

استفاده از تصاویر رزولوشن بالا (IRS P5) جهت تعیین جابجایی‌های

ناشی از زمین لغزش

سیده سمیرا حسینی^{۱*}، علی عزیزی^۲، عباس بحرودی^۳، محمد علی شریفی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
samirahoseini86@ut.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
aazizi@ut.ac.ir

^۳ استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
bahroudi@ut.ac.ir

^۴ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
sharifi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت فروردین ۱۳۹۱، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۱)

چکیده

وقوع پدیده زمین لغزش یکی از سوانح طبیعی است که سالیانه باعث کشته شدن صدها نفر، ایجاد خسارت‌های فراوان و بستن راه‌های ارتباطی در سطح جهانی می‌شود. به منظور جلوگیری از خطر وقوع زمین لغزش ایجاد مدل‌های پیش‌بینی زمین لغزش اهمیت زیادی دارد. دسترسی به نقشه‌های آسیب‌پذیری مناطقی که بیشتر در معرض حادثه وقوع زمین لغزش قرار دارند در مدلسازی بهتر این پدیده نقش مهمی را ایفا می‌نماید. تعیین نقشه‌های آسیب‌پذیری به کمک روش‌های زمینی در مناطق وسیع جوابگوی این مشکل نبوده، علاوه بر آنکه تهیه این نقشه‌ها با روش‌های زمینی از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نمی‌باشد. تصاویر هوایی نیز به دلیل نداشتن پریود زمانی بالا و نیز عدم پوشش سراسری برای مناطق وسیع مشکلاتی را در تهیه این پارامترها ایجاد می‌کنند همچنین قدرت تفکیک پایین مکانی تصاویر ماهواره‌ای قدیمی و نیز نیاز داشتن به نقاط کنترل زمینی جهت تصحیح هندسی تصاویر از دلایل استفاده کم این تصاویر به منظور ایجاد این گونه نقشه‌ها بشمار می‌رود. تصاویر ماهواره‌های اپتیک با وجود سنجنده‌های استرئو با توان تفکیک بالا که مجهز به GPS/INS نیز هستند با کمک ضرائب توابع رشنال امکان تصحیح هندسی و هم مرجع کردن تصاویر با حداقل یک نقطه کنترل زمینی را فراهم می‌آورند. به کمک این تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا می‌توان میزان جابجایی‌های ناشی از زمین لغزش که پارامتری اساسی در مدلسازی پیش‌بینی زمین لغزش به شمار می‌رود را بدست آورد. در این مقاله، از تصاویر قدرت تفکیک بالای IRS P5 در چهاراپوک زمانی برای منطقه دم‌دل واقع در استان اردبیل جهت بدست آوردن جابجایی سطحی زمین و ایجاد نقشه آسیب‌پذیری استفاده شد، نتایج با دیتاهای GPS شرکت مهندسی مشاور ایستا سنج دقیق مقایسه شد و اختلاف کمتر از نیم متر در جابجایی‌های ناشی از زمین لغزش را نشان می‌داد.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، نقشه آسیب‌پذیری، معادله هلمرتز، تصاویر IRS P5، HRSI.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

وقوع پدیده زمین لغزش یکی از سوانح طبیعی است که سالیانه سبب خسارات بالایی در سطح جهانی میشود. بنابراین افزایش دقت مدل‌های پیش‌بینی این پدیده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱، ۲، ۳]. دسترسی به نقشه‌های آسیب‌پذیری مناطقی که بیشتر در معرض حادثه وقوع زمین لغزش قرار دارند می‌تواند در مدلسازی بهتر این پدیده نقش مهمی را ایفا نماید [۱]. تهیه و دستیابی به این نقشه‌ها همیشه بسادگی میسر نبوده به علاوه، این اطلاعات، ممکن است به‌روز نباشند و این امر نیز دقت مدل‌های پیش‌بینی را کاهش می‌دهد. با توجه به تکنولوژی ماهواره‌ای و توسعه قابل توجه آنها در سالهای اخیر، به نظر میرسد ابزار قدرتمندی در زمینه فراهم کردن اطلاعات لازم جهت مدلسازی جامع‌تر پدیده زمین لغزش فراهم شده باشد [۱، ۲]. تصاویر اخذ شده با سنجنده‌های مجهز به تکنیک تداخل سنجی، قبلاً در این زمینه فعال بوده و پتانسیل بالایی خود را در زمینه مطالعات مربوط به زمین لغزش ارائه داده‌اند [۴، ۵]. ولی مشکل این سنجنده‌ها کاهش توان تعیین توده جابجا شده در امتداد مولفه‌های افقی است و دقت آنها بیشتر محدود به جابجایی در جهت ارسال پالس می‌شود [۶، ۷]. تصاویر سنجنده‌های اپتیکی در این زمینه نیز قبلاً مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی این تصاویر بیشتر با روش جستجوی تغییرات^۱، زمین لغزش را مورد بررسی قرار داده و کمتر اندازه‌گیری‌های هندسی به منظور تعیین دقیق جابجایی در این تصاویر صورت گرفته است [۷، ۸]. عدم توجه جدی جامعه علمی به استفاده از این تصاویر در اندازه‌گیری و پایش جابجایی توده زمین می‌تواند به این دلیل باشد که اولاً برای مقصود اشاره شده در بالا تصاویر می‌بایست دارای توان تفکیک مکانی قابل قبولی باشند [۹]. توان تفکیک بالا در عکسهای هوایی موجود است ولی این عکسها به علت اینکه باید با سکوها یا هواپرد برداشته شوند نمی‌توانند با پیوند زمانی بالا و نیز برای پوشش سراسری یک منطقه وسیع، کارایی کافی داشته باشند. به علاوه، تصاویر ماهواره‌ای و نیز عکس‌های هوایی باید هم مرجع گردند

تا تصاویر اپکهای زمانی مختلف جهت اندازه‌گیری زمین لغزش با یکدیگر قابل مقایسه باشند. این امر مستلزم داشتن نقاط کنترل زمینی و نیز مدل رقومی موجود منطقه است تا از طریق آنها جابجایی‌های ناشی از تیلت و اختلاف ارتفاع، بویژه در مناطق کوهستانی، امکان‌پذیر گردد [۶]. البته این اطلاعات ممکن است همیشه با دقت کافی در اختیار نباشد و به علاوه برای مناطق کوهستانی دستیابی به نقاط کنترل حتی دشوارتر نیز خواهد بود. مشکلات اشاره شده در بالا جهت استفاده از تصاویر ماهواره‌های اپتیکی برای اندازه‌گیری کمی پدیده زمین لغزش در سالهای اخیر با وجود سنجنده‌های استرئو با توان تفکیک بالا که مجهز به GPS/INS نیز هستند برطرف شده است. این تصاویر ضرائب توابع رشنال برازش داده شده به اطلاعات GPS/INS را نیز در اختیار کاربر قرار داده که از طریق آنها کاربر قادر به تصحیح هندسی و هم مرجع کردن تصاویر خواهد بود [۱۰]. بنابراین این تصاویر می‌توانند به عنوان ابزاری قدرتمند جهت تهیه نقشه حادثه خیزی زمین لغزش مورد استفاده قرار گیرند. در روش پیشنهادی به منظور بدست آوردن جابجایی سطحی زمین نیز از تصاویر IRS P5 در چهارپایک زمانی برای منطقه دمدمل واقع در استان اردبیل استفاده شد و جابجایی‌های ناشی از زمین لغزش در این مقاطع زمانی بدست آمدند. نتایج حاصل با دیتاهای GPS شرکت مهندسیین مشاور ایستاسنج دقیق مقایسه شدند و اختلاف کمتر از نیم متر را در نتایج نشان می‌دادند. در روش پیشنهادی به کمک تصاویر قدرت تفکیک بالای IRS P5 جابجایی‌های ناشی از زمین لغزش تعیین می‌شوند.

