

رفتار سنجی زمین لغزش با استفاده از روش اینترفرومتری (Interferometry) (منطقه مورد مطالعه: شهرستان اردل)

علی صادقی* - استادیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه اصفهان.
شهرام شریفی هاشجین - استادیار گروه مطالعات ناحیه‌ای، پژوهشکده محیط زیست، جهاد دانشگاهی.
محمدعلی رحیمی پور شیخانی نژاد - استادیار گروه مطالعات ناحیه‌ای، پژوهشکده محیط زیست، جهاد دانشگاهی.
حبیب محمودی چناری - استادیار گروه مطالعات ناحیه‌ای، پژوهشکده محیط زیست، جهاد دانشگاهی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

چکیده

زمین لغزش به عنوان یک مخاطره طبیعی، همواره خسارات فراوانی را به همراه داشته است. استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به عنوان یک روش کارآمد در پایش، پیش‌بینی، تحلیل، اندازه‌گیری میزان جابجایی و تعیین محل وقوع همواره مطرح بوده است. در این پژوهش هدف بررسی، شناسایی و تعیین میزان جابجایی زمین لغزش در شهرستان اردل استان چهارمحال و بختیاری به عنوان یکی از حوضه‌های کوهستانی کشور می باشد با ایجاد ۷ اینترفروگرام بهینه از ۱۰ تصویر ماهواره Envisat مربوط به سال ۲۰۰۵، زمین لغزش‌های متعدد با میزان جابجایی از ۲٫۸ تا ۱۴ سانتیمتر در منطقه مورد مطالعه شناسایی گردید. در این روش با بهره‌گیری از اطلاعات فاز تصاویر مختلط SAR، مدل ارتفاعی زمین با دقت متر و مقدار جابجایی‌ها و تغییرشکل‌های پوسته زمین با دقت زیر سانتیمتر در پوششی پیوسته و وسیع ایجاد گردید. این نتایج بیانگر فعال بودن پهنه‌های لغزشی این منطقه از لحاظ حرکات دامنه‌ای است.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، تداخل‌سنجی راداری، اینترفروگرام، ENVISAT DEM

مقدمه

زمین لغزش (Landslide) و ریزش‌های سنگی نمونه‌هایی از حرکات توده‌ای زمین می‌باشند و اصطلاحی عمومی برای حرکت روبه پایین واحدهای سنگی و رسوبی تحت تأثیر نیروی گرانشی است. این فرایند بر روی زمین‌های شیب‌دار عمل کرده و ممکن است باعث تخریب منازل و تأسیسات، مسدود گشتن مسیر جاده‌ها و رودها و غیره شود و در بعضی مواقع که حجم عملکرد آن عظیم باشد باعث ایجاد دریاچه‌هایی نیز می‌گردد.

زمین‌لغزش‌ها به انواع مختلفی شامل زمین‌لغزش‌های انتقالی (Translational) و چرخشی (Rotational) تقسیم می‌شوند. زمین لغزش‌های انتقالی در طول سطوح لایه‌بندی یا سطوح ضعیف دیگر موجود در سنگ لغزش انجام می‌شود و تمام توده به موازات این صفحه حرکت می‌کند. زمین‌لغزش‌های چرخشی در رسوبات سطحی یا سنگ‌های هوازده گسترش می‌یابند. از نظر مشأ ممکن است طبیعی بوده یا توسط انسان فعال شده باشند (مانند ایجاد بریدگی‌هایی (ترانشه) در قاعده یک سرایشی ناپایدار). سطح شکستگی در برش عرضی تقریباً کمانی شکل می‌باشد (در حالت سه بعدی، قاشقی شکل است). ایران بدلیل شرایط خاص زمین شناسی، توپوگرافی و آب‌وهوایی از کشورهای مهم لغزش خیز است و سالانه خسارات قابل توجهی بر اثر بروز زمین لغزه گزارش می‌شود. برهم زدن گستره سیستم آب و خاک در طبیعت، تخریب جاده‌ها، بزرگراه‌ها، مناطق مسکونی، انتقال انرژی، سازه‌های مهندسی، تخریب پوشش گیاهی و زمین‌های کشاورزی، رسوبزایی سریع و وسیع در عرصه طبیعت، تسریع فرسایش و انتقال گستره رسوبات به پشت سدها، از جمله خسارات و خطرات مستقیم ناشی از این پدیده طبیعی است. به منظور حفاظت از امنیت زندگی انسانها از زمین لغزش و اثرات نامطلوب آن بر سازه‌های زیربنایی و غیره نیاز به یک سیستم مدیریت بهینه خطر احساس می‌شود. لازمه ایجاد چنین سیستمی، شناسایی مناطق پرخطر از لحاظ زمین لغزش می‌باشد.

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری حرکات پوسته زمین، ناشی از وقوع زمین لغزش وجود دارد. از آن جمله می‌توان به روش‌های میکروژئودزی با بهره‌گیری از ترازیابی دقیق و مشاهدات GPS اشاره نمود. استفاده از روش ترازیابی دقیق علی‌رغم دقت بسیار بالا (۲ سانتیمتر)، منجر به اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین تنها در جهت ارتقاعی می‌گردد. علاوه بر آن با این روش تنها قادر خواهیم بود در راستای یک خط که همان مسیر ترازیابی است حرکات و جابجایی سطح زمین را اندازه‌گیری نماییم. تکرار اندازه‌گیری‌ها با روش مذکور به دلیل هزینه بالا و نیز سختی کار امکان پذیر نخواهد بود. بنابراین نمی‌توان اطلاعات بهنگام از حرکات و جابجایی‌های ناشی از زمین لغزش تهیه نمود.

روش‌های مبتنی بر مشاهدات GPS، اندازه‌گیری‌های مربوط به جابجایی‌های سطح زمین را به طور مداوم و با دقت بالا (حدود ۵ میلی‌متر) انجام می‌دهد. اما محدودیت این روش آن است که جابجایی‌ها فقط در یک سری نقطه که همان ایستگاه‌های GPS هستند اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین واضح است که با استفاده از GPS نمی‌توان محدوده تحت تأثیر زمین لغزش را مشخص نمود. علاوه بر این هزینه نصب و نگهداری ایستگاه‌های دائم GPS بالا بوده و این خود از نقاط ضعف این روش محسوب می‌گردد.

تکنیک تداخل سنجی راداری یکی از جدیدترین تکنیک‌های سنجش از دوری است که با پردازش تصاویر راداری امکان تهیه نقشه‌های جابجایی پوسته زمین در سطحی وسیع و پیوسته را فراهم نموده است. از آنجا که هدف از این تحقیق ارزیابی توانایی و قابلیت تکنیک تداخل سنجی راداری در شناسایی زمین‌لغزش است لذا در ادامه ابتدا اصول تکنیک تداخل سنجی راداری به همراه توانایی‌ها و محدودیت‌های این تکنیک در مطالعه جابجایی‌های پوسته زمین تشریح می‌شود. در نهایت پردازش‌های تداخل سنجی راداری و نتایج حاصل به منظور شناسایی زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

محاسبه ارتفاع هدف با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری

تکنیک تداخل سنجی راداری از ترکیب تصاویر مختلط SAR اخذ شده با آنتنهای مختلف و یا در زمانهای مختلف برای تشکیل اینترفروگرام استفاده می‌کند (Madsen&Zebker, 1993). هر تصویر SAR از یک شبکه منظم با مقادیر مختلط، که با معادلات زیر به مؤلفه‌های دامنه و فاز تجزیه می‌شوند، تشکیل شده است (Hanssen, 2001).

$$\begin{aligned} y_1 &= |y_1| \exp(j\phi_1) \\ y_2 &= |y_2| \exp(j\phi_2) \end{aligned} \quad (1)$$

در روابط فوق y_1 و y_2 تصاویر مختلط اخذ شده با آنتنهای متفاوت و یا در زمانهای مختلف از یک صحنه، ϕ_1 و ϕ_2 فازهای متناظر با تصاویر اول و دوم و $|y_1|$ و $|y_2|$ دامنه‌های متناظر با این تصاویر می‌باشد. با ضرب تصویر مختلط اول (y_1) در مزدوج مختلط تصویر دوم (y_2)، که نسبت به موقعیت‌های متناظر در تصویر اول ثبت هندسی شده است، اینترفروگرام مختلط حاصل می‌گردد:

$$I = y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| \exp(j\phi) \quad (2)$$

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (3)$$

در رابطه فوق I اینترفروگرام مختلط، * علامت مزدوج مختلط و ϕ فاز اینترفروگرام یا فاز تداخل سنجی راداری حاصل از اختلاف فاز دو تصویر می‌باشد.

