

ارائه یک مدل شبه فیزیکی در حل توجیه نسبی تصاویر ماهواره‌ای آرایه خطی با زوایای دید مشابه

علی عزیزی^{۱*}، اعظم هادیلو^۲، محمد علی شریفی^۳

^۱دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
aazizi@ut.ac.ir

^۲کارشناس ارشد فتوگرامتری - گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
azam83_hadiloo@yahoo.com

^۳استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
sharifi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۱، تاریخ تصویب تیر ۱۳۹۳)

چکیده

در این مقاله، یک مدل شبه فیزیکی برای حل توجیه نسبی دو بعدی تصاویر ماهواره‌ای آرایه خطی که در زمان‌های بازدید مجدد ماهواره^۱ اخذ شده‌اند ارائه و دقت آن ارزیابی گردیده است. برخلاف روش‌های متداول در حل توجیه نسبی که در آنها فقط پارالاکس^۲ نقش اساسی را ایفاء می‌کند، در روش ارائه شده در این مقاله، پارالاکس^۳ نیز علاوه بر پارالاکس^۲ در حل توجیه نسبی دخالت داده شده است و در نتیجه، حل توجیه نسبی در تصاویر آرایه خطی در زمین‌های کوهستانی، مشروط بر اینکه تصاویر دارای زوایای دید مشابه باشند، امکان‌پذیر گردیده است. اهمیت کاربردی حل توجیه نسبی این تصاویر در مطالعات مربوط به تعیین جابجائی‌های هندسی ناشی از رانش زمین است. پایش جابجائی‌های گسترده در مناطق پرشیب کوهستانی از طریق تصاویر اپتیکی ماهواره‌ای مستلزم هم‌مرجع سازی تصاویر با حداکثر دقت ممکن است که از طریق روش پیشنهادی در این مقاله می‌تواند متحقق گردد. تصاویر دید عقب‌نگر^۴ سنجنده IRS-P5 از یک منطقه کوهستانی دارای رانش زمین، در دو اپوک زمانی متعلق به سالهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ جهت تحلیل مدل پیشنهادی استفاده شده است. دقت بدست آمده در توجیه نسبی این تصاویر با استفاده از مدل بهینه شده، به ترتیب، ۰/۳۰ و ۰/۴۷ پیکسل برای باقیمانده پارالاکس‌های^۵ در فضای تصویر، برآورد گردید.

واژگان کلیدی: توجیه نسبی، تصاویر ماهواره‌ای آرایه خطی، هم‌مرجع سازی تصاویر، تصاویر جلونگر و عقب‌نگر، رانش و لغزش زمین

* نویسنده رابط

^۱ Satellite revisit

^۲ Afterward

۱- مقدمه

عکس‌های هوایی در تعیین جابجائی‌های ناشی از رانش و لغزش زمین از سالها قبل مورد استفاده قرار می‌گرفته است. مشکل اساسی در استفاده از عکس‌های هوایی، نبود و یا کمبود تصاویر در اپوکهای زمانی مورد نیاز از منطقه است. در حالیکه تصاویر ماهواره‌ای، مشکل تعدد تصاویر در اپوکهای زمانی متوالی را حل کرده است، ولی نیاز به داشتن مدل رقومی زمین^۱ از منطقه مورد بررسی جهت هم‌مرجع سازی دقیق تصاویر و نیز مشاهدات زمینی جهت اندازه‌گیری نقاط کنترل، از جمله عوامل نامطلوب در این روش است. روش‌های پایش و تعیین جابجایی ناشی از لغزش زمین در [۱] ارائه گردیده است.

در این مقاله، یک متد شبه فیزیکی جهت حل توجیه نسبی دو بعدی تصاویر آرایه‌ی خطی اخذ شده در اپوکهای زمانی متفاوت با استفاده از مقادیر پارالاکس‌های x و y پیشنهاد شده است که از طریق آنها هم‌مرجع سازی تصاویر به منظور پایش و اندازه‌گیری لغزش زمین، بدون استفاده از مدل رقومی زمین و نقاط کنترل زمینی حتی در زمین‌های شدیداً کوهستانی، با دقت بالا قابل انجام است. حل توجیه نسبی در تصاویر استرئو آرایه خطی، به دلیل ناخالصی پارالاکس x (به ویژه در مناطق کوهستانی) امکان پذیر نیست [۲]، زیرا معادلات توجیه نسبی، می‌بایست فقط با مشاهدات پارالاکس y نوشته شوند و در نتیجه، آن دسته از عناصر توجیه نسبی که به پارالاکس x وابسته‌اند غیر قابل حل خواهند بود. به همین دلیل است که حل توجیه نسبی در تصاویر آرایه خطی تا کنون لاینحل باقیمانده است. ناخالصی در پارالاکس x در رابطه زیر به صورت کلی نشان داده شده است:

$$\begin{cases} dpx = f(d\omega, d\phi, d\kappa, BX, BZ, h) \\ dpy = f(d\omega, d\phi, d\kappa, BY, BZ) \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه بالا، تغییرات پارالاکس‌های x و y بعنوان توابعی از عناصر توجیه نسبی و ارتفاع نقطه در زمین بیان شده است. همانطور که در روابط بالا قابل مشاهده است، پارالاکس x نقاط، نه فقط تابعی از المانهای دورانی و انتقالی سنجنده هستند، بلکه ارتفاع زمینی نقاط (h) نیز در جابجایی نسبی مولفه x شرکت دارند زیرا محور x در

