

جغرافیا (فصلنامه علمی - پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)
دوره جدید، سال چهاردهم، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۵

سنجش مقدار و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار^۱

امیر صفاری^۲ و فرهاد جعفری^۳

تاریخ وصول: ۱۳۹۴/۱۰/۳۰، تاریخ تایید: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰

چکیده

فرونشست زمین طبق تعریف ارائه شده توسط یونسکو عبارت است از فرو ریزش یا نشست سطح زمین که به دلایل متفاوتی در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد. فرونشست عنوان پدیده‌ای مورفولوژیک است و ظهور طیف وسیعی از عوارض مورفولوژیک ناشی از آن همانند ایجاد درز و ترک در سازه‌ها؛ تغییر در شکل و هندسه سطحی زمین از جمله عمومی‌ترین رخنمون‌های قابل رویت ناشی از این پدیده است. امروزه بدلیل حاکم بودن شرایط اقلیمی خشک و تمرکز بهره‌برداری روزافزون از منابع آب زیرزمینی زیرساخت مناسبی برای این پدیده فراهم شده است. رویداد این حادثه در دشت‌ها؛ باعث تخریب سازه‌های زیرسطحی و سطحی در اثر ایجاد شکاف در زمین می‌شود (Galloway, D., Hudnut, K., 1998). بنابراین به منظور ارزیابی خطر و مدیریت بهتر منابع، کنترل دقیق زمانی و مکانی تغییرات سطح زمین مورد نیاز است.

با ظهور داده‌های باحد تفکیک مکانی و فرکانس تصویربرداری بالای راداری؛ تحولی عظیم در زمینه پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری بوجود آمده است. در این تحقیق از داده‌های راداری ماهواره Envisat به منظور پایش جابجایی سطح زمین ناشی از فرونشست در دشت کرج - شهریار استفاده شده است. جهت پردازش تصاویر رادار بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ از روش Stamps و نیز جهت کاهش خطاهای ناشی از خط مبنای زمانی و مکانی از تحلیل سری زمانی با روش Sbas استفاده گردیده است. نتایج حاصل از فرایند تداخل‌سنجی راداری انجام شده بیانگر نرخ نشست متوسط سالانه حداکثر ۱۳۶ میلی‌متر در بازه زمانی مورد اشاره است.

کلیدواژگان: فرونشست زمین، تکنیک پردازش Stamps، سری زمانی با روش Sbas.

۱. این مقاله مستخرج از رساله دکتری فرهاد جعفری است.

۲. دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی

۳. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه خوارزمی

مقدمه

برای اندازه‌گیری فرونشست زمین، روش تداخل‌سنجی راداری با دهانه ترکیبی^۱ یا InSAR در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های غیرژئودتیک با توجه به مزایایی که نسبت به دیگر روشها دارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش در میان روش‌های زمینی و فضایی به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به‌شمار می‌رود (Peltzer et al., 1998; Tesauro et al., 2000; Crosato et al., 2002; Ferneau & Sarti, 2000).

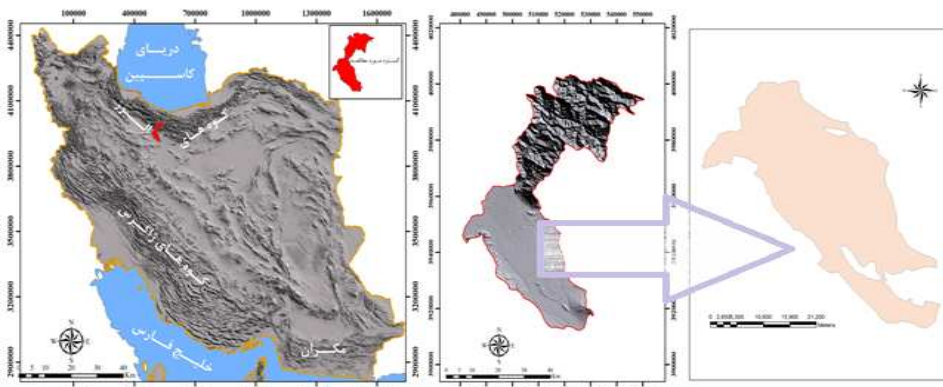
برخی مطالعات، روش تداخل‌سنجی راداری را به‌منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده کرده‌اند (Chang et al., 2004; Motagh et al., 2006). از جمله مزایای این روش می‌توان به دقت بسیار بالا، پوشش وسیع، قدرت تفکیک مکانی بالا و نداشتن نیاز به کار میدانی، مقرون به صرفه بودن و امکان دستیابی به اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی اشاره کرد. در این فناوری با استفاده از تلفیق داده‌های به‌دست آمده از سامانه‌های تصویربرداری رادار نصب شده بر سکوه‌های ماهواره‌های یا هواپیمایی، حرکت، ارتفاع و تغییرات سطح زمین نقشه‌برداری می‌شوند. اساس کار در اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین، استفاده از تصاویر تکراری رادار است. تصویری که از یک منطقه در یک زمان مشخص برداشت می‌شود، با تصویری که در زمان دیگر توسط همان سنجنده رادار برداشت می‌گردد، تلفیق می‌شود. روش تداخل‌سنجی راداری، شناسایی مناطق در حال نشست و تعیین وسعت آنها را ممکن می‌سازد. روش‌های تداخل‌سنجی راداری سنتی به‌طور گسترده‌ای به‌منظور مشخص کردن فشردگی سفره آب زیرزمینی در مقیاس زمانی زیاد، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تحلیل سری زمانی جابجایی به کمک تداخل‌سنجی راداری به تازگی به‌عنوان روشی برای توصیف رفتار مکانی و زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت فرونشست توسعه یافته است.

