاویر ماهواره Sentinel S1 به مدت ۳ سال (از اکتبر ۲۰۱۴ تا اکتبر ۲۰۱۷) پردازش و میدان جابجایی دشت خرمدره با روش آنالیز سری زمانی به روش خط مبنای کوتاه محاسبه شد (شکل ۳). نقشه حاصله، نشان‌دهنده ادامه روند تغییر شکل در دشت خرمدره با بیشینه نرخ متوسط ۴۹ میلی‌متر بر سال، در راستای دور شدن از ماهواره در جهت خط دید ماهواره است.

میدان متوسط سرعت و آنالیز سری زمانی از روش آنالیز سری زمانی به روش خط مبنای کوتاه (Berardino et al., 2002) استفاده شده است.

۳- نتایج

در این تحقیق تصاویر ماهواره ENVISAT اخذ شده از سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵، با استفاده از بسته نرم افزاری StaMPS پردازش و براساس پراکنشگرهای پایدار، آنالیز سری زمانی انجام شد. نقشه نهایی نرخ متوسط فرونشست بدست آمده از این روش، در شکل ۳، نشان داده شده است. مقادیر منفی در این شکل، نشان‌دهنده جابه‌جایی در راستای دور شدن از ماهواره است. بنابراین



شکل ۳. نقشه نرخ متوسط فرونشست سالانه دشت خرمدره، قرار گرفته بر روی مدل ارتفاعی رقومی و ایستگاه GPS موجود در منطقه. مقادیر منفی بیانگر جابجایی در راستای دور شدن از ماهواره است.

(Samsonov & d'Oreye 2012):

$$V_{los} = V_V \cos \theta - V_H \sin \theta \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

نرخ متوسط بدست آمده حاصل از ماهواره ENVISAT و Sentinel S1 در راستای خط دید ماهواره است که با استفاده از رابطه زیر می‌توان به راستای قائم تصویر کرد

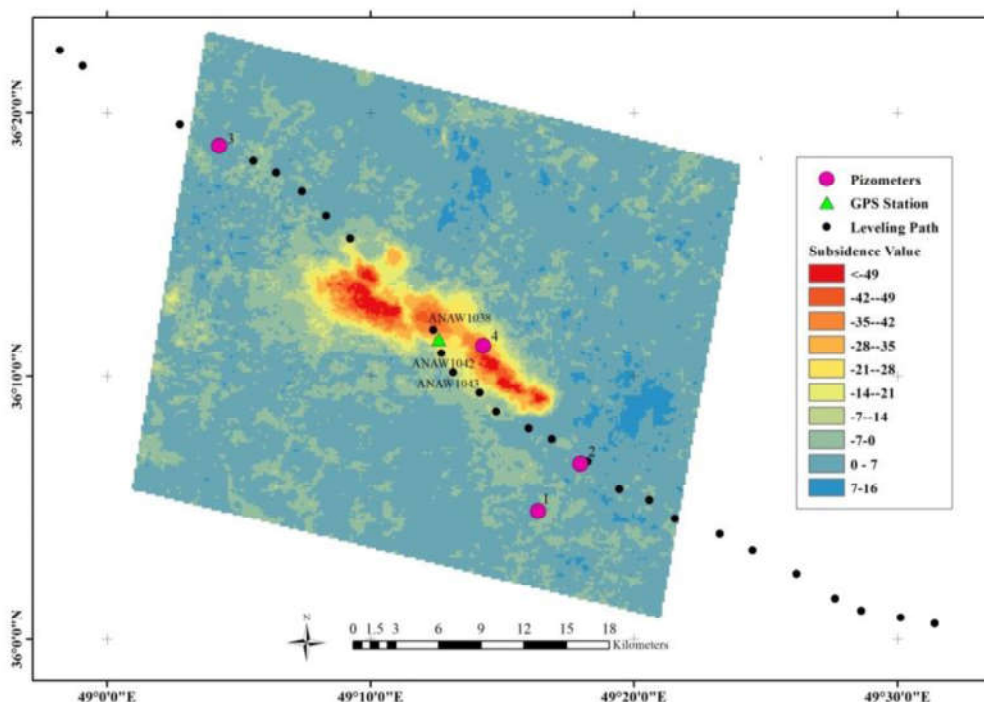
داده‌های ژئودتیک (GPS و ترازیبی دقیق) استفاده شده است. شکل ۴، نشان‌دهنده میدان جابجایی حاصل از پردازش تصاویر Sentinel S1 (از سالهای ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷)، موقعیت ایستگاه GPS ثابت سازمان نقشه‌برداری کشور و پروفیل ترازیبی دقیق سازمان نقشه‌برداری کشور است. همچنین جدول ۱، بیانگر میزان اختلاف ارتفاع نقاط واقع در منطقه فرونشست در دو اپیک مشاهداتی ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ است. همانطور که جدول ۱ و شکل ۴ نشان می‌دهند، در منطقه‌ای که فرونشست برای دشت خرمدره توسط تکنیک InSAR به دست آمده، نتایج حاصل از ترازیبی دقیق نیز مابین دو اپیک مشاهداتی ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ نیز بیانگر فرونشستی در حدود ۲۰ سانتیمتر بر ۲۰ سال است.

در این رابطه θ زاویه فرود (زاویه دید ماهواره با جهت عمود بر سطح زمین) و V_H و V_V به ترتیب سرعت در راستای افقی و ارتفاعی است. از آنجاکه جابجایی حاصل از فعالیت تکتونیکی در راستای مسطحاتی در این دشت اندک بوده (Djamour et al., 2010) می‌توان فرض کرد که تغییرشکل بدست آمده در راستای مسطحاتی، قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین با استفاده از رابطه ۱۲، مقدار بیشینه تغییرات ارتفاعی در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ به مقدار ۴۱ میلی‌متر بر سال و در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ به مقدار ۶۰ میلی‌متر بر سال می‌رسد.