تعیین میزان جابجایی های پوسته زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی دیفرانسیلی

چنانچه در فاصله زمانی اخذ تصاویر SAR تشکیل دهنده اینترفروگرام، پوسته زمین به دلایلی چون زلزله، آتشفشان، جابجایی صفحات، لغزش زمین، استخراج آب و نفت و یا آبیاری زمین دچار تغییر شکل و جابجایی گردد آنگاه با صرف نظر از اثرات اتمسفر و دیگر عوامل خطا، فاز اینترفروگرام علاوه بر اثرات توپوگرافی، شامل اثر جابجایی نیز خواهد بود. در واقع فاز تداخل سنجی راداری به توپوگرافی سطح و جابجاییهای Coherent اتفاق افتاده در فاصله زمانی اخذ جفت تصویر تشکیل دهنده اینترفروگرام حساس می‌باشد. ایده اصلی پردازش تداخل سنجی دیفرانسیلی، جداسازی این اثرات به منظور دستیابی به نقشه جابجایی می‌باشد. در صورتی که فاز مربوط به توپوگرافی از مدل ارتفاعی موجود منطقه و یا از اینترفروگرام مستقل دیگری که عاری از اثرات جابجایی باشد بدست آید و از اینترفروگرام مورد نظر کسر شود، فاز توپوگرافی حذف و فاز جابجایی حاصل می‌گردد. با توجه به هندسه تصویربرداری و با استفاده از معادلات مثلثاتی رابطه زیر ثابت می‌گردد (فتاحی، ۱۳۸۴؛ Henderson&Lewis, 1998):

$$\Delta R = B \sin(\theta - \alpha) = B_{||} \quad (4)$$

در این رابطه $B_{||}$ مؤلفه خط مبنای مکانی در جهت موازی با خط دید سنجنده می‌باشد. با در نظر گرفتن روابط (۵) و (۸)، فاز اینترفروگرام توپوگرافی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{||} \quad (5)$$

چنانچه صحنه در فاصله زمانی اخذ دو تصویر به دلایلی همچون زلزله دچار جابجایی شود، آنگاه در اینترفروگرام حاصل، علاوه بر مؤلفه فاز وابسته به توپوگرافی، مؤلفه فاز ناشی از جابجایی نیز وجود دارد. می‌توان رابطه زیر را برای فاز چنین اینترفروگرامی نوشت (Zebker et al., 1994):

$$\begin{aligned}\phi' &= -\frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - (R_2 + \Delta\rho)) \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda}(\Delta R - \Delta\rho) \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda}(B'_{||} - \Delta\rho)\end{aligned}\quad (۶)$$

در این رابطه ϕ' فاز اینترفروگرام حاوی اثرات جابجایی و توپوگرافی، $B'_{||}$ مؤلفه خط مبنای این اینترفروگرام در جهت موازی با جهت دید سنجنده و $\Delta\rho$ میزان جابجایی در جهت دید سنجنده می‌باشد. با تغییر مقیاس فاز اینترفروگرام توپوگرافی به اندازه نسبت مؤلفه های خط مبنای در جهت موازی با جهت دید سنجنده و کسر آن از اینترفروگرام حاوی اطلاعات توپوگرافی و جابجایی، رابطه‌ای که فقط وابسته به جابجایی می‌باشد بدست می‌آید (Zebker et al., 1994):

$$\phi' - \phi \frac{B'_{||}}{B_{||}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho \quad (۷)$$

در رابطه فوق تنها مجهول معادله میزان جابجایی ($\Delta\rho$) می‌باشد.

داده مورد استفاده

در این مقاله از تصاویر راداری اخذ شده توسط سنجنده ASAR (Advanced SAR) که یکی از سنجنده‌های ماهواره ENVISAT می‌باشد، برای پردازش تداخل سنجی راداری و تشکیل اینترفروگرام استفاده شده است. خصوصیات کلی ماهواره ENVISAT در جدول (۱) ارائه شده است.

بزرگترین سنجنده این ماهواره، سنجنده راداری ASAR می‌باشد که تصاویر راداری را در باند C با پوشش‌های مختلف ۱۰۰ کیلومتر یا ۴۰۰ کیلومتر و در پولاریزاسیونهای متفاوت اخذ می‌نماید. در این تحقیق از تصاویر IM با پولاریزاسیون VV و فرمت SLC (Single Look Complex) استفاده شده است. این تصاویر در حالت ascending ماهواره اخذ شده‌اند.

جدول ۱: خصوصیات ماهواره ENVISAT

1 March 2002(CET), From Kourou, French Guiana	Launch
Ariane 2005	Launcher
8200 kg	Launch Mass
10 including ASAR and MERIS	Number of instruments
Sun synchronous, Altitude 800 km	Orbit
98 degrees	Inclination
101 minutes	Time for one orbit
35-day repeat	Cycle

لیست تصاویر دریافتی به همراه خصوصیات آنها در جدول ذیل مشاهده گردید.

جدول ۲: لیست تصاویر دریافتی

ردیف	ماهواره	سنجنده	مد تصویربرداری	تاریخ	مدار	Track	مختصات مرکز تصویر	باند فرکانسی	گذر	پولاریزاسیون
۱	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۱/۹	۱۴۹۶۱	۳۷۸	31.98 50.65	C	D	VV
۲	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۳/۲۰	۱۵۹۶۳	۳۷۸	31.98 50.65	C	D	VV
۳	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۸/۷	۱۷۹۶۷	۳۷۸	31.98 50.65	C	D	VV
۴	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۴/۲۹	۱۶۵۴۳	۴۵۷	32.02 50.55	C	A	VV

۵	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۷/۱۸	۱۷۵۴۵	۴۵۷	32.02 50.55	C	A	VV
۶	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۵/۱۳	۱۶۷۳۶	۱۴۹	32.08 49.95	C	D	VV
۷	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۷/۲۲	۱۷۷۳۸	۱۴۹	32.08 49.95	C	D	VV
۸	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۵/۲۹	۱۶۹۶۵	۳۷۸	31.98 50.65	C	D	VV
۹	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۷/۲۲	۱۷۷۳۸	۱۴۹	32.08 49.95	C	D	VV
۱۰	ENVISAT	ASAR	Image Mode(IM)	۲۰۰۵/۸/۲۶	۱۸۲۳۹	۱۴۹	32.08 49.95	C	D	VV

با توجه به آنکه برای پردازش این تصاویر با تکنیک InSAR نیاز به اطلاعات جفت‌های اینترفرومتری می‌باشد، لذا با بهره‌گیری از اطلاعات مداری تصاویر، خصوصیات جفت‌های اینترفرومتری مختلف استخراج گردید که با توجه به شرایط فنی نهایتاً جفت‌های مناسب انتخاب شد. خصوصیات این جفت‌ها در جدول ذیل خلاصه شده است.

جدول ۳: خصوصیات جفت‌های اینترفرومتری

Pair	Orbit	Track	Pass	Day Diff	Baseline Diff	Date	Scene center
1	14961	378	D	70	237	2005/1/9	31.98, 50.65
	15963	378	D			2005/3/20	31.98, 50.65
2	15963	378	D	140	263	2005/3/20	31.98, 50.65
	17967	378	D			2005/8/7	31.98, 50.65
3	16543	457	A	70	251	2005/4/29	32.02, 50.55
	17545	457	A			2005/7/8	32.02, 50.55
4	16736	149	D	70	-12	2005/5/13	32.08, 49.95
	17738	149	D			2005/7/22	32.08, 49.95
5	16736	149	D	105	-65	2005/5/13	32.08, 49.95
	18239	149	D			2005/8/26	32.08, 49.95
6	16965	378	D	70	-245	2005/5/29	31.98, 50.65
	17967	378	D			2005/8/7	31.98, 50.65
7	17738	149	D	35	-53	2005/7/22	32.08, 49.95
	18239	149	D			2005/8/26	32.08, 49.95

پیاده سازی

در ادامه مراحل پردازش تصاویر به منظور تشکیل اینترفروگرام تشریح می‌گردد. شایان ذکر است که برای تشکیل هر اینترفروگرام کلیه مراحل ذیل بصورت جداگانه بر روی زوج تصویر مربوطه انجام شده است.

خواندن تصاویر Master و Slave

با در اختیار بودن تصاویر SLC، اولین مرحله پردازش، خواندن این تصاویر و پارامترهای آنها است. در واقع یکی از تصاویر به عنوان تصویر Master و تصویر دیگر به عنوان تصویر Slave خوانده می‌شود. در مراحل بعدی تصویر Slave نسبت به تصویر Master ثبت هندسی می‌گردد.

تخمین میزان offset تصویر Slave نسبت به تصویر Master

از آنجاکه فاز تداخلی از اختلاف فاز دو تصویر SAR حاصل می‌گردد، لذا روشن است که ابتدا باید دو تصویر نسبت به هم ثبت هندسی شوند. بدین منظور میزان offset تصویر Slave در هر دو جهت pixel و line نسبت به تصویر Master محاسبه می‌گردد.

در پردازش تصاویر SAR برای انجام این مرحله، ابتدا تابع Cross Correlation دوبعدی برای تصاویر intensity در یک موقعیت تعریف شده توسط کاربر محاسبه می‌گردد. ماکزیمم این تابع، offset اولیه تصویر Slave را نسبت به تصویر

Master می‌دهد. پس از آن میزان دقیق offset با استفاده از بهینه‌سازی Cross Correlation Optimization (Cross Correlating) تصاویر محاسبه می‌گردد. این الگوریتم به سرعت میزان offset را با همبسته سازی (Correlating) قطعات تصویر تولید می‌کند. پس از محاسبه میزان offset های بین دو تصویر، یک مدل چندجمله‌ای بر این offset ها با استفاده از روش کمترین مربعات خطی برازش TPT می‌گردد.

