

شناسایی و پایش ناپایداری دامنه‌ای به روش پردازش اینترفرومتری تفاضلی

مطالعه موردی: حوضه آبریز گرمی‌چای میانه

جمشید یاراحمدی* - بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی
شهرام روستائی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز
محمد شریفی کیا - دانشیار دانشگاه تربیت مدرس
مه آسا روستائی - استادیار سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۱۲/۱۴

چکیده

امروزه، اینترفرومتری تفاضلی راداری (DInSAR) به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد در اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین محسوب می‌شود. به‌طوری‌که با استفاده از این فناوری، امکان پایش حرکات کوچک سطح زمین به‌صورت پیوسته، با دقت بالا و در گستره وسیعی امکان‌پذیر است. در این پژوهش، از تکنیک اینترفرومتری تفاضلی بر اساس سری زمانی ۶ تصویر راداری از سنجنده PALSAR ماهواره ALOS از ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ جهت شناسایی و پایش مناطق ناپایدار دامنه‌ای حوضه آبریز گرمی‌چای استفاده گردید. نتایج حاصله از این تحقیق بر اساس مشاهدات میدانی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، ۲۰ نقطه ناپایدار در بازه ۹۲ روزه زوج تصویر راداری سال ۲۰۰۷ شناسایی شد که بزرگ‌ترین آن‌ها از نوع لغزش چرخشی بوده و ۱۱- سانتی‌متر در این مدت جابجایی داشته است. بر همین اساس، تعداد ۲۵ نقطه لغزشی نیز در سال ۲۰۰۹ شناسایی گردید که مهم‌ترین آن، لغزش روستای سوبین با میزان جابجایی ۷/۵cm تا ۱۰/۳- بوده است. نتایج به‌دست‌آمده در سال ۲۰۱۰ از برخی جهات قابل مقایسه با دو دوره قبلی بوده به‌طوری‌که تعداد مناطق ناپایدار در این دوره کمتر از دو دوره قبلی بوده و توزیع مکانی مناطق ناپایدار نیز عمدتاً به نیمه شرق حوضه محدود شده است. میزان جابجایی محاسبه‌شده در این دوره (۲cm تا ۵/۱-) نیز کمتر از دو دوره قبل بوده است. مهم‌ترین نقطه لغزشی شناسایی‌شده در دوره اخیر، توده لغزشی مجاور سد گرمی‌چای بوده که ادامه فعالیت ساختمانی سد را تحت تأثیر قرار داده است.

واژگان کلیدی: اینترفرومتری تفاضلی، تصاویر راداری، ناپایداری دامنه‌ای، حوضه آبریز گرمی‌چای.

مقدمه

حرکات توده‌ای از جمله پدیده‌های مورفودینامیک هستند که تحت تأثیر عوامل مختلفی در سطح دامنه‌های مناطق کوهستانی به وقوع می‌پیوندد و مهم‌ترین آن‌ها زمین‌لغزش در اشکال مختلف است. زمین‌لغزش‌ها را می‌توان به‌عنوان حرکت توده‌ای از سنگ، مواد واریزه‌ای و یا بخشی از زمین در جهت شیب دامنه تعریف کرد (کرودن^۱ و وارنز^۲، ۱۹۹۶؛ دایی^۳، لی^۴ و نگایی^۵، ۲۰۰۲). این حالت مربوط به مناطقی است که در آن تنش برشی مواد بیشتر از مقاومت برشی آن باشد و در قالب واژه رایج ناپایداری دامنه‌ای^۶ از آن یاد می‌شود (وان وستن^۷، کریل^۸، دامن^۹ و لوب سنسکا^{۱۰}، ۲۰۰۹). بر اساس برآوردهای اولیه، سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد ریال خسارات مالی از طریق وقوع زمین‌لغزش‌ها بر کشور ما وارد می‌شود (کرم، ۱۳۸۰). کشور ایران به دلیل مساعد بودن شرایط جغرافیایی، ضعف مدیریت جامع و عدم رعایت آستانه‌های محیطی به‌عنوان یک کشور پرخطر بشمار می‌رود. اگر برای دیگر بلایای طبیعی احتمال وقوع هر از چند گاهی قائل شویم، پتانسیل وقوع پدیده لغزش در کشور را باید هر لحظه در نظر گرفت (کمک پناه، منتظم و چندی، ۱۳۷۳). ایران از نظر بلایای طبیعی جزء ۱۰ کشور اول دنیا بوده و هرساله وقوع زمین‌لغزش‌ها در مناطق مختلف کوهستانی آن خسارات و صدمات قابل توجهی به بار می‌آورد. بر اساس برآورد اولیه، سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارات مالی از طریق وقوع زمین‌لغزش‌ها بر کشور تحمیل می‌شود. البته این رقم تنها به خسارات مستقیم اشاره دارد. خسارات غیرمستقیم زمین‌لغزش‌ها مانند هدر رفت خاک، افزایش حجم رسوبات در پشت سدها، تغییر اکوسیستم مناطق لغزشی و از بین رفتن جنگل‌ها و ... خساراتی بسیار بیشتر از رقم یادشده بر اقتصاد کشور تحمیل می‌کند (پارسایی و علی‌محمدی، ۱۳۹۱). خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش‌ها در ایران که با ثبت ۴۹۰۰ مورد از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۷ در سراسر کشور در قالب پروژه بانک اطلاعات زمین‌لغزش‌های کشور صورت گرفته بیش از ۱۲۷ هزار میلیارد ریال برآورد شده است (مرادی و همکاران، ۱۳۹۱). این امر بر اهمیت شناخت هر چه دقیق‌تر و مطالعه بیشتر ابعاد مختلف زمین‌لغزش‌ها افزوده و مسئولیت سنگین متولیان امر را گوشزد می‌کند.

مدیریت ریسک و ارزیابی خطر زمین‌لغزش‌ها با شناسایی جامع و تهیه نقشه آن‌ها شروع می‌شود و این امر می‌تواند مبنایی جهت کسب آگاهی از توزیع مکانی و زمانی آن‌ها بکار رود (گازتی^{۱۱}، ۲۰۰۰؛ براردینونی^{۱۲}، اسلای میکر^{۱۳} و حسن^{۱۴}، ۲۰۰۳). تاکنون روش‌های متعددی نظیر: تاکنومتری، ترازبایی، فتوگرامتری برد کوتاه، مشاهدات حاصل از شبکه‌های ژئودتیکی (GPS)، اینترفرومتری راداری و لیدار جهت مطالعه زمین‌لغزش‌ها بکار رفته است (خوانین زاده، ۱۳۹۰). در اوایل، شناسایی لغزش‌ها عمدتاً بر اساس تفسیر بصری زوج استریوئی عکس‌های هوایی در کنار مشاهدات صحرائی صورت می‌گرفت. هرچند که تفسیر بصری عکس‌های هوایی در ترکیب با بررسی‌های صحرائی، تا به امروز نیز

۱ Cruden

۲ Varnes

۳ Dai

۴ Lee

۵ Nagai

۶ Slope fauiler

۷ Van Westen

۸ Kerel

۹ Damen

۱۰ Lubsynska

۱۱ Guzzeti

۱۲ Brardinoni

۱۳ Slaymaker

۱۴ Hassan

به‌عنوان یکی از روش‌های مرسوم در نقشه‌برداری زمین‌لغزش‌ها باقی‌مانده است. اما این منابع اطلاعاتی ضمن اینکه برای اکثر مناطق دنیا به‌صورت به‌هنگام قابل‌دسترس نبوده، تهیه آن نیز برای مناطق وسیع هزینه زیادی در بر خواهد داشت (هانگ^۱، آدلر^۲ و هافمن^۳، ۲۰۰۷). امروزه با توسعه و پیشرفت در فناوری فضائی، تصویربرداری ماهواره‌ای به‌عنوان یک منبع اطلاعاتی مفید جایگزین مناسبی در این زمینه شده است. تعداد محدودی از مطالعات پیشین به‌صورت ابتدائی اقدام به آشکارسازی لغزش‌های بزرگ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی پایین نموده‌اند. درحالی‌که، مطالعات امروزی به‌طور فزاینده‌ای از تصویربرداری با تفکیک مکانی خیلی بالا (نظیر: *QuickBird, Ikonos, WorldView-1, Cartosat-1, 2, SPOT-5, ALOS-PRISM*) برای تهیه نقشه زمین‌لغزش‌ها استفاده می‌کنند و تعداد سنجنده‌های فعال نیز با ویژگی‌های مشابه سال‌به‌سال در حال افزایش است (وان وستن، کریل، دامن و لوب سنسکا، ۲۰۰۹).