۴- بحث و بررسی

۴-۱- صحت سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی نتایج حاصله برای تغییر شکل، از



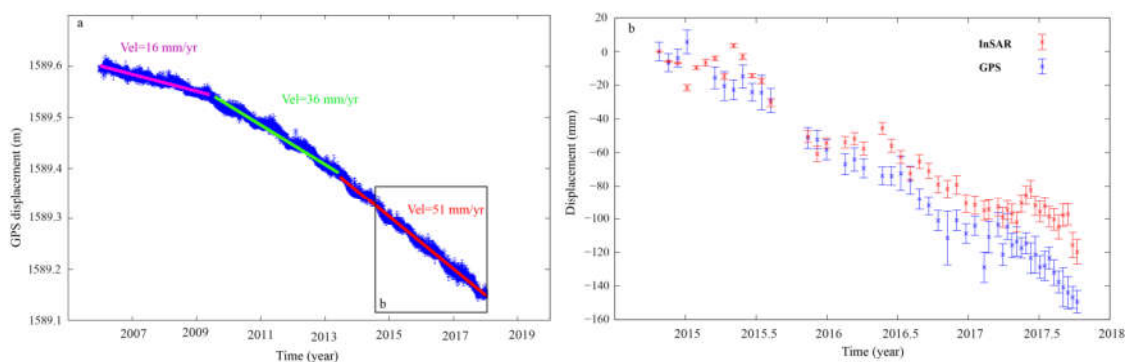
شکل ۴. نقشه جابجایی به دست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری حاصل از پردازش تصاویر Sentinel S1، موقعیت پیزومترهای بررسی شده، پروفیل ترازیبی دقیق سازمان نقشه‌برداری کشور در دو اپیک ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ و موقعیت ایستگاه دائم GPS سازمان نقشه‌برداری کشور

طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ است. نرخ فرونشست از ۱۶ میلی‌متر بر سال در طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ به ۳۶ میلی‌متر بر سال در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ و در نهایت به ۵۱ میلی‌متر بر سال در طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ افزایش داشته است. از آنجائیکه ایستگاه GPS خرمدره از سال ۲۰۰۶ شروع به کار کرده است، مقایسه سری زمانی مولفه ارتفاعی موقعیت این ایستگاه با نتایج حاصل از پردازش تصاویر ENVISAT امکان‌پذیر نبود. بنابراین سری زمانی مولفه ارتفاعی این ایستگاه ثابت، با سری زمانی نتایج حاصل از پردازش تصاویر Sentinel S1 از اکتبر ۲۰۱۴ تا اکتبر ۲۰۱۷ در شکل ۵-ب ترسیم شده است. در شکل ۵-ب، مولفه ارتفاعی سری زمانی ایستگاه GPS با توجه به رابطه ۱۱، به جابجایی در راستای خط دید ماهواره تبدیل شده است که تطابق خوبی با میزان فرونشست حاصل از پردازش تصاویر Sentinel S1 دارد.

جدول ۱. مقدار اختلاف ارتفاع ایستگاه‌های داخل محدوده فرونشست در دو اپک مشاهداتی ترازیبی دقیق

شماره ایستگاه	مقدار اختلاف ارتفاع در سالهای ۱۹۸۵ و ۲۰۰۵ بر حسب متر
ANAW 1038	0.28801
ANAW 1042	0.16423
ANAW 1043	0.27775

شکل ۵-الف، نشان‌دهنده سری زمانی مولفه ارتفاعی ایستگاه GPS ثابت خرمدره از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ است. محور افقی، نشان‌دهنده زمان و محور عمودی، نشان‌دهنده تغییرات ارتفاعی ایستگاه است. این ایستگاه جابجایی در راستای قائم به اندازه ۴۵ سانتی‌متر در طی ۱۲ سال را نشان می‌دهد. اما با توجه به سری زمانی ایستگاه GPS سرعت فرونشست، در طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ یکسان نبوده است. آنالیز سری زمانی این ایستگاه، نشان‌دهنده تغییر سرعت فرونشست در



شکل ۵. سری زمانی مولفه ارتفاعی ایستگاه GPS ثابت خرمدره. محور افقی نشان‌دهنده زمان و محور عمودی نشان‌دهنده تغییرات ارتفاعی ایستگاه است.

منطقه‌ای، بیانگر رخداد فرونشست در دشت خرمدره و افزایش نرخ آن در طول زمان است.