۲- الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله، تعیین جابجایی‌های ناشی از زمین لغزش در دو حالت تعیین جابجایی سه بعدی نقاط و تعیین جابجایی‌های دو بعدی نقاط به صورت جداگانه بیان می‌شود، تعیین جابجایی سه بعدی نیز با استفاده از تصاویر استرئو و نیز با استفاده از تک تصویر مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش تعیین جابجایی‌های دو بعدی در این مقاله پیاده سازی می‌شود.

۲-۱- تعیین جابجایی‌های سه بعدی

۲-۱-۱- تعیین جابجایی‌های سه بعدی با تصاویر استرئو و نقاط کنترل زمینی

در این روش، ابتدا در مناطقی که احتمال وقوع زمین لغزش وجود دارد، نقاط متناظر به صورت دستی انتخاب می‌گردد. این نقاط می‌توانند با معادلات رشنال زمین مستقل و با استفاده از ضرائب RPC، به فضای زمینی برده شوند. این پروسه برای همین نقاط در کلیه تصاویر استرئو که در اپوکهای مختلف در اختیار است نیز انجام می‌شود. حاصل این محاسبات، مختصات زمین نقاط مشکوک به زمین لغزش خواهد بود که مختصات زمینی آنها در اپوکهای متفاوت بدست آمده است. مقایسه این مختصات در این حالت میسر نیست زیرا این نقاط دارای خطاهای موسوم به شیفت و دریفت هستند که از قبل در ضرائب RPC وجود داشته و در نتیجه، این خطاها به مختصات زمینی نقاط منتقل می‌شوند. بنابراین قبل از هرگونه مقایسه بین مختصات نقاط مشابه جهت تعیین مقدار زمین لغزش، لازم است با حداقل یک نقطه کنترل زمینی، خطای شیفت برای کلیه نقاط تصحیح گردد. در صورتی که ابعاد منطقه مورد مطالعه وسیع باشد (معمولا بیش از ۵۰ کیلومتر) در اینصورت علاوه بر خطای شیفت، خطای دریفت نیز موجود خواهد بود [11, 12, 13, 14, 15, 16]. که می‌بایست با یک تبدیل افاین سه بعدی با حداقل چهار نقطه کنترل زمینی که در خارج از منطقه زمین لغزش انتخاب شده‌اند مسئله حل شود. بعد از محاسبه ضرائب تبدیل افاین سه بعدی، کلیه نقاط محاسبه شده زمینی در اپوکهای مختلف، به مرجع زمینی برده شده و پس از تفاضل مختصات سه بعدی نقاط، میزان جابجایی احتمالی نقاط برای اپوکهای مختلف بدست خواهد آمد.

۲-۱-۲- تعیین جابجایی‌های سه بعدی با تصاویر استرئو بدون نقاط کنترل زمینی

راه حل دیگری که می‌تواند در کنار راه حل اشاره شده در بالا در نظر گرفته شود، اندازه‌گیری میزان جابجایی‌های نسبی است. بدین معنا که اگر یک اپک زمانی به عنوان مرجع در نظر گرفته شود، معمولا اولین اپک، در

اینصورت بقیه اپوکها می‌توانند به این مرجع منتقل شوند و میزان جابجایی نقاط در کلیه اپوکها نسبت به این مرجع سنجیده شوند. مزیت این روش در این است که احتیاج به نقاط کنترل زمینی نبوده و در نتیجه مشکلاتی که در بالا در ارتباط با نقاط کنترل زمینی مطرح گردید نیز کاهش می‌یابد. مراحل اجرای این روش در زیر توضیح داده شده است:

در ابتدا کلیه نقاطی که در معرض احتمالی زمین لغزش قرار داشته‌اند به صورت استرئو در هر دو تصویر جلونگر و عقب نگر، اندازه‌گیری می‌شوند. با داشتن ضرائب RPC برای هر اپوک، مشابه با حالت قبل، مختصات زمینی محاسبه خواهد شد. برای هم مرجع کردن نقاط به اولین اپوک (اپوک مرجع)، می‌بایست از یک تبدیل هندسی سه بعدی که تغییر شکل ایجاد نمی‌کند، استفاده شود. زیرا وجود هرگونه انعطاف در معادلات، سبب بروز جابجایی‌های تصنعی خواهد شد. بنابراین مناسبترین تبدیل برای این هدف، معادلات هلمرتز هفت پارامتری است، این معادلات در رابطه ۱ نشان داده شده است:

$$\begin{pmatrix} E_j \\ N_j \\ H_j \end{pmatrix} = \lambda_{ij} R_{ij} \begin{pmatrix} E_i \\ N_i \\ H_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{ij}^T \\ Y_{ij}^T \\ Z_{ij}^T \end{pmatrix} \quad (1)$$

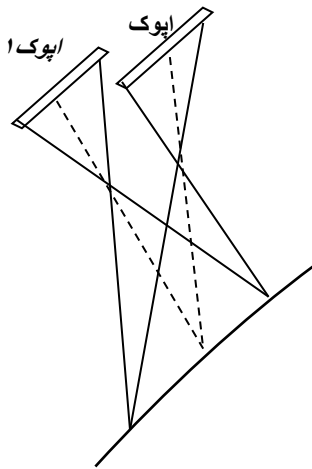
در رابطه بالا: λ ، R ... Z^T پارامترهای تبدیل هلمرتز برای اپوک i نسبت به اپوک مرجع j هستند. معادلات بالا پس از خطی شدن نسبت به هفت پارامتر تبدیل، با روش تکراری قابل حل خواهند بود. پس از حل این پارامترها، با استفاده از معادلات مستقیم هلمرتز، مختصات سه بعدی نقاط اندازه‌گیری شده در اپوکهای مختلف، به اپوک مرجع انتقال یافته و سپس اختلاف مختصات نقاط متناظر برای کلیه اپوکها نسبت به اپوک مرجع محاسبه می‌شود.

۲-۱-۳- تعیین جابجایی‌های سه بعدی با تصاویر غیر استرئو و DEM

در این روش داشتن مدل رقومی زمین ضروری است. در ابتدا می‌بایست تصاویر با DEM هم مرجع گردند. برای

۲-۲-۱- تخمین خطای جابجایی‌های ناشی از تیلت برای سنجنده P_s در دو اپوک زمانی

تغییرات زاویه دید دوربین در دو اپوک زمانی، که ناشی از تغییرات وضعیت ماهواره است، عاملی است که باعث تغییر در مقیاس می‌شود. زیرا همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، به علت تشابه مثلث‌های تصویربرداری، هرگونه تغییر در زاویه دید دوربین عقب‌نگر، تغییری در مقیاس تصویربرداری در امتداد خطوط اسکن ایجاد خواهد کرد.



شکل ۱- تغییر مقیاس در اپوک تصویربرداری نسبت به یکدیگر.

این تغییر مقیاس، $\Delta\lambda_s$ با رابطه ۲ می‌تواند بیان شود:

$$\Delta\lambda_s = \frac{f}{H \cos \varphi_1} / \frac{f}{H \cos \varphi_2} = \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \quad (2)$$

در رابطه بالا: φ_1 و φ_2 به ترتیب، بیان‌کننده زوایای دید سنجنده عقب‌نگر در اپوک‌های زمانی ۱ و ۲؛ f فاصله کانونی سنجنده و H ارتفاع پرواز ماهواره هستند. بسادگی می‌توان نشان داد که تغییر زاویه دید دوربین عقب‌نگر در اپوک ۲ نسبت به اپوک ۱ باید در رابطه ۳ صدق کند:

$$\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} = \lambda_x \quad (3)$$

در رابطه بالا λ_x تغییر مقیاس تصویر اپوک ۲ نسبت به اپوک ۱ است.