در سال‌های اخیر، توسعه سریع تکنولوژی فضائی امکان آشکارسازی تغییرات سطح زمین را با دقت بالا فراهم ساخته است. این پیشرفت‌ها مرهون اخذ تصاویر میکروویو توسط سنجنده‌های SAR در کنار توسعه روش‌های پیشرفته پردازش داده‌های آن‌ها همچون روش اینترفرومتری می‌باشد (فرتی^۴ و همکاران، ۲۰۰۷). در مقایسه با سایر تکنیک‌های دورسنجی، اینترفرومتری راداری (InSAR یا DInSAR) که قابلیت کار در تمام شرایط بد جوی و طول مدت شب و روز را داشته، به‌عنوان روشی مؤثر و کارآمد در پایش تغییرات آرام سطح زمین محسوب می‌شود.

اینترفرومتری روش استفاده از اختلاف فاز سیگنال‌های برگشتی از سطح زمین در دو تصویر SAR گرفته‌شده با تأخیر زمانی یا دارای پارالاکس از یک منطقه جهت استخراج ارتفاع و یا اطلاعات مربوط به تغییرات سطح زمین است (آخوندزاده، ۱۳۸۴). رادار دهانه ترکیبی (SAR) یک نوع سیستم تصویربرداری فعال پهلوگیر بوده که سیگنال‌های میکروموج را در فواصل زمانی معین در طول مسیر حرکت به‌صورت پالس‌های به‌طرف سطح زمین ارسال کرده و سیگنال‌های برگشتی به آنتن را در دو حالت دامنه^۵ و فاز^۶ ثبت می‌کند. اساس کار این روش، استفاده از اطلاعات فاز راداری بازتابی از سطح زمین است به‌نحوی که تغییرات ایجادشده در سطح زمین سبب اختلاف فاز در دو تصویر راداری در دو زمان مختلف از منطقه‌ای مشابه می‌شود. با بررسی اختلاف فاز و مدل‌سازی آن، تغییرات سطح زمین قابل کمی‌سازی خواهد بود. به کمک تکنیک اینترفرومتری راداری تصویری به نام اینترفروگرام ساخته می‌شود. یک اینترفروگرام، تصویری است که حاوی اختلاف فاز دو تصویر راداری است که به‌دقت نسبت به هم ثبت هندسی^۷ شده‌اند. مقدار تغییرات مربوط به فاصله عارضه تا سنجنده راداری در اینترفروگرام موجود است. این تغییرات مربوط به خطای مداری ماهواره ($\Delta\varphi_G$)، اثر توپوگرافی ($\Delta\varphi_T$)، جابجایی عارضه ($\Delta\varphi_D$) و اثرات اتمسفری ($\Delta\varphi_{Atm}$) می‌باشد. جهت استخراج میزان تغییرات سطح می‌بایست تمام اثرات دیگر از اینترفروگرام حذف گردد (دهقانی و همکاران، ۱۳۸۵). ساده‌ترین روش به‌منظور مقابله با مؤلفه توپوگرافی، به حداقل رساندن خط مبنای عمودی^۸ زوج تصاویر انتخابی است. به این ترتیب قسمت اعظم تأثیر توپوگرافی در ایجاد اختلاف فاز از بین می‌رود. به‌منظور بهبود نتایج می‌توان از یک مدل ارتفاعی رقومی زمین استفاده نمود تا بدین ترتیب باقیمانده اثر توپوگرافی را نیز از اینترفروگرام حذف نمود. درنهایت آنچه در تصاویر اینترفروگرام

^۱ Hong

^۲ Adler

^۳ Huffman

^۴ Ferretti

^۵ Amplitude

^۶ Phase

^۷ Co-register

^۸ Perpendicular Baseline

مشهود خواهد بود، اختلاف فاز ناشی از جابجایی زمین در راستای دید سنجنده است. رابطه زیر بیانگر عوامل تأثیرگذار در به وجود آمدن اختلاف فاز میان دو تصویر راداری می‌باشد.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_G + \Delta\varphi_T + \Delta\varphi_D + \Delta\varphi_{Am} + Noise$$

قابلیت این تکنیک در آشکارسازی و پایش زمین‌لغزش‌ها پیشتر توسط گابریل^۱، گلدشتاین^۲ و زبکر^۳، ۱۹۸۹؛ مسونت^۴ و فیگل^۵، ۱۹۹۸ گزارش شده است. در حقیقت، پیشرفت‌های اخیر در اینترفرومتری راداری نظیر اینترفرومتری تفاضلی (DInSAR) توجه بسیاری از محققان و دست‌اندرکاران مرتبط با پایش زمین‌لغزش‌ها و ارزیابی مخاطرات محیطی را به خود جلب کرده است و قابلیت این تکنیک در زمینه آشکارسازی و پایش حرکات زمین‌لغزش‌ها در مطالعات مختلفی از طرف فرونیو^۶ و همکاران، ۱۹۹۶؛ روت^۷ و همکاران، ۱۹۹۹؛ کیمورا و یاماگوچی^۸، ۲۰۰۰؛ ناقلر^۹ و همکاران، ۲۰۰۲؛ براردونی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۳؛ کولیسانتی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۳؛ کولیسانتی و واسکوویسکی^{۱۲}، ۲۰۰۶؛ فارینا^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۴؛ هایللی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۰۴؛ سینگروی و مولچ^{۱۵}، ۲۰۰۴؛ استروزی^{۱۶} و همکاران، ۲۰۰۵؛ باوینگا^{۱۷} و همکاران، ۲۰۰۶ گزارش شده است (نقل از سازمان فضائی اروپا^{۱۸}). اخیراً نیز مطالعاتی توسط (ریدل^{۱۹} و والتر^{۲۰}، ۲۰۰۸؛ لی یو^{۲۱} و همکاران، ۲۰۱۱؛ آگوستینی^{۲۲}، ۲۰۱۲؛ باوینگا^{۲۳}، واسوسکی^{۲۴}، نیتی^{۲۵}، نوتریکاتو^{۲۶} و چیارادیا^{۲۷}، ۲۰۱۲) در این زمینه صورت گرفته است. استفاده از این تکنیک در زمینه مطالعه زمین‌لغزش‌ها در ایران عمدتاً به تحقیقات گوزل پور و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی حرکات توده‌ای سمیرم در جنوب شرق ایران، دژمور و همکاران (۲۰۰۸) در زمینه مانیتورینگ حرکت بطئی زمین‌لغزش بزرگ کهرود در رشته‌کوه البرز-ایران، اکبری و همکاران (۱۳۹۱)، در مطالعه توده لغزشی روستای گوگرد، خوانین زاده (۲۰۱۰) در زمینه پایش زمین‌لغزش‌های حوضه طالقان، روستایی و همکاران (۱۳۹۲) آشکارسازی زمین‌لغزش‌های حوضه آبریز گرمی چای میانه برمی‌گردد.