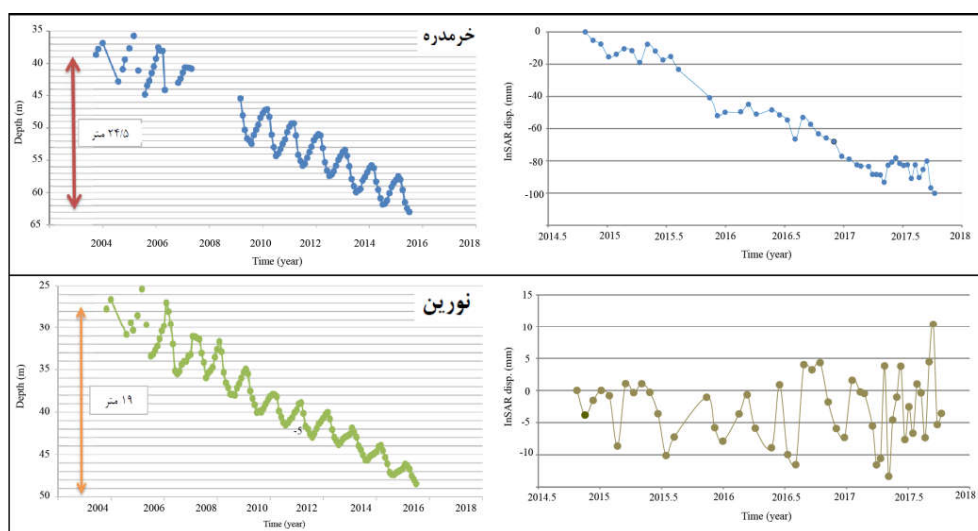
۴-۲- سری زمانی چاه‌های پیرومتری

جهت بررسی ارتباط بین برداشت آب‌های زیرزمینی و

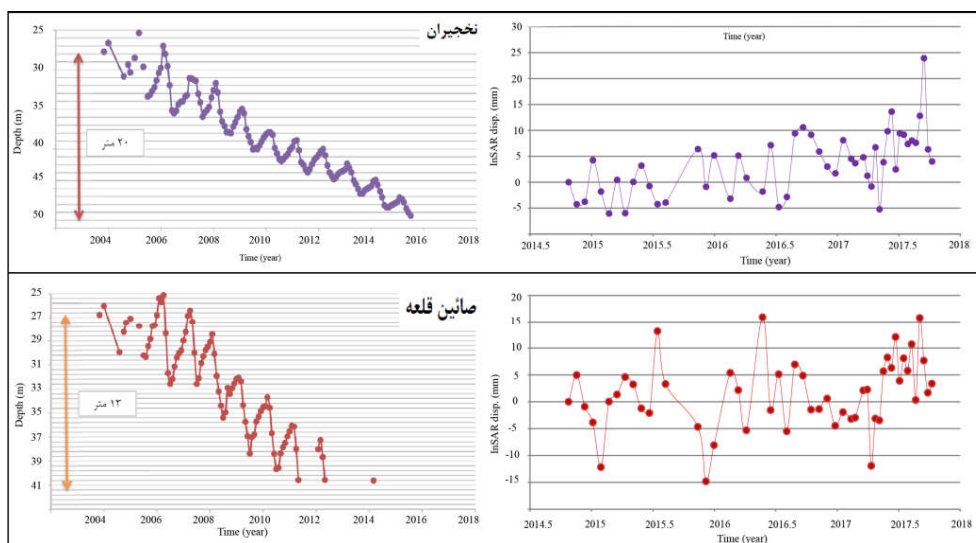
نتایج حاصل از سه تکنیک ژئودتیک در منطقه، نشان می‌دهد که نرخ فرونشست، در طی سال‌های اخیر با افزایش قابل توجهی برخوردار بوده است. داده‌های GPS به صورت نقطه‌ای، داده‌های ترازیبی دقیق به صورت خطی و نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری به صورت

نخجیران، نورین و صابین قلعه، قرار گرفته در خارج از منطقه‌ی فرونشست، نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اطلاعات ثبت شده در این ایستگاه‌ها، افت تراز آب به ترتیب برابر با ۲۰، ۱۹ و ۱۳ متر است. نتایج حاصل از بررسی نمودارها می‌تواند نشان دهنده این موضوع باشد که ارتباط مستقیمی بین افت تراز آب و ایجاد فرونشست در منطقه وجود دارد و هر چه از منطقه فرونشست دورتر می‌شویم، افت تراز آب در منطقه کمتر می‌شود. این مسئله اهمیت توجه به بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در این منطقه، استفاده از منابع روش‌های نوین آبیاری در مزارع، استفاده بهینه از منابع آب و صرفه جویی در مصرف آب برای مصارف خانگی و صنعتی را به خوبی آشکار می‌سازد. موقعیت چاه‌های پیژومتری مورد بررسی نیز در شکل ۴، نشان داده شده است. در شکل ۴، نقاط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ایستگاه‌های نورین، نخجیران و صابین قلعه در خارج از محدوده فرونشست و نقطه‌ی ۴، ایستگاه خرمدره داخل محدوده فرونشست را نشان می‌دهد.

افت سطح تراز آب با ایجاد فرونشست در منطقه، اطلاعات بدست آمده از چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه مورد مطالعه، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شکل ۶، سری زمانی مربوط به جابجایی‌ها برای نقاط انتخاب شده در محل پیژومترها و داده‌های ثبت شده توسط چاه‌های پیژومتری موجود در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه نرخ متوسط فرونشست منطقه مورد مطالعه، ایستگاه خرمدره در منطقه متحمل فرونشست واقع شده است. با توجه به داده‌های عمق آب که در بازه‌ی زمانی بین سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴ در این ایستگاه ثبت شده، عمق آب در این بازه زمانی به میزان ۲۴/۵ متر افزایش پیدا کرده است. این مسئله بیانگر این است که در این بازه زمانی تراز آب به میزان ۲۴/۵ متر افت پیدا کرده است. با بررسی الگوی افت تراز آب در این منطقه، ارتباط مستقیم بین افت تراز آب و ایجاد فرونشست در منطقه، به خوبی قابل درک است. برای درک بهتر و اطمینان بیشتر در نتیجه بدست آمده، ایستگاه‌های پیژومتری



شکل ۶. نمودار سری زمانی داده‌های عمق آب در منطقه‌ی مورد مطالعه. محور افقی نشان دهنده‌ی تاریخ نمونه برداری و محور عمودی نشان دهنده‌ی عمق آب است. قسمت الف، بیانگر سری زمانی عمق آب ایستگاه خرمدره است که در منطقه‌ی فرونشست قرار دارد. قسمت ب، پ و ت بیانگر سری زمانی عمق آب ایستگاه‌های نخجیران، نورین و صابین قلعه است که در خارج از محدوده‌ی فرونشست قرار گرفته‌اند.



