

بررسی فرونشست یزد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و ترازیبی دقیق

معصومه آمیغپئی^{۱*}، سیاوش عربی^۱ و علی طالبی^۱

^۱ سازمان نقشه برداری کشور، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۲/۱۴

چکیده

به طور معمول خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین، همچون تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی، رشد چاه‌ها، آسیب به سازه‌ها و ایجاد اختلال در خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب، ترمیم‌ناپذیر، پر هزینه و مخرب هستند. یکی از مناطقی که در ایران با سرعت فرونشست قابل توجهی روبه‌روست، محدوده دشت یزد- اردکان است که بر اساس مشاهدات تصاویر راداری، نرخ بیشینه فرونشست در این منطقه حدود ۱۲ سانتی‌متر در سال است. بررسی‌های صورت گرفته حاکی از آن است که این فرونشست در اثر استخراج آب‌های زیرزمینی است که این بهره‌برداری از منابع زیرزمینی، بیش از مقداری است که با بارندگی‌های منطقه جبران شود. با توجه به نرخ قابل توجه فرونشست و آسیب‌هایی که این فرونشست در سازه‌های محل ایجاد می‌کند، مدیریت صحیح استخراج آب زیرزمینی امری ضروری به نظر می‌رسد.

کلید واژه‌ها: تداخل سنجی راداری، فرونشست، ترازیبی، دشت یزد- اردکان، آبخوان.

E- mail: amighpey@yahoo.com

*نویسنده مسئول: معصومه آمیغپئی

۱- مقدمه

خاک‌های حاصلخیز کشاورزی و ایجاد خسارت به چاه‌ها در منطقه‌های فرونشست روستایی منجر شود. این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها و بزرگراه‌ها آسیب زده، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساختمان‌ها آسیب رسانده، موجب ترک در آنها شود. همچنین پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه شود. برای مثال در این مناطق ممکن است سیلاب‌های عظیم و مخربی روی دهد، در حالی که پیش از ایجاد فرونشست از هیچ سابقه‌ای برخوردار نبوده است. از سوی دیگر این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در وضعیت زمین‌آب‌شناختی منطقه مانند جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی، بیلان آب زیرزمینی و غیره مخاطرات جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد (گروه زمین‌شناسی مهندسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۳). متأسفانه، فرونشست‌ها و پیامدهای ناخوشایند آن سرشتی بازگشت‌ناپذیر دارند و به سختی می‌توان آنها را کند و مهار نمود. رویارویی با مخاطرات فرونشست بر مبنای تشخیص و پیش‌بینی آنها استوار است. فرایند پیش‌بینی و تشخیص بر پایه داده‌های حاصل از چاه‌پیمایی، آزمون‌های ژئوفیزیکی و داده‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی برای پیش‌بینی و اندازه‌گیری میزان نشست خاک و تخلخل مفید و پتانسیل تراکم‌پذیری آن است. از سوی دیگر مکان‌یابی و اندازه‌گیری میزان فرونشست می‌تواند با روش‌های مختلف نقشه برداری انجام پذیرد.

به منظور تشخیص و کنترل مناطق فرونشست از روش‌هایی همچون تداخل سنجی راداری، GPS و ترازیبی دقیق استفاده می‌شود. تکرار مشاهدات ترازیبی دقیق یکی از قدیمی‌ترین و با دقت‌ترین روش‌های ژئودتیک برای کنترل و بررسی فرونشست است. در این روش، با ثابت فرض کردن ارتفاع نقاط خارج از محدوده فرونشست، می‌توان به تغییرات ارتفاعی نقاط ترازیبی دست یافت. به طور معمول برای بررسی فرونشست با ترازیبی از مشاهدات درجه یک با خطای استاندارد $\pm 3\sqrt{k}$ استفاده می‌شود که K در این فرمول طول مسیر ترازیبی به کیلومتر است. ترازیبی دقیق در کنار برتری دقت بالا با محدودیت‌های اندازه‌گیری فرونشست به صورت نقطه‌ای و هزینه بالا مواجه است. از طرفی، امروزه روش تداخل سنجی راداری به عنوان یک روش رایج برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین شده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی خوب تصاویر راداری و دقت قابل قبول، این روش را به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه و اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در اثر پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون

به طور معمول فرونشست به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد، گفته می‌شود. افزایش روز افزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی بویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریایی کم ژرفا یا دریاچه‌ای تحکیم نیافته انباشته شده‌اند، در مناطق مختلفی از کشور عزیزمان ایران، مانند مشهد، نیشابور، کرمان و کاشمر موجب فرونشست زمین شده است (آمیغپئی و دیگران، ۱۳۸۶ و Amighpey et al., 2008).

یکی از مناطقی که در ایران با پدیده فرونشست مواجه است، دشت یزد- اردکان است. در دو دهه اخیر، نشست و گسیختگی زمین در استان یزد و در دشت یزد- اردکان عامل ایجاد گسیختگی سطح جاده‌ها، شکسته شدن لوله‌های آبرسانی، کج شدن دکل‌های برق و ایجاد نشست‌های نامتقارن در ساختمان‌ها و در نتیجه ایجاد شکستگی در سازه‌ها شده است (عالی، ۱۳۸۱).

به منظور تشخیص و کنترل مناطق فرونشست از روش‌هایی همچون تداخل سنجی راداری، GPS و ترازیبی دقیق استفاده می‌شود. تداخل سنجی راداری با پوشش وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالا در کنار GPS با قدرت تفکیک زمانی بالا و ترازیبی دقیق با دقت بالا می‌تواند منبع مناسبی برای بررسی حرکات سطح زمین باشد. در این نوشتار، فرونشست دشت یزد- اردکان با استفاده از مشاهدات ترازیبی دقیق و تداخل سنجی راداری مورد بررسی قرار گرفت.