این منظور ساده‌ترین روش، استفاده از ضرائب RPC با یک نقطه کنترل زمینی است. پس از انجام این مرحله، هر نقطه در منطقه وقوع زمین لغزش، به زمین منتقل می‌شود. انجام اینکار مستلزم پیاده‌سازی یک روش تکراری است که از طریق آن معادله فضایی سه بعدی خط که از طریق معادلات رشنال به کمک ضرائب RPC ایجاد شده است، با رویه مدل رقومی زمین تقاطع داده می‌شود. نتیجه نهایی این تقاطع، بدست آمدن مختصات سه بعدی زمینی هر نقطه اندازه‌گیری شده در فضای تصویر خواهد بود بنابراین، نقاط واقع بر منطقه احتمالی زمین لغزش در اپوک‌های مختلف، به زمین منتقل شده و در نتیجه می‌توانند با یکدیگر جهت کشف وقوع زمین لغزش، مقایسه گردند.

۲-۲-۲- تعیین جابجایی‌های دو بعدی

این روش فقط توان تعیین جابجایی‌های افقی را نسبت به یک اپک مرجع دارد ولی مزیت آن در این است که مشکل خطاهای ذاتی شیف و دریافت موجود در ضرائب RPC را نخواهد داشت. این روش، در دو حالت بررسی می‌شود: در حالت اول فرض بر این است که منطقه‌ای که در معرض زمین لغزش قرار گرفته است قسمت عمده‌ای از تصویر ماهواره‌ای را دربرگرفته است. دومین روش مربوط به حالتی است که منطقه زمین لغزش نسبت به کل تصویر کوچک است. هرگونه مقایسه بین اپوک‌های تصویربرداری فقط موقعی امکان‌پذیر است که دو خطای عمده جابجایی ناشی از تیلت (تغییر منظر ماهواره) و جابجایی ناشی از اختلاف ارتفاع برای تصاویر در اپوک‌های مختلف یکسان‌سازی شده باشد. در روش‌های سه بعدی، که در بالا به آنها اشاره شده، هریک به نحو خود این یکسان‌سازی هندسی را با استفاده از ضرائب RPC و یا DEM اعمال می‌کردند. در حالت دو بعدی فرض بر این است که ضرائب RPC و DEM منطقه در اختیار نیست، بنابراین در چنین حالتی، تنها راه هم-مرجع‌سازی، یکسان‌سازی جابجایی‌های تیلت و ارتفاعی در تصاویر اخذ شده در اپوک‌های متفاوت است. لذا، قبل از هر چیز، تعیین میزان تغییرات جابجایی‌های ناشی از تیلت و ارتفاع برای اپوک‌های تصویر برداری جهت هم-مرجع‌سازی ضروری است.

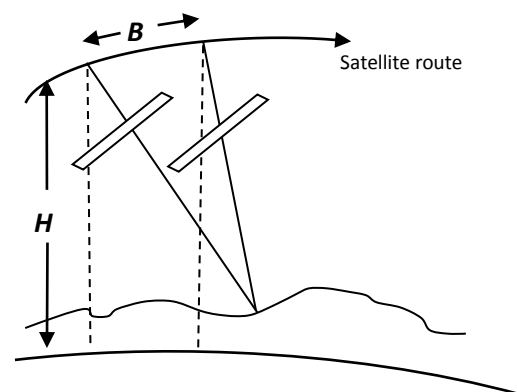
۲-۲-۲- تخمین خطای جابجایی ارتفاعی برای سنجنده P5 در دو اپوک زمانی

اگر تصاویر در اپوکهای متفاوت با پرسپکتیوهای کاملاً یکسان و از ارتفاع پرواز یکسان برداشته شوند، میتوان نشان داد مقدار جابجایی ارتفاعی برای این تصاویر کاملاً یکسان است. ولی از آنجایی که برای یک سنجنده، اختلاف پرسپکتیو اجتناب ناپذیر است، تغییرات جابجایی ارتفاعی در تصاویر نیز اجتناب ناپذیر خواهد بود. اما به دلیل آنکه این تغییر پرسپکتیو برای یک سنجنده در اپوکهای زمانی متفاوت کوچک است، تغییرات جابجایی ارتفاعی نیز کوچک خواهد بود. برای تخمین مقدار تغییرات جابجایی ارتفاعی در تصاویر، می توان از روابط ساده هندسه پارالاکس، رابطه ۴ برای عکسهای قائم استفاده کرد (شکل ۲):

$$px = \frac{Bf}{H - h} \quad (۴)$$

در رابطه بالا: H ، B و h به ترتیب بیان کننده، باز تصویری ایجاد شده به علت تغییر زاویه دید در دو اپوک زمانی، ارتفاع پرواز ماهواره و ارتفاع زمینی نقطه و px نشان دهنده تغییرات جابجایی ناشی از ارتفاعات در دو اپوک تصویربرداری هستند. حال، اگر میزان تغییر زاویه دید دوربین عقب‌نگر محاسبه شده باشد مقدار عددی B طبق رابطه ۵ قابل تخمین خواهد بود (شکل ۲):

$$B = H(\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (۵)$$



شکل ۲- وضعیت هندسی تصاویر در دو اپوک زمانی نسبت به یکدیگر.

با دیفرانسیل‌گیری از معادله ۴ رابطه ۶ را خواهیم داشت:

$$dpx = \frac{Bf}{(H - h)^2} dh \quad (۶)$$

۲-۲-۳- محاسبه جابجایی های ناشی از زمین لغزش در حالت دو بعدی

در حالتی که ابعاد منطقه آسیب‌پذیر، نسبت به کل منطقه پوشش داده شده در تصویر، بزرگ باشد در ابتدا نقاط متناظر در تصویر اپوک مرجع، (J) ، و اپوک اختیاری (I) ، در بیرون منطقه آسیب‌پذیر ولی نزدیک به این منطقه شناسایی و مختصات پیکسلی آنها اندازه‌گیری شده و سپس برای این نقاط، تبدیل افاین دوبعدی حل میشود. در مرحله بعد، نقاط واقع در منطقه آسیب‌پذیر نیز در هر دو اپوک شناسایی شده و مختصات پیکسلی آنها اندازه‌گیری می شود. حال، ضرائب تبدیل افاین که در مرحله قبل بدست آمده است به نقاط اندازه‌گیری شده در اپوک i اعمال و بدین ترتیب مختصات آنها به فضای تصویر مرجع انتقال می یابد. پس از این هم‌مرجع‌سازی، تفاضل مختصات در دو اپوک، میزان جابجایی نسبی ناشی از زمین لغزش را نشان خواهد داد. این مراحل سپس برای کلیه اپوکهای دیگر تکرار شده و میزان جابجایی بین کلیه اپوکها و اپوک مرجع محاسبه میشود. فلوچارت حل مسئله با این روش در شکل ۳ نشان داده شده است.

در حالتی که ابعاد منطقه آسیب‌پذیر، نسبت به کل منطقه پوشش داده شده در تصویر، کوچک است، میتوان به جای تبدیل افاین در یکسان‌سازی جابجایی ناشی از تیلت در تصاویر، از تبدیل کانفورمال دو بعدی استفاده کرد. زیرا در این حالت، با توجه به کوچک بودن تغییرات زاویه دید سنجنده در اپوکهای متوالی، خطای مقیاس ایجاد شده در منطقه آسیب‌پذیر بسیار کوچک بوده و کاملاً قابل اغماض است. فلوچارت حل مسئله با این روش در شکل ۴ نشان داده شده است.

