

بررسی جابجایی‌های پیش‌لرز گسل اهر - ورزقان با استفاده از سری زمانی

تداخل‌سنجی راداری

احسان سعادت‌فر^{۱*}، مریم دهقانی^۲، علی اسماعیلی^۳، بهزاد زمانی قره‌چمنی^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان ۲- استادیار بخش راه، ساختمان و محیط زیست،

دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز ۳- استادیار گروه مهندسی سنجش از دور، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

۴- استادیار گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۲/۰۸/۱۸، پذیرش: ۹۳/۰۴/۰۸)

چکیده

تکنیک تداخل‌سنجی راداری با توجه به پوشش مکانی وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالا، ابزاری ارزشمند در پایش جابجایی پوسته زمین است. در این مقاله تغییرات ایجادشده در پوسته زمین پیش از زمین‌لرزه ۱۳۹۱ اهر- ورزقان واقع در شمال‌غرب ایران با استفاده از فن تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای پایدار بررسی شده است. روش پراکنشگرهای پایدار استفاده‌شده در این مقاله، StaMPS می‌باشد که توسط دانشگاه استنفورد ارائه شده است و داده‌های مورد استفاده شامل ۲۰ تصویر راداری از سنجنده Envisat ASAR، از سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در مدار پائین‌گذر می‌باشند. با توجه به نتایج اخذشده، بیشترین نرخ جابجایی در منطقه مورد مطالعه، ۹ میلی‌متر بر سال می‌باشد. بررسی سازوکار گسل جنوب اهر در تمامی بخش‌های گسل، سازوکار امتداد لغزی راستگرد نشان می‌دهد که با داده‌های زمین‌شناسی کاملاً یکسان و همخوان است.

واژگان کلیدی:

گسل، تداخل‌سنجی راداری، اهر- ورزقان، پراکنشگرهای پایدار، پیش‌لرز

۱. مقدمه

استفاده از تصاویر رادار با روزه مصنوعی (SAR) برای تشخیص جابجایی‌های موجود در سطح زمین در حد زیر سانتی‌متر در اواخر دهه ۱۹۸۰ شروع شد که فن تداخل‌سنجی راداری (InSAR^۱) را معرفی کرد. این فن با توجه به توانایی اندازه‌گیری دقیق جابجایی سطح زمین در یک محدوده گسترده، قدرت تفکیک مکانی بالا و همچنین صرف هزینه و زمان کمتر، به ابزاری قدرتمند برای تحلیل حرکات تکتونیکی پوسته زمین تبدیل شد [۲،۳،۴]. تداخل‌سنجی از ضرب مختلط یک تصویر SAR در مزدوج مختلط تصویر دوم تولید می‌شود و باعث ایجاد تصویر تداخل‌سنج شده^۲ و فاز این تصویر، اختلاف فاز بین تصاویر است [۴،۵]. از جمله محدودیت‌هایی که در تکنیک تداخل‌سنجی متداول وجود دارد می‌توان به فاز نویز ناشی از تغییر در خصوصیات پراکنشی تحت تأثیر خط مبنای مکانی و یا

قرار گرفتن ایران در یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان و احتمال وقوع زلزله‌های مخرب در همه نقاط کشور، اهمیت مطالعات لرزه‌خیزی و لرزه زمین‌ساختی را دوچندان می‌کند. از جمله مهم‌ترین گسل‌های آذربایجان گسل تبریز، گسل ارس و گسل آستارا-اردبیل می‌باشند. گسل‌های ناشناس متعددی نیز در آذربایجان وجود دارد که یا تاکنون معرفی نشده و یا مطالعه نشده‌اند. رویداد زلزله اهر و ورزقان باعث بروز زلزله‌ای گردید که در سال ۱۳۸۹ توسط زمانی و شریفی معرفی گردیده بود [۱]. در این تحقیق با توجه به اهمیت گسله یادشده که مسبب دو زمین‌لرزه با بزرگای ۶/۴ و ۶/۲ در مقیاس ریشتر در ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ بوده است از کارایی فناوری نوین سنجش از دور در مطالعات زمین‌لرزه بهره‌جسته شده است.

^۱ Interferometric Synthetic Aperture RADAR

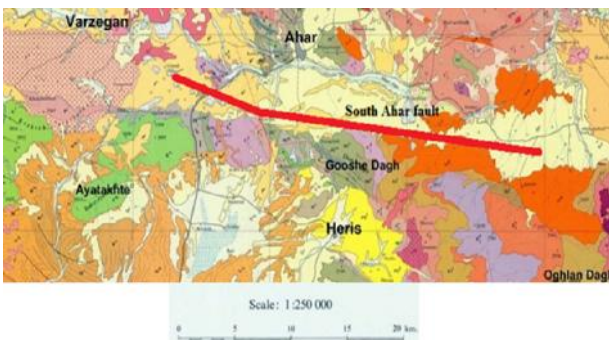
^۲ Interferogram

* رایانامه نویسنده پاسخگو: Ehsan.saadatfar@kgut.ac.ir

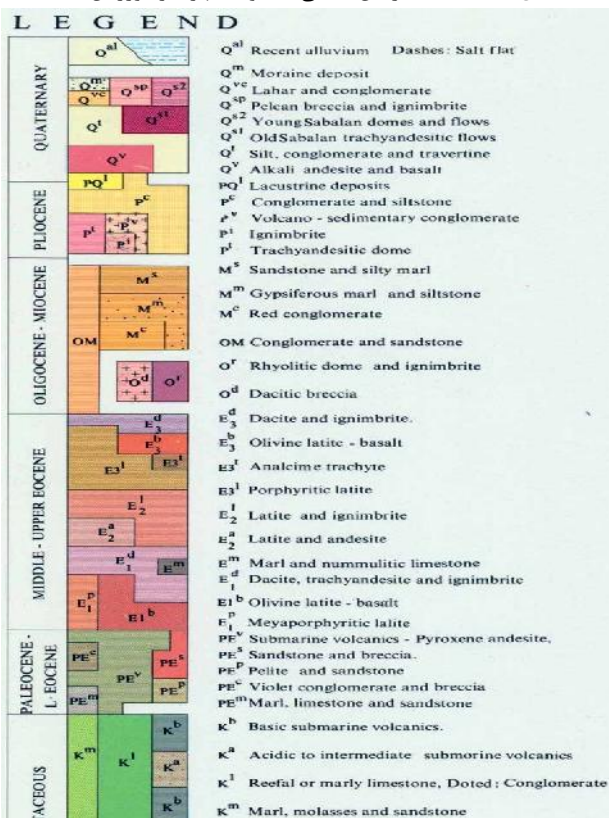
شمار می‌آید. اهر یکی از شهرهای استان آذربایجان شرقی می‌باشد که با ۱۳۶۰ متر ارتفاع از سطح دریا در مختصات ۴۷ درجه و ۴ دقیقه شرقی و ۳۸ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی این شهر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. الف) نقشه زمین‌شناسی محدوده شهر اهر-ورزقان [۷]



شکل ۲. ب) نقشه زمین‌شناسی محدوده شهر اهر-ورزقان [۷]

زمانی بلند و همچنین تغییر در تاخیر سیگنال در حین انتشار در اتمسفر که منجر به تغییر و ایجاد فاز اضافی در کل تصویر می‌شود، اشاره نمود [۶]. این محدودیت‌ها استفاده از روشهای متداول تداخل‌سنجی راداری را با مشکل مواجه می‌کند.