سنجنده‌های راداری متفاوتی، اطلاعات موردنیاز در اختیار قرار می‌دهند. در میان این ماهواره‌ها، Envisat کشور ایران را به‌طور مطلوبی پوشش می‌دهند.

1. synthetic aperture radar interferometry

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه قسمتی از دشت تهران - کرج می باشد. که به لحاظ سیاسی در استانهای تهران و البرز قرار گرفته و به لحاظ تقسیمات طبیعی در حوضه کرج و دقیقاً منطبق بر بخش مخروط‌افکنه‌ای کرج واقع شده است. حوضه طبیعی کرج از نظر تقسیمات سیاسی عمدتاً منطبق بر بخش آسارا است. سد کرج در حوضه آبریز آن قرار دارد و رود کرج مهم‌ترین رود و تأمین‌کننده اصلی رسوبات مخروط‌افکنه آن می‌باشد. گستره حوضه آبخیز از نظر مختصات جغرافیایی در محدوده بین $50^{\circ}47'$ تا $51^{\circ}34'$ طول شرقی و $35^{\circ}21'$ تا $36^{\circ}11'$ عرض شمالی قرار دارد. وسعت حوضه آبریز آن در حدود ۱۲۰۰ کیلومترمربع و مساحت مخروط‌افکنه آن که منطبق بر دشت محدوده مورد مطالعه است در حدود ۹۰۰ کیلومترمربع است. محدوده مورد مطالعه که تحت عنوان دشت (مخروط افکنه‌ای) کرج - شهریار از حوضه آبخیز تفکیک شده است دقیقاً منطبق با آبخوان است. این دشت نیز دارای مختصات $50^{\circ}47'$ و $51^{\circ}20'$ طول جغرافیایی و $35^{\circ}21'$ و $35^{\circ}48'$ عرض جغرافیایی قرار دارد. به لحاظ فیزیوگرافی محیط دشت ۱۶۵ کیلومتر است. شهر کرج تقریباً در رأس این دشت مخروط قرار گرفته است. از رأس به سمت قاعده این مخروط به دلیل شرایط مناسب آب و هوایی و منابع آن شهرهای متعدد و نسبتاً بزرگی به وجود آمده‌اند. از مهم‌ترین شهرهای موجود بر سطح این مخروط می‌توان به کرج، محمدشهر، ملارد، شهریار، وحیدیه، صباشهر، رباط‌کریم، اشاره کرد.



نقشه ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

داده‌ها و شیوه پژوهش

داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های راداری در این پژوهش، بر مبنای پردازش داده‌های راداری با روزنه مجازی SAR در Track (مسیر) ۱۴۹ می‌باشد. تصاویر راداری موردنظر از سنجنده ASAR ماهواره Envisat سازمان فضائی اروپا با فرمت SLC^۱ از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV اخذ شده است. این نوع داده‌ها، داده‌های خامی هستند که تنها پردازش‌های اولیه بر روی آن‌ها انجام گرفته و به تصاویر تک منظر تبدیل شده‌اند و اطلاعات آنها به هیچ عنوان مخدوش نگردیده است. از این رو نه تنها سرعت پردازش را بالا برده‌ایم بلکه اطلاعات نیز به صورت دست نخورده باقی مانده‌اند. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی^۲ نیز جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین یا به دست آوردن جایجایی‌ها در جهات مختلف با استفاده از ایتترفرومتری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با عنایت به اینکه در این پژوهش هدف پایش میزان فرونشست است، داده‌های نزولی کفایت می‌کند.

نرخ تکرار تصویربرداری آنها این ماهواره ۳۵ روز یکبار می‌باشد. تعداد ۲۴ تصویر قابل استفاده مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ از طریق نرم‌افزار Doris مورد پردازش قرار گرفت (جدول شماره ۱).

جدول ۱. دوره زمانی و تصاویر مورد استفاده

زاویه تصویر برداری	قدرت تفکیک مکانی عمود بر پرواز	قدرت تفکیک مکانی در امتداد پرواز (متر)	حالت مداری	تاریخ	
				شمسی	میلادی
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۴/۲۷	۲۰۰۳/۰۷/۱۸
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۰۵/۳۱	۲۰۰۳/۰۸/۲۲
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۰۷/۰۴	۲۰۰۳/۰۹/۲۶
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۰۹/۱۴	۲۰۰۳/۱۲/۰۵
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۱۰/۱۹	۲۰۰۴/۰۱/۰۹
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۱۱/۲۴	۲۰۰۴/۰۲/۱۳
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۲/۱۲/۲۹	۲۰۰۴/۰۳/۱۹

1. Single looking complex
2. Ascending and Descending

زاویه تصویر برداری	قدرت تفکیک مکانی عمود بر پرواز	قدرت تفکیک مکانی در امتداد پرواز(متر)	حالت مداری	تاریخ	
				شمسی	میلادی
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۲۰۰۴/۰۴/۲۳
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۳/۰۸	۲۰۰۴/۰۵/۲۸
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۵/۱۶	۲۰۰۴/۰۸/۰۶
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۶/۲۰	۲۰۰۴/۰۹/۱۰
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۷/۲۴	۲۰۰۴/۱۰/۱۵
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۴/۱۱/۱۹
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۴/۱۲/۲۴
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۴/۰۲/۲۳	۲۰۰۵/۰۵/۱۳
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۴	۲۰۰۵/۸/۲۶
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۴/۱۱/۱۷	۲۰۰۶/۰۲/۱۷
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۵/۰۲/۰۸	۲۰۰۶/۰۴/۲۸
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۷/۲/۱۳	۲۰۰۸/۰۵/۰۲
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۷/۴/۲۱	۲۰۰۸/۰۷/۱۱
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۷/۶/۲۹	۲۰۰۸/۰۹/۱۹
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۷/۷/۳	۲۰۰۸/۱۰/۲۴
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۸/۹/۲۷	۲۰۰۹/۱۲/۱۸
۱۹-۲۶	۲۰	۳/۸	نزولی	۱۳۸۹/۲/۱۷	۲۰۱۰/۰۵/۷