ادامه شکل ۶. نمودار سری زمانی داده‌های عمق آب در منطقه‌ی مورد مطالعه. محور افقی نشان دهنده‌ی تاریخ نمونه برداری و محور عمودی نشان دهنده‌ی عمق آب است. قسمت الف، بیانگر سری زمانی عمق آب ایستگاه خرمدره است که در منطقه‌ی فرونشست قرار دارد. قسمت ب، پ و ت بیانگر سری زمانی عمق آب ایستگاه‌های نخجیران، نورین و صابین قلعه است که در خارج از محدوده‌ی فرونشست قرار گرفته اند.

۴-۳- بررسی مخاطرات فرونشست

راه‌های ارتباطی، مناطق مسکونی و آثار تاریخی منطقه، ابتدا نرخ فرونشست بدست آمده در نقاط مختلف با استفاده از الگوریتم درون‌یابی^۲ IDW به سطح تبدیل شده است. دقت درون‌یابی به منظور تولید سطح در روش PS به دلیل تعداد نقاط کمتر نمونه‌برداری شده نسبت به روش SBAS کمتر است. از آنجائیکه در بازه سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵، فرونشست از روش PS به دست آمده و پراکندگی نقاط پراکنشگر در این روش به خوبی روش SBAS نیست، دقت روش IDW در این حالت برای تولید سطح به دست آمده است. شکل ۷، نمایانگر نقاط پراکنشگر، سطح به دست آمده و نیز نقاط کنترل استفاده شده برای ارزیابی دقت درون‌یابی است که در آن شکل (a)، کل محدوده و (b) بزرگنمایی محدوده مشخص شده درون مستطیل سفید رنگ برای وضوح بیشتر، پراکندگی نقاط را نشان می‌دهند. RMSE^۳ به دست آمده برابر ۱۰/۰۷ میلی‌متر بوده است.

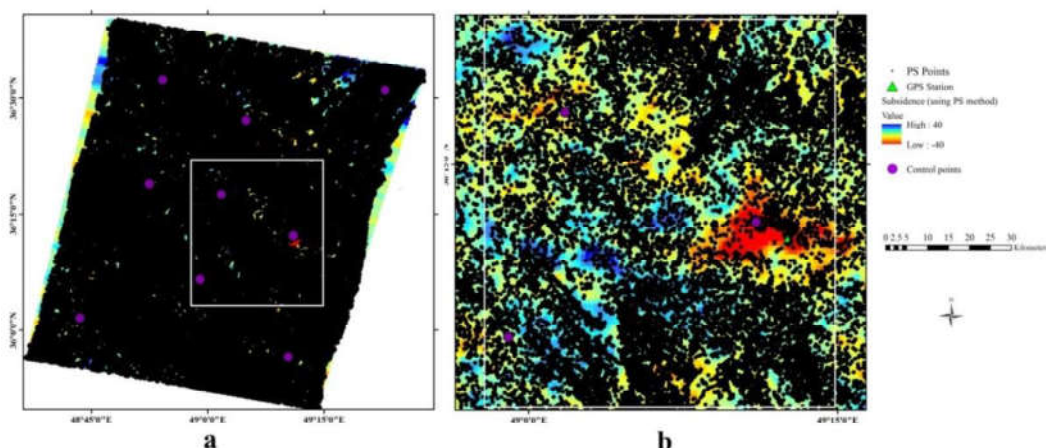
به‌منظور تهیه نقشه‌های تحلیلی، برای بررسی فرونشست و مخاطرات ناشی از آن در این منطقه، از سیستم اطلاعات مکانی^۱ GIS استفاده شده است. فرونشست‌ها می‌توانند باعث آسیب دیدگی تأسیسات زیربنایی و نقاط استراتژیک شوند که از جمله آنها می‌توان به راه‌های ارتباطی، خطوط انتقال نیرو، نیروگاه‌ها و سدها اشاره کرد. از سیستم اطلاعات مکانی GIS به‌منظور تحلیل مخاطرات این پدیده در منطقه مطالعاتی، استفاده شده است. به همین دلیل، در ابتدا داده‌های مربوط به تأسیسات زیربنایی و نقاط استراتژیک از سازمان‌های مربوطه اخذ شده و آماده ورود به نرم‌افزار سیستم اطلاعات مکانی شده‌اند. سپس با استفاده از آنالیزهای مکانی در نرم افزارهای GIS، داده‌های مکانی مربوطه مورد پردازش قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، برای بررسی مخاطرات فرونشست در شبکه