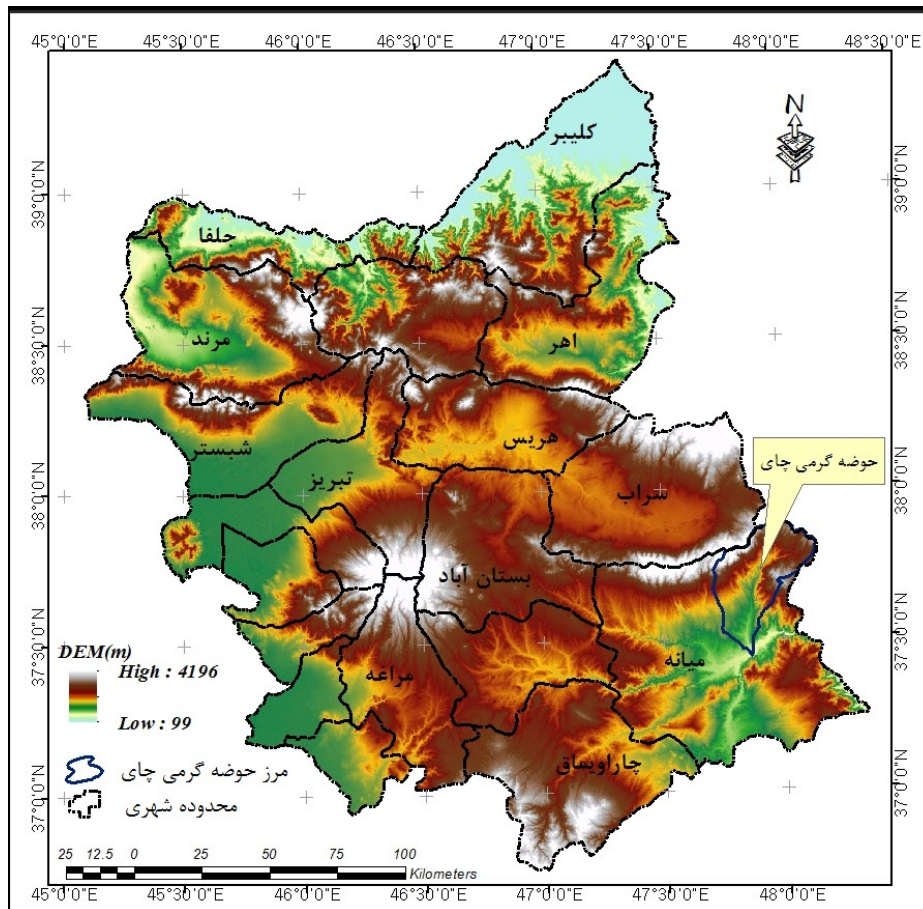
این تحقیق باهدف آشکارسازی زمین‌لغزش‌های فعال در حوضه آبریز گرم چای میانه با روش اینترفرومتری تفاضلی انجام گرفته است. در این تحقیق، ضمن آشکارسازی توزیع مکانی زمین‌لغزش‌های فعال در منطقه مورد مطالعه، با

- 1 Gabriel
- 2 Goldstein
- 3 Zebker
- 4 Massonnet
- 5 Feigl
- 6 Fruneau
- 7 Rott
- 8 Kimura and Yamaguchi
- 9 Nagler
- 10 Berardino
- 11 Colesanti
- 12 Wasowski
- 13 Farina
- 14 Hilley
- 15 Singhroy and Molch
- 16 Strozzi
- 17 Bovenga
- 18 European Space Agency's
- 19 Riedel
- 20 Walther
- 21 Liu
- 22 Agostini
- 23 Bovenga
- 24 Wasowski
- 25 Nitti
- 26 Nutricato
- 27 Nutricato

استفاده از روش اینترفرومتری تفاضلی، میزان جابجایی ناشی از حرکات زمین‌لغزش‌ها در فاصله زمانی زوج تصاویر راداری پردازش شده نیز محاسبه شده است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز گرمی‌چای با مساحت ۹۴۰ کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی و در فاصله ۴۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان میانه در منتهی‌الیه شرقی ارتفاعات بزقوش واقع شده که از نظر جغرافیایی بین طول‌های 47° و 42° و $54''$ تا 48° و $8''$ و $25''$ شرقی 37° و $24''$ تا 37° و $54''$ و $40''$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). بلندترین نقطه ارتفاعی منطقه ۳۰۶۹ متر و پست‌ترین آن ۱۰۴۳ متر می‌باشد. مهم‌ترین شبکه زهکشی منطقه رودخانه گرم چای بوده که با جهت شمالی-جنوبی از ارتفاعات جنوبی بزقوش سرچشمه گرفته و در مناطق پست شمال شرق شهر میانه بعد از طی ۴۰ کیلومتر به رودخانه قزل‌اوزن می‌پیوندد. منطقه مورد مطالعه عمدتاً کوهستانی بوده بطوریکه ۵۲ درصد مساحت منطقه را شیب‌های ۱۶-۴۵ درصد تشکیل می‌دهد. بر اساس آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی میانه (۹۰-۱۳۶۶)، میانگین بارش سالیانه ۲۸۰ میلی‌متر و متوسط دما $13/5$ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. بر اساس نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی کشور، سازندهای الیگومیوسن و میوسن بیشترین گسترش را در منطقه داشته که از نظر لیتولوژیکی مربوط به سنگ‌های ریولیت، تراکیت (۲۳ درصد) و گنگلومرا و مارن و ماسه‌سنگ (۱۳ درصد) می‌باشند. بر اساس اطلاعات موجود در بانک اطلاعات زمین‌لغزش‌های کشور، نزدیک به ۳۸۰ مورد زمین‌لغزش در این حوضه شناسایی شده است. مطابق اطلاعات موجود در مرکز حوادث غیرمترقبه استانداری آذربایجان شرقی، وقوع زمین‌لغزش‌ها در این منطقه باعث خسارات هنگفتی به مناطق روستایی و زمین‌های کشاورزی اطراف آن‌ها شده است. بر اساس گزارش یادشده، بر اثر وقوع زمین‌لغزش سال ۱۳۸۴ روستای سوین خسارات کلی دیده بطوریکه بنیاد مسکن و شهرسازی مجبور به اسکان اهالی آن در محل جدیدی شده است. گزارش‌های مشابهی نیز در مورد خسارات وقوع زمین‌لغزش‌ها بر روستاهای تجرق، آرموداق، نی باغی، ینگی کندی، ترناب و ... در محدوده حوضه آبریز گرمی‌چای موجود است. از طرف دیگر، از سال ۱۳۸۱ سد گرمی در روی رودخانه گرمی‌چای با حجم مخزن ۴۰ میلیون مترمکعب در حال احداث بوده و از قرار معلوم بایستی عملیات ساختمانی آن در سال ۱۳۹۳ خاتمه یابد. متأسفانه، در حال حاضر ادامه عملیات اجرایی این سد تحت تأثیر فعالیت زمین‌لغزش مجاور آن متوقف شده است.



شکل ۱: موقعیت حوضه گرم چای در استان آذربایجان شرقی

روش پژوهش

در پژوهش حاضر، آشکارسازی زمین‌لغزش‌های فعال و محاسبه میزان جابجایی آن‌ها در حوضه گرم‌چای میانه به روش پردازشی اینترفرومتری تفاضلی با استفاده از تصاویر راداری سنجنده PALSAR ماهواره ALOS در مد بالاگذر^۱ صورت گرفته است.