از آنجا که انتظار می‌رفت این منطقه تحت فرونشست ناشی از فرونشست دشت تهران باشد بنابراین بدنال جایجایی‌های بسیار محلی و کوچک نبوده‌ایم. از این‌رو، بنظر می‌رسد که این مجموعه داده‌ها برای بررسی منطقه مطلوب باشند. رزولوشن مکانی تصاویر سنجنده ASAR ماهواره Envisat در جهت رنج برابر ۲۰ متر و در جهت آزیموت برابر ۴ متر می‌باشد که آنها را در دسته سنجنده‌های با حد تفکیک متوسط قرار می‌دهد. هر تصویر دارای ابعاد ۱۰۵×۱۰۵ است کیلومتر با فرمت complex real در باند C (با طول موج ۵/۶ سانتیمتر) ذخیره می‌گردد.

روش و شیوه پژوهش

تکنیک‌های مختلفی جهت برآورد و تخمین این میزان مورد استفاده قرار گرفته است. تداخل سنجی از جمله جدیدترین و درعین حال دقیقترین تکنیکی است که این مقاله به دنبال استفاده از آن در برآورد میزان فرونشست زمین با دقت میلی‌متر در دشت کرج - شهریار است. این تکنیک از

اختلاف فاز میان دو تصویر (که از یک منطقه در دو زمان متفاوت گرفته شده‌اند) و تشکیل اینترفروگرام به‌منظور برآورد تغییر شکل منطقه استفاده می‌کند. لازم به ذکر است اینترفروگرام تصویری است که حاوی اختلاف فاز دو تصویر راداریست که به دقت نسبت به هم ثبت هندسی شده‌اند (Daniel, R., C., Maisons, C., Carnec, S., Le Mouelic, C., King and S., Hosford 2003).

اگرچه کلیت تکنیک "سار" برای پردازش یکسان است، اما فرایند پردازش طی سالهای گذشته توسعه یافته و به شیوه‌های مختلف انجام می‌گردد. هنگامی که چندین تصویر در بازه‌های زمانی متفاوت در دسترس باشد و برای محاسبه نرخ تغییر شکل چندین اینترفروگرام از این تصاویر مورد محاسبه قرار گیرد با شیوه سنتی و متداول D-insar^۱ مواجهیم. اما در مناطقی؛ نظیر منطقه مورد مطالعه؛ که دارای تغییر شکل سیمای ظاهری سریع باشند مانند زمین‌های مزروعی؛ باغات و زمین‌های مسکونی، اینترفروگرام‌ها با این شیوه همبستگی پایینی را تشکیل می‌دهند. Mahmoudpour, (2013) Khamsehchiyan که امر پایش را دچار اشکال و خطا می‌نمایند. به عبارتی از آنجاییکه داده‌های مورد استفاده به شدت به تغییرات حساس هستند، امکان تشکیل اینترفروگرام‌های همبسته با روش متداول وجود نداشته و از روش SBAS به‌منظور پردازش اینترفرومتری و تحلیل سری زمانی داده‌ها استفاده می‌گردد. در این روش به‌منظور آنکه از ایجاد خط مبنای مکانی بلند که موجب بروز بیشتر خطای توپوگرافی در فازها می‌شود، جلوگیری شود به‌جای آنکه اینترفروگرام‌ها تنها نسبت به یک مرجع تشکیل شوند، در میان آن دسته از تصاویری که دارای خط مبنای مکانی و زمانی کوتاه‌تری هستند تشکیل می‌گردند. جدول شماره ۲ جدول زمانی و نیز تعداد ۸۲ اینترفروگرام تشکیل شده نسبت به یک مرجع زمانی و نمودار شماره ۱ خط مبنای زمانی و مکانی تصاویر و اینترفروگرام‌های برگزیده را نشان می‌دهند.