در سالهای ۲۰۰۰-۲۰۰۱ مشخص شد که عوارضی در روی زمین قرار دارند که با گذر زمان، ویژگی‌های بازپراکنشی آنها ثابت می‌ماند و تحت تأثیر عواملی از قبیل طول مبنای بلند مکانی و زمانی قرار ندارند. همچنین در مناطقی با ناهمواری زیاد که مقدار همبستگی بین تصاویر رادار تحت تأثیر زاویه دید و جهت دید می‌باشد پدیده‌هایی که دارای بازپراکنش غالب و پایدار در زمان هستند کمتر تحت تأثیر عدم همبستگی قرار می‌گیرند. محققان نشان دادند چنانچه این عوارض بر روی سطح زمین شناسایی شوند نه تنها می‌توان جابجایی سطح زمین را روی این نقاط صرف نظر از عدم همبستگی تصاویر راداری پیش نمود، بلکه می‌توان اثر مؤلفه‌های مخرب دیگر بر روی نتایج تداخل‌سنجی از جمله اثرات اتمسفر و خطای مربوط به مدل رقومی زمین را برآورد و حذف نمود. به روشی که به کمک آن پراکنشگرهای پایدار شناسایی و مقدار جابجایی سطح زمین بر روی آن نقاط پیش می‌شود، روش پراکنشگرهای پایدار مبتنی بر تداخل‌سنجی رادار (PS-InSAR) گویند. در این پژوهش از یکی از الگوریتم‌های این تکنیک که توسط دانشگاه استنفورد ارائه شده است با عنوان (StaMPS¹) به منظور برآورد جابجایی سطح زمین در اطراف گسل اهر-ورزقان استفاده شده که اصول کلی این روش در بخش ۳ توضیح داده خواهد شد. همچنین از فن تداخل‌سنجی متداول برای تولید تداخل‌سنج‌ها استفاده می‌کنیم. هدف این پژوهش، تهیه و بررسی سری‌های زمانی تداخل‌سنج‌های محدوده گسل جنوب اهر به منظور بررسی شواهد محتمل در ارتباط با زمین‌لرزه‌های مرداد ۱۳۹۱ اهر و ورزقان می‌باشد.

بعد از توضیح کلی که راجع به ضرورت انجام پژوهش و فن تداخل‌سنجی راداری داده شد، در بخش بعدی، منطقه مورد مطالعه و زمین‌شناسی آن معرفی می‌شود. سپس روشی که به منظور به دست آوردن نرخ جابجایی پوسته در منطقه اهر-ورزقان استفاده شده است توضیح داده خواهد شد. در بخش ۴ و ۵، داده‌ها معرفی و آنالیز و تحلیل داده‌های مورد استفاده ارائه می‌شود و در نهایت، بحث و نتایج حاصل از جابجایی‌های به دست آمده شرح داده می‌شود.

۲. معرفی منطقه مورد مطالعه و زمین‌شناسی منطقه

استان آذربایجان شرقی در گوشه شمال غربی فلات ایران قرار دارد. این استان به دلیل واقع شدن در محل اتصال دو رشته کوه مهم و اصلی ایران، یعنی البرز و زاگرس در ردیف مناطق کوهستانی به

¹ Stanford Method for Persistent Scattering

می باشد [۶]:

$$\{int = w \{ \{def + \{atm + \{orb + \{N} + \{N} \} \} \} \} \quad (1)$$

به طوری که $\{def$ فاز ناشی از حرکت پیکسل در جهت مسیر دید ماهواره ($\{LOS$)، $\{atm$ اختلاف در تأخیر فاز اتمسفری بین دو تصویر، $\{orb$ فاز باقیمانده ناشی از خطای مداری، $\{N$ فاز باقیمانده ناشی از خطای زاویه دید (که معمولاً به عنوان خطای DEM نام برده می شود) و $\{N$ فاز نویز ناشی از تنوع در پراکنشگرها و نویز حرارتی می باشند. اپراتور w نشان دهنده این است که فاز در یافتی، مقداری بین $(f$ و $-f)$ دارد. از آنجا که ماهواره تعداد سیکل های صحیح امواج را ثبت نمی کند، یکی از مهم ترین و در عین حال مشکل ترین مراحل در تداخل سنجی راداری برآورد تعداد سیکل های صحیح است که به این عمل، بازیابی فاز می گویند.

محدودیت اصلی تداخل سنجی راداری برای بیشتر سنجنده ها، فاز نویز ناشی از تغییر در خصوصیات پراکنشی می باشد. در یک تصویر SAR، دامنه و فاز هر پیکسل، حاصل مجموع توزیع های کوهرنت از همه پراکنشگرها در فاصله یک پیکسل زمینی می باشند. حرکت نسبی این پراکنشگرها، یا تغییر در زاویه دید و یا چرخش باعث ایجاد عدم همبستگی^۳ می شود [۱۲]. محدودیت مهم بعدی که تداخل سنجی راداری متداول معمولاً با آن روبرو است، تغییر در تأخیر سیگنال در حین انتشار در اتمسفر می باشد که منجر به تغییر و ایجاد فاز اضافی در کل تصویر می شود. بیشتر تغییرات در این فاز اضافی، در کل یک تداخل سنج ناشی از تغییر در توزیع بخار آب در اتمسفر می باشد [۱۳]. در محدوده های مطالعاتی که از نظر توپوگرافی برجسته تر باشند، تغییرات زیادی از نظر ارتفاعی وجود دارد که با ارتفاع زمین همبستگی خواهد داشت.

برای حل محدودیت های یاد شده یعنی غلبه کردن بر مشکل عدم همبستگی و تأخیر اتمسفری می توان از روش پراکنشگرهای پایدار^۴ (PS-InSAR) استفاده کرد. در این روش، عوارضی که دارای ویژگی پراکنشی ثابتی در زمان می باشند شناسایی و جابجایی بر روی این نقاط پایش می شود. لازم به ذکر است که ثابت بودن ویژگی بازپراکنشی یک عارضه، به معنای ثابت بودن موقعیت آن عارضه نمی باشد. ویژگی بازپراکنشی یک عارضه، تابعی از ضریب دی الکتریک آن، جهت، مقدار رطوبت موجود در آن و غیره می باشد. چه بسا عوارضی وجود دارند که ویژگی بازپراکنشی آنها در طول زمان ثابت است ولی خود عارضه در حال جابجایی است و بالعکس. در روش مبتنی بر پراکنشگرهای پایدار با تولید تعداد زیادی تداخل سنج نسبت به تصویر پایه، پراکنشگرهای پایدار یا PS ها در منطقه

رشته کوه قرار گرفته در جنوب شهر اهر به نام رشته کوه قوشه داغ از قرارگیری کوه های مختلف در کنار هم شکل یافته است که به ترتیب از شرق به غرب شامل اوغلان داغ، قوشه داغ و آیتاخلی می باشند. این رشته کوه در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۷]. این رشته کوه ها روند شرقی - غربی داشته و از نظر زمین شناسی، سازندهای مختلف دوران های مزوزوئیک و سنوزوئیک در آن برونزد یافته است [۸]. برخاستگی این رشته کوه نتیجه فرایندهای تکتونیکی توام با فراراندگی است که مورفولوژی کنونی آن را در جنوب شهر تاریخی اهر به نمایش گذاشته است.