^۳Root Mean Square Error

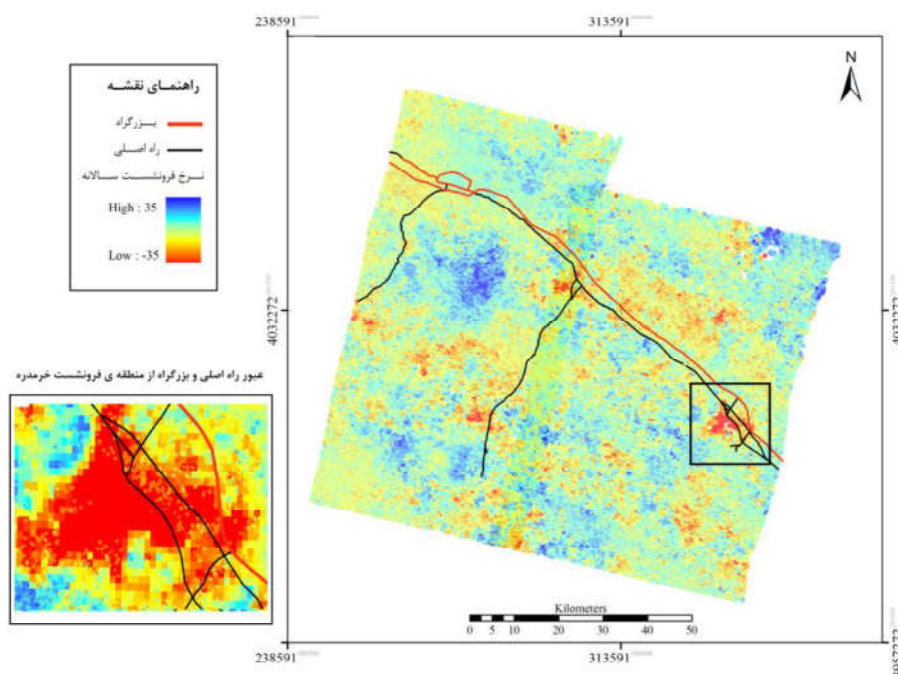
1. Geospatial Information System
1. Inverse Distance Weight

همانطور که در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌شود، قسمتی از راه‌های اصلی، بزرگراه‌ها، راه‌آهن، مناطق مسکونی و آثار تاریخی در منطقه‌ای که دارای بیشینه نرخ فرونشست است قرار دارند.

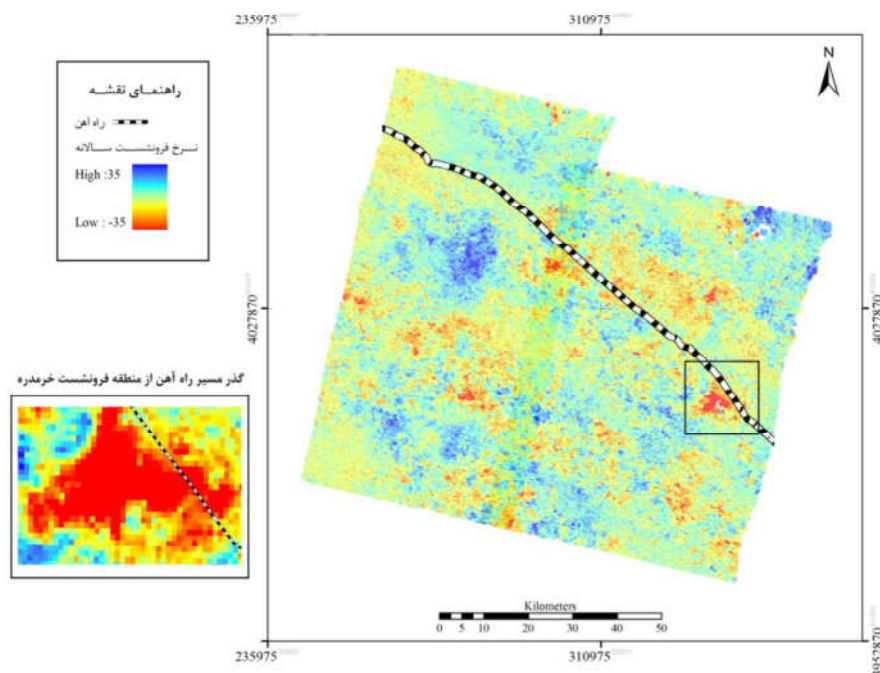
در ادامه، ارتباط مکانی لایه‌های شبکه‌ای ارتباطی، کاربری‌ها و نقاط مهم با سطح مزبور با استفاده از روی هم‌گذاری لایه‌ها بدست آمده است. شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ نتایج تحلیل خطر را نشان می‌دهند.



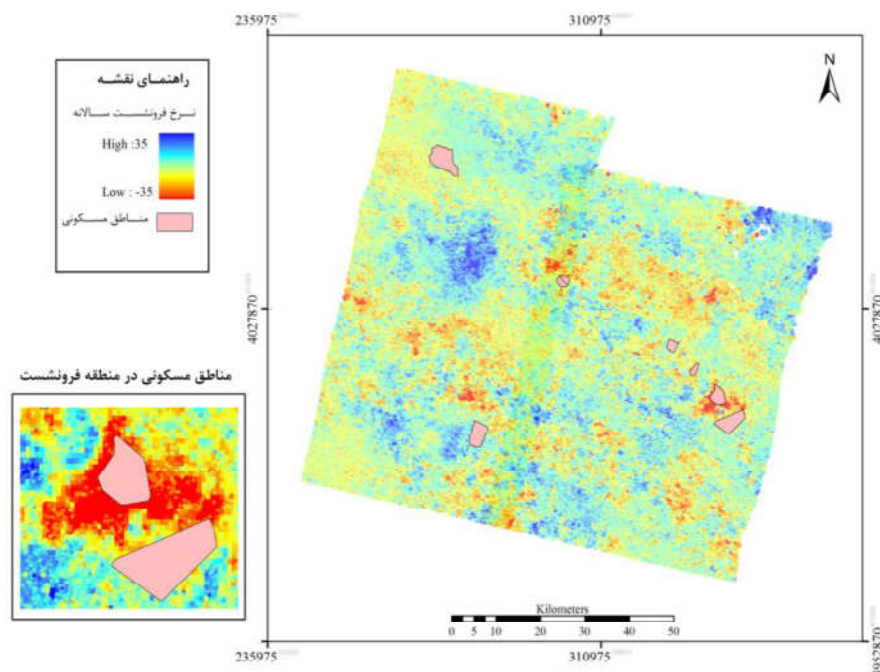
شکل ۷. نقاط پراکنشگر پایدار در روش PS و نقاط کنترل استفاده شده برای ارزیابی دقت درون‌یابی، (a). کل محدوده‌ی مطالعه شده و بزرگنمایی محدوده‌ی مشخص شده درون مستطیل سفید رنگ در کل محدوده (b)



شکل ۸. عبور بزرگراه و راه اصلی از منطقه فرونشست. تصویر سمت راست، کل منطقه مورد مطالعه و تصویر سمت چپ، بزرگنمایی محدوده فرونشست است که در مسیر راه اصلی و بزرگراه اتفاق افتاده است.