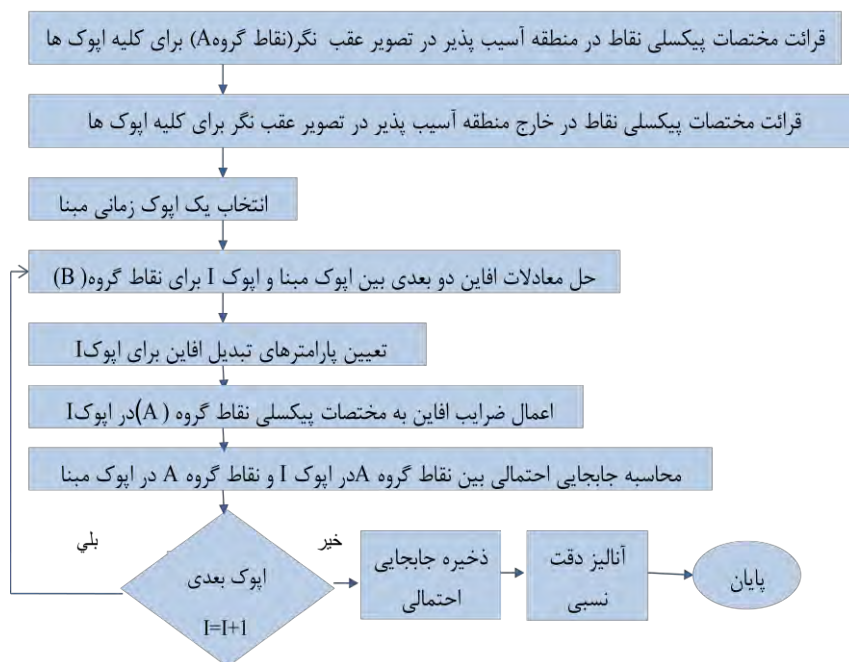
۳- داده‌های مورد استفاده

تصاویر استفاده شده در این تحقیق، متعلق به روستای دم‌دل در جنوب شهرستان خلخال در استان اردبیل

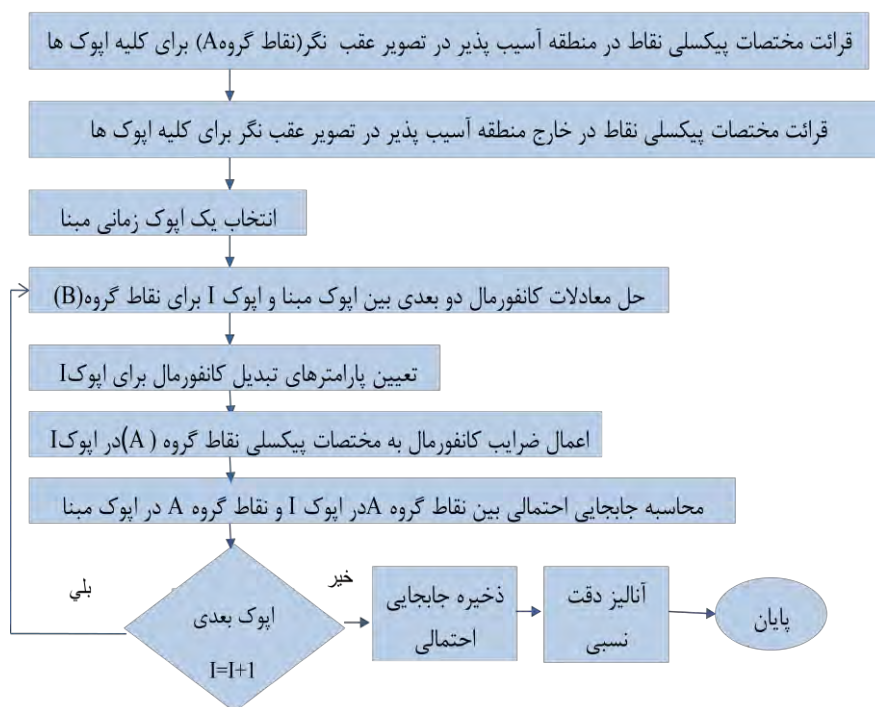
است. روستای دمدل در در طول جغرافیایی $48^{\circ} 24'$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 20'$ شمالی واقع شده است. تصاویر اخذ شده مربوط به سالهای ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۰ میباشد که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است، تصاویر مربوط به منطقه زمین لغزش در اپوک های مختلف در اشکال ۵، ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر اخذ شده

اپوک اول	اپوک دوم	اپوک سوم	اپوک چهارم
۲۳ جولای	۴ آگوست	۱۷ آگوست	۳۰ آگوست
۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰



شکل ۳- فلوچارت پیشنهادی برای اندازه گیری دو بعدی جابجایی نسبی نقاط بدون نقاط کنترل با ضرایب افاین



شکل ۴- فلوچارت پیشنهادی برای اندازه گیری دو بعدی جابجایی نسبی نقاط بدون نقاط کنترل با ضرایب کانفورمال



شکل ۸- تصویر عقب نگر از منطقه زمین لغزش در ۳۰ آگوست ۲۰۱۰



شکل ۵- تصویر عقب نگر از منطقه زمین لغزش در ۲۳ جولای ۲۰۰۷

۴- نتایج اجرایی الگوریتم پیشنهادی

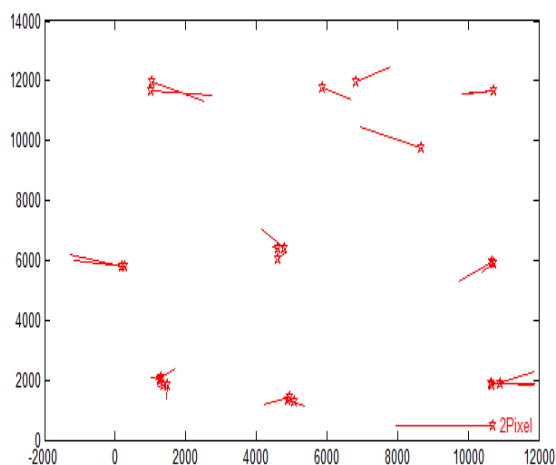
قبل از تعیین جابجایی های ناشی از زمین لغزش نیاز است که تصحیحات هندسی بر روی تصاویر انجام گرفته و خطای ناشی از جابجایی ارتفاعی و تیلت تصحیح گردد، برای کلیه اپوکهای زمانی تصاویر استفاده شده در این تحقیق، نقاط متناظر به نحوی که کل سطح تصویر پوشش داده شود انتخاب و با دقت بالا به صورت دستی مختصات پیکسلی آنها اندازه گیری شد. البته توجه کافی صورت گرفت تا این نقاط در منطقه متأثر از زمین لغزش انتخاب نگردند زیرا این امر سبب اشتباه در محاسبه جابجایی ناشی از تیلت می گردد. حال، برای این نقاط، یک تبدیل دو بعدی از نوع کانفورمال، به ترتیب برای کلیه اپوکهای زمانی اجرا گردید، بردارهای باقیمانده برای این نقاط در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، کشیدگی یکنواخت در امتداد خطوط اسکن و فشردگی تصویر در امتداد حرکت ماهواره برای تصاویر عقبنگر اپوک ۲۰۰۸ نسبت به اپوک ۲۰۰۹ به وقوع پیوسته است.