ثبت هندسی تصاویر و تشکیل اینترفروگرام

در این مرحله با خواندن تصاویر Master و Slave، پارامترهای متناظر این تصاویر و نتایج محاسبه میزان offset بین آنها، از چندجمله‌ایهای offset در جهات range و azimuth برای ثبت هندسی تصویر Slave به هندسه تصویر Master استفاده می‌شود. سپس از تصاویر ثبت هندسی شده برای تشکیل اینترفروگرام مختلط استفاده می‌گردد. اینترفروگرام مختلط نرمالیزه شده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{Complex Interferogram} = \frac{\langle S_1 S_2^* \rangle}{\sqrt{\langle S_1 S_1^* \rangle \langle S_2 S_2^* \rangle}} \quad (8)$$

در این رابطه S_1 و S_2 مقادیر مختلط single look تصاویر Master و Slave می‌باشند. بدیهی است که فاز اینترفروگرام حاصل از این مرحله شامل اثرات مختلف سطح مرجع، توپوگرافی، جابجایی و نویز می‌باشد.

مسطح سازی اینترفروگرام TP1TP

در این مرحله ابتدا خط مبنای مکانی تصاویر تشکیل دهنده اینترفروگرام، با استفاده از اطلاعات بردار موقعیت سنجنده که در فایل پارامترهای تصاویر SLC موجود می‌باشد، محاسبه می‌گردد و سپس رمپ فاز زمین مسطح TP2PT با استفاده از اطلاعات خط مبنای مکانی محاسبه و از مقادیر مختلط اینترفروگرام، در فرآیندی که مسطح سازی اینترفروگرام گفته می‌شود، حذف می‌گردد. در واقع در این مرحله فاز ناشی از سطح مرجع (مثل WGS84) از فاز تداخلی اینترفروگرام حذف می‌گردد. این کار با ضرب درایه به درایه اینترفروگرام مختلط I در مزدوج مختلط فاز سطح مرجع در حوزه مختلط انجام می‌گیرد:

$$I_{flat} = I \cdot (\cos R_\phi - j \sin R_\phi) \quad (9)$$

که I_{flat} اینترفروگرام مسطح شده، I اینترفروگرام مختلط، R_ϕ فاز سطح مرجع و . نشان دهنده ضرب نقطه‌ای TP3PT است. فاز تداخلی اینترفروگرام حاصل پس از انجام مسطح سازی اینترفروگرام شامل اثرات توپوگرافی، جابجایی و نویز می‌باشد.

حذف اثر توپوگرافی از فاز تداخلی

¹. Interferogram flattening

². Flat earth phase ramp

³. point wise multiplication

در تداخل سنجی راداری روش‌های مختلفی برای حذف اثر توپوگرافی از فاز تداخلی وجود دارد. با توجه به داده‌های موجود، در این پژوهش از روش تداخل سنجی دیفرانسیلی دومسیری استفاده و فاز توپوگرافی مورد نیاز مدل ارتفاعی SRTMTP\PT شبیه‌سازی شده است.

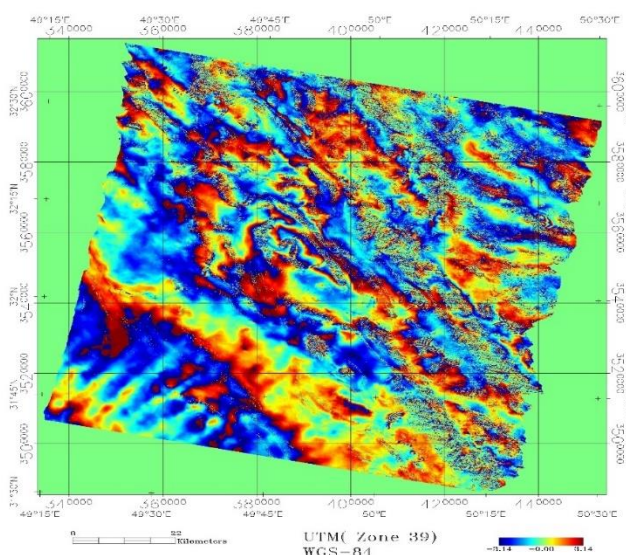
با کسر این فاز توپوگرافی شبیه‌سازی شده از فاز اینترفروگرام، اثر توپوگرافی از فاز تداخلی حذف و تنها اثرات جابجایی و نویز باقی می‌ماند. اگرچه حذف کامل نویز از تصاویر مقدور نیست اما با اعمال فیلترهای کاهش نویز اثرات نویز کاهش یافته و اینترفروگرام حاوی سیگنال‌های جابجایی بدست می‌آید.

اینترفروگرام‌های حاصل

با انجام مراحل فوق بر روی کلیه زوج تصاویرهای موجود، نهایتاً هفت اینترفروگرام تشکیل شد. از آنجاکه عوامل مختلف محیطی و غیر محیطی ممکن است باعث کاهش همبستگی تصاویر راداری شود، لذا در این تحقیق نیز در چهار اینترفروگرام حاصل سیگنال‌های مفید و قابل تفسیری مشاهده نگردید. اما در سه اینترفروگرام مربوط به Track شماره ۱۴۹ فرینج‌های متعددی که نشان از وقوع زمین لغزش دارند ملاحظه می‌شود. لذا در ادامه سه اینترفروگرام حاصل از تصاویر مربوط به Track شماره ۱۴۹ تفسیر می‌شوند. به منظور سهولت در تفسیر نتایج، تصاویر SAR با در نظر گرفتن زمان اخذ این تصاویر نامگذاری شده‌اند. به عنوان مثال تصویر اخذ شده در تاریخ ۲۰۰۵/۷/۲۲ با نام ۰۵۰۷۲۲ نامگذاری شده است. بر این اساس اینترفروگرام حاصل از دو تصویر اخذ شده در تاریخ‌های ۲۰۰۵/۷/۲۲ و ۲۰۰۵/۵/۱۳ با نام اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۵۱۳ نامیده شده است.

نتایج اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۵۱۳

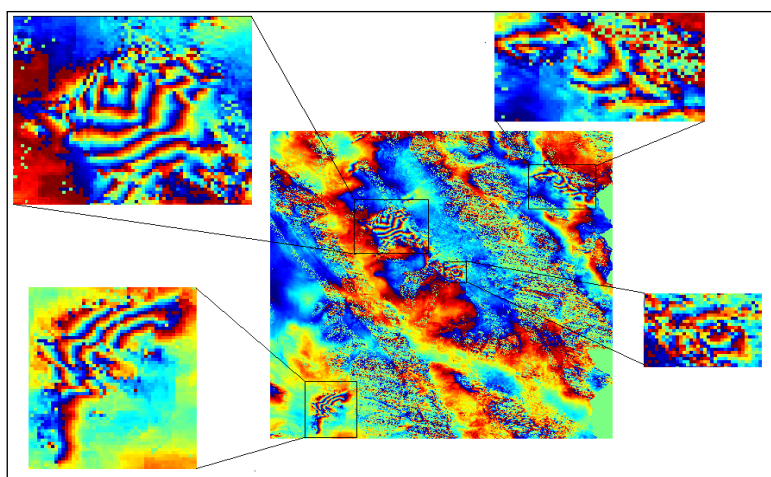
اینترفروگرام حاصل از پردازش دو تصویر اخذ شده در تاریخ‌های ۲۰۰۵/۵/۱۳ و ۲۰۰۵/۷/۲۲ در شکل ۱ زیر مشاهده می‌گردد.



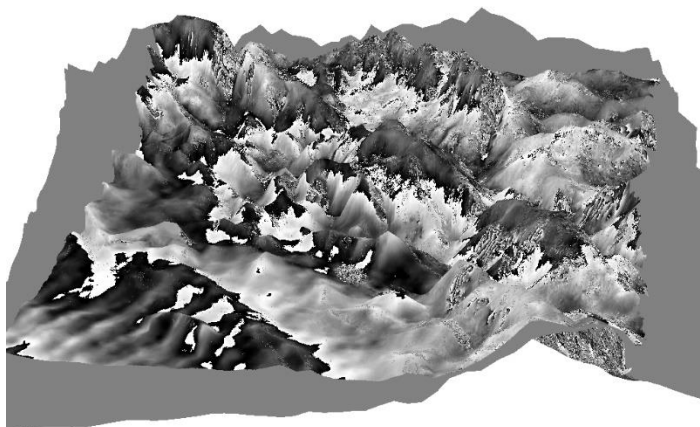
شکل ۱: اینترفروگرام حاصل از پردازش تصاویر اخذ شده در تاریخ‌های ۲۰۰۵/۷/۲۲ و ۲۰۰۵/۵/۱۳

با توجه به حذف اثر توپوگرافی در اینترفروگرام فوق و با در نظر گرفتن این واقعیت که در بازه زمانی اخذ تصاویر تشکیل دهنده این اینترفروگرام زلزله‌ای در این منطقه ثبت نگردیده است لذا فرینج‌های شکل گرفته در این اینترفروگرام را می‌توان به وقوع زمین لغزش مرتبط دانست. شایان ذکر است که باتوجه به فاصله کوتاه زمانی (۷۰ روز) بین دو تصویر تشکیل دهنده این اینترفروگرام، فرینج‌های حاصل را نمی‌توان به پدیده فرونشست مرتبط دانست.