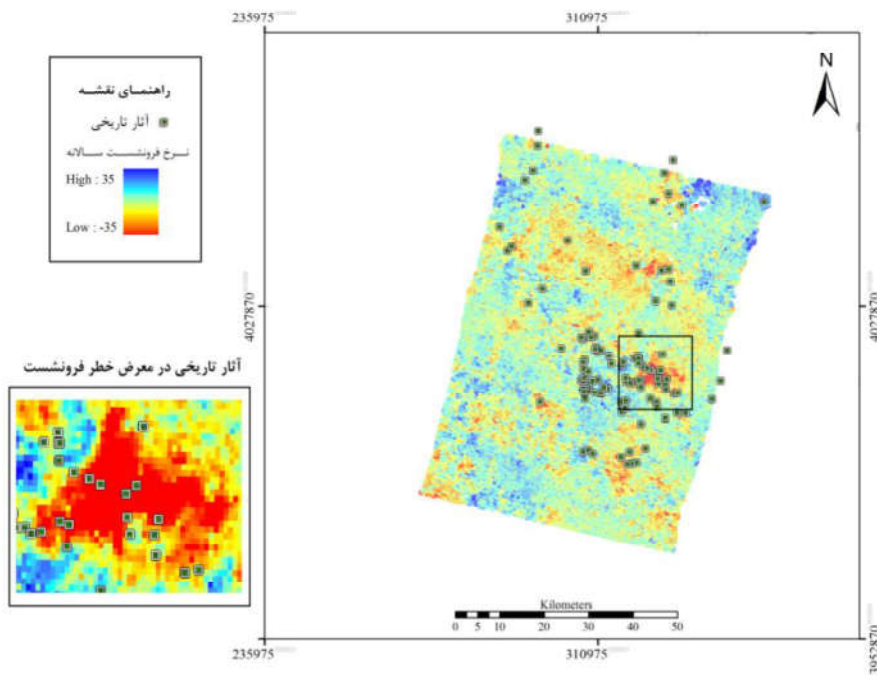


شکل ۹. عبور راه‌آهن از منطقه فرونشست. شکل سمت راست، کل محدوده مورد مطالعه و شکل سمت چپ، بزرگنمایی منطقه فرونشست و گذر راه‌آهن از این منطقه را نشان می‌دهند.

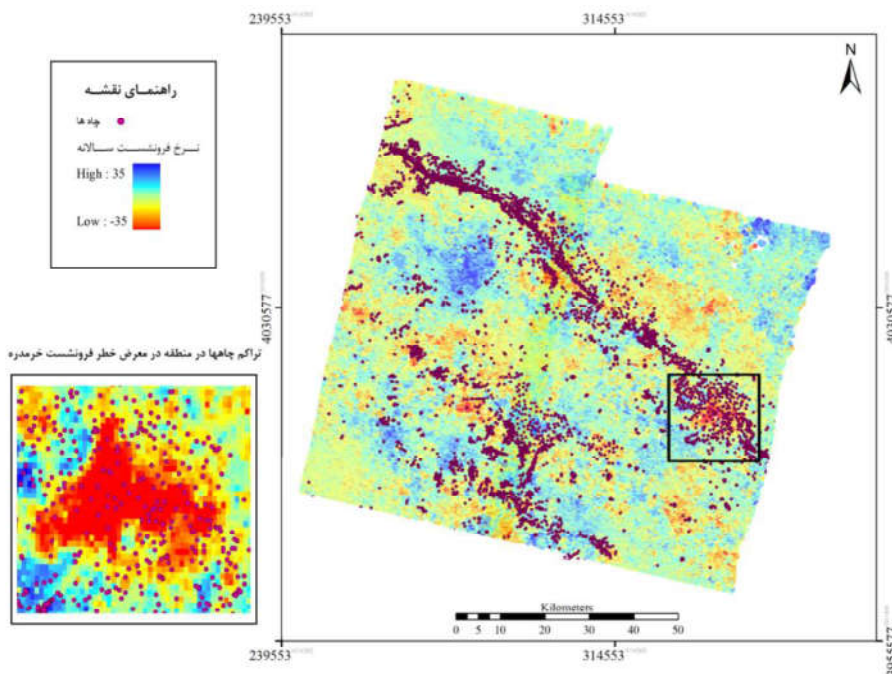


شکل ۱۰. مناطق مسکونی در منطقه فرونشست؛ شکل سمت چپ، نشانگر کل منطقه مورد مطالعه و شکل سمت راست، نشانگر بزرگنمایی منطقه فرونشست و مناطق مسکونی موجود در منطقه است.

مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی ...