در بخش دوم این نوشتار، معرفی خلاصه‌ای بر پدیده فرونشست و مخاطرات آن و روش‌های تعیین و اندازه‌گیری آن خواهیم داشت. در بخش سوم به معرفی فرونشست دشت یزد- اردکان، پرداخته، در بخش چهارم، نتایج بررسی‌های انجام شده با استفاده از مشاهدات ترازیبی دقیق و تداخل سنجی راداری بر فرونشست این محدوده خواهد آمد. در بخش پنجم، به بررسی علل فرونشست منطقه پرداخته و در نهایت در بخش ششم، نتیجه‌گیری خواهد آمد.

۲- فرونشست، مخاطرات آن و روش‌های تعیین و اندازه‌گیری

فرونشست و شکاف‌های زمین که به آهستگی و به تدریج گسترش می‌یابند شاید همان تأثیر خطرهای ناگهانی و فاجعه بار مانند سیل و زلزله را نداشته باشد. با این وجود به طور معمول خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین ترمیم‌ناپذیر، پر هزینه و مخرب هستند. برای مثال، فرونشست‌ها می‌توانند به تخریب سیستم‌های آبیاری و

مصبوب زمان خود و با تجهیزات اپتیکی انجام شده است و اکنون نیز برای دومین بار با تجهیزات رقومی و روش کار مختص خود، در حال تکرار است. بر اساس مقایسه بین مشاهدات درجه یک شبکه ترازیبی دقیق، در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۰ شاهد فرونشستی در مسیر عقدا - یزد، در جاده اردکان به یزد بودیم که بیشینه مقدار این فرونشست $95\text{cm} \pm 0.95\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$ بین شمس و حجت آباد، طی ۸ سال به دست آمد. شکل ۲ نمایانگر مسیرهای ترازیبی دقیق شبکه درجه یک کشور در منطقه مورد نظر در استان یزد است که مسیرهای ترازیبی موجود در منطقه با رنگ سبز و مسیری که در بررسی فرونشست استفاده شده است، با رنگ صورتی مشخص شده است. شکل ۳ تغییرات ارتفاعی مسیر عقدا - یزد را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد در قسمت‌هایی از مسیر به علت از بین رفتن نقاط سری اول مشاهدات، در زمان مشاهدات سری دوم، امکان بررسی تغییرات ارتفاعی موجود نبود.

نتایج ترازیبی دقیق، سه منطقه فرونشست متمایز با الگوی کاسه‌ای را با نرخ‌های متفاوت نشان می‌دهد (شکل ۳). بیشترین نرخ فرونشست در منطقه بین حجت آباد و شمس با سرعت بیشینه حدود ۱۲ سانتی‌متر در سال است. پس از آن اردکان فرونشستی با سرعت بیشینه ۶ سانتی‌متر در سال را نشان می‌دهد. محدوده سوم، فرونشست کاسه‌ای شکل در شهر یزد است که بیشینه سرعت ۲/۷ سانتی‌متر در سال را نشان داده است. البته باید توجه داشت که نقاط ترازیبی دقیق لزوماً از مناطق با بیشینه فرونشست عبور نکرده‌اند.

۴-۲. بررسی فرونشست دشت یزد - اردکان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری
همان‌طور که در قسمت قبل در نتایج داده‌های ترازیبی دقیق دیده شد، مشاهدات ترازیبی دقیق منطقه گرچه مقدار جابه‌جایی سطح زمین را با دقت بالایی اندازه‌گیری کرده است، اما این مشاهدات از لحاظ زمانی متعلق به یک اپک زمانی طولانی ۸ ساله بود که امکان بررسی رفتار زمانی فرونشست را در اپک‌های کوتاه فراهم نمی‌کرد، از طرفی ترازیبی دقیق رفتار فرونشست را به صورت نقطه‌ای در نقاطی که طی ۸ سال از بین نرفته بودند، نشان داده بود و بنابراین به تنهایی قادر به تعیین محدوده فرونشست نبود. بنابراین به منظور دستیابی به الگوی فرونشست منطقه در اپک‌های زمانی کوتاه‌تر از تجزیه سری زمانی تصاویر راداری استفاده شد.

پس از مشاهده فرونشست در این مسیر توسط مشاهدات ترازیبی دقیق، به منظور بررسی بیشتر محدوده فرونشست از نظر گستره مکانی آن و نیز بررسی رفتار زمانی آن در اپک‌های کوتاه مدت تراز ۸ سال، ۱۰ تصویر راداری سنجنده ASAR از ماهواره Envisat در قالب ارائه طرح پژوهشی از مرکز فضایی اروپا گرفته شده است (Amighpey et al., 2007). جدول ۱ مشخصات این تصاویر را نشان می‌دهد.

از پردازش این تصاویر توسط نرم افزار Doris، ۴۳ اینترفراگرام حاصل شد. به منظور حذف اثر توپوگرافی از اینترفراگرام‌ها، از مدل ارتفاعی رقومی SRTM (با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر) استفاده شد. تعداد قابل ملاحظه‌ای از این اینترفراگرام‌ها به علت پایین بودن وابستگی مکانی یا زمانی تصاویر برای نتیجه‌گیری نهایی حذف شدند و در نهایت تنها ۱۹ اینترفراگرام که دارای وابستگی مکانی و زمانی بالا بودند، برای تجزیه سری زمانی انتخاب شدند.