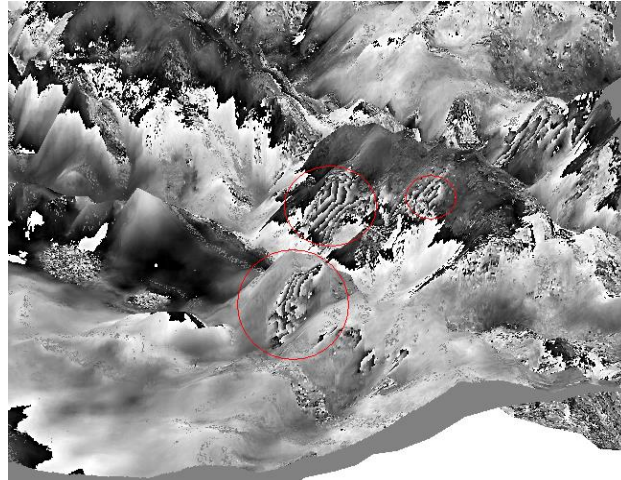
ضمن آنکه با تطابق محل فرینج‌ها با تصاویر دامنه اینترفروگرام و نیز با تشکیل مدل سه‌بعدی منطقه، وقوع این فرینج‌ها در دامنه کوه‌ها مشاهده گردیده است که این خود به احتمال تعلق فرینج‌ها به پدیده زمین لغزش قوت می‌بخشد. علاوه بر این با توجه به زمان اخذ تصاویر تشکیل دهنده این اینترفروگرام که ماه‌های اردیبهشت و تیر می‌باشد، به دلیل شدت بارندگی در این بازه زمانی در منطقه مورد مطالعه همواره زمین‌لغزش‌های زیادی در این فصل از سال مشاهده شده است. شکل زیر بزرگنمایی بخشی از اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۵۱۳ را نشان می‌دهد. در این شکل فرینج‌های تشکیل شده در قسمت‌های مختلف اینترفروگرام به خوبی قابل تشخیص است.



شکل ۲: بزرگنمایی بخشی از اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۵۱۳ و شناسایی فرینج‌های جابجایی در قسمت‌های مختلف در شکل (۳) مدل سه‌بعدی منطقه مشاهده می‌شود و در شکل (۴) بزرگنمایی بخشی از این مدل مشاهده می‌شود. چنانکه ملاحظه می‌گردد مناطق حاوی فرینج‌های جابجایی که با دایره‌های قرمز رنگی در شکل (۴) مشخص شده‌اند در دامنه کوه‌ها واقعند که چنانکه قبلاً ذکر شد این موضوع یکی از دلایل منتسب دانستن این فرینج‌های جابجایی به پدیده زمین-لغزش است.

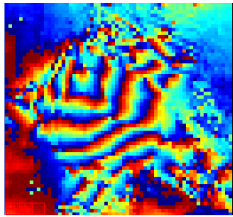
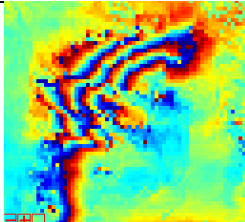


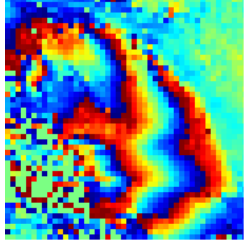
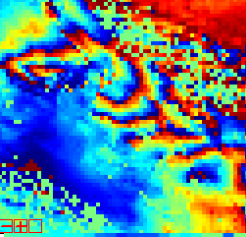
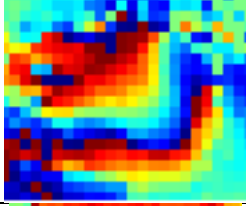
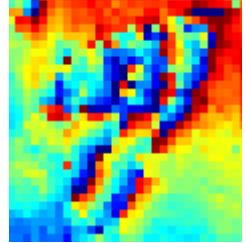
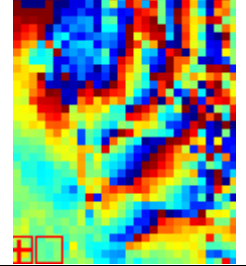
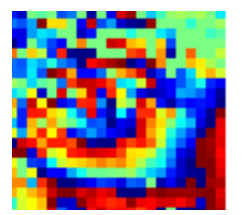
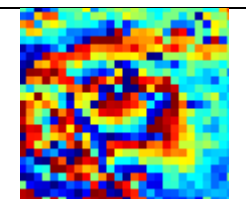
شکل ۳: دید سه‌بعدی از منطقه مربوط به اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۵۱۳

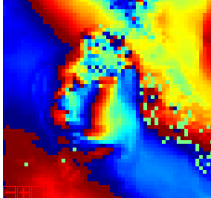


شکل ۴: بزرگنمایی بخشی از مدل سه‌بعدی منطقه که نشانگر واقع بودن فرینج‌های جابجایی بر روی دامنه کوه‌ها است با بررسی اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۵۱۳-۰۵ ده منطقه مختلف حاوی فرینج‌های جابجایی شناسایی شد که مختصات این محدوده‌ها و حداکثر میزان جابجایی پوسته زمین در هر یک از این مناطق در جهت دید سنجنده راداری در جدول زیر مشاهده می‌گردد.

جدول ۴: زمین لغزش های شناسایی شده در اینترفروگرام 050513-050722

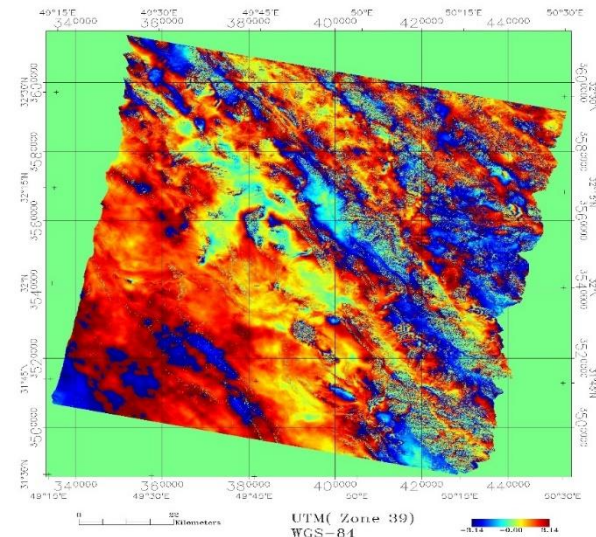
شماره	مختصات گوشه سمت چپ بالا	مختصات گوشه سمت راست پایین	بیشترین میزان جابجایی در جهت دید سنجنده راداری (سانتیمتر)	تصویر اینترفروگرام
۱	31 54' 32.73" N 50 05' 3.20" E 3530725.00 N 413413.00 E	31 52' 10.69" N 50 07' 52.44" E 3526315.00 N 417823.00 E	14 cm	
۲	31 43' 7.02" N 50 1' 10.59" E 3509665.00 N 407113.00 E	31 40' 10" N 50 4' 00" E 3504175 N 411523 E	11 cm	

تصویر اینترفروگرام	بیشترین میزان جابجایی در جهت دید سنجنده راداری (سانتیمتر)	مختصات گوشه سمت راست پایین	مختصات گوشه سمت چپ بالا	شماره
	5.6 cm	32 11' 10.40" N 50 23' 57.78" E 3561235 N 443383 E	32 13' 33" N 50 21' 42.74" E 3565645 N 439873 E	۳
	11 cm	31 55' 2" N 50 19' 19" E 3531445 N 435913 E	31 57' 6" N 50 15' 46" E 3535315 N 430333 E	۴
	5.6 cm	32 14' 7.74" N 49 42' 44.12" E 3567265 N 378673 E	32 15' 11" N 49 41' 6.92" E 3569245 N 376153 E	۵
	8.4 cm	32 27' 58.72" N 49 39' 36.51" E 3592915 N 374083 E	32 29' 19.61" N 49 38' 9.11" E 3595435 N 371833 E	۶
	11.2 cm	32 30' 42.56" N 49 35' 25.75" E 3598045 N 367603 E	32 32' 38.34" N 49 33' 47.33" E 3601645 N 365083 E	۷
	5.6 cm	31 59' 2.28" N 50 6' 33.12" E 3539005 N 415843 E	32 0' 6" N 50 5' 10.18" E 3540985 N 413683 E	۸
	5.6 cm	31 49' 46.04" N 50 11' 39.76" E 3521815 N 423763 E	31 50' 58.51" N 50 10' 6.67" E 3524065 N 421333 E	۹