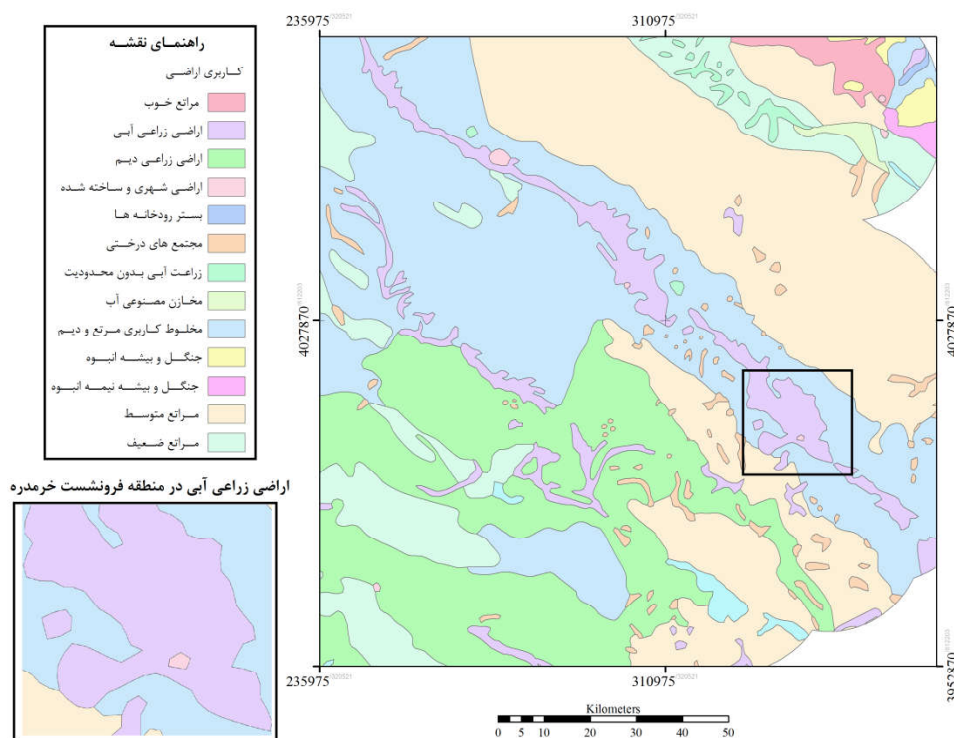
شکل ۱۱. آثار تاریخی در منطقه فرونشست؛ شکل سمت چپ، نشانگر کل منطقه مورد مطالعه و شکل سمت راست، نشانگر بزرگنمایی منطقه فرونشست و آثار تاریخی موجود در منطقه است.



شکل ۱۲. ازدیاد چاهها در منطقه فرونشست. شکل سمت راست، نشانگر کل منطقه مورد مطالعه است و شکل سمت چپ، بزرگنمایی محدوده فرونشست و تراکم چاههای حفاری شده در این منطقه را نشان می‌دهد.

اراضی این منطقه را زمین‌های کشاورزی تشکیل داده‌اند، می‌توان برداشت آب‌های زیرزمینی را در این منطقه، یکی از عوامل فرونشست زمین دانست.

همانطور که شکل شماره ۱۲ نشان می‌دهد، در منطقه فرونشست، چاه‌های آب به صورت متراکم دیده می‌شوند. با توجه به شکل ۱۳ که نشان می‌دهد، بیشتر



شکل ۱۳. کاربری اراضی؛ شکل سمت راست، کل منطقه مورد مطالعه و شکل سمت چپ، بزرگنمایی منطقه فرونشست و اراضی زراعی آبی در این منطقه را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

سازمان نقشه‌برداری کشور، در پهنه فرونشست بررسی شد. نتایج مشاهدات نشان داد فرونشست در این دشت، از سال ۱۹۸۵ وجود داشته، ولی نرخ آن در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت بوده است. سری زمانی ایستگاه ثابت GPS خرمدره، بیانگر افزایش نرخ فرونشست از ۱۶ میلی‌متر بر سال در سال ۲۰۰۶ به ۵۱ میلی‌متر بر سال در سال ۲۰۱۷ رسیده است. این افزایش می‌تواند، بیانگر افزایش استرس بر آبخوان در طول زمان باشد. همچنین تغییرات سطح تراز آب در چاه‌های پیژمتری منطقه، حاکی از ارتباط میان فرونشست و برداشت آب از سفره

در این پژوهش، به منظور بررسی نرخ و پهنه فرونشست در دشت خرمدره، از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. بیشینه نرخ تغییر شکل، در راستای دور- شدن از ماهواره با استفاده از تصاویر ENVISAT، ۳۵ میلی‌متر بر سال (در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۵) و نیز با استفاده از تصاویر Sentinel S1، ۴۹ میلی‌متر بر سال (در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۷) تعیین شد. نتایج به دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری، با استفاده از سری زمانی ایستگاه دائم GPS و پروفیل تراز یابی دقیق

مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس

حقیقت‌مهر، پ.، ولدان‌زوج، م.ج.، صاحبی، م.ر.، دهقانی، م.، ۱۳۸۹، اندازه‌گیری فرونشست دشت هشتگرد ناشی از استخراج آبهای زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل-سنجی راداری، همایش ژئوماتیک، تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور

شریفی‌کیا، م.، ۱۳۹۱، تعیین میزان فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری، دشت نوق بهرمان، برنامه‌ریزی و آمایش فضا دوره شانزدهم، شماره ۳

عبدی‌نژاد، پ.، ۱۳۹۰، بررسی وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی دشتهای مهم استان زنجان، جهت مدیریت مناسب منابع آب زیرزمینی در آنها، دومین کنفرانس ملی پژوهشهای کاربردی منابع آب ایران، زنجان، شرکت آب منطقه‌ای استان زنجان.

عینلو، ف.، معافی، ر.، ملکیان، ع.، قضاوی، آ.، محسنی ساروی، ر.، ۱۳۹۵، بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت زنجان از نظر استانداردهای شرب با استفاده از رویکرد زمین‌آمار، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲، پیاپی ۶۲، ۱-۱۶.