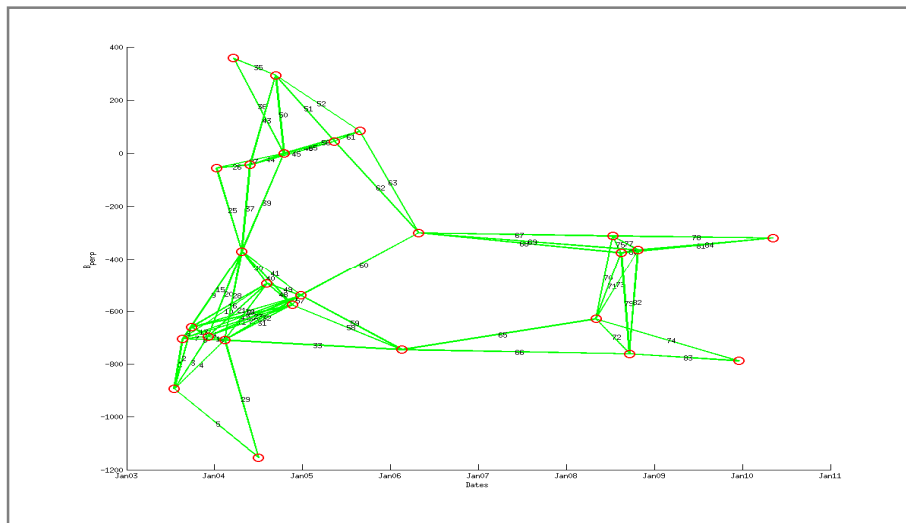
1. Differential interferometry

جدول ۲. ایتروفروگرام‌های تهیه شده از تصاویر به همراه خط مبنای زمانی

خط مبنای زمانی	تاریخ	
	شمسی	میلادی
روز ۳۴	۱۳۸۲/۴/۲۷-۱۳۸۲/۵/۳۱	۲۰۰۳/۰۷/۱۸-۲۰۰۳/۰۸/۲۲
روز ۶۹	۱۳۸۲/۴/۲۷-۱۳۸۲/۰۷/۴	۲۰۰۳/۰۷/۱۸-۲۰۰۳/۹/۲۶
روز ۱۳۹	۱۳۸۲/۴/۲۷-۱۳۸۲/۰۹/۱۴	۲۰۰۳/۰۷/۱۸-۲۰۰۳/۱۲/۰۵
روز ۲۰۹	۱۳۸۲/۴/۲۷-۱۳۸۲/۱۱/۲۴	۲۰۰۳/۰۷/۱۸-۲۰۰۴/۰۲/۱۳
روز ۳۴۹	۱۳۸۲/۴/۲۷-۱۳۸۳/۰۴/۱۲	۲۰۰۳/۰۷/۱۸-۲۰۰۴/۰۷/۰۲
روز ۳۵	۱۳۸۲/۰۵/۳۱-۱۳۸۲/۰۷/۰۴	۲۰۰۳/۰۸/۲۲-۲۰۰۳/۰۹/۲۶
روز ۱۰۵	۱۳۸۲/۰۵/۳۱-۱۳۸۲/۰۹/۱۴	۲۰۰۳/۰۸/۲۲-۲۰۰۳/۱۲/۰۵
روز ۱۷۵	۱۳۸۲/۰۵/۳۱-۱۳۸۲/۱۱/۲۴	۲۰۰۳/۰۸/۲۲-۲۰۰۴/۰۲/۱۳
روز ۲۱۵	۱۳۸۲/۰۵/۳۱-۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۲۰۰۳/۰۸/۲۲-۲۰۰۴/۰۴/۲۳
روز ۳۲۰	۱۳۸۲/۰۵/۳۱-۱۳۸۳/۰۵/۱۶	۲۰۰۳/۰۸/۲۲-۲۰۰۴/۰۸/۰۶
روز ۴۵۵	۱۳۸۲/۰۵/۳۱-۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۳/۰۸/۲۲-۲۰۰۴/۱۱/۱۹
روز ۴۹۰	۱۳۸۲/۰۵/۳۱-۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۳/۰۸/۲۲-۲۰۰۴/۱۲/۲۴
روز ۷۰	۱۳۸۲/۰۷/۰۴-۱۳۸۲/۰۹/۱۴	۲۰۰۳/۰۹/۲۶-۲۰۰۳/۱۲/۰۵
روز ۱۴۰	۱۳۸۲/۰۷/۰۴-۱۳۸۲/۱۱/۲۴	۲۰۰۳/۰۹/۲۶-۲۰۰۴/۰۲/۱۳
روز ۱۸۰	۱۳۸۲/۰۷/۰۴-۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۲۰۰۳/۰۹/۲۶-۲۰۰۴/۰۴/۲۳
روز ۲۸۵	۱۳۸۲/۰۷/۰۴-۱۳۸۳/۰۵/۱۶	۲۰۰۳/۰۹/۲۶-۲۰۰۴/۰۸/۰۶
روز ۴۲۰	۱۳۸۲/۰۷/۰۴-۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۳/۰۹/۲۶-۲۰۰۴/۱۱/۱۹
روز ۴۵۵	۱۳۸۲/۰۷/۰۴-۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۳/۰۹/۲۶-۲۰۰۴/۱۲/۲۴
روز ۷۰	۱۳۸۲/۰۹/۱۴-۱۳۸۲/۱۱/۲۴	۲۰۰۳/۱۲/۰۵-۲۰۰۴/۰۲/۱۳
روز ۱۴۰	۱۳۸۲/۰۹/۱۴-۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۲۰۰۳/۱۲/۰۵-۲۰۰۴/۰۴/۲۳
روز ۱۸۶	۱۳۸۲/۰۹/۱۴-۱۳۸۳/۰۵/۱۶	۲۰۰۳/۱۲/۰۵-۲۰۰۴/۰۸/۰۶
روز ۳۵۰	۱۳۸۲/۰۹/۱۴-۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۳/۱۲/۰۵-۲۰۰۴/۱۱/۱۹
روز ۳۸۵	۱۳۸۲/۰۹/۱۴-۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۳/۱۲/۰۵-۲۰۰۴/۱۲/۲۴
روز ۷۰	۱۳۸۲/۱۰/۱۹-۱۳۸۲/۱۲/۲۹	۲۰۰۴/۰۱/۰۹-۲۰۰۴/۰۳/۱۹
روز ۱۰۵	۱۳۸۲/۱۰/۱۹-۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۲۰۰۴/۰۱/۰۹-۲۰۰۴/۰۴/۲۳
روز ۱۴۰	۱۳۸۲/۱۰/۱۹-۱۳۸۳/۰۳/۰۸	۲۰۰۴/۰۱/۰۹-۲۰۰۴/۰۵/۲۸
روز ۲۸۰	۱۳۸۲/۱۰/۱۹-۱۳۸۳/۰۷/۲۴	۲۰۰۴/۰۱/۰۹-۲۰۰۴/۱۰/۱۵
روز ۷۰	۱۳۸۲/۱۱/۲۴-۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۲۰۰۴/۰۲/۱۳-۲۰۰۴/۰۴/۲۳
روز ۱۴۰	۱۳۸۲/۱۱/۲۴-۱۳۸۳/۰۴/۱۲	۲۰۰۴/۰۲/۱۳-۲۰۰۴/۰۷/۰۲