جهت حرکت سنجنده، در نظر گرفته می‌شود. در حالیکه جابجایی نسبی نقاط در امتداد مؤلفه y کاملاً مستقل از تغییرات ارتفاعی نقطه در روی زمین بوده و به صورتی خالص تابعی از المانهای توجیه نسبی هستند. بدیهی است، این مشکل، در تصاویر اخذ شده توسط دوربین‌های تک-مرکزی^۲ صادق نیست و در این دوربین‌ها، بر خلاف سنجنده‌های آرایه‌ی خطی، کلیه المان‌های توجیه نسبی، صرفاً با مشاهدات py قابل حل است. عدم امکان حل توجیه نسبی در تصاویر آرایه‌ی خطی در [۲] بحث شده است و روشی برای حل توجیه نسبی در این تصاویر با استفاده از نقاط کنترل مجازی ارائه گردیده است [۲]. در روش ارائه شده در مقاله حاضر، بدون استفاده از نقاط کنترل مجازی و صرفاً با بهره‌گیری از پارالاکس x در کنار پارالاکس y ، توجیه نسبی حل می‌شود. تحلیل امکان استفاده از پارالاکس x در حل توجیه نسبی در بخش بعدی این مقاله ارائه می‌گردد.

۲- تحلیل تغییرات پارالاکس x در تصاویر بازدید مجدد مداری

در تصاویر آرایه خطی اخذ شده در بازدیدهای مجدد مداریک ماهواره، تغییرات پارالاکس x میتواند با دیفرانسیل گیری از معادله (۱-۱) و با فرض کوچک بودن تغییرات عناصر توجیه خارجی سنجنده، با ارجاع به شکل (۱)، از رابطه (۲) تخمین زده شود [۲]:

$$dpx = \left(\frac{B}{H} \right) \left(\frac{f}{H} \right) dh \quad (2)$$

در معادله بالا، B ، باز تصاویر در دو اپوک زمانی بازدید مجدد ماهواره، f ، H و dh به ترتیب، بیان کننده‌ی فاصله کانونی سنجنده، ارتفاع پرواز ماهواره و تغییرات ارتفاعی در زمین هستند. همانطور که در شکل (۱) قابل مشاهده است، تغییرات پارالاکس x ، اساساً از نوسانات ارتفاعی و نیز تغییرات زاویه دوران در جهت حرکت ماهواره (دوران ϕ) ناشی می‌شود.

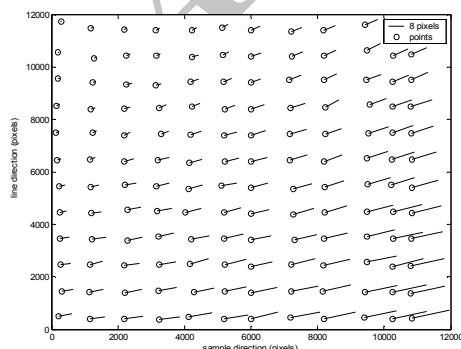
^۲ Single projection

^۱ DTM

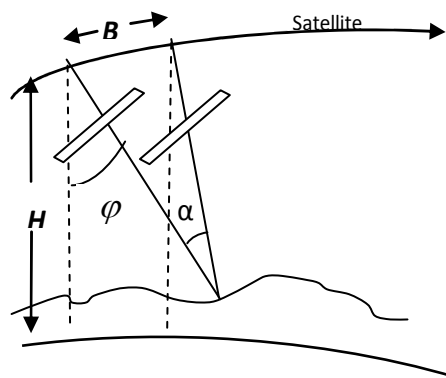
اغماض است. و این بدین معنا است: پارالاکس x و زاویه صورت همزمان می‌توانند حتی در زمین‌هایی با تغییرات ارتفاعی بسیار زیاد، در حل توجیه نسبی و در نتیجه هم‌مرجع سازی دقیق تصاویر، شرکت کرده و بدین ترتیب، نیاز به حذف اثر توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی زمین نخواهد بود. در این مقاله، معادله (۱) برای حل توجیه نسبی تصاویر عقب‌نگر سنجنده آرایه خطی که در اپوکهای زمانی متفاوت اخذ گردیده‌اند پیاده‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفته است. در بخش بعدی این مقاله، جزئیات تحلیلی مسئله و مدل پیشنهادی، توضیح داده می‌شود.