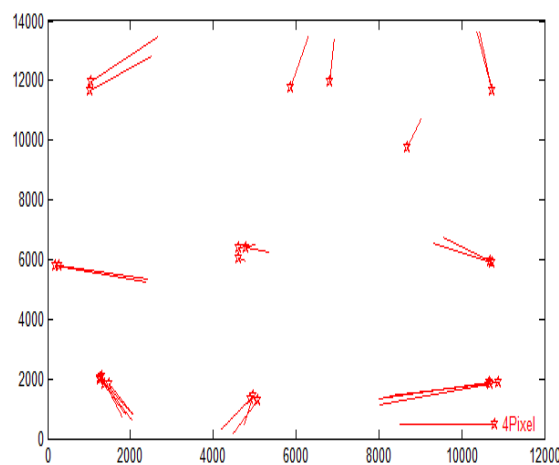
شکل ۶- تصویر عقب نگر از منطقه زمین لغزش در ۴ آگوست ۲۰۰۸



شکل ۷- تصویر عقب نگر از منطقه زمین لغزش در ۱۷ آگوست ۲۰۰۹



شکل ۱۰- بردار باقیمانده ها پس از اعمال ضرایب افاین بین تصاویر اپوک ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹



شکل ۹- بردار باقیمانده ها پس از اعمال ضرایب کانفورمال بین تصاویر اپوک ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹

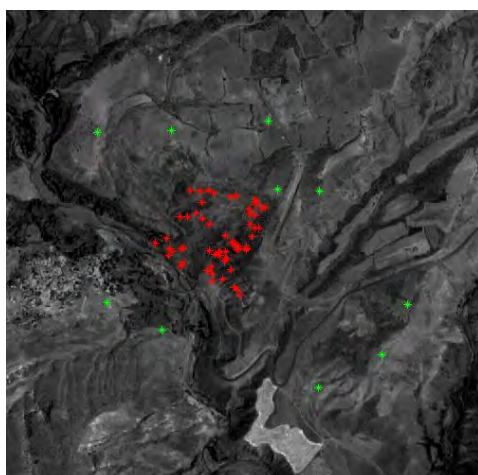
این روش نیز می تواند سبب جابجایی‌های غیر واقعی که مرتبط با زمین لغزش نیست بشود. زیرا اگر در منطقه‌ای زمین لغزش اتفاق نیفتاده باشد و یا اگر در صورت وقوع، مقدار آن از خطای مربعی متوسط باقیمانده‌ها در تبدیل افاین کمتر باشد، در اینصورت ترند جابجایی بر روی این نقاط غیر واقعی خواهد بود. بنابراین، هرگونه ترند جابجایی که مقدار آن به خطای مربعی متوسط باقیمانده‌ها در تبدیل افاین نزدیک شود فاقد اعتبار است. این موضوع در تست‌های انجام شده در منطقه زمین لغزش که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است قابل مشاهده است. برای نمونه، ضرائب محاسبه شده در تبدیل افاین بین تصاویر اپوک ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹، به مناطق آسیب‌پذیر اعمال گردید. بردار جابجاییها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده میشود، جابجایی‌های اصلی و معنی دار مربوط به بردارهای بیش از یک پیکسل است و ترند جابجایی مشاهده شده در نقاطی که میزان جابجایی آنها کمتر از یک پیکسل است میتواند غیر واقعی بوده و ناشی از تأثیر ضرائب افاین باشد، زیرا مقادیر جابجایی کمتر از یک پیکسل، به مقدار خطای مربعی متوسط باقیمانده‌های تبدیل افاین نزدیک بوده و بنابراین فاقد اعتبار است.

برای رندوم شدن بردار باقیمانده ها، لازم است برای همان نقاط متناظر که قبلاً برای هر دو اپوک اندازه‌گیری شده‌اند، این بار به جای تبدیل کانفورمال، تبدیل افاین اجرا گردد. تغییر مقیاس در راستای خطوط اسکن برای اپوکهای ۱ و ۲ برابر با ۰،۹۹۹۱ بدست آمده است. اگر زاویه اسمی دوربین عقب‌نگر را در اپوک ۱ برابر با ۵ درجه در نظر بگیریم، زاویه دید دوربین عقب‌نگر در اپوک ۲ برابر با ۵،۵۶ درجه خواهد بود. یعنی زاویه دید دوربین در اپوک ۲ نسبت به زاویه دید در اپوک ۱ برابر با ۰،۵۶ درجه افزایش یافته است. برای یکسانسازی جابجایی‌های ناشی از تیلت در دو تصویر، می توان مجدداً از تبدیل افاین دو بعدی استفاده کرد. بردار باقیمانده‌ها پس از اجرای این تبدیل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱۰ مشهود است خطاهای تغییر مقیاس، تصحیح شده است و بردارهای باقیمانده ترندی را نمایش نمی دهند و این بدین معنا است که تبدیل افاین تغییرات مقیاس را کاملاً مدل کرده است و جابجایی ناشی از تغییرات زاویه تیلت در دو اپوک تصویربرداری با دقت بالایی یکسانسازی شده است.

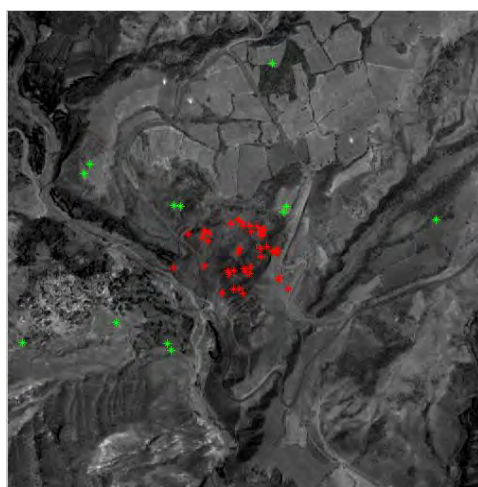
جدول ۲- تعداد نقاط بیرون منطقه زمین لغزش برای اپوک های

زمان اپوک ها	اپوک ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸	اپوک ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹	اپوک ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰
تعداد نقاط بیرون منطقه زمین لغزش	۱۰	۱۴	۳۸

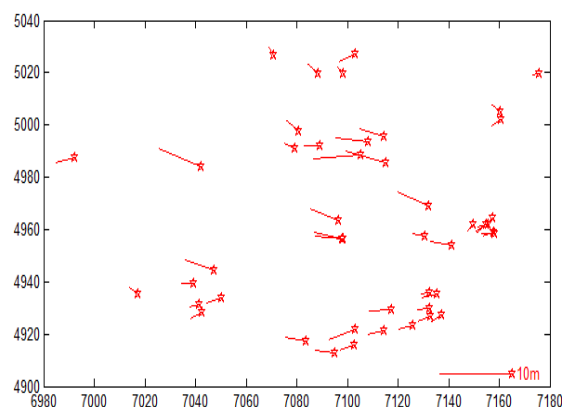
برای اجرای تبدیل کانفورمال، این نقاط نمی بایست دور از منطقه انتخاب گردند تا تغییرات جابجایی ناشی از تیلت در اپوکهای تصویری قابل اغماض باشد. پراکندگی این نقاط در اپوکهای مختلف در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود منطقه آسیب‌پذیر در داخل نقاط ساکن قرار دارد و خطر برونمایی بدین‌ترتیب منتفی شده است.



شکل ۱۲- نمایش پراکندگی نقاط داخل و بیرون منطقه زمین لغزش بین سال های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸، نقاط قرمز، نقاط درون منطقه زمین لغزش و نقاط سبز، نقاط بیرون منطقه زمین لغزش می باشد.