تصاویر راداری موردنیاز از طریق ارائه پروپوزال پژوهشی به سازمان فضائی اروپا (ESA) و جلب موافقت آن‌ها تهیه گردید. بررسی مشخصات تصاویر راداری موجود برای محدوده حوضه گرم‌چای میانه و سفارش آن‌ها با برنامه EOLI-SA صورت گرفت. در نتیجه آن، تعداد ۶ تصویر راداری از سنجنده PALSAR انتخاب و سفارش داده شد (جدول ۱). مراحل مختلف پردازش اینترفرومتری راداری تفاضلی به منظور آشکارسازی زمین‌لغزش‌ها و محاسبه میزان جابجایی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SARscape 4.4 مطابق فلوجارت موجود در شکل (۲) انجام گردید. در همین راستا، ابتدا تصاویر راداری جهت پردازش اینترفرومتری به فرمت SLC^۲ تبدیل شدند. سپس به منظور ثبت هندسی^۳ تصاویر، یکی از آن‌ها به عنوان تصویر مرجع^۴ و سایر تصاویر به عنوان تصاویر تابع^۱ در نظر گرفته شدند. از طریق ترکیب

^۱Ascending

^۲ Single look complex

^۳ Co-registration

^۴Master

دو تصویری که نسبت به هم به‌طور دقیق ثبت هندسی شده‌اند یک اینترفروگرام تهیه شد. در حقیقت یک اینترفروگرام از حاصل ضرب هر پیکسل تصویر اول در مزدوج مختلط^۲ تصویر دوم ساخته می‌شود. در ادامه، اینترفروگرام تفاضلی از طریق حذف فاز رفرنس بر اساس مدل رقومی ارتفاعی منطقه تهیه شد. به‌منظور بهبود نسبت فاز سیگنال به نوفه^۳ (SNR) اینترفروگرام تهیه‌شده، از فیلتر تطبیقی گلدشتاین استفاده شد. نقشه همدوسی^۴ نیز که شاخصی از کیفیت اینترفروگرام بوده در این مرحله تهیه گردید. در ادامه فرایند پردازش، مرحله اصلاح فاز^۵ با استفاده از روش (Delaunay MCF^۶) صورت گرفت. به‌منظور تبدیل صحیح فاز اصلاح‌شده به مقادیر ارتفاعی و محاسبه میزان جابجایی سطح زمین، حتماً لازم است تا مرحله پایش^۷ یا تسطیح مجدد^۸ فاز اجرا گردد. اجرای این مرحله باعث می‌شود تا خطاهای احتمالی مداری تصحیح‌شده و مقدار انحراف^۹ فاز محاسبه گردد تا از این طریق، مقادیر فاز مطلق به دست آید. البته این کار باعث حذف حالت پله‌ای^{۱۰} فاز نیز خواهد شد (اسکانیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ فایانو و همکاران، ۲۰۱۴). اجرای این پروسه از طریق نقاط کنترل زمینی^{۱۱} (GCP) به تعداد ۳۵ مورد و مدل رقومی ارتفاعی صورت گرفت. آخرین مرحله از پروسه پردازش اینترفرومتری تفاضلی، تبدیل فاز مطلق به نقشه جابجایی و ژئوکد کردن آن است که بر اساس سطح بیضوی WGS84 سیستم تصویر متریک صورت گرفت. در نقشه‌های نهایی مربوط به جابجایی حاصل از پردازش اینترفرومتری تفاضلی، همیشه مقادیر مثبت به معنی کاهش فاصله سنجنده تا سطح زمین یا به عبارت دیگر بالآمدگی سطح زمین بوده و مقادیر منفی نیز به معنی عکس این عمل یا همان فروافتادگی سطح زمین در جهت دید ماهواره^{۱۲} (LOS) تفسیر می‌شوند. شاخص اصلی تفسیر این قبیل نقشه‌ها تغییرات فاز بوده که در قالب تغییر ناگهانی در تن رنگی مشخص ظاهر خواهد شد. در همین راستا، مقادیر مثبت تغییرات فاز سیگنال راداری با تن رنگی قرمز و کاهش ارتفاع با تغییرات تدریجی تن رنگی آبی نشان داده می‌شوند (راهنمای تکنیک اینترفرومتری-آژانس فضائی اروپا، ۲۰۰۷). با توجه به اینکه هیچ‌گونه اندازه‌گیری مستقیم از میزان جابجایی سطوح گسیخته شده در منطقه مورد مطالعه موجود نبود، لذا ارزیابی دقت نتایج تحقیق حاضر از طریق پیمایش زمینی با استفاده از GPS و هم‌پوشانی نتایج با برنامه Google Earth صورت گرفت.

جدول ۱: مشخصات تصاویر راداری سنجنده PALSAR مورد استفاده

Mission	ALOS	ALOS	ALOS	ALOS	ALOS	ALOS
Sensor	PALSAR	PALSAR	PALSAR	PALSAR	PALSAR	PALSAR

1 Slave

2 complex conjugate

3 Signal to noise ratio

4 Coherence map

5 Phase Unwrapping

6 Delaunay Minimum Cost Flow

7 Refinement

8 Re-flattening

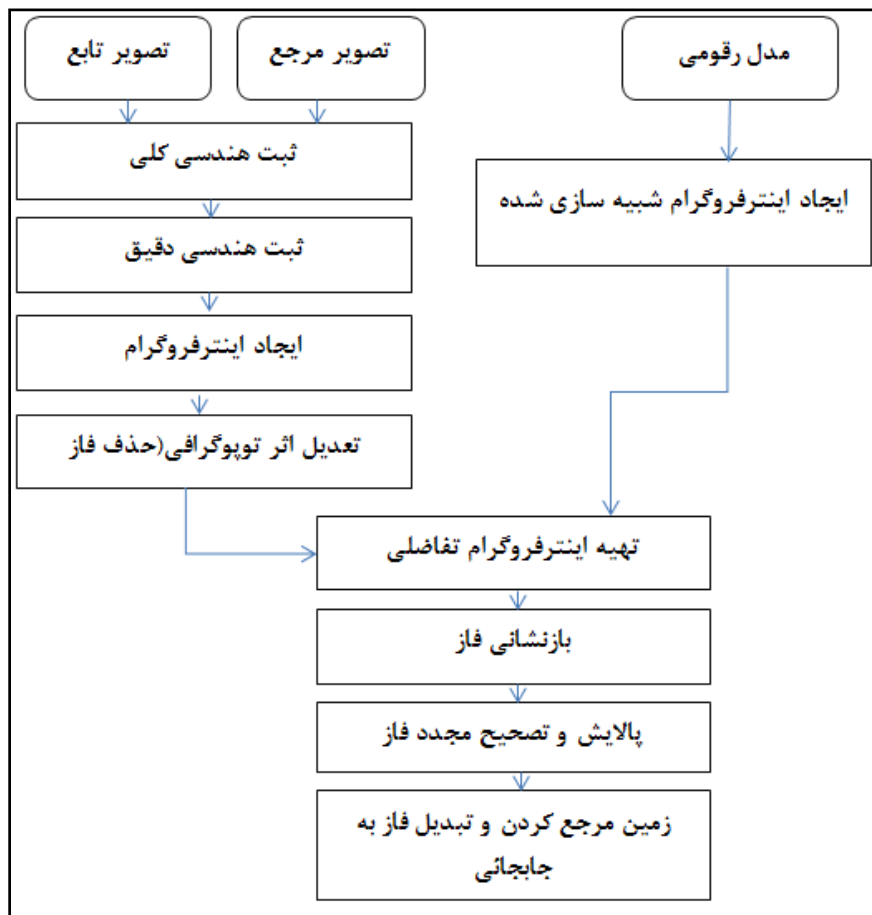
9 Offset

10 Ramp

11 Ground Control Point

12 Line Of Sight

Date	پنجم جولای ۲۰۰۷	پنجم اکتبر ۲۰۰۷	دهم جولای ۲۰۰۹	دهم اکتبر ۲۰۰۹	۱۳ جولای ۲۰۱۰	۲۸ نوامبر ۲۰۱۰
Track	۵۷۶	۵۷۶	۵۷۶	۵۷۶	۵۷۶	۵۷۶
Orbit	۷۶۹۸	۹۰۴۰	۱۸۴۳۴		۲۳۸۰۲	۲۵۸۱۵
Swath	۴۳/۳	۴۳/۳	۴۳/۳	۴۳/۳	۴۳/۳	۴۳/۳
Frame	۷۴۰	۷۴۰	۷۴۰	۷۴۰	۷۴۰	۷۴۰
Pass	A	A	A	A	A	A
Product	PSR-FBD ^۱	PSR- FBD	PSR- FBD	PSR- FBD	PSR- FBD	PSR- FBD
Level	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱	۱/۱