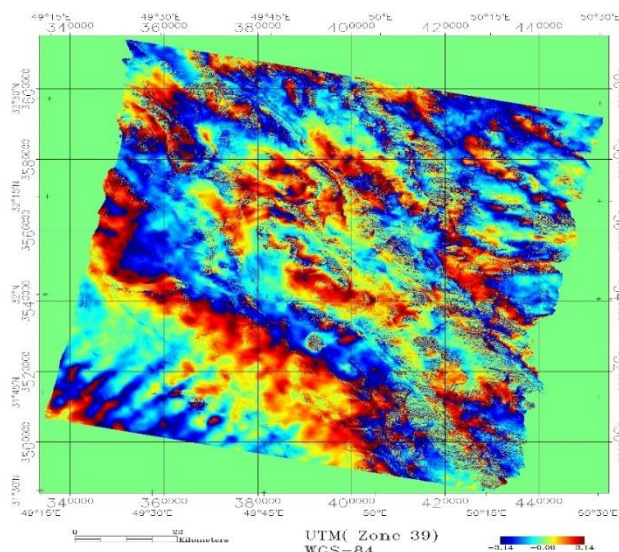
شماره	مختصات گوشه سمت چپ بالا	مختصات گوشه سمت راست پایین	بیشترین میزان جابجایی در جهت دید سنجنده راداری (سانتیمتر)	تصویر اینترفروگرام
۱۰	32 5' 2.72" N 49 35' 56.39" E 3550615 N 367783 E	32 3' 12.8" N 49 37' 41" E 3547195 N 370483 E	2.8 cm	

مقایسه مناطق شناسایی شده در اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۵۱۳+ با مناطق نظیر در اینترفروگرام‌های ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۸۲۶+ و ۰۵۰۸۲۶-۰۵۰۵۱۳+

اینترفروگرام‌های حاصل از پردازش تصاویر اخذ شده در تاریخ‌های ۲۰۰۵/۵/۱۳ و ۲۰۰۵/۸/۲۶ و نیز اینترفروگرام حاصل از پردازش تصاویر ۲۰۰۵/۷/۲۲ و ۲۰۰۵/۸/۲۶ برترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند.

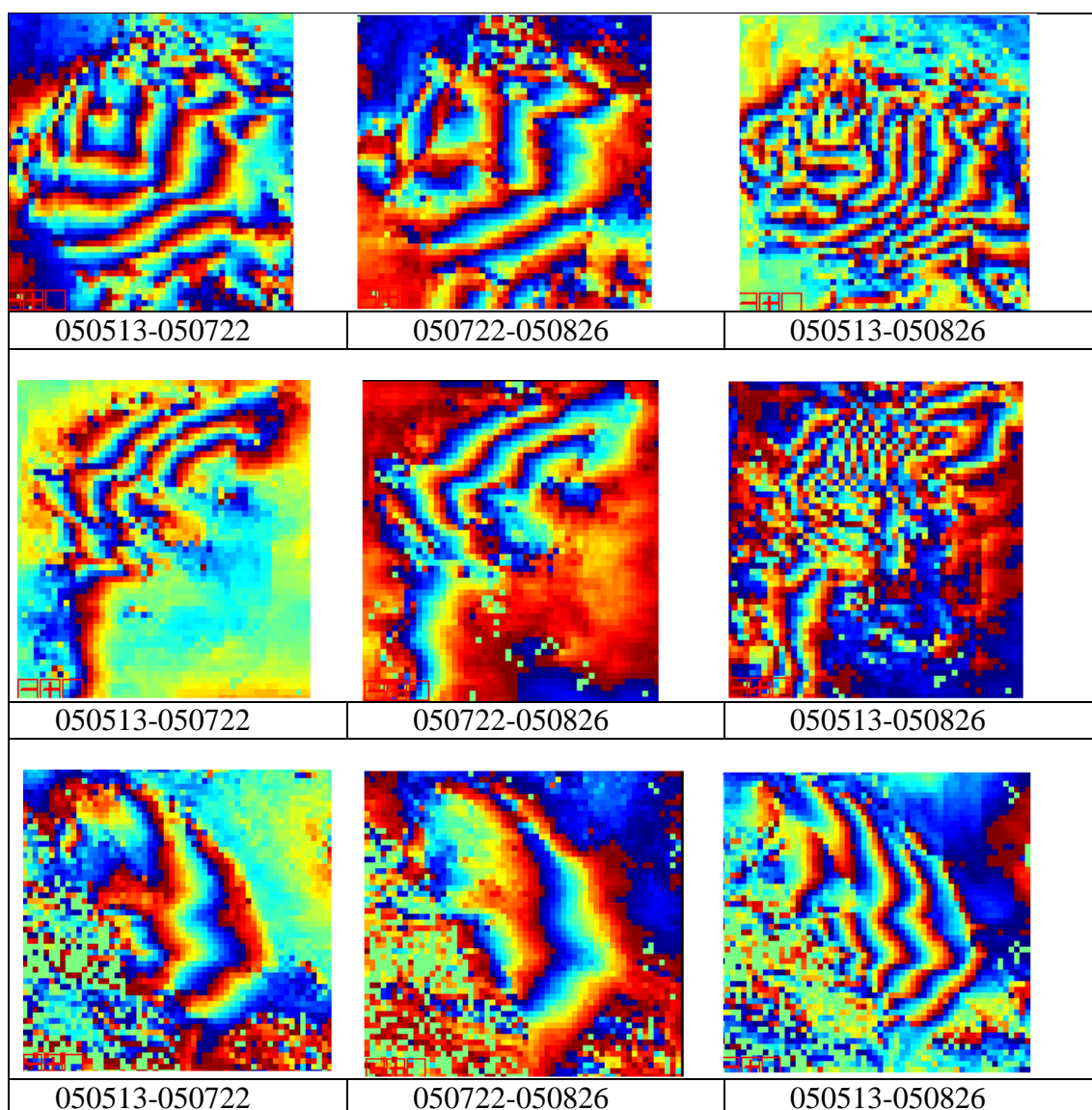


شکل ۵: اینترفروگرام حاصل از پردازش تصاویر اخذ شده در تاریخ‌های ۲۰۰۵/۸/۲۶ و ۲۰۰۵/۵/۱۳



شکل ۶: اینترفروگرام حاصل از پردازش تصاویر اخذ شده در تاریخ‌های ۲۰۰۵/۸/۲۶ و ۲۰۰۵/۷/۲۲

به منظور بررسی بیشتر مناطق شناسایی شده به عنوان زمین لغزش در اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۵۱۳، این مناطق با مناطق نظیر آنها در دو اینترفروگرام ۰۵۰۷۲۲-۰۵۰۸۲۶ و ۰۵۰۵۱۳-۰۵۰۸۲۶ مقایسه گردید. تصویر این مناطق در سه مورد در هر سه اینترفروگرام مذکور در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد. با توجه به این تصاویر و با تفسیر میزان جابجایی مربوط به فرینج‌های تشکیل شده، میزان جابجایی ناشی از زمین لغزش در دو بازه زمانی ۲۰۰۵/۵/۱۳ تا ۲۰۰۵/۷/۲۲ و ۲۰۰۵/۷/۲۲ تا ۲۰۰۵/۸/۲۶ روند یکنواختی بوده که با نتایج اینترفروگرام پوشاننده کل بازه زمانی ۲۰۰۵/۵/۱۳ تا ۲۰۰۵/۸/۲۶ نیز سازگار است.



شکل ۷: مقایسه مناطق دارای جابجایی در سه اینترفروگرام

در جدول زیر حداکثر میزان جابجایی برای هر یک از زمین لغزش‌های شناسایی شده در جهت دید سنجنده راداری در هر یک از اینترفروگرام‌های 050513-050722، 050722-050826 و 050513-050826 ملاحظه می‌گردد. با توجه به سازگاری مشاهدات هر سه اینترفروگرام، میزان تقریبی متوسط نرخ جابجایی نیز برای هر یک از این زمین لغزش‌ها محاسبه شده است.

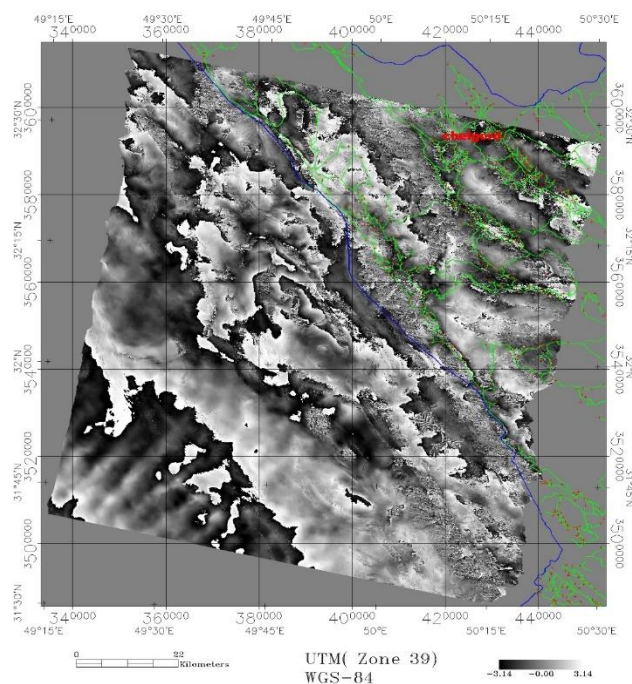
جدول ۵: خصوصیات زمین لغزش های شناسایی شده در هر سه اینترفروگرام