با استفاده از مشاهدات ترازیبی شبکه درجه یک موجود در منطقه و بررسی تغییرات ارتفاعی این مسیرها، مناطقی که خارج از حوضه فرونشست بود، شناسایی شدند و به منظور حذف خطای باقیمانده مداری که به صورت ترند ثابت در اینترفراگرام‌ها ظاهر می‌شود، صفحه‌ای بر این مناطق برازش داده شد و در نهایت از اینترفراگرام‌ها حذف شد. ضمناً حذف این صفحه، اختلاف فاز اینترفراگرام را که بیانگر تغییرات نسبی ارتفاعی است، تبدیل به نشانگر مطلق تغییرات ارتفاعی کرد، زیرا نقاطی که طبق مشاهدات ترازیبی دقیق (به عنوان منبع بررسی تغییر ارتفاعی مطلق) در بازه زمانی ۸ سال تغییر ارتفاعی قابل توجهی نداشته‌اند، به عنوان منطقه ثابت ارتفاعی انتخاب شدند.

زلزله، فرونشست زمین، زمین‌لغزش و ... مطرح کرده است (Singhory et al., 2006; Motagh et al., 2007; Amighpey et al., 2009). تداخل سنجی راداری تفاضلی جابه‌جایی سطح زمین را با دقت سانتی‌متر و قدرت تفکیک مکانی چند ده متر در منطقه‌ای به وسعت ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع اندازه‌گیری می‌کند (Massonnet and Feigl, 1998). اما آنچه امروزه مورد توجه قرار گرفته است، بررسی رفتار زمانی جابه‌جایی سطحی زمین به وسیله تصاویر با خط مبنای مکانی کوچک، با استفاده از این روش است (Berardino et al., 2002). استفاده از این روش‌های مختلف ژئودینامیکی به منظور بررسی رفتار فرونشست‌ها گامی کلیدی در شناسایی و مدیریت صحیح این پدیده به شمار می‌رود.

۳- فرونشست دشت یزد - اردکان

استان یزد با مساحتی بالغ بر ۱۳ میلیون هکتار، با توجه به وجود دشت کویر در شمال، دشت لوت در خاور و جنوب و ارتفاعات مرکزی ایران در باختر، دارای شرایط نامساعد طبیعی و جوی است و به‌طور کلی در حوضه بسته‌ای قرار دارد که در برگزیده نامناسب‌ترین عوامل طبیعی چیره بر فلات مرکزی ایران است. بیش از ۹۰ درصد استان یزد را منابع طبیعی تجدید شونده شامل بیابان و ماسه‌زار، جنگل طبیعی و دست کاشت و مراتع با وضعیت‌های مختلف تشکیل می‌دهد.

یکی از مشکلات موجود در امر ساخت و ساز و گسترش ناحیه شهری در استان یزد، گسیختگی‌های متعدد در سطح زمین در مناطق حد فاصل شهرهای یزد و اردکان است. دشت یزد - اردکان با طول ۶۰ کیلومتر و عرض متوسط ۱۵ کیلومتر بین شهرهای یزد و اردکان واقع است. در دو دهه اخیر نشست و گسیختگی زمین در استان یزد و در دشت یزد - اردکان عامل ایجاد خسارت‌های زیادی در منطقه شده است. این پدیده باعث گسیختگی سطح جاده‌ها، شکسته شدن لوله‌های آبرسانی، کج شدن دکل‌های برق و ایجاد نشست‌های نامتقارن در ساختمان‌ها و در نتیجه ایجاد شکستگی در سازه‌ها شده است.

منطقه یزد - اردکان قسمتی از حوضه آبریز کویر سیاه کوه است که تقریباً در مرکز استان یزد واقع شده است. گسیختگی‌ها در مناطق میبد، اردکان، رستاق، اشکدر، زارچ و یزد دیده می‌شود و در قسمت‌هایی از جاده‌ها، فرورفتگی و خساراتی ایجاد شده است. در منطقه شمس آباد میبد زمانی که زمین‌های کشاورزی در حال آیش به شیوه غرقابی آبیاری می‌شوند، گسیختگی‌های حفره‌ای ایجاد می‌شود و چاه‌های آب، در این منطقه و منطقه رستاق بعد از چند سال دچار افت شدید آبدی می‌شوند و این افت همراه با فرونشست زمین در اطراف چاه‌ها است (عالمی، ۱۳۸۱). شکل ۱ نمونه‌ای از آثار فرونشست در منطقه حجت آباد و رستاق است.

۴- بررسی فرونشست دشت یزد - اردکان با استفاده از مشاهدات ترازیبی دقیق و تصاویر راداری

بررسی‌های انجام شده توسط مشاهدات ترازیبی دقیق در دشت یزد - اردکان نمایانگر فرونشست قابل توجهی در این منطقه بود. بر این اساس به منظور بررسی محدوده فرونشست و بررسی نرخ زمانی آن از روش تداخل سنجی راداری استفاده شد. در این بخش، ابتدا نتایج ترازیبی دقیق و سپس تجزیه سری زمانی مشاهدات راداری به منظور پایش این فرونشست ارائه می‌شود.

۴-۱. بررسی فرونشست دشت یزد - اردکان با استفاده از مشاهدات ترازیبی دقیق

با تکرار مشاهدات شبکه درجه یک ترازیبی کشور و داشتن دست کم دو اپک مشاهداتی، امکان بررسی تغییرات ارتفاعی مسیرهای ترازیبی وجود داشت. مشاهدات این شبکه که یک بار به‌طور کامل از سال ۶۰ شروع، و تا سال ۱۳۷۶ با دستورالعمل

و قسمتی از خطوط راه آهن شهر است که بیشینه نرخ فرونشست آن ۶/۵ سانتی متر در سال است. در اشکال ۶ تا ۸ سری زمانی این سه منطقه نشان داده شده است.