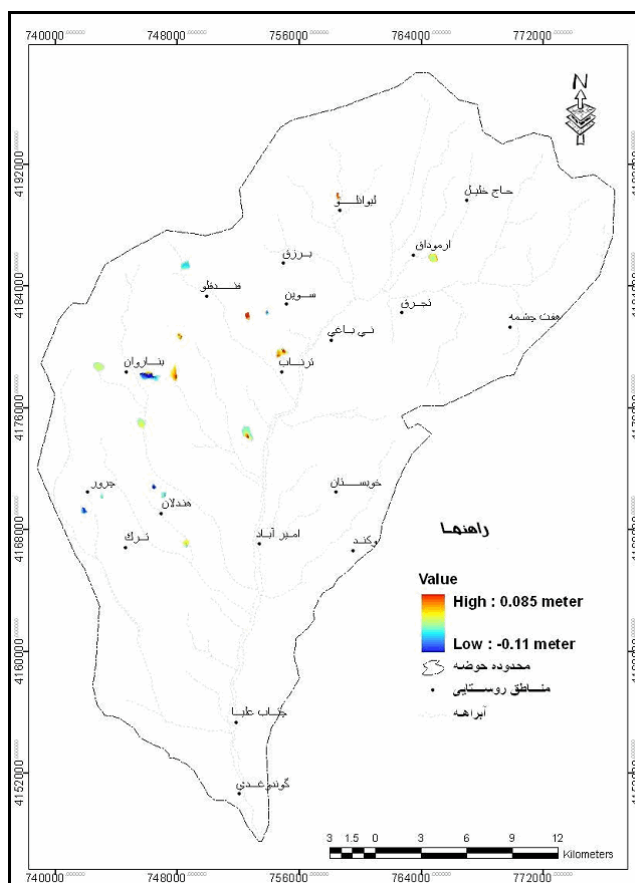
شکل ۲: فلوجارت پردازش اینترفرومتری تفاضلی

نتایج

نتایج پردازش اینترفرومتری تفاضلی زوج تصویر راداری (پنجم جولای تا پنجم اکتبر سال ۲۰۰۷) که مطابق با ۱۳ تیر تا ۱۳ مهرماه ۱۳۸۶ هجری شمسی بوده در قالب توزیع مکانی مناطق لغزشی همراه با مقادیر جابجایی صورت

^۱ Fine Beam Dual polarization

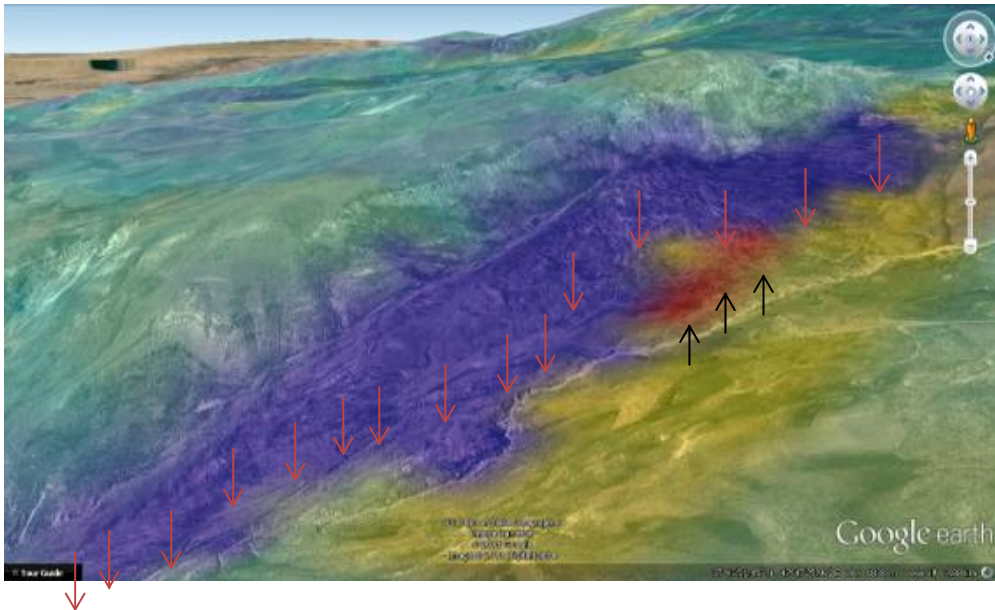
گرفته در سطح آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق اطلاعات موجود در این تصویر، در مجموع ۲۰ توده لغزشی در حوضه آبریز گرمی چای میانه در بازه زمانی ۹۲ روزه شناسایی گردید. از نظر توزیع مکانی، این مناطق بیشتر در نیمه غربی رودخانه گرمی چای در شیب‌های شرقی و جنوب شرقی (به ترتیب ۲۸ و ۲۶ درصد) گسترش داشته و بزرگ‌ترین آن‌ها مربوط به توده لغزشی است که در مجاورت روستاهای قیرخ بولاغ و بناوران، علی بیگلو و اووزال و روستای اوین است. این توده لغزشی حدود ۴۳ هکتار مساحت داشته و از نوع چرخشی می‌باشد (شکل ۴). بیشترین مقدار جابجایی صورت گرفته در سطح این توده لغزشی بوده بطوریکه بیشترین مقدار فروافتادگی در سطح آن به میزان ۱۱- سانتیمتر محاسبه شده است. سایر مناطق ناپایدار به صورت نامنظم در قسمت‌های شمال و جنوب حوضه گرمی چای گسترش یافته است. توده لغزشی مابین روستای آرموداق، بسیط (شکل ۵) و مناطق لغزشی نواحی مجاور روستاهای قره حاجیلو، شمال ترناب را می‌توان به عنوان نمونه ذکر کرد. نکته قابل توجه این است که اکثر زمین‌لغزش‌های شناسایی شده در این بازه زمانی، در مجاورت شبکه رودخانه‌ای قرار داشته و توزیع مکانی آن‌ها نشان می‌دهد که قسمت عمده مناطق شناسایی شده منطبق با زمین‌لغزش‌های قبلی است. به عبارت دیگر، برخی زمین‌لغزش‌های قدیمی در منطقه همچنان فعال هستند. بیشترین مقدار جابجایی محاسبه شده در این بازه زمانی حدود ۸/۵ سانتیمتر بوده و منطبق با انباشتگی مواد در پای دامنه‌ها و داخل بستر رودخانه‌هاست که می‌توان آن‌ها را به ترتیب در قالب لغزش وایزه‌ای^۱ و جریان‌های وایزه‌ای^۲ قرارداد.