نرخ تقریبی حداکثر میزان جابجایی در جهت دید سنجنده راداری (cm/month)	بیشترین میزان جابجایی در جهت دید سنجنده راداری در بازه‌های مختلف زمانی (cm)			مختصات گوشه سمت راست پایین	مختصات گوشه سمت چپ بالا	شماره
	050513-050826	050722-050826	050513-050722			
10.7	25 cm	11.2 cm	14 cm	31 52' 10.69" N 50 07' 52.44" E 3526315.00 N 417823.00 E	31 54' 32.73" N 50 05' 3.20" E 3530725.00 N 413413.00 E	۱
8.3	19.5	8.4	11.2 cm	31 40' 10" N 50 4' 00" E 3504175 N 411523 E	31 43' 7.02" N 50 1' 10.59" E 3509665.00 N 407113.00 E	۲
4.8	11.2	5.6	5.6 cm	32 11' 10.40" N 50 23' 57.78" E 3561235 N 443383 E	32 13' 33" N 50 21' 42.74" E 3565645 N 439873 E	۳
8.3	NA	8.4	11 cm	31 55' 2" N 50 19' 19" E 3531445 N 435913 E	31 57' 6" N 50 15' 46" E 3535315 N 430333 E	۴
3.6	8.4	2.8	5.6 cm	32 14' 7.74" N 49 42' 44.12" E 3567265 N 378673 E	32 15' 11" N 49 41' 6.92" E 3569245 N 376153 E	۵
4.8	11.2	2.8	8.4 cm	32 27' 58.72" N 49 39' 36.51" E 3592915 N 374083 E	32 29' 19.61" N 49 38 9.11" E 3595435 N 371833 E	۶
8.4	NA	8.4	11.2 cm	32 30' 42.56" N 49 35' 25.75" E 3598045 N 367603 E	32 32' 38.34" N 49 33' 47.33" E 3601645 N 365083 E	۷
4.8	NA	5.6	5.6 cm	31 59' 2.28" N 50 6' 33.12" E 3539005 N 415843 E	32 0' 6" N 50 5' 10.18" E 3540985 N 413683 E	۸
4.8	11.2	5.6	5.6 cm	31 49' 46.04" N 50 11' 39.76" E 3521815 N 423763 E	31 50 58.51" N 50 10 6.67" E 3524065 N 421333 E	۹
4.8	11.2	5.6	5.6 cm	32 3' 12.8" N 49 37' 41" E 3547195 N 370483 E	32 5' 2.72" N 49 35' 56.39" E 3550615 N 367783 E	۱۰

قطع نقشه‌های نقاط مسکونی و مسیرهای ارتباطی با نقشه جابجایی

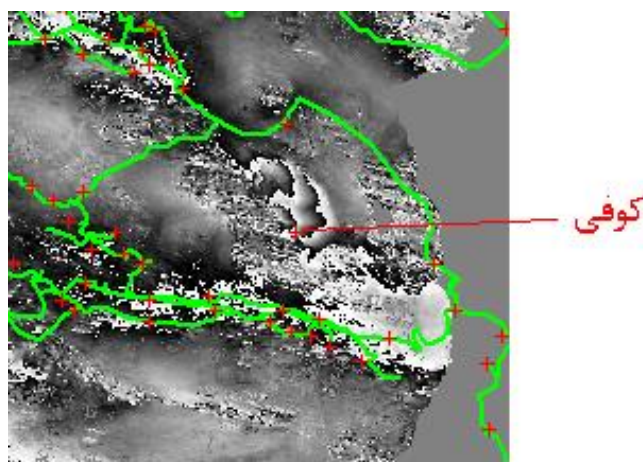
به منظور آگاهی از موقعیت زمین لغزش‌های شناسایی شده نسبت به نقاط مسکونی و مسیرهای ارتباطی، لایه‌های مربوط به نقشه این عوارض بر روی نقشه اینترفروگرام شامل فرینج‌های جابجایی قرار گرفت که در شکل (۸) مشاهده می‌شود.

در این شکل مرز استان چهار محال و بختیاری با رنگ آبی و راه‌های ارتباطی با رنگ سبز مشخص می‌باشد. چنانکه ملاحظه می‌شود بخشی از این نقشه در استان چهار محال و بختیاری واقع شده است. این بخش شامل بخش‌هایی از شهرستان چلگرد و شهرستان اردل می‌باشد. از میان مناطق شناسایی شده بعنوان زمین لغزش که مختصات آنها در جدول (۵) ارائه گردید، تنها دو مورد شامل موارد ۳ و ۴ در استان چهار محال و بختیاری واقع شده است.



شکل ۸: نقشه حاصل از قطع نقاط مسکونی و شبکه ارتباطی با اینترفروگرام جابجایی

از میان مناطق شناسایی شده بعنوان زمین لغزش که مختصات آنها در جدول (۵) ارائه گردید، تنها دو مورد شامل موارد ۳ و ۴ در استان چهار محال و بختیاری واقع شده است. به منظور آگاهی از موقعیت این دو زمین لغزش در استان چهار محال و بختیاری نسبت به مناطق مسکونی و مسیرهای ارتباطی، محدوده‌های مربوط به این مناطق در نقشه نشان داده شده در شکل (۸) بزرگنمایی شده است که در شکل‌های (۹) و (۱۱) ملاحظه می‌شود.



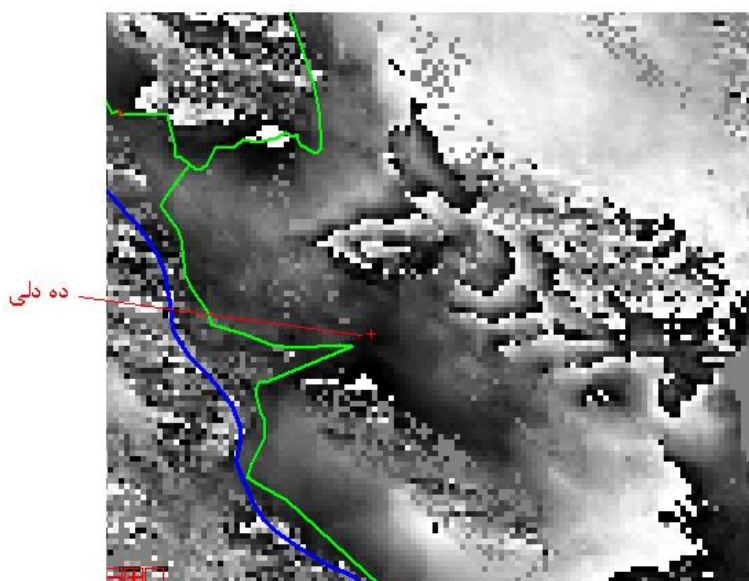
شکل ۹: بزرگنمایی بخشی از شکل مربوط به محل قرارگیری زمین لغزش شماره ۳

چنانکه در شکل فوق ملاحظه می‌گردد زمین لغزش شماره ۳ در مجاورت روستای کوفی از توابع دهستان دوآب، بخش بازفت در شهرستان کوهرنگ واقع شده است. همچنین موقعیت محدوده زمین لغزش نسبت به مسیر ارتباطی در شکل فوق ملاحظه می‌گردد. موقعیت روستای کوفی در استان چهارمحال و بختیاری و نیز تصویر ماهواره‌ای این منطقه (برگرفته از google earth) در شکل ذیل ملاحظه می‌شود.



شکل ۱۰: موقعیت زمین لغزش شناسایی شده در مجاورت روستای کوفی به همراه تصویر ماهواره‌ای منطقه (اخذ شده از google earth)

چنانکه در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود زمین لغزش شماره ۴ در مجاورت روستای ده‌دلی از توابع دهستان دیناران، بخش مرکزی در شهرستان اردل واقع شده است. علاوه بر این موقعیت محدوده زمین لغزش نسبت به مسیر ارتباطی در این شکل مشخص است.



شکل ۱۱: بزرگنمایی بخشی از شکل (۸) مربوط به محل قرارگیری زمین لغزش شماره ۴

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق توانایی تکنیک تداخل سنجی راداری، به عنوان یکی از تواناترین تکنیک‌های سنجش از دوری در اندازه‌گیری جابجایی‌های پوسته زمین، در شناسایی و پایش زمین لغزش‌های فعال در مناطقی از استان چهارمحال و بختیاری ارزیابی شد. بدین منظور ده تصویر سنجنده راداری ASAR مربوط به سال ۲۰۰۵ میلادی از سازمان فضایی اروپا دریافت شد. با پردازش این تصاویر نهایتاً سه اینترفروگرام از تصاویر اخذ شده از track شماره ۱۴۹ در زمان‌های ۲۰۰۵/۵/۱۳، ۲۰۰۵/۷/۲۲ و ۲۰۰۵/۸/۲۶ حاصل شد. این مسئله را می‌توان به عوامل کاهش همبستگی تصاویر همچون عوامل Baseline Decorrelation و Temporal Decorrelation مربوط دانست.