شکل ۶ نمایش سری زمانی منطقه با فرونشست بیشینه (بین شمسی و حجت آباد) است. همان‌طور که از این شکل پیداست، سری زمانی منطقه یک رفتار خطی نسبت به زمان دارد. نتایج حاصل از تست‌های مربع باقیمانده (R-Square statistic) و خطای میانگین مربع باقیمانده (RMSE (Root Mean Squared Error) statistic بر روی سری زمانی این منطقه نشانگر این مطلب است. تست مربع باقیمانده، مناسب بودن رویه برازش داده شده به داده را ارزیابی می‌کند، به عبارتی مقدار این تست بیانگر مقدار وابستگی مقادیر مشاهده و مدل ایجاد شده است که در مورد سری زمانی منطقه بیشینه فرونشست برابر ۰/۹۷ شده است و این به آن معناست که رفتار خطی ۹۷٪ رفتار سری زمانی را به خوبی مدل‌سازی کرده است. تست خطای میانگین مربع باقیمانده بیانگر خطای استاندارد مدل است که در منطقه بیشینه فرونشست برابر ۱ سانتی متر شده است. با بررسی نقشه زمین‌شناسی منطقه، این منطقه در زمین‌های کشاورزی واقع شده است که استخراج آب‌های زیرزمینی منطقه از یک طرف و عدم تغذیه کافی این منابع با بارش‌های سالیانه از سویی دیگر باعث کاهش سطح آب زیرزمینی، کاهش فشار پیزومتریک و فرونشست زمین شده است که این فرونشست باعث ایجاد گسیختگی‌هایی در سطح زمین و آسیب به سازه‌های محل شده است (شکل ۱- الف، ب، ج). فرونشست کاسه‌ای دیگر در منطقه اردکان با نرخ فرونشست بیشینه ۱۰ سانتی متر در سال است. سری زمانی این منطقه و رفتار خطی آن در شکل ۷ آمده است. مقادیر مربع باقیمانده و خطای میانگین مربع باقیمانده سری زمانی اردکان به ترتیب برابر ۰/۹۸ و ۷ میلی‌متر است که نشانگر رفتار خطی سری زمانی فرونشست منطقه اردکان است. این فرونشست در مناطق کشاورزی و صنعتی قرار گرفته است که بررسی آبخوان‌های منطقه گویای افت سطح آب زیرزمینی منطقه است.

شهرستان یزد، که مرکز استان یزد است، سومین منطقه فرونشست این استان با بیشینه نرخ فرونشست ۵/۶ سانتی‌متر در سال است. شکل ۸ بیانگر سری زمانی منطقه است. همان‌طور که از شکل پیداست، به نظر می‌رسد رفتار این سری زمانی، دستخوش تغییراتی ناشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی و بارش‌های منطقه است. مقدار مربع باقیمانده این سری برابر ۰/۵۷ است، یعنی تنها نیمی از رفتار این سری با برازش خطی مدل‌سازی می‌شود و باقیمانده رفتاری دوره‌ای نسبت به زمان دارد. خطای میانگین مربع باقیمانده برازش خطی برابر ۲ سانتی‌متر است.

۴-۳. مقایسه نتایج به دست آمده از مشاهدات ترازبایی دقیق و تداخل سنجی

راداری

همان‌طور که در قسمت ۴-۱ دیده شد، بازه زمانی داده‌های ترازبایی بین سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۰ بوده است، در حالی که تصاویر راداری مربوط به بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۶ است. با این وجود مقایسه نتایج به دست آمده از نتایج ترازبایی دقیق و تداخل سنجی راداری بیانگر تطابق خوب این نتایج است. شکل ۹ مقایسه اندازه‌گیری‌های تداخل سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های ترازبایی دقیق را که در راستای خط دید ماهواره تصویر شده است، نشان می‌دهد.

بر اساس محاسبات rms نبود تطابق دو داده ترازبایی دقیق و تداخل سنجی راداری در منطقه فرونشست ۱/۵ سانتی‌متر بود که البته این مقدار با توجه به اختلاف بازه زمانی مشاهدات ترازبایی دقیق و مشاهدات تداخل سنجی راداری قابل توجیه است، به منظور بررسی صحت مشاهدات تداخل سنجی راداری، rms مقادیر فاز در مناطق دور از فرونشست که توقع اختلاف فاز در این مکان‌ها نبود، به دست آمد که در مناطق دشت و هموار برابر ۵ میلی‌متر بود.

روش تداخل سنجی راداری اندازه‌گیری‌های تغییرات سطح زمین را در امتداد خط دید ماهواره انجام می‌دهد. به دلیل این که عمده تغییرات سطح زمین در فرونشست به صورت تغییرات ارتفاعی است، می‌توان جابه‌جایی‌های استخراج شده به روش تداخل سنجی راداری را با صرف نظر کردن از تغییرات افقی سطح زمین، با تصویر کردن آنها در راستای قائم، به تغییرات ارتفاعی تبدیل کرد. پس از این مرحله، مناطقی که دارای وابستگی مکانی کمتر از ۰/۱ بودند، در اینترفروگرام‌ها فیلتر شدند تا تغییرات فاز آنها از ارزیابی‌های نهایی حذف شوند.

هر اینترفروگرام به طور مجزا فقط حاوی تغییرات سطح در یک بازه زمانی است. با به کار بردن تعدادی اینترفروگرام به همراه تجزیه سری زمانی می‌توان تغییرات سطح را در زمان مورد بررسی قرار داد. تجزیه سری زمانی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری روشی مناسب برای برآورد نرخ تغییرات سطح زمین در قدرت تفکیک مکانی بالا است. با در دست داشتن تعداد قابل توجهی اینترفروگرام (دست کم به تعداد تاریخ‌های گرفته شده تصاویر راداری) می‌توان با استفاده از روش کمترین مربعات مقدار جابه‌جایی سطح زمین را برای هر نقطه و در هر تاریخ محاسبه کرد. فرض کنید بردار (D) بردار جابه‌جایی در زمان‌های گرفته شده داده راداری است، $D=[d_1, d_2, \dots, d_n]$ که می‌بایست در حل مسئله کمترین مربعات برآورد شود و $I=[i_{12}, i_{23}, \dots, i_{nm}]$ بردار مقادیر تغییرات سطح زمین در یک بازه زمانی است که از اینترفروگرام‌ها استخراج می‌شود و به عنوان بردار مشاهدات در حل مسئله کمترین مربعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دو بردار طبق رابطه (۱) با یکدیگر مرتبطند:

$$AD = I \quad (1) \text{ رابطه}$$

در این رابطه A ماتریس ضرایب است. حل مسئله کمترین مربعات برای تعیین بردار جابه‌جایی به صورت رابطه (۲) است:

$$D=(A^T P A)^{-1} A^T P I \quad (2) \text{ رابطه}$$

و دقت مجهولات طبق فرضیه کمترین مربعات طبق فرمول زیر برآورد می‌شود:

$$C_D=(A^T P A)^{-1} \quad (3) \text{ رابطه}$$

P ماتریس وزن مشاهدات است، در این نوشتار، rms اینترفروگرام‌ها در مناطق خارج از محدوده فرونشست به عنوان معیاری برای برآورد دقت مشاهدات در نظر گرفته شد (Funing et al., 2005). به منظور بررسی رفتار زمانی فرونشست، با استفاده از اینترفروگرام‌های با خط مبنای مکانی کوچک، سری زمانی تغییرات ارتفاعی منطقه به دست آمد. شکل ۴ تصاویر راداری را با توجه به زمان گرفته شده آنها و طول خط مبنا نشان می‌دهد. در این نوشتار ۱۹ اینترفروگرام با استفاده از ۱۰ تصویر ENVISAT در تجزیه سری زمانی مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از شبکه نشان داده شده در شکل ۴، معادلات مشاهدات ساخته شدند. لازم به یادآوری است که نرخ برآورد شده از تجزیه سری زمانی بر اساس مشاهدات تداخل سنجی راداری در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ است. نتایج با قابلیت اطمینان بیشتر با به کار بردن مشاهدات در بازه زمانی بیشتر حاصل می‌شود. نقشه نهایی نرخ میانگین فرونشست حاصل از تجزیه سری زمانی برای کل منطقه فرونشست در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشینه نرخ میانگین فرونشست در منطقه به حدود ۱۲ سانتی‌متر در سال می‌رسد.

همان‌طور که در شکل ۵ پیداست، فرونشست دشت یزد- اردکان را می‌توان به سه منطقه جداگانه با نرخ‌های قابل توجه و با شکل کاسه‌ای تفکیک کرد. منطقه نخست با بیشترین نرخ فرونشست، حفاصل بین میند تا شاهده است که مقدار فرونشست در این حوضه در حفاصل شمسی تا حجت آباد بیشینه و سرعتی حدود ۱۲ سانتی‌متر در سال دارد. منطقه دیگر، شمال باختر اردکان در محدوده کارخانه نساجی اردکان و مجتمع صنعتی اردکان است که بیشینه سرعت فرونشست در آن حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال است. منطقه سوم، محدوده خاوری و مرکزی شهر یزد،

۵- بحث و بررسی فرونشست دشت یزد اردکان

به منظور کنترل فرونشست منطقه، اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب، تغییر روش‌های آبیاری و تغذیه مصنوعی در منطقه توصیه می‌شود. همچنین بررسی نحوه عملکرد گسل‌های منطقه بر ساختار آبخیز نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. گام بعدی در راستای مطالعات فرونشست یزد، مدل‌سازی این فرونشست بر اساس داده‌های ژئودتیکی موجود به منظور پیش‌بینی رفتار زمانی آن خواهد بود که نقش مؤثری را در مدیریت بحران ایفا خواهد کرد.



شکل ۱- فرونشست زمین در دشت یزد- اردکان، الف، ب و ج) فرونشست در حجت آباد، د) فرونشست در رستاق.

جدول ۱- ویژگی‌های تصاویر گرفته شده منطقه یزد.

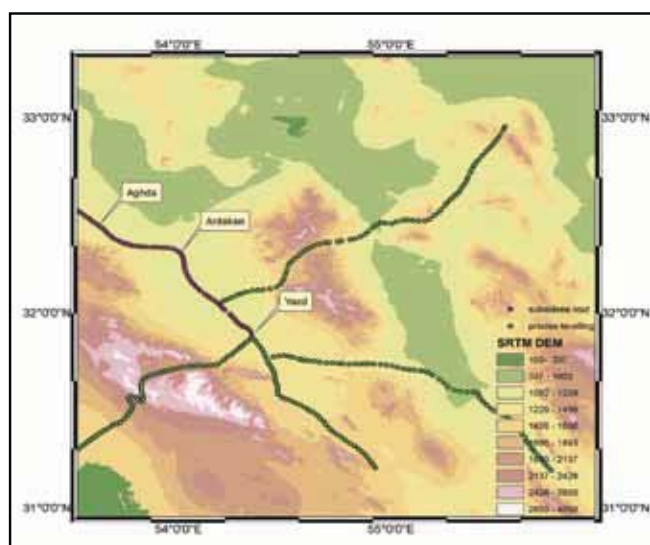
Mission	Sensor	Track	Pass	Swath	Date	Orbit
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2003-03-26	5585
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2004-06-23	12098
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2004-12-15	14603
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2005-03-30	16106
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2003-09-17	8090
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2004-09-01	13100
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2005-10-26	19112
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2003-11-26	9092
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2006-02-08	20615
Envisat	ASAR/IM	20	Descending	I2	2006-12-20	25124