۳. روش شناسی

در این پژوهش با بهره گیری از روش های سنجش از دور، شواهد محتمل در ارتباط با زمین لرزه مرداد ۱۳۹۱ اهر و ورزقان مورد جستجو قرار می گیرد. برای این منظور از یکی از روش های نوین موسوم به تداخل سنجی به کمک تصاویر راداری برای بررسی میزان جابجایی های روی داده در پوسته زمین پیش از رویداد زمین لرزه استفاده شده است.

در مقایسه با سایر روش های اندازه گیری جابجایی سطح زمین از جمله GPS و تراز یابی، فن تداخل سنجی راداری قادر به اندازه گیری دقیق جابجایی سطح زمین در یک پوشش وسیع و پیوسته و با قدرت تفکیک مکانی بالا می باشد. با توجه به این مسئله که فاز امواج راداری بازگشتی از سطح زمین به تغییرات موجود در سطح زمین در حد چند میلی متر حساس هستند می توان از این نوع تصاویر در تکنیک تداخل سنجی راداری برای تحلیل حرکات تکتونیکی استفاده کرد.

رادار با روزه مصنوعی (SAR) فنی است که از تصویربرداری کوهرنت (ثابت اطلاعات فاز در کنار دامنه موج برگشتی از سطح زمین)، تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا ایجاد می کند. دامنه تصویر SAR نشانگر خصوصیات پراکنشی از سطح زمین می باشد. از سوی دیگر، تصویر فاز (phase image) اصولاً به شکل تصادفی می باشد که میانگین وزن دار تأخیر فاز بین ارسال و دریافت همه پراکنشگرها بر روی زمین در یک پیکسل می باشد. اما اختلاف در فاز بین دو تصویر می تواند به عنوان تغییر فاصله از ماهواره تا زمین، به شرطی که خصوصیات پراکنشی زمین تقریباً ثابت بماند، باشد [۹، ۱۰]. در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت های تصویربرداری و یا زمان های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می شود. از تفاضل گیری بین این مقادیر، تصویر جدیدی حاصل می شود که تداخل سنج نام دارد [۱۱]. فاز نهایی ایجاد شده در تداخل سنج^۱، که شامل ترم های اضافی می باشد به صورت رابطه (۱)

¹ Interferogram

² Line-Of-Sight

³ Decorrelation

⁴ Line-Of-Sight

پایدار متداول برای به دست آوردن میزان جابجایی استفاده شده است. الگوریتم PS بر روی سری زمانی تداخل سنج‌ها که همه آنها نسبت به یک تصویر پایه ثبت هندسی شده‌اند اجرا می‌شود. انتخاب اولیه پیکسل‌های PS کاندیدا می‌تواند به روش‌های مختلفی تعیین شود که مرسوم‌ترین آنها استفاده از شاخص پراکندگی دامنه می‌باشد. در این مقاله، از حد آستانه ۰/۴ برای شاخص پراکندگی دامنه در انتخاب پیکسل‌های کاندیدا استفاده شده است. پس از انتخاب PS‌های اولیه، به کمک تحلیل فاز، PS‌های نهایی تعیین می‌شوند.

۴. داده‌های مورد استفاده

در این مقاله، از ۲۰ تصویر سنجنده Envisat ASAR در شماره مسیر ۴۹ و گذر پائین، در بازه زمان‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ استفاده شده است که در جدول ۱ مشخصات داده‌ها نشان داده شده است. این تصاویر در فرمت SLC^۳ سفارش داده شده‌اند. برای حذف اثر توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاعی SRTM^۵ با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متری استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات تداخل سنج‌های پردازش شده نسبت به تصویر پایه

سنجنده Envisat ASAR. تصویر تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۶ به عنوان تصویر پایه انتخاب شده است.

زمان اخذ تصویر	مدار ماهواره	طول خط مبنای زمانی (بر حسب روز)	طول خط مبنای مکانی (بر حسب متر)
Jun-2003-06	6616	-1400	-567
Aug-2003-15	7618	-1330	-582
Nov-2003-28	9121	-1225	317
Feb-2004-06	10123	-1155	191
May-2004-21	11626	-1050	545
Jun-2004-25	12127	-1015	-45
Nov-2004-12	14131	-875	-471
Jan-2006-06	20143	-455	676
Feb-2006-10	20644	-420	-233
Dec-2006-22	25153	-105	603
Jan-2007-26	25654	-70	-200
Mar-2007-02	26155	-35	545
Apr-2007-06	26656	0	0
May-2007-11	27157	35	198
Apr-2008-25	32167	385	94
Aug-2009-28	39181	875	589
Nov-2009-06	40183	945	510
Dec-2009-11	40684	980	-247
Jan-2010-15	41185	1015	350
Jul-2010-09	43690	1190	133

۵. تحلیل داده‌ها

در این پژوهش، از تکنیک تداخل سنجی متداول و تکنیک Stamps استفاده شده است. در تکنیک تداخل سنجی راداری متداول به منظور تولید تداخل سنج‌ها از بین تصاویر موجود، ۴ تصویر که از نظر طول خط مبنای مکانی و زمانی مناسب می‌باشند انتخاب گردید

شناسایی می‌شود و تنها به کمک این پیکسل‌ها که رفتار فاز ثابت در تداخل سنج‌های مختلف دارند جابجایی سطح زمین مورد پایش قرار می‌گیرد. این روش برای اولین بار توسط ferretti et al, 1999 گسترش یافت که تشخیص جابجایی‌های زمینی در مکان‌هایی با خصوصیات پراکنشی راداری ثابت در حد چند میلی‌متر را میسر ساخت؛ از این رو به ((پراکنشگرهای پایدار (PS))) معروف شد [۱۴، ۱۵]. داده‌های حاصل از تداخل سنجی رادار، جابجایی‌های در راستای محور دیدگانی (LOS^۱) را به صورت تابعی پیوسته در مکان آشکار می‌سازد [۱۶].

از نقطه نظر فیزیکی PS‌ها، بازتابش کننده‌های ساخت بشر مانند گوشه ساختمان یا تخته سنگ‌های بزرگ می‌باشند. در تصویر SAR، اگر در یک پیکسل یک پراکنشگر پایدار وجود داشته باشد، این پراکنشگر روشن‌تر از سایر پراکنشگرهای پس زمینه دیده می‌شود و عدم همبستگی به میزان زیادی کاهش پیدا می‌کند [۱۱، ۱۶]. اما در مناطق کوهستانی، پراکنش‌های روشن معمولاً بسیار کم بوده و تراکم PS در شبکه مرجع تا حدود زیادی کاهش می‌یابد و با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه در این پژوهش و عدم امکان ایجاد یک شبکه با فواصل مناسب می‌بایست از شیوه دیگری بهره جست.

در سال‌های اخیر، روشی موسوم به StaMPS^۲ برای پردازش پراکنشگرهای پایدار پیشنهاد شده است که از آنالیز فاز در کنار آنالیز دامنه بهره جسته می‌شود و باعث شناسایی تراکم مناسبی از PS‌ها در مناطق غیر شهری می‌شود [۶]. بنابراین با توجه به محدودیت‌های به کارگیری سایر الگوریتم‌های روش پراکنشگرهای پایدار در مناطق غیر شهری و کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، به منظور آشکارسازی تغییرات در محدوده مورد بررسی، از روش StaMPS استفاده می‌شود [۱۷]. از دیگر مزایای روش StaMPS نسبت به روش‌های دیگر این است که این روش در مرحله شناسایی پراکنشگرهای پایدار نیاز به اطلاعات اولیه از مدل جابجایی در زمان ندارد، در حالی که روش‌های ارائه شده توسط محققین دیگر در مرحله شناسایی PS‌ها و به منظور بازیابی فاز نیاز به اطلاعات اولیه از مدل جابجایی در زمان دارند. آشنایی از مدل جابجایی در یک منطقه همیشه امکان‌پذیر نخواهد بود. لذا روش StaMPS از این نظر نیز ارجح بر روش‌های دیگر است.