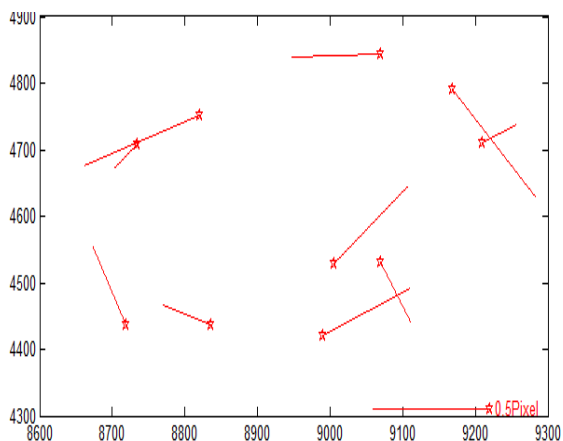


شکل ۱۳- نمایش پراکندگی نقاط داخل و بیرون منطقه زمین لغزش بین سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹، نقاط قرمز، نقاط درون منطقه زمین لغزش و نقاط سبز، نقاط بیرون منطقه زمین لغزش می باشد.

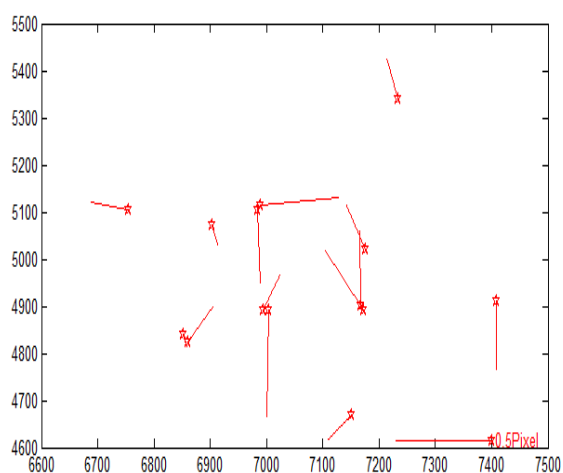


شکل ۱۱- بردار جابجایی ها در منطقه آسیب پذیر با ضرایب محاسبه شده افاین بین سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹

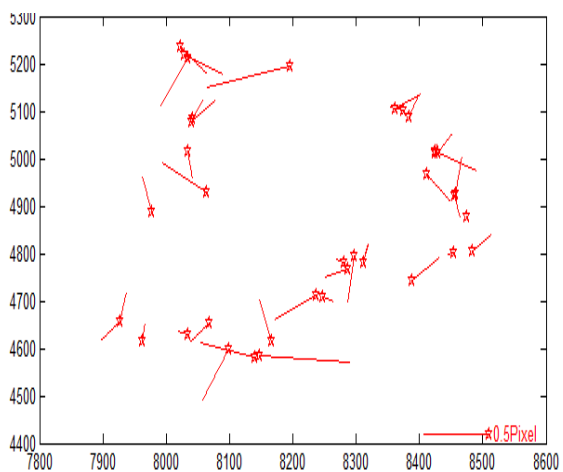
از آنجا که منطقه زمین لغزش منطقه کوچکی از تصویر را شامل می شود با کمک معادله کانفورمال نیز می توان خطای تیلت را تصحیح کرد برای تصحیح خطای ناشی از جابجایی ارتفاعی نیز با ارجاع به معادله ۶ برای ارتفاع پرواز ماهواره برابر با ۸۰۰ کیلومتر و تغییر ارتفاعات برابر با ۱۰۰ متر در روی زمین و نیز تغییرات زاویه دید برابر با ۵۶، ۰ درجه، میزان تغییرات جابجایی ناشی از ارتفاع در دو اپوک تصویر برداری، (dpx) در معادله ۶، حدود ۲ میکرومتر خواهد شد. اگر ابعاد هر پیکسل برابر با ۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شود، این تغییرات حدود ۰،۲ پیکسل خواهد بود. این محاسبات نشان میدهد حتی برای زمین‌های کاملاً کوهستانی، هم- مرجع سازی تصاویر با دقت بالا بدون نیاز به داشتن DEM و یا هیچگونه اطلاعات اضافی دیگری، با روش پیشنهادی کاملاً امکان‌پذیر است. به علاوه، نتایج بدست آمده در بخش یکسان‌سازی جابجایی ناشی از تیلت(با خطای مربعی متوسط $RMSEX=0.68, RMSEY=0.25$) پیکسل برای باقیمانده‌ها) کاملاً استنتاجات بحث شده در این قسمت را تأیید می‌کند و موید این نکته است که یکسان‌سازی جابجایی ناشی از تیلت در تصاویر به تنهایی برای اندازه- گیری جابجایی زمین لغزش کفایت می کند. تعداد نقاط متناظر اندازه گیری شده و اپوک های مربوط به آنها در جدول ۲ نشان داده شده است. در ابتدا، نقاط ساکن که خارج منطقه زمین لغزش قرار دارند شناسایی شدند.



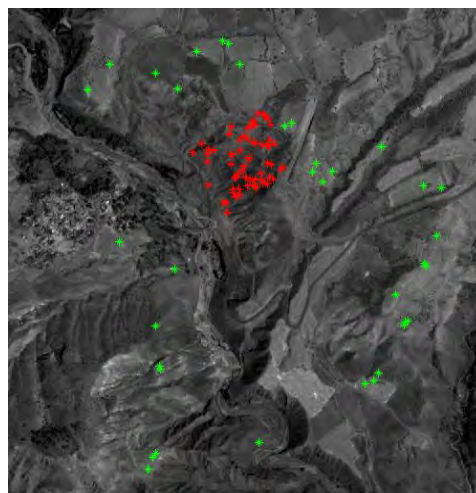
شکل ۱۵- بردار خطاهای باقیمانده در تبدیل کانفورمال برای نقاط ثابت در اپوک ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸



شکل ۱۶- بردار خطاهای باقیمانده در تبدیل کانفورمال برای نقاط ثابت در اپوک ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹



شکل ۱۷- بردار خطاهای باقیمانده در تبدیل کانفورمال برای نقاط ثابت در اپوک ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰



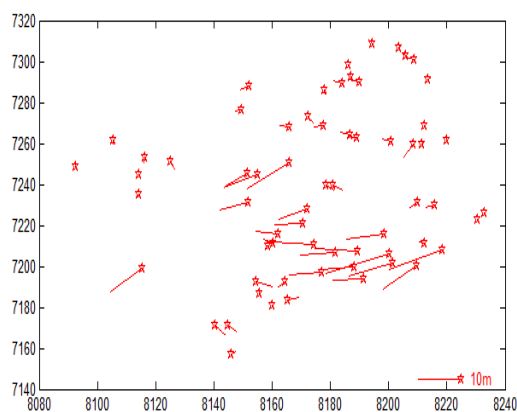
شکل ۱۴- نمایش پراکندگی نقاط داخل و بیرون منطقه زمین لغزش بین سال های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، نقاط قرمز، نقاط درون منطقه زمین لغزش و نقاط سبز، نقاط بیرون منطقه زمین لغزش می باشد

خطای مربع متوسط باقیمانده‌ها برای نقاط ثابت در اپوکهای متفاوت در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- خطای متوسط باقیمانده ها برای نقاط ثابت در اپوک های مختلف

زمان اپوک ها	اپوک ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸	اپوک ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹	اپوک ۲۰۰۹ و ۲۰۰۸
RMSEX	۰٫۲۹	۰٫۱۴	۰٫۲۲
RMSEY	۰٫۲۷	۰٫۳۲	۰٫۲۵

بردار خطاهای باقیمانده در تبدیل کانفورمال برای نقاط ثابت در اپوکهای مختلف در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می شود، این بردارها رندوم بوده و ترندی را نشان نمی دهند. بنابراین، با توجه به خطای مربعی متوسط باقیمانده‌ها در تبدیل کانفورمال و نیز با توجه به رندوم بودن این باقیمانده‌ها، می توان نتیجه گرفت که هم‌مرجع‌سازی تصاویر در اپوکهای زمانی مختلف با دقت زیر پیکسل صورت گرفته است.