۶- نتیجه‌گیری

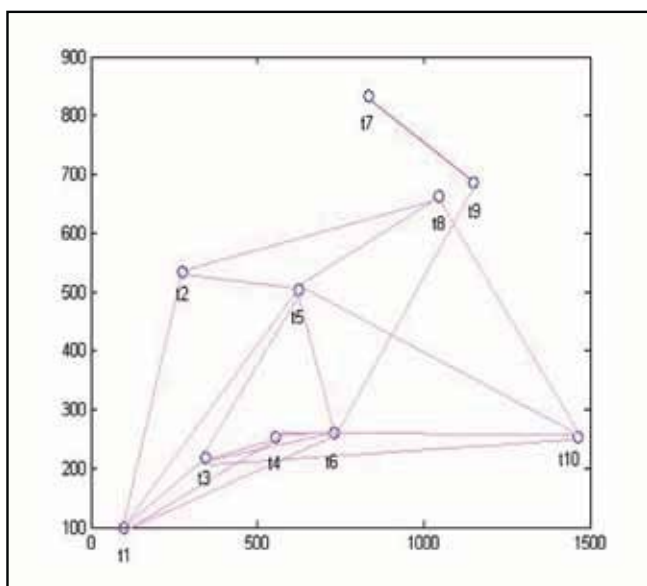
در این نوشتار، با استفاده از حل کمترین مربعات، سری زمانی فرونشست یزد با استفاده از اینترفراگرام‌های با خط مبنای مکانی کوچک به دست آمد. سری زمانی حاصل نشان‌دهنده فرونشست خطی منطقه شمسی- حجت آباد و اردکان و فرونشست غیرخطی شهرستان یزد بود. این موضوع نشان‌دهنده آن است که استخراج آب زیرزمینی در مناطق شمسی- حجت آباد و اردکان بیش از مقداری است که با بارندگی‌های محل جبران شود، اما استخراج آب زیرزمینی در شهرستان یزد با نرخ پایین‌تری است که به طور فصلی مقداری با بارش‌های محل جبران می‌شود.

مقایسه مقادیر تغییرات ارتفاع به دست آمده از ترازیبی دقیق و تداخل سنجی راداری یکدیگر را تأیید می‌کنند. بر اساس برآورد سری زمانی تداخل سنجی راداری و ترازیبی دقیق، بیشینه نرخ میانگین فرونشست دشت یزد- اردکان، به حدود ۱۲ سانتی‌متر در سال در حدفاصل شمسی و حجت آباد می‌رسد.

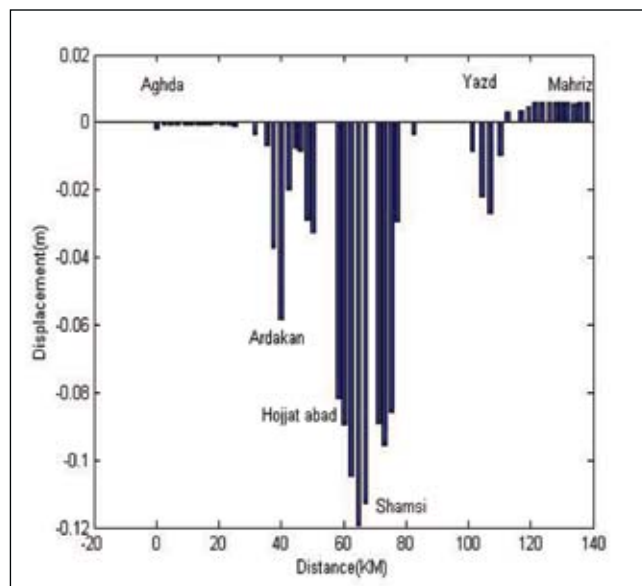
بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه و وضعیت آبخوان‌های منطقه، بیانگر آن است که دلیل عمده این فرونشست کاهش سطح آب‌های زیرزمینی ناشی از استخراج بی‌رویه آب این مناطق است. برداشت از این سفره ژرف موجب کاهش فشار پیرومتریک شده است. در نتیجه کاهش فشار پیرومتریک و برهم خوردن تعادل در منطقه، فشار حاصل از بار رسوبات بالایی افزایش می‌یابد، به طوری که تخلخل رسوبات با جورشدگی دوباره کاهش یافته و در اثر افزایش تراکم، فرونشست حاصل شده است.



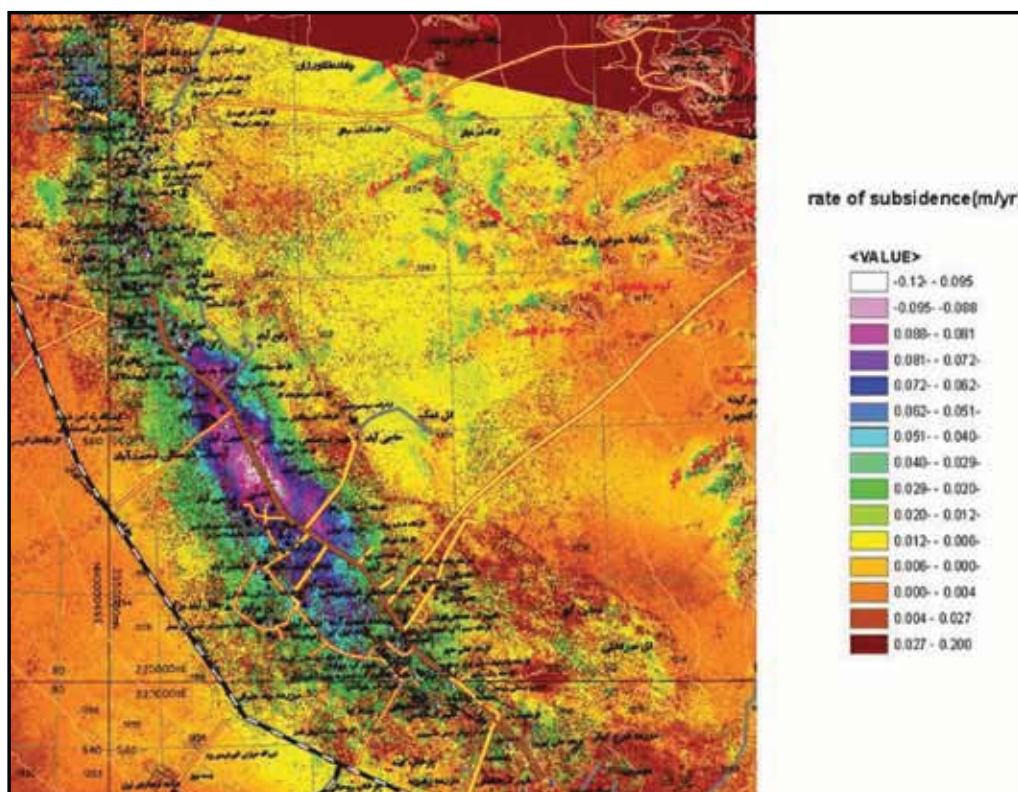
شکل ۲- مسیرهای ترازیبی دقیق شبکه درجه یک کشور در استان یزد، مسیرهای ترازیبی درجه یک موجود در منطقه با رنگ سبز و مسیری که در بررسی فرونشست استفاده شده است با رنگ صورتی مشخص شده است. تصویر زمینه، مدل ارتفاعی رقومی SRTM منطقه است.