روش StaMPS دارای دو الگوریتم متفاوت، شامل روش پراکنشگرهای پایدار متداول و روش پراکنشگرهای پایدار بر مبنای خط مبنای کوتاه^۲ می‌باشد، که در این مقاله، از روش پراکنشگرهای

^۳ Small Baseline Subset (SBAS)

^۴ Single Look Complex

^۵ Shuttle Radar Topographic Mission

^۱ Line Of Sight

^۲ Stanford Method for Persistent Scattering

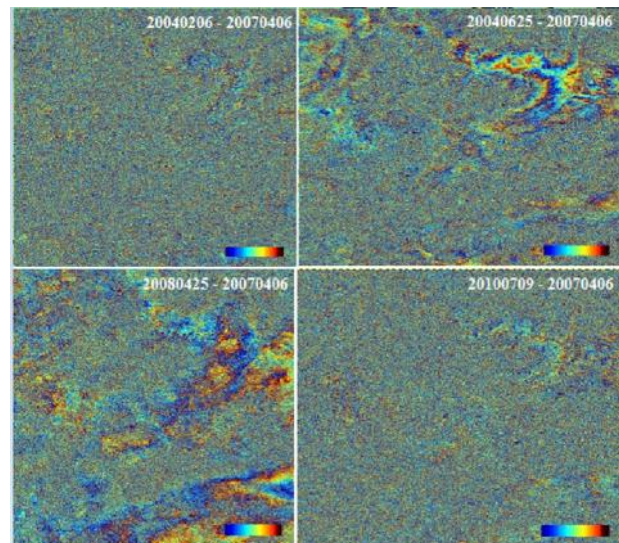
تفکیک مکانی ۹۰ متر تصحیح گردیده است. مرحله بعد در پردازش پراکنشگرهای پایدار به روش StaMPS، انتخاب پراکنشگرهای پایدار می‌باشد. در روش StaMPS از تحلیل دامنه و فاز برای شناسایی پیکسل های PS استفاده می‌شود. در ابتدا از شاخص پراکنندگی دامنه، در تحلیل دامنه به منظور انتخاب PS های کاندیدا استفاده می‌شود که در این تحقیق، حد آستانه استفاده شده برای پراکنندگی دامنه ۰/۴ می‌باشد. PS های نهایی بر مبنای برآورد پایداری فاز از طریق تحلیل فاز انتخاب می‌شوند [۵]. در تحلیل فاز سعی بر این است تا مؤلفه های مختلف فاز که در مکان همبسته می‌باشند، در تداخل سنج‌ها در یک فرآیند تکراری برآورد و از تداخل سنج‌ها حذف گردند. یک کمیت کوهرنس زمانی $x_x(2)$ از تغییرات فاز باقیمانده که معیاری است از PS بودن، در هر مرحله از تکرار محاسبه می‌شود:

$$x_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp\{j(\mathbb{E}_{x,i} - \hat{\mathbb{E}}_{x,i} - \Delta\{\hat{\mathbb{E}}_{x,i}\})\} \right| \quad (2)$$

که $\mathbb{E}_{x,i}$ در آن فاز بازیابی نشده و پیکسل نام در اینترفروگرام نام، $\hat{\mathbb{E}}_{x,i}$ برآوردی از مؤلفه های همبسته در مکان، $\Delta\{\hat{\mathbb{E}}_{x,i}\}$ برآوردی از مؤلفه های ناهمبسته در مکان مربوط به زاویه دید و N تعداد کل اینترفروگرام‌ها می‌باشند. بعد از هر تکرار، تغییرات RMS در x تعیین شده از معادله بالا محاسبه می‌شود. زمانی که این مقدار از حد آستانه انتخاب شده کمتر باشد همگرا شده و الگوریتم تکرار را خاتمه می‌دهد. در نهایت، PS ها براساس احتمال PS بودن که به کمک شاخص پراکنندگی دامنه و کوهرنس زمانی محاسبه می‌شوند، انتخاب می‌گردند که در شکل ۴ نشان داده شده است.

زمانی که PS ها انتخاب شدند، فاز آنها نسبت به خطای زاویه دید ناهمبسته در مکان با کم کردن مقادیر تخمین زده شده تصحیح می‌شود (خطای DEM) همچنین بخشی از فاز که متعلق به تصویر پایه و ناهمبسته در مکان است نیز برآورد و حذف می‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد نحوه برآورد این دو کمیت به هوپر، (۲۰۰۷) رجوع شود [۱۸]. عمل بازیابی فاز در دو مرحله تحت عناوین بازیابی فاز زمانی و مکانی با در نظر گرفتن فرض نمونه برداری نایکوییست در زمان انجام می‌گیرد. نویز مربوط به سری زمانی اختلاف فاز پیکسل های همسایه با استفاده از فیلتر پایین گذر قبل از عملیات بازیابی فاز کم می‌شود. در مرحله آخر، مؤلفه های همبسته و نیز ناهمبسته در مکان و زمان از جمله خطای زاویه دید ($SCLA$)، خطای اتمسفر و خطای مداری که سیگنال جابجایی را ماسک نموده‌اند به روشی که در هوپر، (۲۰۰۷) پیشنهاد شده برآورد و از فاز بازیابی شده کسر می‌شود.

لازم به ذکر است که پس از برآورد مؤلفه خطای زاویه دید، ($SCLA$)، این خطا از فاز بازیابی نشده کسر و عملیات بازیابی فاز



شکل ۳. تداخل سنج‌های تولید شده با استفاده از روش تداخل سنجی راداری متداول

و تداخل سنج‌ها نسبت به تصویر پایه تولید شدند. شکل ۳ تداخل سنج‌های تولید شده با استفاده از این روش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با توجه به کوهستانی بودن منطقه و وجود پوشش گیاهی، تداخل سنج‌ها با نویز زیادی همراه هستند و برای شناسایی جابجایی های پوسته زمین مناسب نمی‌باشند. همچنین تکنیک DePSI برای مناطق شهری مناسب می‌باشد و در مناطق کوهستانی و زمین‌های همراه با پوشش گیاهی قادر به شناسایی نقاط پراکنشگرهای پایدار نمی‌باشد. لذا با توجه به کوهستانی بودن منطقه اهر-ورزقان تنها از فن StaMPS برای به دست آوردن میزان جابجایی پوسته استفاده می‌شود.

اولین مرحله برای پردازش داده‌ها در تکنیک StaMPS، تولید تداخل سنج‌ها می‌باشد. قبل از تولید تداخل سنج‌ها، تصاویر پایه و پیرو باید نسبت به یکدیگر ثبت هندسی شوند. در روش StaMPS تصاویری که خط مبنای مکانی آنها نسبت به تصویر پایه^۱ کمتر از ۳۰۰ متر باشد، نسبت به تصویر پایه، ثبت هندسی می‌شوند، در غیر اینصورت تصاویر نسبت به سه تصویر نزدیکتر از نظر خط مبنای مکانی و زمانی ثبت هندسی می‌شوند. تصویر پایه با شرط بیشینه کردن همبستگی خط مبنای مکانی، فرکانس داپلری و خط مبنای زمانی انتخاب می‌شود [۵].