خط مبنای زمانی	تاریخ	
	شمسی	میلادی
روز ۱۷۵	۱۳۸۲/۱۱/۲۴-۱۳۸۳/۰۵/۱۶	۲۰۰۴/۰۲/۱۳-۲۰۰۴/۰۸/۰۶
روز ۲۸۰	۱۳۸۲/۱۱/۲۴-۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۴/۰۲/۱۳-۲۰۰۴/۱۱/۱۹
روز ۳۱۵	۱۳۸۲/۱۱/۲۴-۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۴/۰۲/۱۳-۲۰۰۴/۱۲/۲۴
روز ۷۳۵	۱۳۸۲/۱۱/۲۴-۱۳۸۴/۱۱/۲۸	۲۰۰۴/۰۲/۱۳-۲۰۰۶/۰۲/۱۷
روز ۷۰	۱۳۸۲/۱۲/۲۹-۱۳۸۳/۰۳/۰۸	۲۰۰۴/۰۳/۱۹-۲۰۰۴/۰۵/۲۸
روز ۱۷۵	۱۳۸۲/۱۲/۲۹-۱۳۸۳/۰۶/۲۰	۲۰۰۴/۰۳/۱۹-۲۰۰۴/۰۹/۱۰
روز ۲۱۰	۱۳۸۲/۱۲/۲۹-۱۳۸۳/۰۷/۲۴	۲۰۰۴/۰۳/۱۹-۲۰۰۴/۱۰/۱۵
روز ۳۵	۱۳۸۳/۰۲/۰۴-۱۳۸۳/۰۳/۰۸	۲۰۰۴/۰۴/۲۳-۲۰۰۴/۰۵/۲۸
روز ۱۰۵	۱۳۸۳/۰۲/۰۴-۱۳۸۳/۰۵/۱۶	۲۰۰۴/۰۴/۲۳-۲۰۰۴/۰۸/۰۶
روز ۱۷۵	۱۳۸۳/۰۲/۰۴-۱۳۸۳/۰۷/۲۴	۲۰۰۴/۰۴/۲۳-۲۰۰۴/۱۰/۱۵
روز ۲۱۰	۱۳۸۳/۰۲/۰۴-۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۴/۰۴/۲۳-۲۰۰۴/۱۱/۱۹
روز ۲۴۵	۱۳۸۳/۰۲/۰۴-۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۴/۰۴/۲۳-۲۰۰۴/۱۲/۲۴
روز ۷۰	۱۳۸۳/۰۳/۰۸-۱۳۸۳/۰۵/۱۶	۲۰۰۴/۰۵/۲۸-۲۰۰۴/۰۸/۰۶
روز ۱۰۵	۱۳۸۳/۰۳/۰۸-۱۳۸۳/۰۳/۲۱	۲۰۰۴/۰۵/۲۸-۲۰۰۴/۰۹/۱۰
روز ۱۴۰	۱۳۸۳/۰۳/۰۸-۱۳۸۳/۰۴/۲۵	۲۰۰۴/۰۵/۲۸-۲۰۰۴/۱۰/۱۵
روز ۳۵۰	۱۳۸۳/۰۳/۰۸-۱۳۸۴/۰۲/۲۳	۲۰۰۴/۰۵/۲۸-۲۰۰۵/۰۵/۱۳
روز ۴۵۵	۱۳۸۳/۰۳/۰۸-۱۳۸۴/۰۶/۰۴	۲۰۰۴/۰۵/۲۸-۲۰۰۵/۰۸/۲۶
روز ۷۰	۱۳۸۳/۰۵/۱۶-۱۳۸۳/۰۷/۲۴	۲۰۰۴/۰۸/۰۶-۲۰۰۴/۱۰/۱۵
روز ۱۰۵	۱۳۸۳/۰۵/۱۶-۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۴/۰۸/۰۶-۲۰۰۴/۱۱/۱۹
روز ۱۴۰	۱۳۸۳/۰۵/۱۶-۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۴/۰۸/۰۶-۲۰۰۴/۱۲/۲۴
روز ۳۵	۱۳۸۳/۰۶/۲۰-۱۳۸۳/۰۷/۲۴	۲۰۰۴/۰۹/۱۰-۲۰۰۴/۱۰/۱۵
روز ۲۴۵	۱۳۸۳/۰۶/۲۰-۱۳۸۴/۰۲/۲۳	۲۰۰۴/۰۹/۱۰-۲۰۰۵/۰۵/۱۳
روز ۳۵۰	۱۳۸۳/۰۶/۲۰-۱۳۸۴/۰۵/۰۴	۲۰۰۴/۰۹/۱۰-۲۰۰۵/۰۸/۲۶
روز ۳۵	۱۳۸۳/۰۷/۲۴-۱۳۸۳/۰۸/۲۹	۲۰۰۴/۱۰/۱۵-۲۰۰۴/۱۱/۱۹
روز ۷۰	۱۳۸۳/۰۷/۲۴-۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۴/۱۰/۱۵-۲۰۰۴/۱۲/۲۴
روز ۲۱۰	۱۳۸۳/۰۷/۲۴-۱۳۸۴/۰۲/۲۳	۲۰۰۴/۱۰/۱۵-۲۰۰۵/۰۵/۱۳
روز ۳۱۵	۱۳۸۳/۰۷/۲۴-۱۳۸۴/۰۶/۰۴	۲۰۰۴/۱۰/۱۵-۲۰۰۵/۰۸/۲۶
روز ۳۵	۱۳۸۳/۰۸/۲۹-۱۳۸۳/۱۰/۰۴	۲۰۰۴/۱۱/۱۹-۲۰۰۴/۱۲/۲۴
روز ۴۵۵	۱۳۸۳/۰۸/۲۹-۱۳۸۴/۱۱/۲۸	۲۰۰۴/۱۱/۱۹-۲۰۰۶/۰۲/۱۷
روز ۴۲۰	۱۳۸۳/۱۰/۰۴-۱۳۸۴/۱۱/۲۸	۲۰۰۴/۱۲/۲۴-۲۰۰۶/۰۲/۱۷