مرتضوی، م.، سلیمانی، ک.، غفاری موفق، ف.، ۱۳۸۹، مدیریت منابع آب و توسعه پایدار، مطالعه موردی دشت رفسنجان، نشریه آب و فاضلاب شماره ۳، ۱۳۱-۱۲۶

معتق، م.، داودی جم، م.، مومنی، م.، هاشمی، م.، ۱۳۹۱، کشف و نمایش فرونشست دشت مهیار اصفهان به کمک تداخل‌سنجی راداری،

آب زیرزمینی این دشت است و تمرکز چاه‌های استخراج آب در مناطق فرونشست، می‌تواند دلیلی بر رخداد فرونشست در دشت خرمدره باشد. در نهایت، با توجه به نتایج و نقشه‌های تهیه شده با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی برای این منطقه، مشخص شد تأسیسات زیربنایی از قبیل راه‌های اصلی، بزرگراه‌ها و خطوط راه-آهن در معرض فرونشست هستند. بنابراین به‌منظور مقابله با این معضل محیط‌زیستی توصیه می‌شود با مدیریت کاربری اراضی در محدوده خطر فرونشست و نظارت کافی بر استخراج منابع آب زیرزمینی، پیشگیری‌های لازم جهت کند کردن سرعت وقوع پدیده فرونشست انجام شود.

۶- تقدیر و تشکر

از سازمان نقشه‌برداری کشور سپاسگذاریم که داده‌های سری زمانی ایستگاه GPS ثابت خرمدره و پروفیل ترازبایی عبوری از دشت خرمدره را در اختیار این تحقیق قرار دادند. تصاویر تداخل‌سنجی راداری نیز از آژانس فضایی اروپا اخذ شده است.

۷- منابع

جلیلی، ث.، ۱۳۹۲، مطالعات منابع آب و شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی دشت ابهر با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز

جنت، ک.، قاضی زاده، ا.، روستایی، م.، ۱۳۸۸، پایش فرونشست زمین در دشت گلپایگان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و شکاف سنج، ششمین کنفرانس زمین‌شناسی

- geoscience and remote sensing, 39(1), pp.8-20.
- Goldstein, R.M. and Werner, C.L., 1998, **Radar interferogram filtering for geophysical applications**, Geophysical research letters, 25(21), pp.4035-4038.
- Hanssen, R.F., 2001, **Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2)**, Springer Science & Business Media.
- Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H., 2007, **Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos**, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B7).
- Hooper, A.J., 2006, **Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation**.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B., 2004, **A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers**, Geophysical research letters, 31(23).
- Massonnet, D. and Feigl, K.L., 1998, **Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface**, Reviews of geophysics, 36(4), pp.441-500.
- نشریه علمی ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی دوره سوم، شماره ۲
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E., 2002, **A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), pp.2375-2383.
- Bürgmann, R., Rosen, P.A. and Fielding, E.J., 2000, **Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation**, Annual review of earth and planetary sciences, 28(1), pp.169-209.
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H.R., Ritz, J.F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Le Moigne, N., Sedighi, M. and Khorrami, F., 2010, **GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran**, Geophysical Journal International, 183(3), pp.1287-1301.
- Farr, T.G. and Kobrick, M., 2000, **Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data**, Eos, Transactions American Geophysical Union, 81(48), pp.583-585.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2001, **Permanent scatterers in SAR interferometry**, IEEE Transactions on

- Cordilleras, southern Spain**), Journal of Geodynamics, 49(3-4), pp.181-189.
- Samsonov, S., d'Oreye, N., 2012, **Multidimensional time-series analysis of ground deformation from multiple InSAR data sets applied to Virunga Volcanic Province**, Geophys.J. Int. 191 (3):1095–1108.
(<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05669.x>)
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T.R., Wetzel, H.U., Zschau, J. and Arabi, S., 2007, **Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS**, Geophysical Journal International, 168(2), pp.518-526.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M.H., Wetzel, H.U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. and Arabi, S., 2017, **Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements**. Engineering Geology, 218, pp.134-151.
- Osmanoğlu, B., Dixon, T.H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. and Jiang, Y., 2011, **Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(1), pp.1-12.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. and Wessel, P., 2011. **GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools**, UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography.
- Sousa, J.J., Ruiz, A.M., Hanssen, R.F., Bastos, L., Gil, A.J., Galindo-Zaldívar, J. and de Galdeano, C.S., 2010, **PS-InSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation—Study of the Granada basin (Central Betic**



سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۷
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.10, No.3, Autumn 2018 33-52

Khoramdarreh Subsidence Estimation Using SAR Interferometry and Investigation its Risks

Ahmadi N.¹, Mousavi Z.^{*2}, Masoumi Z.^{2,3}

1. Msc. Student in Geodesy, Faculty of engineering, University of Zanjan
2. Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, University of Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran
3. Center for Research in Climate Change and Global Warming (CRCC), University of Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

Abstract

Subsidence is a downward motion of ground surface with small horizontal displacement vector. It may happen due to natural factors or human activities. In Iran, subsidence may occur because of the human activities and excessive extraction of groundwater resources. In this study, we applied Synthetic aperture Radar Interferometry (InSAR) to investigate the rate of subsidence. We estimated the rate of subsidence in Khoramdareh plain using Permanent Scattering (PS) for the duration time 2003-2005. The mean velocity map indicated that the subsidence is occurring with the rate of 35 mm/yr in direction of Satellite Line of Sight. Afterward, we used Geospatial Information System (GIS) to evaluate subsidence relation with agricultural lands and wells in the case study area. Also the risks of subsidence are investigated in the area using GIS abilities. The results show some parts of the railways, main roads and highways are affected by subsidence.

Keywords: Khoramdarreh plain, SAR interferometry (InSAR), Geospatial Information System (GIS)