تداخل سنج‌ها بعد از ثبت هندسی تشکیل شده و پس از حذف اثر توپوگرافی برای استخراج PS ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از تولید تداخل سنج‌ها، خطای مربوط به انحنا به کمک اطلاعات خط مبنای مکانی محاسبه و از تداخل سنج‌ها حذف و همچنین خطای توپوگرافی زمین با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت

² Spatially Correlated Look Angle

¹ Master image

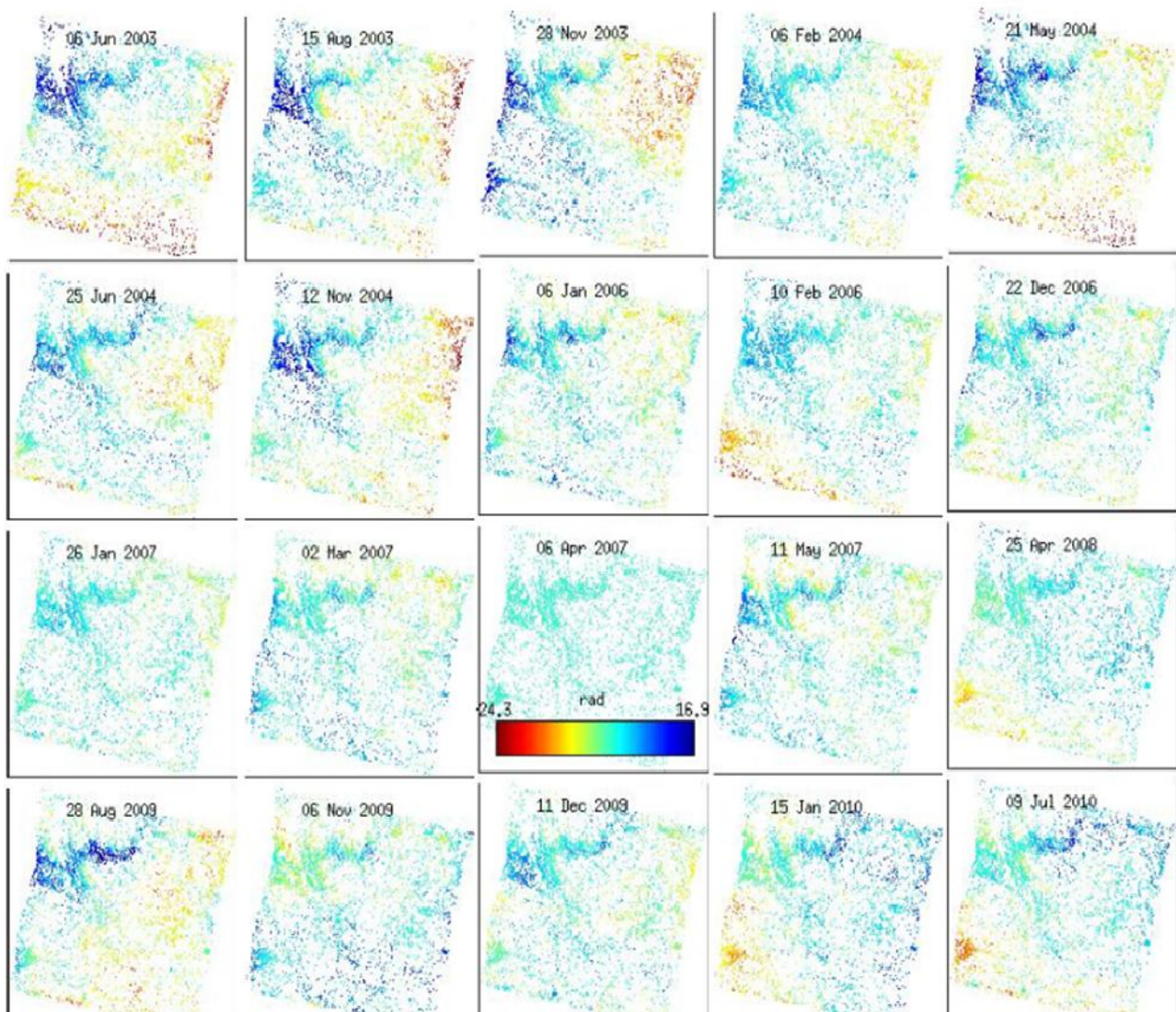
۶. بحث و بررسی نتایج

روش پراکنشگرهای پایدار متداول (PS-StaMPS) برای کل منطقه مورد پردازش قرار گرفت. در قسمت شمال منطقه، تراکم PSها به علت شناسایی نقاط پراکنشگرهای پایدار بسیار زیاد بوده که در شکل ۶ با دایره مشخص شده است. شکل ۷ انحراف معیار جابجایی که نمایانگر دقت برآورد نرخ جابجایی با استفاده از روش پراکنشگرهای پایدار می‌باشد را نشان می‌دهد.

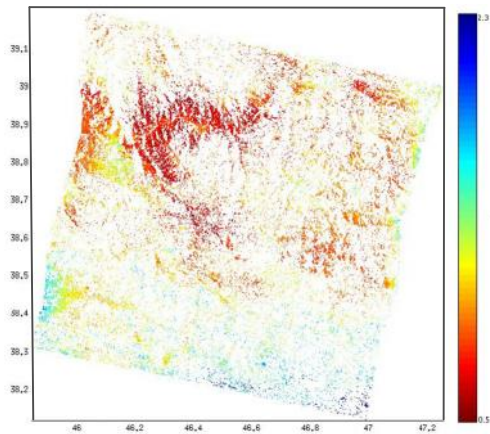
همانطور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، در مناطقی که تراکم PSها زیاد است دقت برآورد نرخ متوسط جابجایی نیز بالا خواهد بود. این مسئله در شکل ۷ به وضوح دیده می‌شود. با توجه به شکل، دقت برآورد در بیشتر نقاط در منطقه بهتر از یک میلی‌متر خواهد بود.

تکرار گردید. بدین ترتیب عملیات بازبازی فاز با دقت بیشتری صورت می‌پذیرد. شکل ۵ سری زمانی جابجایی حاصل از این مرحله که خطای زاویه دید، سهم تصویر پایه و نیز خطای مداری از روی آن حذف شده است را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در برخی مناطق که چگالی نقاط PS کم است، خطاهای محلی بازبازی به صورت جهش فازی خود را نشان می‌دهد.

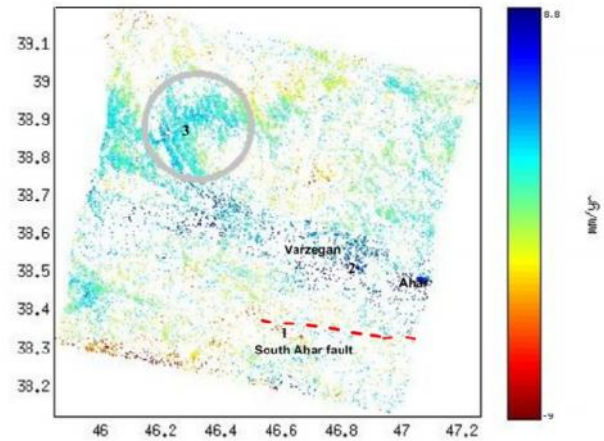
در تکنیک StaMPS به منظور کاهش عدم همبستگی از اعمال فیلتر در جهت رنج و آزیموت استفاده نمی‌شود. اعمال فیلتر منجر به افزایش همبستگی و کاهش قدرت تفکیک می‌شود. به طور کلی هرچه قدرت تفکیک بالاتر باشد، تعداد کمتری پراکنشگر در درون یک پیکسل قرار می‌گیرد و احتمال آنکه در آن پیکسل تنها یک پراکنشگر دارای سیگنال غالب باشد، افزایش می‌یابد. به همین دلیل ترجیح داده می‌شود قدرت تفکیک مکانی تا حد امکان بالاتر باشد.