شکل ۲۰- بردارهای جابجایی بین سال های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰

مقدار عددی جابجایی ها برای اپوک ۲۰۰۹-۲۰۱۰ نیز در جدول ۵ ارائه شده است. این مقادیر نشان دهنده وقوع احتمالی جابجایی های قابل توجهی در منطقه است. ترند این جابجایی ها که تقریباً شرقی-غربی است نیز در شکلهای به وضوح قابل رویت است. این جابجایی های احتمالی، در اپوکهای ۲۰۰۷-۲۰۰۸ نیز کاملاً مشهود است. ولی نرخ جابجایی، کاهش ظاهری را در اپوکهای ۲۰۰۸-۲۰۰۹ نشان می دهد.

جدول ۵- مقدار عددی جابجایی های زمینی بین سال های ۲۰۰۹-۲۰۱۰ برحسب متر

۱.۳۹	۰.۷۳	۰.۹۳	۲.۴۷	۴.۸۵	۲.۰۷
۲.۹۹	۱.۵۰	۲.۳۴	۱.۱۰	۲.۵۷	۰.۵۴
۰.۵۳	۰.۷۸	۱.۹۷	۰.۹۰	۲.۶۴	۲.۳۲
۱.۴۶	۱.۳۳	۰.۶۱	۲.۱۳	۲.۸۹	۱۰.۷
۰.۸۵	۰.۳۷	۲.۷۴	۲.۳۳	۹.۰۸	۱.۴۳
۷.۷۱	۷.۶۸	۷.۱۷	۸.۱۶	۹.۹۰	۹.۶۷
۲.۶۹	۱۲.۹	۲.۲۶	۲.۱۶	۱.۸۴	۱۰.۵
۷.۳۳	۲.۸۵	۲.۴۳	۲.۵۹	۰.۴۲	۱.۳۱
۴.۱۰	۲.۵۶	۱.۳۰	۳.۱۶	۴.۲۶	۸.۶۴
۷.۰۲	۶.۶۱	۲.۴۷	۱.۱۸	۱.۵۰	۱۳.۶
۱۱.۰۷	۶.۷۲	۰.۳۴	۵.۱۷	۱۵.۶	

مقادیر ماکزیمم، مینیمم و میانگین این جابجایی ها برای اپوک های مختلف در جداول ۶، ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۶- مقادیر ماکزیمم، مینیمم و میانگین این جابجایی ناشی از زمین لغزش بین سال های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸

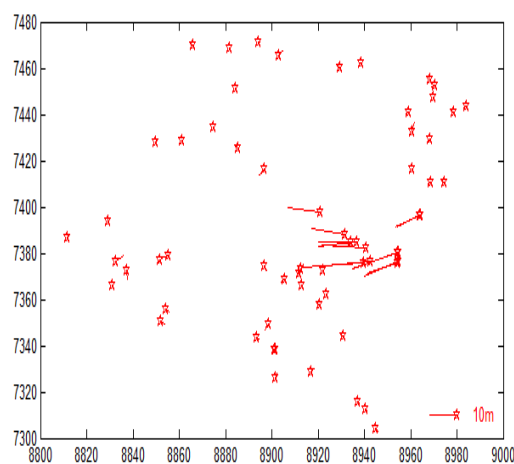
۸.۹۰۰۶	بیشترین مقدار جابجایی (بر حسب پیکسل)
۰.۰۱۹۷	کمترین مقدار جابجایی (بر حسب پیکسل)
۱.۶۶۹۸	متوسط مقادیر جابجایی (بر حسب پیکسل)

در مرحله بعد، نقاط منطقه آسیب پذیر شناسایی و مختصات پیکسلی آنها اندازه گیری گردید. تعداد این نقاط برای اپوکهای مختلف در جدول ۴ ارائه شده است.

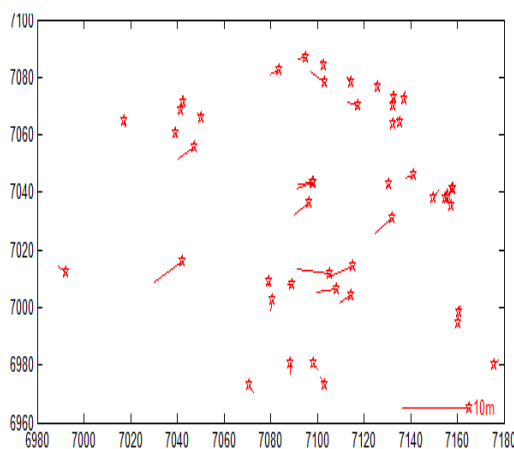
جدول ۴- تعداد نقاط درون منطقه زمین لغزش برای اپوک های مختلف

اپوک	اپوک	اپوک	زمان اپوک ها
۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹ و ۲۰۱۰	
۶۴	۴۶	۶۵	تعداد نقاط درون منطقه زمین لغزش

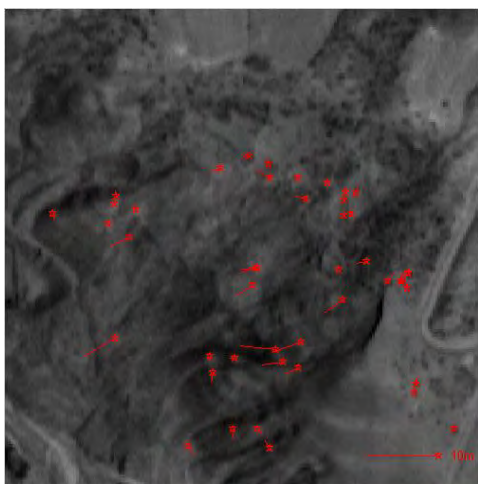
این نقاط با ضرائب تبدیل کانفورمال به اپوکهای مرجع منتقل گردیده و مقدار جابجایی های ناشی از زمین لغزش تخمین زده شد. بردارهای این جابجاییها برای اپوکهای مختلف در شکلهای ۱۸، ۱۹ و ۲۰ ارائه شده است.



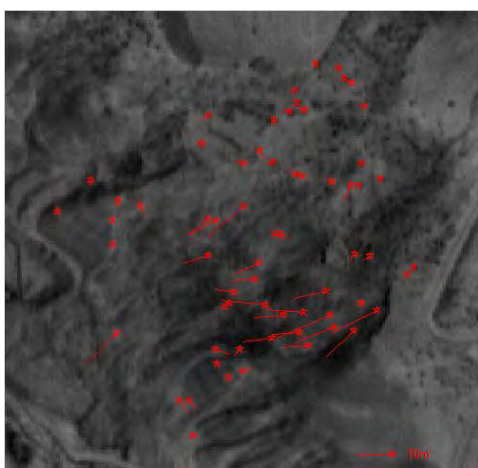
شکل ۱۸- بردارهای جابجایی بین سال های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸



شکل ۱۹- بردارهای جابجایی بین سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹



شکل ۲۲- جابجایی بین سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ با پیکان‌های قرمز بر روی تصویر عقب نگر مربوط به سال ۲۰۰۸ نشان داده شده است.



شکل ۲۳- جابجایی بین سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ با پیکان‌های قرمز بر روی تصویر عقب نگر مربوط به سال ۲۰۰۹ نشان داده شده است.

برای تأیید صحت نتایج بدست آمده، اندازه‌گیری‌های بدست آمده با اندازه‌گیری‌های انجام شده حاصل از استقرار ایستگاه‌های مشاهداتی GPS در منطقه آسیب‌پذیر که توسط شرکت مهندسين مشاور ایستاسنج دقیق صورت گرفته بود مقایسه شد، این مشاهدات در بازه‌های زمانی ۵ دیماه ۸۸ تا ۲۴ خرداد ۸۹ در داخل بازه زمانی مشاهداتی ۱۷ آگوست ۲۰۰۹ تا ۳۰ آگوست ۲۰۱۰ تصاویر ماهواره‌ای قرار داشتند.