خط مبنای زمانی	تاریخ	
	شمسی	میلادی
روز ۴۹۰	۱۳۸۳/۱۰/۰۴-۱۳۸۵/۰۲/۰۸	۲۰۰۴/۱۲/۲۴-۲۰۰۶/۰۴/۲۸
روز ۱۰۵	۱۳۸۴/۰۲/۲۳-۱۳۸۴/۰۶/۰۴	۲۰۰۵/۰۵/۱۳-۲۰۰۵/۰۸/۲۶
روز ۳۵۰	۱۳۸۴/۰۲/۲۳-۱۳۸۵/۰۲/۰۸	۲۰۰۵/۰۵/۱۳-۲۰۰۶/۰۴/۲۸
روز ۷۰	۱۳۸۴/۱۱/۲۸-۱۳۸۵/۰۲/۰۸	۲۰۰۶/۰۲/۱۷-۲۰۰۶/۰۴/۲۸
روز ۸۰۵	۱۳۸۴/۱۱/۲۸-۱۳۸۷/۰۲/۱۳	۲۰۰۶/۰۲/۱۷-۲۰۰۸/۰۵/۰۲
روز ۹۴۵	۱۳۸۴/۱۱/۲۸-۱۳۸۷/۰۶/۲۹	۲۰۰۶/۰۲/۱۷-۲۰۰۸/۰۹/۱۹
روز ۸۰۵	۱۳۸۵/۰۲/۰۸-۱۳۸۷/۰۴/۲۱	۲۰۰۶/۰۴/۲۸-۲۰۰۸/۰۷/۱۱
روز ۸۴۰	۱۳۸۵/۰۲/۰۸-۱۳۸۷/۰۵/۲۵	۲۰۰۶/۰۴/۲۸-۲۰۰۸/۰۸/۱۵
روز ۹۱۰	۱۳۸۵/۰۲/۰۸-۱۳۸۷/۰۸/۰۳	۲۰۰۶/۰۴/۲۸-۲۰۰۸/۱۰/۲۴
روز ۷۰	۱۳۸۷/۲/۱۳-۱۳۸۷/۰۴/۲۱	۲۰۰۸/۰۵/۰۲-۲۰۰۸/۰۷/۱۱
روز ۱۰۵	۱۳۸۷/۲/۱۳-۱۳۸۷/۰۵/۲۵	۲۰۰۸/۰۵/۰۲-۲۰۰۸/۰۸/۱۵
روز ۱۴۰	۱۳۸۷/۲/۱۳-۱۳۸۷/۰۶/۲۹	۲۰۰۸/۰۵/۰۲-۲۰۰۸/۰۹/۱۹
روز ۱۷۵	۱۳۸۷/۲/۱۳-۱۳۸۷/۰۷/۳	۲۰۰۸/۰۵/۰۲-۲۰۰۸/۱۰/۲۴
روز ۵۹۵	۱۳۸۷/۲/۱۳-۱۳۸۷/۰۹/۲۸	۲۰۰۸/۰۵/۰۲-۲۰۰۹/۱۲/۱۸
روز ۳۵	۱۳۸۷/۰۴/۲۱-۱۳۸۷/۰۵/۲۵	۲۰۰۸/۰۷/۱۱-۲۰۰۸/۰۸/۱۵
روز ۷۰	۱۳۸۷/۰۴/۲۱-۱۳۸۷/۰۶/۲۹	۲۰۰۸/۰۷/۱۱-۲۰۰۸/۰۹/۱۹
روز ۱۰۵	۱۳۸۷/۰۴/۲۱-۱۳۸۷/۰۷/۳	۲۰۰۸/۰۷/۱۱-۲۰۰۸/۱۰/۲۴
روز ۶۶۵	۱۳۸۷/۰۴/۲۱-۱۳۸۹/۰۲/۱۷	۲۰۰۸/۰۷/۱۱-۲۰۱۰/۰۵/۰۷
روز ۳۵	۱۳۸۷/۰۵/۲۵-۱۳۸۷/۰۶/۲۹	۲۰۰۸/۰۸/۱۵-۲۰۰۸/۰۹/۱۹
روز ۷۰	۱۳۸۷/۰۵/۲۵-۱۳۸۷/۰۷/۳	۲۰۰۸/۰۸/۱۵-۲۰۰۸/۱۰/۲۴
روز ۶۳۰	۱۳۸۷/۰۵/۲۵-۱۳۸۹/۰۲/۱۳	۲۰۰۸/۰۸/۱۵-۲۰۱۰/۰۵/۰۷
روز ۳۵	۱۳۸۷/۰۶/۲۹-۱۳۸۷/۰۷/۲۴	۲۰۰۸/۰۹/۱۹-۲۰۰۸/۱۰/۲۴
روز ۴۵۵	۱۳۸۷/۰۶/۲۹-۱۳۸۸/۰۹/۲۷	۲۰۰۸/۰۹/۱۹-۲۰۰۹/۱۲/۱۸
روز ۵۶۰	۱۳۸۷/۰۷/۳-۱۳۸۹/۰۲/۱۷	۲۰۰۸/۱۰/۲۴-۲۰۱۰/۰۵/۰۷



نمودار ۱. انتخاب تصاویر بر مبنای کمترین خط مبنای زمانی (روز) و مکانی (متر)