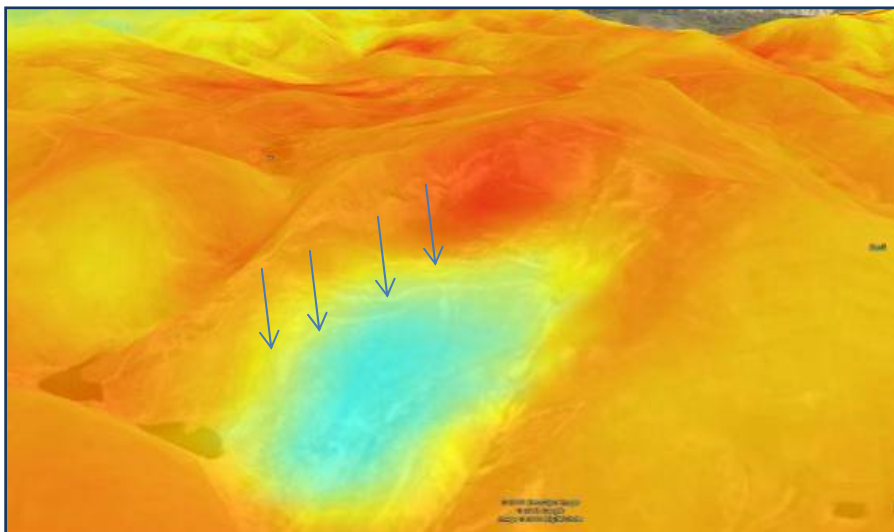
شکل ۳: نقشه مناطق ناپایدار و میزان جابجایی آن‌ها در حوضه گرم چای به روش اینترفرومتری تفاضلی زوج تصویر راداری سال ۲۰۰۷

1 Debris Slide

2 Debris Flow



شکل ۴: توده لغزشی مجاورت روستاهای اوین و بناوران در Google Earth، جهت فلش‌ها نشانگر امتداد جابجایی توده لغزشی است



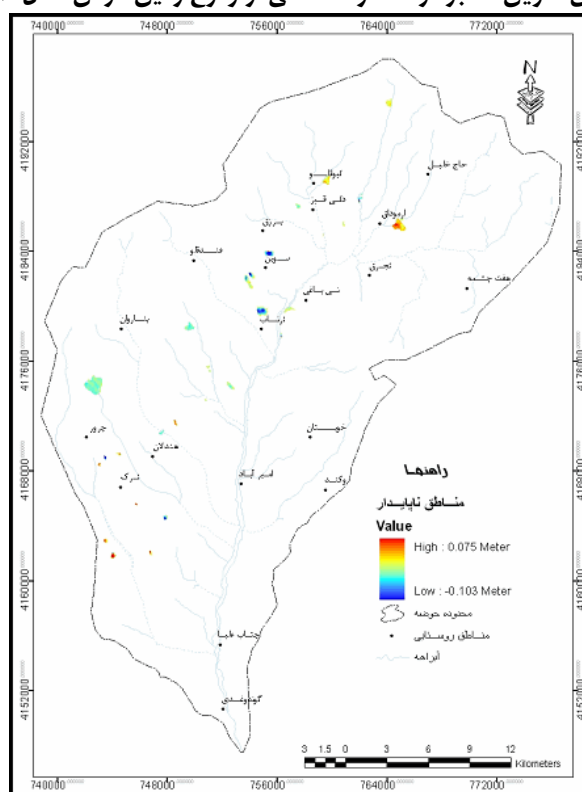
شکل ۵: موقعیت و میزان جابجایی زمین لغزش شرق روستای آرموداق بر روی Google-Earth، جهت فلش‌ها نشانگر امتداد جابجایی توده لغزشی است

نتایج پردازش اینترفرومتری تفاضلی زوج تصویری سال ۲۰۰۹ (دهم جولای تا دهم اکتبر) که مطابق با ۱۹ تیر و ۱۸ مهرماه سال ۱۳۸۸ بوده تعداد ۲۵ مورد زمین لغزش فعال در بازه زمانی ۹۲ روزه در حوضه آبریز گرمی‌چای میانه نشان داده است (شکل ۷). توزیع مکانی زمین لغزش‌های شناسایی شده نشان می‌دهد که قسمت عمده این مناطق در نیمه غربی رودخانه گرمی‌چای در شیب‌های شرقی و جنوب شرقی گسترش یافته‌اند. مشاهدات میدانی نشان داد که اکثر آن‌ها منطبق با مناطق لغزشی قدیمی هستند و جابجایی‌های صورت گرفته در سطح این لغزش‌ها دلالت بر فعال بودن آن‌ها دارد. به‌عنوان مثال می‌توان به لغزش‌های موجود در مجاورت روستا قره حاجیلو، بسیط و آرموداق، شمال علی بیگلر و لغزش موجود در مجاورت روستای برزق و شمال روستای ترناب اشاره کرد. میزان جابجایی مناطق ناپایدار در حدود $۷/۵+$ سانتیمتر بالآمدگی بوده است. یکی از مهم‌ترین مناطقی که در این بازه زمانی جابجا شده، توده لغزشی بزرگی است که در نزدیکی روستای سوین واقع شده است. جابجایی محاسبه شده در سطح این توده گسیخته شده $۱۰/۳-$ سانتیمتر

پایین‌افتادگی یا کاهش ارتفاع در محل زخمه لغزش را نشان می‌دهد. مطابق اطلاعات حاصله از روستائیان منطقه معلوم گردید که شروع فعالیت آن سال ۱۳۸۴ بوده است. در اثر وقوع آن، روستای سویین خسارات کلی دیده (شکل ۶) بطوریکه بنیاد مسکن استان آذربایجان شرقی مجبور شده روستا سویین را به نقطه دیگری انتقال دهد و هم‌اکنون اهالی آن در روستای سویین جدید سکونت دارند.



شکل ۶: نمایی از روستای سویین که بر اثر خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش سال ۱۳۸۴ متروکه شده است



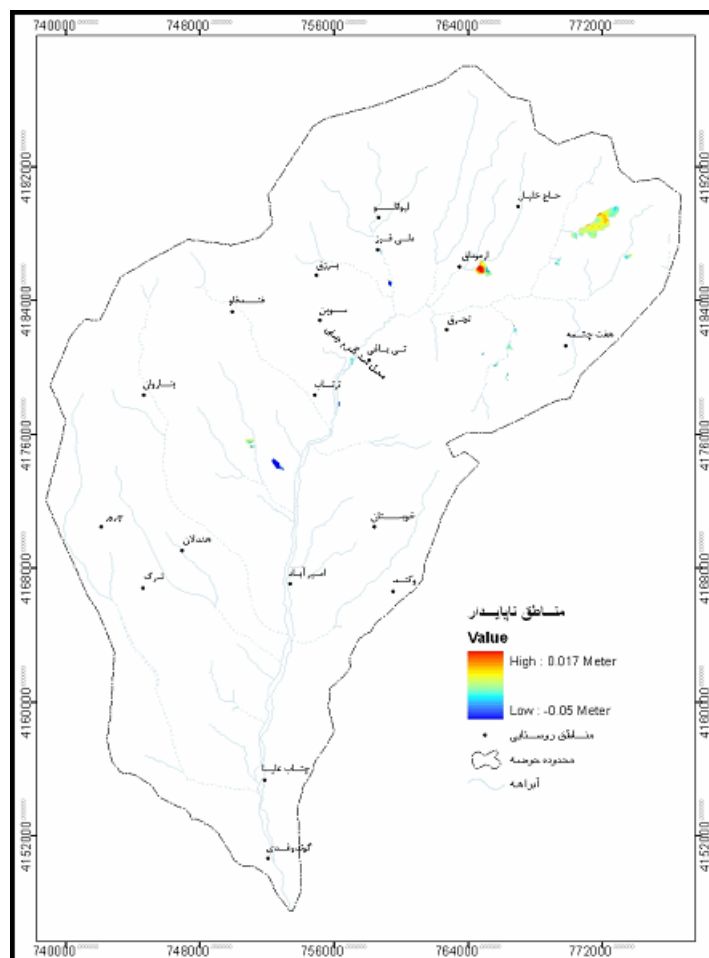
شکل ۷: نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها و میزان جابجایی آن‌ها بر اساس پردازش اینترفرومتری تفاضلی زوج تصویر راداری سال ۲۰۰۹