میانگین مقادیر جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در روی زمین در این منطقه، طبق گزارش تیم شرکت مهندسين مشاور ایستاسنج ۸،۱۵ متر است که با میانگین مقادیر بدست آمده در این تحقیق که ۸،۵۸ متر می‌باشد، مطابقت دارد.

طبق نتایج به دست آمده بیشترین جابجایی بین سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ بر روی زمین با اعمال ضریب ۲،۵، ۲۲،۲۵ متر، کمترین مقدار جابجایی ۰،۰۴۹ متر و میانگین جابجایی‌ها ۴،۱۷۴ متر می‌باشد.

جدول ۷- مقادیر ماکزیمم، مینیمم و میانگین این جابجایی ناشی از زمین لغزش بین سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹

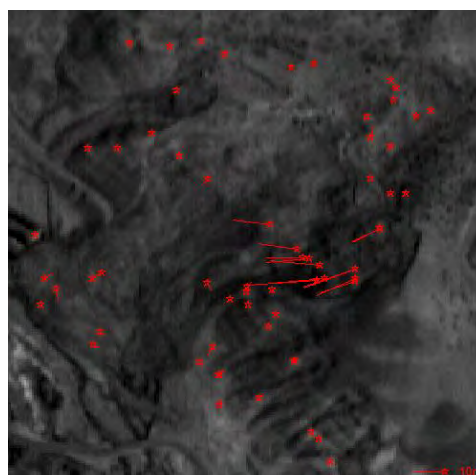
بیشترین مقدار جابجایی (بر حسب پیکسل)	۲،۰۳۰۳
کمترین مقدار جابجایی (بر حسب پیکسل)	۰،۰۸۱۴
متوسط مقادیر جابجایی (بر حسب پیکسل)	۰،۶۱۳۸

طبق نتایج به دست آمده بیشترین جابجایی بین سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ بر روی زمین با اعمال ضریب ۲،۵، ۵،۰۷ متر، کمترین مقدار جابجایی ۰،۲۰ متر و میانگین جابجایی‌ها ۱،۵۳ متر می‌باشد.

جدول ۸- مقادیر ماکزیمم، مینیمم و میانگین این جابجایی ناشی از زمین لغزش بین سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰

بیشترین مقدار جابجایی (بر حسب پیکسل)	۶،۲۷۶۶
کمترین مقدار جابجایی (بر حسب پیکسل)	۰،۱۳۸۹
متوسط مقادیر جابجایی (بر حسب پیکسل)	۱،۶۲۵۰

طبق نتایج به دست آمده بیشترین جابجایی بین سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ بر روی زمین با اعمال ضریب ۲،۵، ۱۵،۶۹ متر، کمترین مقدار جابجایی ۰،۳۴ متر و میانگین جابجایی‌ها ۴،۰۶ متر می‌باشد. برای مشاهده بهتر این جابجایی‌ها در منطقه، بردارهای جابجایی بر روی تصویر منطقه ترسیم گردید که در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲۱- جابجایی بین سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ با پیکان‌های قرمز بر روی تصویر عقب نگر مربوط به سال ۲۰۰۷ نشان داده شده است.

۶- نتیجه گیری

جلونگر ایجاد می کنند. پیشنهاد می شود که از حالت سه بعدی پیشنهاد داده شده در این تحقیق به منظور تعیین جابجایی های ناشی از زمین لغزش استفاده شود. همچنین در مرحله تناظریابی، نقاط به صورت دستی پیدا شدند که می توان از روش های دقیقتر تناظریابی کمترین مربعات به جای روش دستی استفاده کرد. استفاده از تصاویر اپتیکی با توان تفکیک مکانی بالاتر نیز جهت جابجایی های ناشی از زمین لغزش پیشنهاد می شود.

سپاسگزاری

این پروژه، در ارتباط با طرح تحقیقاتی مصوب شورای پژوهشی دانشگاه تهران به شماره ۸۱۰۲۰۳۲/۱/۰۱ با کمک مالی دانشگاه تهران صورت گرفته است. نگارندگان بدینوسیله مراتب قدردانی خود را از مساعدت مالی دانشگاه اعلام می نمایند.

روش پیشنهادی، روشی جهت تعیین جابجایی های ناشی از زمین لغزش در مناطق آسیب پذیر می باشد، مزیت عمده روش پیشنهادی در سادگی آن و در نتیجه امکان پایش دائمی و مستمر (هر دوهفته یکبار با توجه به پربود ماهواره) در منطقه آسیب پذیر بدون نیاز به حضور در منطقه است. به علاوه، بر خلاف اندازه گیری های زمینی که فقط برای تعدادی نقطه پراکنده مقدار جابجایی اندازه گیری میشود، در روش پیشنهادی میتوان پوشش پیوسته زمینی جابجایی ها و نیز ترند و روند تغییرات را به صورت مستمر مورد پایش و آنالیز قرار داد. این روش میتواند علاوه بر کاربردهای مدلسازی زمین لغزش، در تهیه نقشه های آسیب پذیری در سطح استانی و کشوری نیز بکار رود. مزیت دیگر آنکه در این تحقیق از تصاویر عقب نگر جهت تعیین جابجایی مناطق زمین لغزش استفاده شده است که این تصاویر خطای تارشدهگی و کوتاه شدگی کمتری را در مقایسه با تصاویر

مراجع

- [1] Adiningsih, E.S. and I. Permana, modelling landslide risks based on complementary use of satellite and spatial data
- [2] Suganthi, S. and K. Srinivasan, Digital Elevation Model Generation and Its Application In Landslide Studies Using Cartosat-1. International Journal of Geomatics and Geosciences, 2010. 1(1): p. 41-50
- [3] Yang, X. and L. Chen, satellite imagery for landslide mapping in An earthquake-struck area: A preliminary study
- [4] Parise, M., Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, 2001. 26(9): p. 697-703
- [5] Bajracharya, B. and S.R. Bajracharya, landslide mapping of the everest region using high resolution satellite images and 3d visualization
- [6] Rathje, E. and K. Woo, documentation of the landslide distribution from the 2004 niigata ken chuetsu earthquake using high resolution satellite imagery
- [7] Deledalle, C.A., et al. Glaciermonitoring: Correlation versus texture tracking: IEEE.
- [8] Delacourt, C., et al., Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review. Bulletin de la Societe Geologique de France, 2007. 178(2): p. 89
- [9] Berthier, E., et al., Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. Remote Sensing of Environment, 2005. 95(1): p. 14-28
- [10] Hervás, J., et al., Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy. Geomorphology, 2003. 54(1-2): p. 63-75
- [11] Moine, M., A. Puissant, and J.P. Malet, Detection of landslides from aerial and satellite images with a semi-automatic method. Application to the Barcelonnette basin (Alpes-de-Hautes-Provence, France).

2009

- [12] Baltsavias, E., Zhang, L., Eisenbeiss, H, DSM generation and interior orientation determination of IKONOS images using a testfield in Switzerland. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part I/W3), 2005: p. 9 pages (on CD-ROM)
- [13] Dial, G., Grodecki, J., , Block adjustment with rational polynomial camera models. Proceedings of ASPRS Annual Meeting, Washington, DC, 2002a: p. 9 pages.
- [14] Dial, G., Grodecki, J.,, IKONOS accuracy without ground control. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002b: p. 6 pages (on CD-ROM)
- [15] Fraser, C.S., Hanley, H.B., Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003: p. 69 (1), 53–57.
- [16] Fraser, C.S., Hanley, H.B ,Bias compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005: p. 71 (8), 909–915.