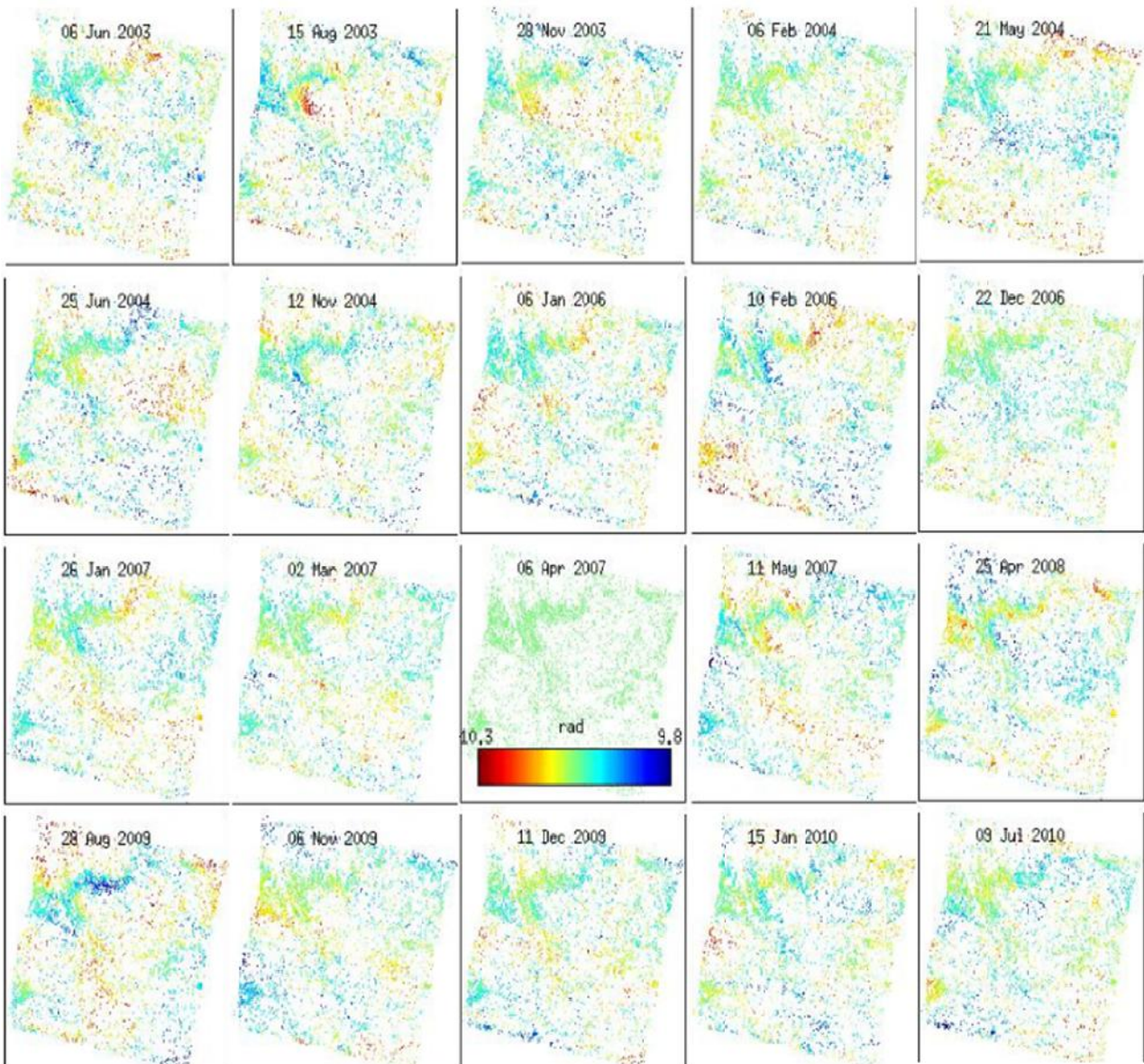
شکل ۴. تداخل‌سنج‌های تولیدشده با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری متداول



شکل ۷. انحراف معیار جابجایی ها با استفاده از روش پراکنشگرهای پایدار برای کل منطقه



شکل ۸. پیکسل های همبسته شناسایی شده با استفاده از تکنیک PS برای کل منطقه



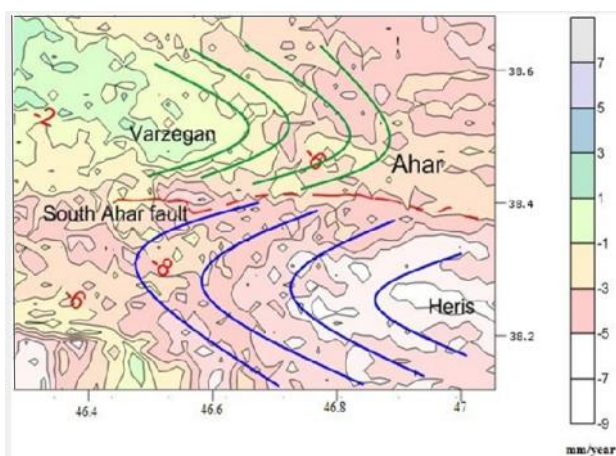
شکل ۹. سری زمانی جابجایی پس از حذف خطای زاویه دید، سهم تصویر پایه و نیز خطای مداری

نقطه متوالی باید کمتر از نصف طول موج باشد که برای تصاویر Envisat ASAR ۲۸ سانتی متر می‌باشد که ناشی از ابهام فاز ۲ در طول انجام عملیات بازیابی فاز می‌باشد. در سمت راست نمودارها نیز تاریخ‌های تداخل سنج‌ها لیست شده‌اند. لازم به ذکر است که این جابجایی‌ها در راستای خط دید رادار اندازه‌گیری شده‌اند. مقادیر مثبت، بیانگر جابجایی در مسیر دید ماهواره و مقادیر منفی نشان‌دهنده حرکت دور از مسیر دید ماهواره است. نتایج حاصل از سری زمانی، کمتر تحت تاثیر خطای بازیابی فاز قرار دارد.

۶-۱. بحث و بررسی زمین‌شناسی نتایج حاصل از روش تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای پایدار

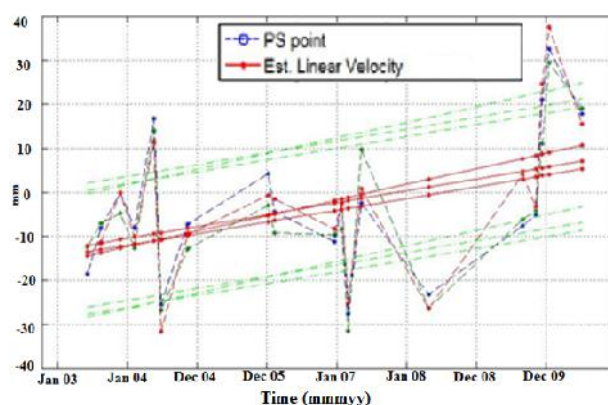
در شکل ۹ نقشه پربند برای داده‌های جابجایی به دست آمده از نتایج روش پراکنشگرهای پایدار در این پژوهش ترسیم شده است که میزان جابجایی پوسته را در بخش‌های مختلف محدوده مطالعاتی نمایش می‌دهد. این نقشه با استفاده از داده‌های نقاط پراکنشگرهای پایدار به دست آمده است که منحنی میزان‌ها نشانگر نرخ جابجایی در نقاط مختلف منطقه می‌باشد.