توزیع مکانی زمین‌لغزش‌های شناسایی‌شده حاصل از پردازش زوج تصویر راداری مربوط به ۱۳ جولای و ۲۸ نوامبر سال ۲۰۱۰ (۲۲ تیرماه ۱۳۸۹ تا هفتم آذرماه همان سال) به روش اینترفرومتری تفاضلی و میزان جابجایی آن‌ها در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج به دست آمده در این قسمت در مقایسه با دو بازه زمانی قبلی تفاوت‌های قابل توجهی را نشان می‌دهد: اولاً اینکه توزیع مکانی نقاط جابجا شده برخلاف دو زوج تصویر قبلی، عمدتاً در نیمه شرقی و مناطق بالادست رودخانه گرمی چای گسترش داشته ثانیاً برخی از زمین‌لغزش‌های که دو دوره قبلی فعال بودند، در این دوره تغییراتی در سطح آن‌ها مشاهده نگردید. ثالثاً، میزان جابجایی محاسبه شده در این بازه ($+1/7$ تا $-5/1$ سانتیمتر) در مقایسه با دو دوره قبلی کمتر است. زمین‌لغزش‌های شناسایی شده جدید در دامنه‌های مشرف به مسیل‌های بالادست رودخانه گرمی چای واقع شده‌اند. سایر مناطق لغزشی جدید در مسیل‌های مجاور روستای حاج یوسفلوی علیا در نیمه شرقی رودخانه گرمی چای توزیع یافته‌اند. مناطق لغزشی مجاور روستای بسیط و دلی قیز تنها نقاط لغزشی هستند که در دو بازه زمانی قبلی نیز مشاهده شده بودند.

نکته قابل ذکر در این دوره، آنومالی‌های مشاهده شده در دامنه‌های مشرف بر محل احداث سد گرمی چای میانه بوده که در نتایج حاصله به صورت مناطق ناپایدار به نظر می‌رسیدند. در حالی که کنترل صحرایی این مناطق نشان داد که تغییرات فاز شناسایی شده در این قسمت‌ها به خاطر دستکاری‌های بوده که در جریان احداث سد بر سطح دامنه‌ها تحمیل شده است و نبایستی آن‌ها را با گسیختگی ناشی از وقوع زمین‌لغزش‌ها اشتباه گرفت. با این وجود، یک قسمت از تغییرات فاز مشاهده شده در این ناحیه مربوط به توده لغزشی تقریباً بزرگی است که در مجاورت محل احداث سد واقع شده و در بازدیدهای صحرایی نیز معلوم شد این توده لغزشی در حال حاضر نیز فعال می‌باشد. بطوریکه فعالیت و جابجایی آن خساراتی را بر ساختمان‌های موجود در محل کارگاه سد وارد ساخته است (شکل ۸). میزان جابجایی در سطح این توده لغزشی بر اساس نتایج پردازش اینترفرومتری تفاضلی زوج تصویر راداری سال ۲۰۱۰ در بازه زمانی ۱۳۸۱ روزه $3/5-$ سانتیمتر محاسبه شده است



شکل ۸: تناوبی از لایه‌های مربوط به حرکات سطحی توده لغزشی مجاور سد گرمی چای میانه



شکل ۹: نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها و میزان جابجایی آن‌ها بر اساس پردازش اینترفرومتری تفاضلی زوج تصویر راداری سال ۲۰۱۰

بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از روش پردازش اینترفرومتری تفاضلی (DInSAR) جهت شناسایی مناطق ناپایدار دامنه‌ای و محاسبه میزان جابجایی آن‌ها در حوضه آبریز گرمی‌چای میانه استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که برخی دامنه‌های حوضه آبریز گرمی‌چای همچنان ناپایدار بوده و انطباق موقعیت مکانی زمین‌لغزش‌های شناسایی با برخی مناطق لغزشی قدیمی بیانگر فعال بودن پهنه‌های لغزشی پیشین منطقه است. از نظر توزیع مکانی، مناطق لغزشی شناسایی شده عمدتاً در مجاورت شبکه زهکشی حوضه قرار داشته و این امر ضمن اشاره به تأثیر شبکه زهکشی در وقوع ناپایداری دامنه‌ای، در ارتباط با جابجایی و انتقال مواد گسیخته شده به داخل شبکه هیدروگرافی و افزایش بار رسوبی رودخانه نیز حائز اهمیت است. یافته‌های این تحقیق از طریق مشاهدات صحرایی و تعیین موقعیت مکانی توده لغزشی از طریق GPS و همچنین برخی اندازه‌گیری‌های مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج کار نشان داد که همه سطوح لغزشی با دقت بالایی آشکارسازی شده است. بنابراین می‌توان اذعان داشت که روش پردازش اینترفرومتری تفاضلی راداری (DInSAR) روشی کارآمدی در شناسایی زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. داده‌های دورسنجی میکروویو به دلیل پوشش وسیع تصاویر ماهواره‌ای، بهنگام بودن آن‌ها در کنار پایین بودن نسبی هزینه تهیه آنها نسبت به سایر روش‌های سنتی و رایج در تهیه نقشه زمین‌لغزش‌ها مانند: تفسیر استریوئی عکس‌های هوایی، تاکئومتری، ترازبایی، فتوگرامتری برد کوتاه

ارجحیت داشته و استفاده از این فناوری مخصوصاً برای مناطق وسیع و صعب‌العبور کوهستانی جایگزین مناسبی در مقایسه با روش‌های کلاسیک یادشده خواهد بود.

بایستی یادآور شد که برخی ویژگی‌های ذاتی تصاویر راداری از قبیل: زاویه دید ماهواره، اعوجاجات هندسی، محدودیت امکان اندازه‌گیری تنها در جهت دید ماهواره (LOS^۱) و پائین بودن میزان همبستگی^۲ به خاطر افزایش طول خط مبنای عمودی، در بعضی مواقع امکان به‌کارگیری آن را در زمینه آشکارسازی و پایش زمین‌لغزش‌ها محدود کرده است. همان‌طوری که نتایج این تحقیق هم نشان داد مناطق ناپایدار در دامنه‌های شرقی با دقت بالایی نسبت به شیب‌های غربی آشکارسازی شده‌اند. این امر به خاطر استفاده از تصاویر راداری در مد بالاگذر^۳ بوده است. چراکه در این حالت شیب‌های غربی بیشتر تحت تأثیر پدیده کوتاه شدگی^۴ قرار دارند. این موضوع در پژوهش فابیان^۵ و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه زمین‌لغزش‌های منطقه ایوانسیج^۶ ایتالیا، اسکانیو^۷ و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه زمین‌لغزش‌های روستای ریساسولی^۸ در ایتالیا، ویگمولر^۹، استروزی^{۱۰}، دلالی^{۱۱} و رایتزو^{۱۲} (۲۰۱۲) در سوئیس نیز گزارش شده است. بنابراین تصاویری مورد استفاده بایستی از هر دو مد پائین‌گذر^{۱۳} و بالاگذر (فررتی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۰۷).