با بررسی اینترفروگرام‌های تشکیل شده که فاز توپوگرافی از آنها حذف شده و تنها فاز جابجایی پوسته زمین باقی مانده بود، وجود فرینج‌های مشخصی که بیانگر وقوع جابجایی پوسته زمین در فاصله زمانی اخذ تصاویر تشکیل دهنده اینترفروگرام‌ها بودند، مشاهده شد. در کل سطح سه اینترفروگرام، ده محدوده، شامل فرینج‌های جابجایی شناسایی گردید که مختصات‌های مربوطه در جدول (۴) ارائه شده‌اند. با تطابق این محدوده‌ها با مدل ارتفاعی منطقه محدوده‌های مربوط به وقوع این جابجایی‌ها در دامنه کوه‌ها مشاهده گردید. با توجه به این مسئله، جابجایی‌های کشف شده به پدیده زمین لغزش مرتبط شد.

از میان ده زمین لغزش کشف شده در منطقه مورد مطالعه صرفاً دو مورد از آنها در استان چهارمحال و بختیاری در مجاورت روستاهای کوفی و ده دلی از توابع شهرستان‌های کوه‌رنگ و اردل، واقع شده‌اند. با توجه وسعت پوشش تصاویر مورد استفاده (100km X 100km) مابقی زمین لغزش‌های شناسایی شده در استان خوزستان واقع شده‌اند. با توجه به در اختیار بودن تصاویر در سه بازه زمانی، نرخ تقریبی ماکزیمم حرکت زمین لغزش‌های شناسایی شده در جهت دید سنجنده راداری بر حسب سانتیمتر بر ماه برآورد گردید.

پوشش وسیع تصاویر مورد استفاده (حدود 100km X 100km) در تکنیک InSAR از مزایای مهم این تکنیک به حساب می‌آید. به طوریکه ملاحظه گردید بخش‌های وسیعی از استان‌های چهارمحال و بختیاری و خوزستان در هر یک از تصاویر مورد استفاده پوشش داده شد. لذا در صورت استفاده از این تکنیک امکان شناسایی زمین لغزش‌های فعال حتی در مناطق دور افتاده فراهم است. این درحالیست که در دیگر تکنیک‌ها همچون استفاده از مشاهدات GPS، امکان اظهار نظر در

مورد فعال بودن زمین لغزش فقط در مناطقی که مشاهدات در آن منطق برنامه‌ریزی و در زمان‌های خاصی انجام شده است امکان پذیر است.

علاوه بر این با توجه به وجود تصاویر در آرشیو ماهواره‌های راداری چون ماهواره ENVISAT امکان پایش زمین لغزش‌ها در طول سال‌های گذشته تا زمان حال وجود دارد. پیوسته بودن مشاهدات InSAR که در آنها سطح توده جابجا شده به سهولت قبل مشاهده است مزیت مهمی در مقابل مشاهدات GPS محسوب می‌گردد. با وجود مزایای مذکور برای تکنیک InSAR، این تکنیک نیز همچون هر روش دیگر علمی کاملاً ایده‌آل نبوده و چنانکه در این مقاله نیز مشاهده شد شامل محدودیت‌های خاص خود است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

یکی از مهمترین محدودیت‌های تکنیک تداخل سنجی راداری در این مطالعه ارائه میزان جابجایی در جهت دید سنجنده راداری است که نمی‌توان آنرا به سهولت در سه جهت x, y, z تصویر نمود. اگرچه با بهره‌گیری از اینترفروگرام‌های اضافی از زوایای دید متفاوت (مثلاً با استفاده از اینترفروگرام‌های حاصل از عبورهای ascending و descending) امکان تصویر بردار جابجایی در سه جهت x, y, z میسر می‌گردد، اما در این پژوهش چنین مشاهداتی از منطقه مورد مطالعه در اختیار نبود.

محدودیت دیگر در استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری دیفرانسیلی، مناسب نبودن تمامی تصاویر راداری اخذ شده برای تشکیل اینترفروگرام‌های جابجایی است. در واقع چنانکه قبلاً نیز اشاره شد عوامل کاهش دهنده همبستگی تصاویر همچون عدم همبستگی هندسی (Baseline Decorrelation) و عدم همبستگی زمانی (Temporal Decorrelation) از موانع مهم در استفاده از این تکنیک در شرایط مختلف محسوب می‌گردند.

چنانکه در این مقاله نیز از میان ده تصویر تهیه شده صرفاً اینترفروگرام‌های حاصل از سه تصویر از کیفیت مطلوب برای تفسیر فاز تداخلی برخوردار بودند. البته باید در نظر داشت که در صورت استفاده از تکنیک PS-InSAR (Permanent Scatterer InSAR) امکان استفاده از تمامی تصاویر موجود فراهم می‌گردد. شایان ذکر است که در این تکنیک فاز نقاط پایدار در تصاویر راداری در طول زمان بررسی و میزان تغییرات و نهایتاً جابجایی‌ها مدل می‌شود. در حالیکه استفاده از این تکنیک در مناطق شهری به علت وجود ساختمان‌ها به عنوان نقاط پایدار، امکان پذیر می‌باشد اما در بحث زمین لغزش به دلیل عدم وجود و یا کم بودن چنین نقاطی در طبیعت، استفاده از آن مشکل است.

دیگر عامل محدود کننده این تکنیک را می‌توان قدرت تفکیک مکانی پایین اینترفروگرام‌های حاصل دانست. در واقع، اگرچه قدرت تفکیک مکانی تصاویر سنجنده ASAR در مد IMS پس از پردازش تصاویر برای تشکیل اینترفروگرام در هر دو جهت رنج و آزیموت به ۲۰ متر می‌رسد اما با توجه به مدل ارتفاعی مورد استفاده برای شبیه‌سازی فاز توپوگرافی که دارای اندازه پیکسل ۹۰ متر می‌باشد، اندازه پیکسل اینترفروگرام نیز به حدود ۹۰ متر افزایش می‌یابد. لذا چنانکه ملاحظه می‌گردد اندازه پیکسل اینترفروگرام‌های حاصل ۹۰ متر می‌باشد که این خود باعث از دست دادن محدوده‌های کوچک جابجایی و به عبارت دیگر زمین لغزش‌های کوچک می‌شود. لذا چنانکه در جدول (۵) نیز ملاحظه می‌گردد. زمین لغزش‌های شناسایی شده در این مطالعه، زمین لغزش‌های واقع شده در محدوده‌های بزرگ می‌باشند.

در نهایت با توجه به قابلیت‌ها و محدودیت‌های تکنیک تداخل سنجی راداری، پیشنهادات ذیل برای استفاده از این تکنیک در مطالعه و بررسی زمین لغزش‌ها ارائه می‌شود.

الف) از آنجاکه امکان شناسایی زمین لغزش و محاسبه بردار جابجایی در جهت دید سنجنده راداری با دقت بالا با استفاده از تکنیک InSAR وجود دارد، بهره‌گیری از این تکنیک در شناسایی و پایش زمین لغزش‌های فعال به منظور تکمیل بانک اطلاعاتی زمین لغزش‌ها پیشنهاد می‌شود.

ب) انجام تحقیقاتی به منظور استخراج ابعاد و اجزاء یک زمین لغزش (شامل پارامترهایی چون تاج، قله، پای لغزش، توده جابجا شده، پهنه تهی شدگی، پهنه تجمع و غیره) از نتایج تکنیک InSAR جهت مدل‌سازی زمین لغزش ضروری به نظر می‌رسد.

ج) مشاهدات نقطه‌ای و دقیق GPS می‌تواند به عنوان مکمل مشاهدات InSAR (به صورت پیوسته و در سطحی وسیع) در مدل‌سازی زمین‌لغزش‌ها استفاده شود.

د) باتوجه به قدرت تفکیک مکانی پایین اینترفروگرام جابجایی حاصل که ناشی از استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با اندازه پیکسل ۹۰ متر بود، انجام تحقیقاتی به منظور استفاده از مدل‌های ارتفاعی رقومی با اندازه پیکسل بهتر جهت بازسازی فاز توپوگرافی و نهایتاً بدست آوردن اینترفروگرام جابجایی با رزولوشن مکانی بهتر ضروری می‌نماید. بدون شک در چنین اینترفروگرامی احتمال شناسایی زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در محدوده‌های کوچک افزایش خواهد یافت.