معرفی روش SBAS^۱

یکی از مهمترین روش‌ها برای پایش جابه‌جایی در یک منطقه در طول یک سری زمانی، استفاده از روش SBAS است (bigg, 2004). این تکنیک متکی است بر ترکیب مناسب از اینترنتروگرام‌های بوجود آمده از زوج تصاویر "سار" که مشخصه آن خط مبنای کوچک است. این کوچکی باعث کاهش ناهمبستگی‌ها در تصاویر می‌گردد (T. R. Lauknes, 2004). این روش به‌طور کلی شامل مراحل زیر است:

- تشکیل اینترنتروگرام‌ها،
- بازیابی فاز،
- تخمین فاز جابه‌جایی و
- محاسبه سری زمانی

در روش SBAS مدلی که برای فاز برآورد شده در نظر گرفته می‌شود بصورت زیر است:

$$\Delta\phi_{\text{nois}} + \Delta\phi_{\text{atm}} + \Delta\phi_{\text{orbit}} + \Delta\phi_{\text{topo}} + \Delta\phi_{\text{def}} = \Delta\phi \quad \text{معادله}$$

1. Small Baseline Subset (SBAS) technique

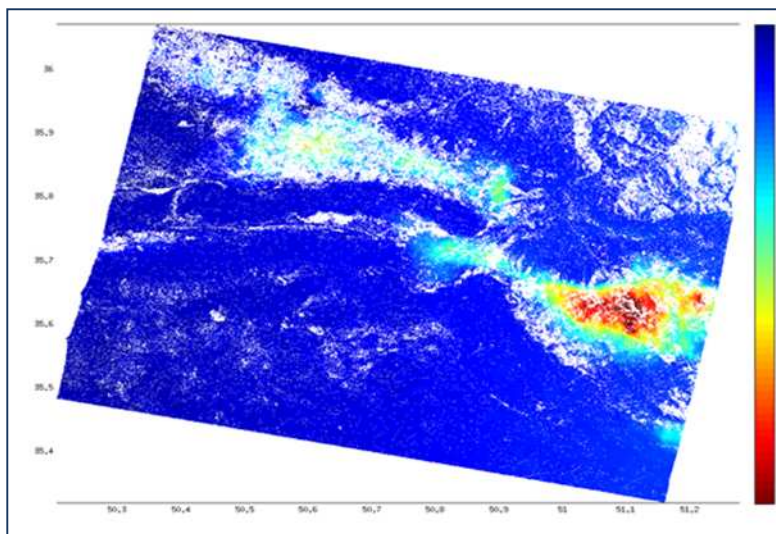
مدل ارائه شده نشان‌دهنده آن است که فاز برآورد شده ترکیبی از فاز جابه‌جایی، فاز مربوط به اثر توپوگرافی، اثر اتمسفر، اثر خطای مداری و اثر مربوط به نویز است. بنابراین ابتدا باید این فازها را برآورد کرده و از فاز تخمین زده شده کسر نمایید تا به فاز صحیح جابه‌جایی برسید. ابتدا به منظور حذف اثر توپوگرافی یک اینترفروگرام از روی DEM منطقه در هندسه رادار شبیه‌سازی شده و از اینترفروگرام‌ها کسر می‌گردد. سپس به منظور حذف اثر نویز یک فیلتر تطبیقی بر روی اینترفروگرام‌ها اعمال شد. اندازه پنجره مورد استفاده در این فیلتر باید به گونه‌ای باشد که در عین نرم نمودن اینترفروگرام‌ها به منظور کاهش اثر نویز، اطلاعات موجود در آن‌ها را نیز حفظ نماید. بدین صورت با اعمال این فیلتر درجه همبستگی اینترفروگرام‌ها تا حد زیاد افزایش می‌یابد که موجب کاهش خطا در مرحله بازیابی فاز می‌شود. روش مورد استفاده در مرحله بازیابی فاز روش Stamps است.

محاسبه سری زمانی

به منظور بررسی سری زمانی در ابتدا باید اثر خطای مداری را از اینترفروگرام‌ها حذف نمایید. بدین منظور صفحه‌ای را به کمک نقاط خارج از محدوده فرورانشست و حتی‌الامکان دور از آن بر روی منطقه برازش داده و آن را از اینترفروگرام‌ها کم می‌نمایید. همچنین یک نقطه در منطقه به عنوان نقطه مرجع انتخاب شده و جابه‌جایی‌ها نسبت به آن محاسبه می‌شود. همچنین در میان تصاویر یک تصویر به عنوان تاریخ مبدا انتخاب می‌شود تا تغییرات تصاویر همگی نسبت به آن مبدا زمانی سنجیده شوند (جدول شماره ۲). سپس اینترفروگرام‌ها وارد سرشکنی کمترین مربعات می‌شوند. اینترفروگرام‌ها نقش مشاهدات را دارا بوده و مجهولات فاز مربوط به جابه‌جایی در هر ایک تصویربرداری است.