از آنجائی که تحقیق حاضر بر پایه پردازش اینترنتی تفاضلی زوج تصاویر راداری در سه بازه زمانی ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ صورت گرفته است بدیهی است که تنها امکان شناسایی زمین‌لغزش‌های فعال موجود در سه بازه زمانی یادشده مقدور بوده و بنابراین لازم است جهت آشکارسازی زمین‌لغزش‌های قدیمی‌تر از تصاویری متناسب با تاریخ وقوع آن‌ها استفاده گردد.

سپاسگزاری

در تحقیق حاضر، تصاویر راداری PALSAR از سازمان فضائی اروپا تهیه شده است که بدین‌وسیله از مشارکت آن‌ها صمیمانه قدردانی می‌گردد.

منابع:

- Akhondzadeh, M., 2005, Visualization of land subsidence from petroleum extraction by SAR technique, Geomatic Congress, Tehran, Iran (In Farsi)
- Akbari mehr, M., Motagh, M.A. Sharifi, N. Khavaninzadeh, 2012, Evaluation of landslide creep in Gougerd slope, northwestern Azerbaijan, using Differential SAR Interferometry and GPS observation, Science and Techniques of Surveying, Volum2. Thehran, Iran. (In Farsi)
- Agostini, A., 2012, The use of different remote sensing techniques for landslide characterization, PhD thesis, Scuola di Dottorato in Scienze della Terra, Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova

1 Line Of Sight
2 Coherence
3 Ascending
4 Foreshortening
5 Fabiana
6 Fabiana
7 Ascanio
8 Ricasoli
9 Wegmuller
10 Strozzi
11 Delalye
12 Raetzo
13 Descending
14 Ferretti

- Ascanio, R., P. Vannocci, V. Tofani, G. Gigli and N. Casagli, 2013, *Landslide Characterization Using Satellite Interferometry (PSI), Geotechnical Investigations and Numerical Modelling: The Case Study of Ricasoli Village (Italy)*, *International Journal of Geosciences*, 2013, 4, 904-918 (<http://www.scirp.org/journal/ijg>)
- Bovenga, F., Wasowski, J., Nitti, D.O., Nutricato, R., Chiaradia, M.T. 2012, *Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. Remote Sensing of Environment*, 119, 272-285 www.elsevier.com/locate/rse
- Brardinoni, F., O. Slaymaker, M.A. Hassan, 2003. *Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. Geomorphology* 54, 179-196
- Colesanti C, J. Wasowski, 2006, *investigating landslides with spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. Eng Geol* 88(3-4):173-199
- Cruden, D., D.J. Varnes, 1996. *Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides Investigation and Mitigation, Special Report, 247. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C, pp. 36-75.*
- Dai, F. C., C.F. Lee, and Y. Y. Nagai, 2002. *Landslide risk assessment and management: an overview, engineering geology*, 64(1): 65-87
- Deghani, M., M.J., Valadanzoj, B. Parsons, T. Weight, 2006, *land subsidence evaluation of north-western part of Mashhad by INSAR technique, 26th Iranian's Geology Cong. (In Farsi)*
- *East Azarbaijan Governor's Office of Disaster Management archive, 2013, Landslide reports of Garmi Chai basin (In Farsi)*
- ESA (European Space Agency), 2007, *InSAR principles: Guidelines SAR Interferometry processing and interpretation, part B, TM-19*
- Fabiana, C., F. Ardizzone, R. Castaldo, P. Lollino, P. Tizzani, F. Guzzetti, R. Lanari, M. G. Angeli, F. Pontoni and M. Manunta, 2014, *Enhanced landslide investigations through advanced DInSAR techniques: The Ivancich case study, Assisi, Italy, Remote Sensing of Environment Volume 142, 25 February 2014, Pages 69-82*
- Farina P., D. Colombo, A. Fumagalli, F. Marks, S. Moretti, 2006, *Remote Sensing techniques for landslide risk analysis: outcomes from the ESA-SLAM project. Eng. Geol.* 88:200-217
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C. and Rocca, F., 2007, "Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 1142-1153
- Fruneau B, J. Achace, C. Delacourt, 1996, *Observation and modeling of the Saint-Etienne-de-Tine'e landslide using SAR interferometry. Tectonophysics* 265(3-4)
- Gabriel, A.K., R.M. Goldstein, H.A. Zebker, 1989. *Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. J. Geophys. Res.* 94, 9183-9191.
- Gozalpour, B., M. Motagh and M. Momeni, 2010, *The application of InSAR technique for investigating mass movement in Semirom, Southeast Iran, American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #NH23A-1425*
- Guzzetti, F., 2000, *Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy, Engineering Geology*, 58(2):89-107
- Hong, Y., R. F. Adler, and G. Huffman, 2007, *An Experimental Global Prediction System for Rainfall-Triggered Landslides Using Satellite Remote Sensing and Geospatial Datasets, IEEE T. Geosci. Remote*, 45, 1671-1680
- Karam, A., 2001, *Quantitative modelling and landslide risk zonation in faulted Zageros, case study: Sarkhon basin in Char-Mahal-e- Bakhteyari, PhD thesis, Physical Geography, Tarbiat Modarres university (In Farsi)*
- Khavaninzadeh, N., 2011, *Using RADAR Interferometry for landslide studying, MSc thesis, technical Faculty, Tehran University, Iran (In Farsi)*
- Khavaninzadeh, N., M. Motagh, M. Sharifi and S. Alipur, 2010, *C-band and L-band InSAR for recognition and monitoring of landslides in Taleghan, Central Iran, American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #NH23A-1424*
- Komakpanah, a., S. Montazam, A. Chodani, 1995, *Landslide and review of Iran's landslides, Volum 1, International Institute of Earthquake Engineering and seismology (In Farsi)*
- *Landslide Database of Iran, 2013, Landslide reports archive in department of Natural Resources and Watershed Management in East Azerbaijan, Tabriz, Iran (In Farsi)*

- Liu, P., Z. Li, T. Hoey, C. Kincal, J. Zhang, Q. Zeng, J.P. Muller, 2011, Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, www.elsevier.com/locate/jag, doi:10.1016/j.jag.2011.10.010
- Massonnet A. and G. Feigl, 1998, Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics* 36 (4) (1998), pp. 441–500.
- Moradi, H.R., M. Mohamadi, H.R. pourghasemi, 2012, Mass movements with emphasis to landslide occur analysis by quantitative methods, 1th edition, SAMAT publication, Iran (In Farsi)
- Parsaei, L. And S. Alimohamadi, 2012, Landslide in Iran, 1th edition, Jahade-e Daneshgahi publication, Iran (In Farsi)
- Riedel, B., A. Walter, 2008, InSAR processing for the recognition of landslides, *Advances in Geosciences, Adv. Geosci.*, 14, 189–194, www.adv-eosci.net/14/189/2008/
- Rostaei, Sh. M. Rostaei, M. A. Sharifikia and J. Yarahmadi, 2013, Application of Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) for detection and monitoring of landslides, *Journal of Watershed Engineering and Management*, Volume 5, Issue 3, 2013, Pages 190-198 (In Farsi)
- Singhroy, V., and K. Molch, 2004a. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. *Advances in Space Research*, 33, 290-295.
- Strozzi, T., P. Farina, A. Corsini, C. Ambrosi, M. Thüring, J. Zilger, A. Wiesmann, U. Wegmüller, C. Werner, 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2, 193-20
- Van Westen, C., N. Kerel, M. Damen, M. Lubsynska, 2009, Multi-hazard risk assessment: guide book, Enschede, The Netherlands, ITC, www.itc.nl
- Wegmüller, V., T. Strozzi, R. Delaloye, H. Raetzo, 2012, Landslide mapping in Switzerland with ENVISAT ASAR, *Gamma Remote Sensing*, 3073 Gümliigen, Switzerland, <http://www.gamma-rs.ch>