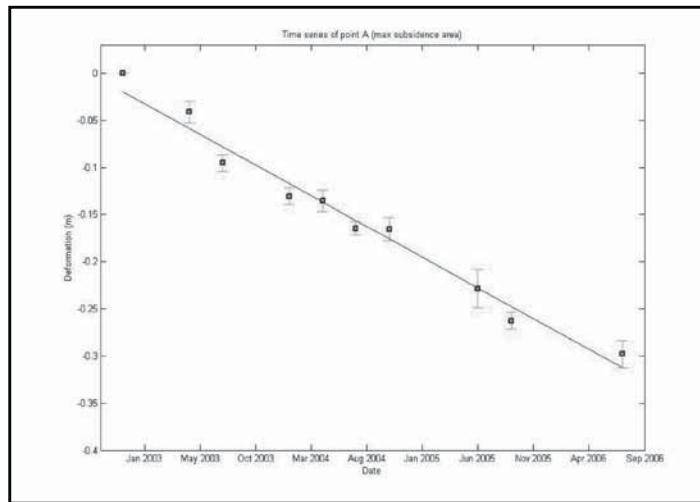
شکل ۴- تصاویر ENVISAT استفاده شده در این مطالعه، اتصالات بین تصاویر نمایانگر اینترفروگرام‌های پردازش شده است.



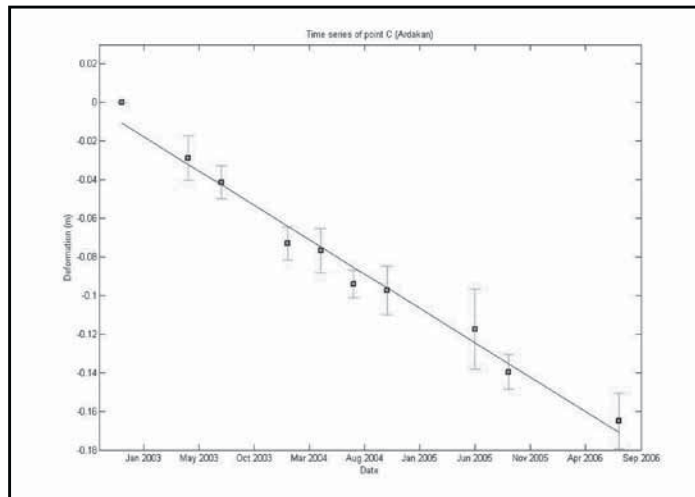
شکل ۳- تغییرات ارتفاعی مسیر عقدا- یزد- مهریز.



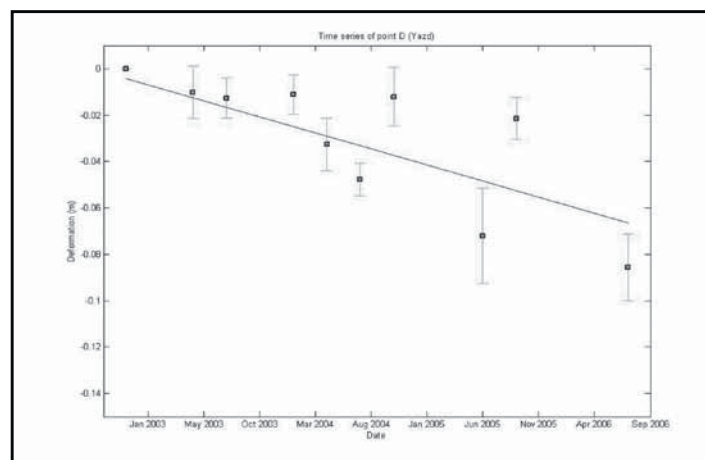
شکل ۵- نقشه نهایی نرخ میانگین فرونشست حاصل از تجزیه سری زمانی برای کل منطقه فرونشست.