نتایج نشانگر این است که بیشترین مقدار نرخ جابجایی افقی در محدوده شهر هریس و برابر با ۹ میلی‌متر بر سال است (البته با در نظر گرفتن اینکه تعداد نقاط پراکنشگرهای پایدار در محدوده جنوب شهر اهر کم ولی در شمال غرب شهر ورزقان به تعداد کافی است و از اینرو خطای کم بودن تعداد نقاط پراکنشگر در نتایج باید مد نظر قرار گیرد) که با توجه به مجاورت این شهر با گسل مرتبط با زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ یعنی گسل جنوب اهر به نظر می‌رسد در ارتباط با گسل یادشده باشد. با توجه به اینکه محدوده یادشده بر روی یکی از بلوک‌های گسل جنوب اهر قرار گرفته است، می‌توان گفت که این

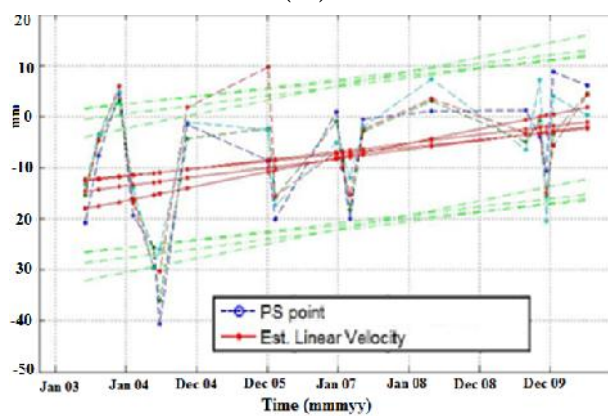


شکل ۹. نقشه پربند برای داده‌های جابجایی به دست آمده از نتایج فن پراکنشگرهای پایدار در این پژوهش که میزان جابجایی پوسته را در بخش‌های مختلف محدوده مطالعاتی نمایش می‌دهد.

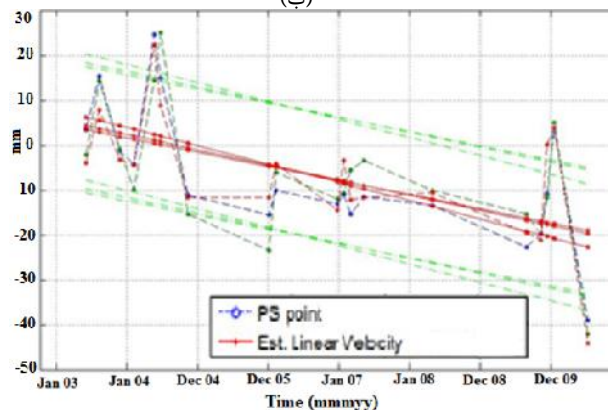
شکل ۸ سری زمانی مربوط به جابجایی نقاطی را که موقعیت آنها در شکل ۶ نشان داده شده است، ارائه می‌دهد. در هر شکل، نمایه بالائی، خط مبنای عمودی در واحد متر، برای هر تداخل سنج را نشان می‌دهد. در نمودار اصلی سری‌های زمانی رسم شده است. خطوط منحنی وار رنگی مختلف، نشانگر سری زمانی نقاط PS مختلف انتخاب شده از منطقه می‌باشد. خطوط خط‌چین- دایره، جابجایی‌های مشاهده شده و خطوط مستقیم، جابجایی‌های تخمین زده شده بعد از انجام برازش خطی می‌باشد. خطوط خط- نقطه چین در بالا و پایین، آفست‌ها هستند. آفست‌ها بیان می‌کنند که اختلاف بین دو



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸. سری زمانی جابجایی‌ها به روش تکنیک پراکنشگرهای پایدار

پوسته می‌شود که انعکاس آن در داده‌های راداری مورد استفاده در این پژوهش نمود پیدا کرده است، که عمدتاً نواحی شرقی شهر هریس و غرب و شمال غرب شهر ورزقان می‌باشد. با این حال در بخش‌های قفل شده سطح گسل مذکور (locked-part)، تجمع تنش‌ها در طول سال‌ها صورت گرفته است که حداقل جابجایی‌ها را در این بین داشته‌اند و این محدوده‌ها در فاصله شهرهای هریس و ورزقان قرار می‌گیرند و در مدل لغزش چسبنده با آزاد شدن تنش‌ها و رویداد زمین‌لرزه همراه بوده است.

بررسی‌های میدانی انجام شده و نقشه کردن محدوده گسیختگی‌ها (ruptures) پس از زمین‌لرزه رویداده نیز این مسئله را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که گسیختگی‌ها در فاصله روستای گوی‌درق در شمال غرب هریس تا روستای زنگ‌آباد در جنوب شهر ورزقان که تقریباً بخش‌های قفل شده گسل را تشکیل می‌دهد به طول حدود ۲۲ کیلومتر گسترش داشته و در صحرا قابل شناسایی بوده است.

۷. نتیجه‌گیری

پردازش StaMPS بر روی تصاویر ENVISAT ASAR بر روی منطقه اهر- ورزقان برای به‌دست آوردن مقدار جابجایی زمین‌لرزه ناشی از زلزله ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ به‌کار گرفته شده است. با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه و توانایی شناسایی پیکسل‌های PS در مناطق غیر شهری توسط فن پراکنشگرهای پایدار به روش StaMPS، از این روش به‌منظور به‌دست آوردن نرخ جابجایی پوسته زمین استفاده شده است. همچنین در این مقاله از فن تداخل‌سنجی راداری متداول بهره گرفته شد ولی به‌دلیل نویز بالای تداخل‌سنج‌ها در تحلیل جابجایی پوسته مورد استفاده قرار نگرفت. بیشترین نرخ جابجایی به‌دست آمده با استفاده از روش پراکنشگرهای پایدار ۹ میلی‌متر بر سال بوده که جابجایی در راستای دید ماهواره را به‌دست آورده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده بیشترین جابجایی‌ها در سمت جنوب شرق گسل جنوب اهر و محدوده شهر هریس و نیز در سمت شمال غرب این گسل می‌باشد و از طرفی کمترین جابجایی‌ها نیز در فاصله شهرهای هریس و ورزقان ثبت شده است که بخش‌های قفل شده سطح گسل مذکور را می‌تواند تشکیل دهد.

جابجایی ثبت شده با داده‌های دورسنجی به‌دلیل جابجایی‌های مولفه افقی یکی از بلوک‌های گسل مذکور می‌تواند صورت گرفته باشد.

در محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، داده‌ها و نتایج دیگری که با روش‌های مشابه در این محدوده انجام شده باشد و بتوان نتایج جابجایی به‌دست آمده را با آنها مقایسه کرد، به‌جز نتایج بررسی‌های ژئودزی در دسترس نبوده است. مقایسه نتایج این پژوهش با حداکثر نرخ جابجایی ۹ میلی‌متر بر سال با نتایج پژوهش‌های محققینی چون (Djamour, 2011, Masson, 2006) که مقدار جابجایی‌های پوسته را به روش ژئودزی و داده‌های GPS در همین محدوده برابر با 8 ± 2 میلی‌متر بر سال به‌دست آورده‌اند [۱۹،۲۰]، قابل قیاس می‌باشد.