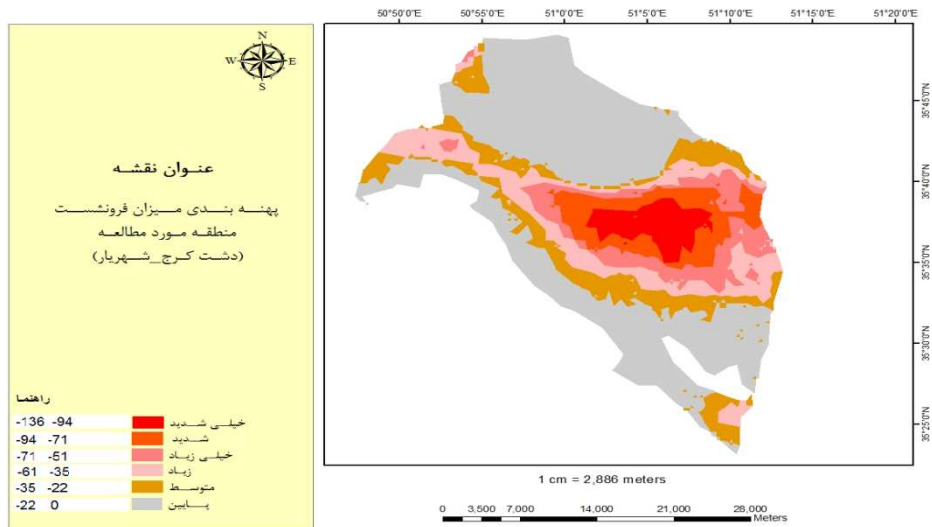
پس از برآورد فاز جابه‌جایی در هر ایک زمانی، میزان جابه‌جایی در هر ایک بازای هر پیکسل اینترفروگرام‌ها با ضرب ضریب $\lambda/4\pi$ در فاز برآورد شده به دست می‌آید. بدین صورت می‌توان سری زمانی در هر پیکسل را به ازای هر ایک تصویربرداری ترسیم نمود. حال به هر سری زمانی خطی برازش داده می‌شود که از روی آن می‌توان سرعت متوسط جابه‌جایی را در هر پیکسل در بازه زمانی موردنظر به دست آورد. بدین صورت نرخ متوسط جابه‌جایی در سال بدست می‌آید.

نقشه شماره ۲، نقشه جابه‌جایی یا فرونشست زمین توسط این مدل و با استفاده الگوریتم Stamps را نشان می‌دهد.



نقشه ۲. جابه‌جایی محاسبه شده از روی نرخ متوسط سالانه

محدوده‌های با رنگ گرم (قرمز) میزان شامل حداکثر فرونشست و رنگ‌های ملایم و سرد نیز مشمول حداقل جابه‌جایی ناشی از نشست زمین است. در این تحقیق ماکزیم نرخ فرونشست بدست آماده از تکنیک STAMPS و سری زمانی SBAS در دشت کرج - شهریار حدود ۱۴ سانتیمتر (۱۳۶ میلی‌متر) در سال برآورد گردیده است. با استفاده از نرم‌افزار Matlab نرخ فرونشست منطقه تبدیل به مجموعه‌ای از نقاط گردید. این فایل که دربردارنده میزان و مقدار عددی فرونشست با دقت پیکسل تصاویر راداری است، جهت پهنه‌بندی در محیط GIS مورد استفاده قرار گرفت. محصول این فرایند در نقشه شماره ۳ آمده است.



نقشه ۳. پهنه‌بندی خطر و میزان فرونشست

نتیجه

در این تحقیق ۸۲ اینترفروگرام با استفاده از ۲۴ تصویر راداری ENVISAT طی دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در آنالیز سری زمانی به روش SBAS مورد استفاده قرار گرفت. پردازش تصاویر نیز با تکنیک Stamps و با انتخاب اینترفروگرام‌هایی که به لحاظ خط زمانی و مکانی در کمترین میزان بوده‌اند، مورد سنجش قرار گرفتند. بر اساس این روش حداکثر فرونشست (مقادیر بین ۱۳۶- تا ۹۴-) در مرکز دشت کرج - شهریار؛ جایی که محدوده شهری شهریار، باغات و زمین‌های کشاورزی آن تکوین شده است؛ قرار گرفته‌اند. این محدوده که در نقشه شماره ۳ مشهود است در پهنه‌بندی خطر فرونشست در طبقات خیلی شدید، شدید و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند.

کتابشناسی

1. Biggs, J., T. Wright (2004), creates a time series of ground deformation using InSAR, Scientific report, Department of Earth Science, University of Oxford.
2. Chang, C. P., Chang, T. Y., Wang, C. T., Kue, C. H. & Chen, K. S., 2004- Land surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan, Math. Comput. Sim., 67: 351-359;
3. Crosetto, M., Tscherning, C. C., Crippa, B. & Castillo, M., (2002), Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering, Geophysical Research Letters, 29(9): 26.1-26.4;
4. Daniel, R., C., Maisons, C., Carnec, S., Le Mouelic, C., King and S., Hosford (2003), Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement, Remote Sensing of Environment, 88, 468-478;
5. Fruneau, B. & Sarti, F., (2000), Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: Isolation from atmospheric artefacts using correlation, Geophysical Research Letters, 27(24): 3981-3984;
6. Galloway, D., Hudnut, K., Ingebritsen, S., Phillips, S., Peltzer, G. F., Rosen, P., (1998), Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California, Journal of Water Resource Research, 34 (10): 2573-2583;
7. interferograms,” M. Sc. Thesis, University of Tromsø, Norway, 2004;
8. Masoud Mahmoudpour , Mashalah Khomehchiyan , Mohammad Reza Nikudel , Mohammad Reza Ghassemi: Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran: JGeope 3 (2), 2013, PP. 49-62;
9. Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzell, H. U., Zschau, J. & Arabi, S., (2006), Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, leveling and GPS, Geophys. J. Int., 168, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x;
10. Peltzer, G., Rosen, P., Rogez, F. & Hudnut, K., 1998- Poro-elastic rebound along the Landers (1992), earthquake surface rupture, J. geophys. Res., 103, 30 131-30 145;
11. T. R. Lauknes, “Long-term surface deformation mapping using small-baseline differential SAR;
12. Terzaghi, K., (1925), Principles of soil mechanics, IV: settlement and consolidation of clay, Eng. News Rec., 95(3), 874-878;
13. Tesauro, M., Berardino, P., Lanari, R., Sansoti, E., Fornaro, G. & Franceschetti, G., (2000), Urban subsidence inside the City of Napoli (Italy) observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera, J. Geophys. Res., 27, 1961-1964.