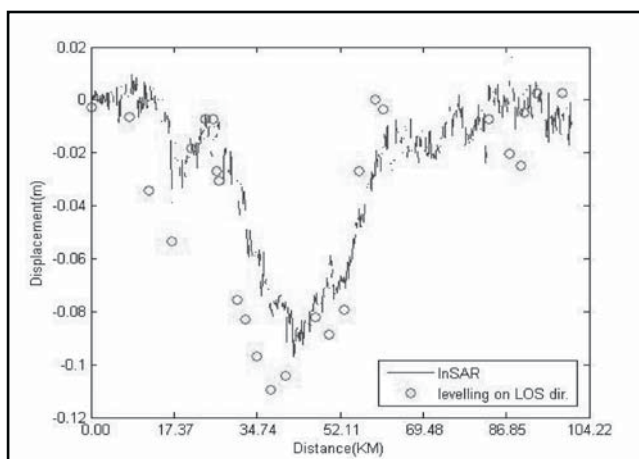
شکل ۶- سری زمانی منطقه بیشینه فرونشست



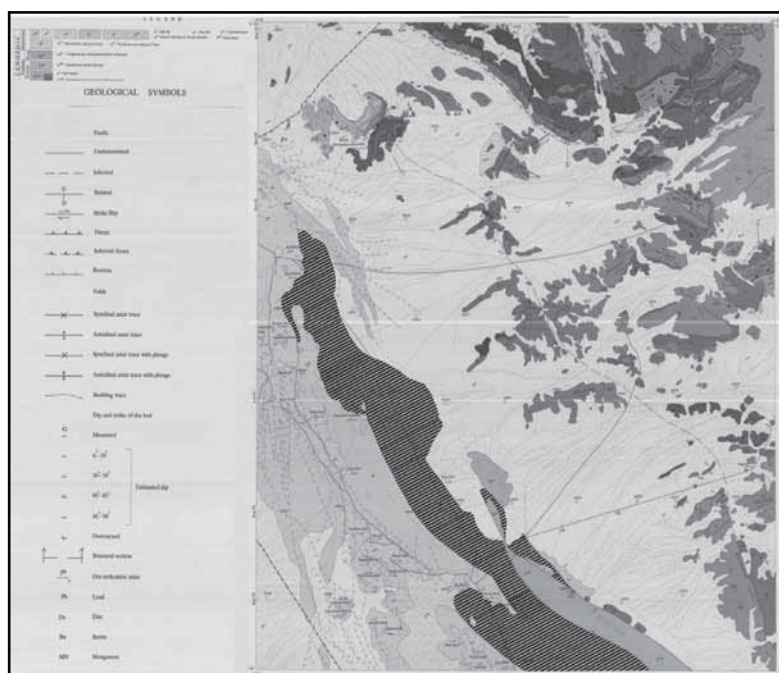
شکل ۷- سری زمانی فرونشست در اردکان



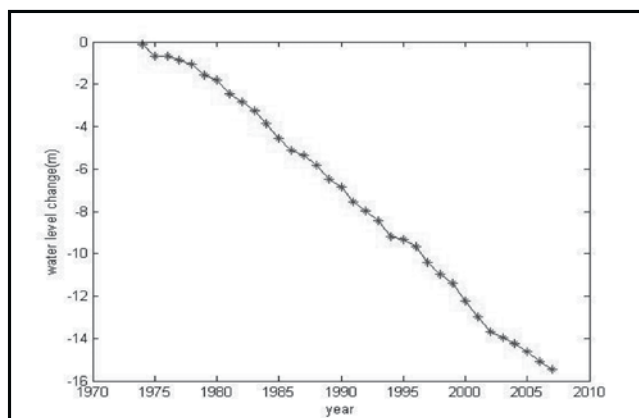
شکل ۸- سری زمانی فرونشست در یزد



شکل ۹- مقایسه اندازه گیری های تداخل سنجی راداری و تراز یابی دقیق در جهت خط دید ماهواره.



شکل ۱۰- نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه اردکان، منطقه فرونشست روی منطقه هاشور زده واقع شده است.



شکل ۱۱- وضعیت سطح آبخوان حوضه یزد اردکان طی سال های ۱۳۸۶-۱۳۵۲.

کتابنگاری

اسلامی زاده، ع.، زارع مهرجردی، ا.ع. و سامانی راد، ش.، ۱۳۸۶- بررسی پدیده نشست زمین و شکستگی های موجود در منطقه رستاق جنوب میبد، همایش ملی معدن، اسفندماه، دانشگاه آزاد اسلامی بافق

آمیغی، م.، عربی، س.، طالبی، ع. و جموری، ی.، ۱۳۸۶- بررسی مناطق فرونشست ایران بر اساس داده های ترازایی، همایش ژئوماتیک ۸۶ اردیبهشت ماه، تهران، ایران.

عالمی، ا.، ۱۳۸۱- بررسی علل نشست زمین در دشت یزد- اردکان، سومین همایش بین المللی همایش ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، آذر ماه، پژوهشگاه نیرو، تهران.

گروه زمین شناسی مهندسی سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۳- فرونشست و پیامدهای نامطلوب آن در ایران و جهان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، بهمن ماه.

References

- Amighpey, M. & Jamoor, Y., 2007- Studying Yazd subsidence in central Iran by radar interferometry and precise leveling, esa category-1 proposal, <http://eopi.esa.int>
- Amighpey, M., Mousavi, Z., Nankali, H., Arabi, S., Sedighi, M. & Hosseini, S., 2008- Studying subsidence in Iran with leveling and permanent GPS observations, *egu*.
- Amighpey, M., Vosooghi, B. & Dehghani, M., 2009- Earth surface deformation analysis of 2005 Qeshm earthquake based on three dimensional displacement field of derived from radar imagery measurements , *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, February.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E., 2002- Geoscience and Remote Sensing, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Volume 40, Issue 11, Nov 2002 Page(s): 2375 – 2383*, doi: 10.1109/TGRS. 803792
- Funning, Gareth J., Parsons, B., Wright, T., Jackson, James A., Fielding, Eric J., 2005- Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery , *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 110, B09406, doi:10.1029/2004JB003338.
- Massonnet, D. & Feigl, K., 1998- radar interferometry and its application to changes in the earths surface, *Reviews of Geophysics*, pages 441-500, 36, 4 /November.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzal, H. U., Zschau, J. & Arabi, S., 2007- Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran; results from InSAR, levelling and GPS, *Geophys. J. Int.*, 168(2), 518–526.
- Singhroy, V., Couture, R., Molch, K. & Poncos, V., 2006- InSAR Monitoring of Post-Landslide Activity , *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2006. IEEE International Conference on Volume , Issue , July 31 2006-Aug. 4 2006 Page(s):1635 – 1638*, Digital Object Identifier 10.1109/IGARSS.2006.422