گسل جنوب اهر، یک گسل پی‌سنگی است که در سطح زمین بروز ندارد، اما حرکات و جابجایی‌های آن می‌تواند باعث جابجایی رسوبات و نهشته‌ها در سطح زمین شود. همچنین به‌موازات گسل اهر، گسل‌های پی‌سنگی دیگری نیز در این محدوده قابل شناسایی است که به‌دلیل پوشیده بودن (blind fault)، امکان مشاهده آنها در سطح وجود ندارد. لیکن، زمانی در سال ۱۳۹۰ به وجود چنین گسل‌هایی در فلات آذربایجان شرقی اشاره کرده است. با توجه به مطالب ذکر شده و با انطباق مرکز زمین‌لرزه‌های اصلی رویداده حادثه مرداد ۱۳۹۱ ورزقان و هریس که خطواره گسلی پی‌سنگی جنوب اهر در جنوب کوه‌های گوشه‌داغ و به‌موازات خطواره جنوب اهر است، مسبب زمین‌لرزه‌های فوق‌الذکر محسوب می‌شود.

می‌توان چنین گفت که بیشترین جابجایی‌ها، در سمت جنوب شرق این گسل و محدوده شهر هریس و نیز در سمت شمال غرب این گسل یعنی شهر جلفا و غرب گسل یادشده (شهرهای تسوج و خوی) متمرکز هستند و همچنین کمترین جابجایی‌ها نیز در فاصله شهرهای هریس و ورزقان ثبت شده است. داده‌های تحلیل شده در این پژوهش مربوط به فاصله زمانی سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ می‌باشند، از اینرو این میزان جابجایی‌ها مربوط به قبل از رویداد زمین‌لرزه‌های اصلی بوده و در واقع مربوط به زمان تجمع تنش در سطح گسل می‌باشند.

در واقع، تجمع تنش‌ها در دو بلوک شمال و جنوب گسل جنوب اهر که همراه با جابجایی پوسته در امتداد گسل بوده است (که در این پژوهش آشکار گردیده است)، سپس وقوع زمین‌لرزه در این منطقه در اثر آزاد شدن آنی تنش‌ها، می‌تواند عملکرد ترکیبی از مدل‌های رویداد زمین‌لرزه یعنی مدل لغزش چسبنده (stick-slip) و مدل لغزش تدریجی (sliding-slip) را در این گسل نشان دهد. در واقع، تجمع تنش‌ها در طول سال‌ها در قالب مدل (sliding-slip) به‌صورت حرکات خزشی در سطح گسل باعث جابجایی‌های تدریجی

۸. مراجع

- [11] A. Hooper, Bekaert, D., Spaans, K., Arikani, M., "Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation," *Tectonophysics* pp. 514-517, 2012.
- [12] R.M. Goldstein, C.L. Werner, "Radar interferogram filtering for geophysical applications," *Nov Geophysical Research Letters* Vol. 25, No. 21, pp. 4035-4038, 1998.
- [13] M. Simons, P.A. Rosen, "Interferometric synthetic aperture radar geodesy." In: Schubert, G. (Ed.), *Treatise on Geophysics*, Vol. 3, Elsevier Press, Vol. 31, No. 23, pp. 391-446, 2007.
- [14] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, B. Kampes, "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers," 2004.
- [15] B. M. Kampes, "Displacement Parameter Estimation Using Permanent Scatterer Interferometry." Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 2005.
- [16] A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, A. Rucci, "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 49, No. 9, pp. 3460-347, 2011.
- [17] N. Adam, A. Parizzi, M. Eineder, M. Crosetto, "Practical persistent scatterer processing validation in the course of the TerraFirma project". *Journal of Applied Geophysics*, 2009.
- [18] A. Hooper, and H. Zebker, L. Chen, "Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series," *J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci.*, Vol. 24, pp. 2737- 2747, 2007.
- [19] F. Masson, Y. Djamour, S. Van Gorp, J. Chéry, M. Tatar, F. Tavakoli, H. Nankali, P. Vernant, "Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin," *Earth and Planetary Science Letters* Vol. 252 ,No. 1-2, 2006.
- [20] Y. Djamour, V. Philippe, H. Nankali, F. Tavakoli , "NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: Results from the Iranian permanent GPS network," *Earth and Planetary Science Letters* Vol. 307, pp.27-34, 2011.
- [1] R. Sharifi and B. Zamani, "Introducing the emplacement of south of Ahar and evaluating the trend of geological stress around the fault", 14th conference of Iranian Geological Society, oroomieh, Iran, 2010. (in Persian)
- [2] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, "Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. 7, pp. 9183-9191, 1898.
- [3] D. Massonnet, and K. L. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev.Geophysic*," 1998.
- [4] R. Hanssen, "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers," 2001.
- [5] P. Rosen, S. Hensley, I. Joughin, F. Li, S. Madsen, E. Rodriguez, R. Goldstein, "Synthetic aperture radar interferometry." *Proceedings of the IEEE* Vol. 88, No. 3, pp. 333-382, 2000.
- [6] A. Hooper, P. Segall, and H. Zebker., "Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos," *Journal of Geophysical Research*. , Vol. 112, No.7, 2007.
- [7] A.R. Babakhani, J.L. Lesquyer, R. Riou, "Explanatory Text of the Ahar geological map in scale of 1:250000", Iranian Geological Organization, 1989. (in Persian)
- [8] M. Berberian, and E. Arshadi, "On the evidence of the youngest activity of the north Tabriz fault and the seismicity of Tabriz city," 1976
- [9] N. Finnegan, M. Pritchard, Lohman, R. Lundgren, P., Constraints on surface deformation in the Seattle, WA, urban corridor from satellite radar interferometry time-series analysis. *Geophysical Journal International*, Vol. 174, pp. 29-41, 2008.
- [10] G. J. Funning, R. Burgmann, A. Ferretti, F. Novali, & A. Fumagalli, "Creep on the Rodgers Creek fault, northern San Francisco Bay area from a 10 year PS-InSAR dataset." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, 2007.

The Study of Pre-Seismic Deformation of Ahar-Varzegan Fault Using Time Series SAR Interferometry

E. Saadatfar*, M. Dehghani, A. Esmaeily, B. Zamani Ghare Chamani

*Graduate University of Advanced Technology, Department of Remote Sensing Engineering,
Kerman, Iran,

(Received: 09/11/2013, Accepted: 29/06/2013)

Abstract

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technique is a valuable tool in monitoring crustal deformation due to its large extensive- massive spatial coverage and high spatial resolutions. In this paper, the intersiesmic crustal deformation occurred before earthquake on August 2012 in Ahar-Varzegan located in north-west of Iran is studied using Persistent Scattering Interferometry. The PSI algorithm used in this study is the Stanford Method for PS (StaMPS) and using 20 descending ENVISAT ASAR images spanning between 2003 and 2010 in the low-earth orbit are applied. The maximum rate obtained from persistent scattering results is 9 mm/year. The deformation monitoring results of south Ahar fault mechanism showed a right lateral strike slip in all segments of fault, which is consistent with the geology data.

Keywords: Fault, SAR Interferometry, Ahar-Varzegan, Persistent Scattering, Interseismic.