منابع

- فتاحی هیرش، محمد جواد ولدان زوج، محمد رضا مباشری و مریم دهقانی "ارائه الگوریتمی برای کاهش نویز فاز تداخل سنجی راداری مورد استفاده در تعیین میزان جابجایی‌های پوسته زمین، بر اساس تبدیل موجک در حوزه مختلط"، مجله علمی-پژوهشی علوم زمین، زمستان ۸۶، سال هفدهم، شماره ۶۶.
- فتاحی هیرش، بررسی *InSAR* و کاربردهای آن در مطالعه بلایای طبیعی، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، زمستان ۱۳۸۴.
- فتاحی هیرش، کاهش نویز اینترفروگرام‌های راداری بر مبنای تحلیل‌های فرکانس- مکان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، شهریور ۱۳۸۶.
- Ahmad, F.H., Lozovskiy, V.F., & Castellane, R.M. (2005). *Interferometric phase estimation through a feedback loop technique. Optics Communications, Vol. 251, pp 51-58.*
- Avallone, A., Zollo, A., Birole, P., Delacourt, C., Beauducel, F. (1999). *Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. Geophysical Research Letters, Vol. 26, No. 15.*
- Baran, I., Stewart, M.P., Kampes, B.M., Perski, Z., & Lilly, P. (2003). *A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No 9.*
- Çakir, Z., Barak, A.A., Chabaliier, J.B.D., Armijo, R., & Meyer, B. (2003). *Kinematics of the November 12, 1999 (Mw=7.2) Düzce Earthquake Deduced from SAR Interferometry. Turkish Journal of Earth Sciences, Vol. 12, pp 105 118.*
- Cakir, Z., Akoglu, A.M., Belabbes, S., Ergintav, S., & Meghraoui, M. (2005). *Creeping along the Ismetpasa section of the North Anatolian fault (Western Turkey): Rate and extent from InSAR. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 238, pp 225-234.*
- Chen, C.W., & Zebker, H.A. (2002). *Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 8.*
- Dehghani, M., Valdan Zouj, M.J., & Abrishami Moghadam, H. (2004). *An Efficient Byesian-Based algorithm for Speckle Noise Reduction of SAR Images Using Wavelet Transform. M.Sc. Thesis. K.N.Toosi University of Technology.*
- Fodor, I.K., Kamath, C. (2001). *Denoising Through Wavelet Shrinkage: An Empirical Study. Journal of Electronic Imaging.*
- Froger, J.-L., Remy, D., Bonvalot, S., & Legrand, D. T(2007). *Two scales of inflation at Lastarria-Cordon del TAzufreT volcanicTT complex, central Andes, revealed from ASAR-*

- ENVISAT interferometric data*. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 255, Issues 1-2, pp 148-163.
- FUK, K.LI., & Goldstein, R.M. (1990). *Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No 1.
 - Funning, G.J., Barke, R.M.D., Lamb, S.H., Minaya, E., Parsons, B., & Wright, T.J. (2005). *The 1998 Aiquile, Bolivia earthquake: A seismically active fault revealed with InSAR*. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 232, pp 39-49.
 - Funning, G.J., Parsons, B., & Wright, T.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.
 - Gens, R. (2006). *From SAR data to information: status, trends and future*. *ISPRS Mid-term symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes"*, Enschede, the Netherlands.
 - Goldstein, M.R., & Werner, C.L. (1998). *Radar Interferogram Filtering for geophysical applications*. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 21.
 - Gonzalez, R.C., & Woods, R.E. (2002). *Digital Image processing*. 2nd ed. New York : Prentice-Hall.
 - Graham, L.C. (1974). *Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping*. *Proceeding of the IEEE*, Vol. 62, No 6.
 - Hanssen, R..F. (2001). *Radar Interferometry: Data interpretation and error analysis*. *Kluwer Acad*, Netherlands.
 - Hanssen, R..F. (2005). *Satellite radar Interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 6, pp 253- 260.
 - Henderson, F.M., & Lewis, A.J. (1998). *Principles and Applications of Imaging Radar*. Vol. 2 of *Manual of Remote Sensing*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 3rd Edition.
 - Kervyn, F., Ayub, S., Kajara, R., Kanza, E., & Temu, B. (2006). *Evidence of recent faulting in the Rukwa rift (West Tanzania) based on radar interferometric DEMs*. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 44, pp 151-168.
 - Kingsbury, N.G. (2001). *Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals*. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, pp.234-253.
 - Lauknes, T.R. (2004). *Long-Term Surface Deformation Mapping using Small-Baseline Differential SAR Interferograms*. Thesis, University of Tromsø, Faculty of Science, Department of Physics.
 - Lee, J.S., Papathanassiou, K.P., Ainsworth, T.L., Grunes, M.H., Reigber, A. (1998). *A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, pp. 1456-1465.
 - Lee, T.S. (1996). *Image Representation Using 2D Gabor Wavelets*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 10.
 - Liu, G.X., Ding, X.L., Li, Z.L, Li, Z.w., Chen, Y.Q., & Yu, S.B. (2004). *Pre- and Co-seismic ground deformations of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, measured with SAR interferometry*. *Computers & Geosciences*. Vol.30 , pp 333-343.
 - Madsen, S.N., & Zebker, H.A. (1993). *Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, No 1
 - Mallat, S. (1998). *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press.
 - Martinez, C.L., & Fabergas, X. (2002). *Modeling and Reduction of SAR Interferometric Phase Noise in the Wavelet Domain*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No 12.

- Martinez, C.L., Canovas, X.F., & Chandra, M. (2001). SAR interferometric phase noise reduction using wavelet transform. *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 10.
- Massonet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzae, G., Feigl, K. and Rabaun, T. (1993), "The displacement field of the Landers Earthquake mapped by Radar interferometry", *Nature*, V.364, pp 138-142.
- Mastriani, M. (2006). New Wavelet-Based Superresolution Algorithm for Speckle Reduction in SAR Images. *International Journal of Computer Science*, Vol. 1, No 4.
- Núñez, J., Otazu, X., Fors, O., Prades, A., Palà, V., & Arbiol, R. (1999). Multiresolution-Based Image Fusion with Additive Wavelet Decomposition. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, No 3.
- Ochoa, N.A., & Silva-Moreno, A.A. (2007). Normalization and noise-reduction algorithm for fringe patterns. *Optics Communications*, Vol. 270, pp 161-168.
- Qian, K., Soon, S.H., & Asundi, A. (2003). Smoothing filters in phase-shifting Interferometry. *Optics & Laser Technology*, Vol. 35, pp 649-654.
- Qian, K., Soon, S.H., & Asundi, A. (2005). A simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform. *Optics & Laser Technology*, Vol. 37, pp 458-462.
- Qian, K. (2007). Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 45, pp 304-317.
- Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Mouelic, S.L., King, C., & Hosford, S. (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*, Vol. 88, Issue. 4, pp 468-478.
- Sharav, A. Differential SAR Interferometry for crustal deformation study. Msc Thesis, ITC
- Zebker, H.A., & Goldstein, R.M. (1986). Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, 4993-4999.
- Zebker, H.A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No 5.
- Zebker, H.A., & Werner, C.L. (1994). Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No 4.
- Zebker, H.A., Rosen, P., Richard, M., Goldstein, R.M., & Werner, C.L. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, B10. 19617-19634.
- Zebker, H.A., Rosen, P.A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, p 4993-4999.
- Zebker, H.A., & Lu, Y. (1998). Phase Unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least squares, and synthesis algorithm. *J. opt. soc. Am. A/* Vol. 15, No 3.
- Zebker, H.A., & Chen, K. (2005). Accurate Estimation of Correlation in InSAR Observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 2, No 2.
- Stramondo, S., Moro, M., Tolomei, C., Cinti, F.R., Doumaz, F. (2005) InSAR Surface displacement field and fault modeling for the 2003 Bam earthquake (southeastern Iran). *Journal of Geodynamics* Vol. 40, pp 347-353.
- Webley, P.W., Bingley, R.M., Dodson, A.H., Wadge, G., Waugh, S.J., & James, I.N. (2002). Atmospheric water vapour correction to InSAR surface motion measurements on mountains: results from a dense GPS network on Mount Etna. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, pp 363-370.
- Wright, T.J., Parsons, B.E., Jackson, J.A., Haynes, M., Fielding, E.J., England, P.C., Clarke, P.J. (1999). Source parameters of the 1 October 1995 Dinar (Turkey) earthquake

from SAR interferometry and seismic bodywave modeling. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol.172 , pp 23-37.

- Wright, T.J., Lu, Z., & Wicks, C. (2003). Source Model for the M_w 6.7, 23 October 2002, Nenana Mountain Earthquake (Alaska) from InSAR. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 18.
- Wright, T.J. (2002). Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar interferometry. *Phil. Trnas. R. Soc. Lond. A*, 360, 2873-2888.
- Wright, T.J., Parsons, B.E., & Lu, Z. (2004). Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31.
- Heresh Fattahi, M.J.Valadan Zouj, Maryam Dehghani, M.R. Mobasheri and M.R. Sahebi "Windowed Fourier Transform for Noise Reduction of SAR Interferograms " *IEEE Geoscience and Remote Sensing Litters* , Vol. 6, Issue. 3, 2009.
- H.Fattahi, M.R. Sahebi, M.J. Valdan Zoj and M.S. Moussavi, "Separation of Soil Surface Components of the Radar Signal Backscattered from Bare Soil", *World Applied Sciences Journal* 4(3): 377-383, 2008.
- Hersh Fattahi, M.J.Valadan Zouj, Maryam Dehghani,2006, "InSAR Application In Geohazards", *Map Middle East Conference*, 26-29 March 2006, Dubai.
- H.Fattahi, M.J.Valadan Zouj, M.R.Mobasheri, M.Dehghani, 2007, "SAR Interferometric Phase Noise Reduction in Wavelet Domain", *ISPRS COMMISSION VII WG2&WG7, Conference on Information Extraction from SAR and Optical data, with Emphasis on Developing Countries*, 16-18 May 2007, Istanbul, Turkey.
- H. Fattahi, M.J.Valadan Zouj, M.R. Mobasheri, M. Dehghani, 2007, "Radar Interferometric Phase Noise Reduction using Wavelet Transform", *Geomatic 86 Conference*, May 2006, NCC, Tehran, Iran.