۳- تحلیل المانهای توجیه تصاویر عقب‌نگر بازدید مجدد مداری

تحلیل المانهای توجیه نسبی در تصاویر عقب‌نگر سنجنده P5 برای اپوکهای زمانی ۲۰۰۹/۲۰۰۸ برای منطقه‌ای کاملاً کوهستانی انجام گرفت. این منطقه در برگیرنده روستای دم‌دول در ۴۵ کیلومتری جنوب شهرستان خلخال است. جابجاییهای ناشی از زمین رانش در این منطقه، اندازه‌گیری شده است که جزئیات این اندازه‌گیریها در [۳،۴] گزارش شده است. جهت تحلیل عناصر توجیه نسبی، در اولین مرحله، بردارهای جابجایی نقاط متناظر در تصاویر اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ استخراج گردید. برای این منظور، ۱۴۴ نقطه‌ی متناظر به صورت چشمی در این تصاویر اندازه‌گیری شد و سپس برآیند پارالاکس‌های x و y در دو تصویر از طریق تفاضل مختصات x و y در سیستم مختصات پیکسلی برای نقاط متناظر، محاسبه گردید. بردارهای اختلاف مختصات نقاط متناظر برای این تصاویر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- بردارهای برآیند پارالاکس‌های x و y در تصاویر عقب‌نگر P5 برای دو اپوک زمانی (۲۰۰۹/۲۰۰۸)



شکل ۱- هندسه‌ی تقریبی تصاویر آرایه خطی در دو بازدید مجدد ماهواره

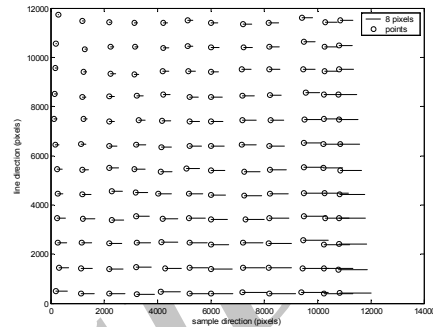
همانطور که از شکل (۱) قابل استنتاج است، در صورتی که زاویه دید سنجنده (دوران φ) در دو اپوک زمانی تغییر نکرده باشد، مقدار B صفر خواهد بود و در نتیجه، زاویه پارالاکتیک (α)، و به تبع آن مقدار تغییرات پارالاکس x ناشی از تغییرات ارتفاعی، نیز در معادله (۲) صفر خواهد بود. البته در عمل، زاویه دید سنجنده، در جهت حرکت ماهواره (دوران φ)، به علت اغتشاشات مداری نمی‌تواند کاملاً بدون تغییر باقی بماند. ولی تغییرات این زاویه ناشی از اغتشاشات مدار، عموماً مقدار کوچکی است. جدول (۱) مقادیر زاویه‌ی دید عقب‌نگر سنجنده P5 استخراج شده از فایل metadata اپوکهای زمانی ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر زاویه φ ، بر حسب درجه، برای خط مرکزی تصویر P5 در سه اپوک زمانی

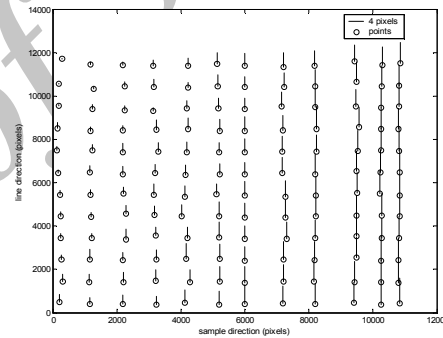
اپوک ۲۰۰۸	SceneCenterPitch=0.01100950
اپوک ۲۰۰۹	SceneCenterPitch=-0.01617818
اپوک ۲۰۱۰	SceneCenterPitch=-0.02606551

با ارجاع به جدول (۱)، مقدار تغییر زاویه دید سنجنده عقب‌نگر، برای اپوکهای ۲۰۱۰/۲۰۰۸ حدود ۲/۳ دقیقه و برای اپوکهای ۲۰۱۰/۲۰۰۹ حدود ۰/۵ دقیقه، تخمین زده شده است. در نتیجه، برای تغییری برابر با ۲/۳ دقیقه زاویه‌ی φ ، با ارجاع به شکل (۱)، مقدار B حدود ۰/۴۲ کیلومتر خواهد بود. با جایگزین کردن این مقدار در رابطه (۲) و برای تغییرات ارتفاعی حدود ۲۰۰۰ متر در یک منطقه، و با در نظر گرفتن مقادیر ۶۲۰ کیلومتر و ۱/۹ متر برای ارتفاع پرواز و فاصله کانونی سنجنده، حداکثر تغییرات پارالاکس x حدود ۵ میکرون خواهد شد که کوچکتر از یک پیکسل است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که تغییرات پارالاکس x به علت جابجاییهای ارتفاعی، برای تصاویر اخذ شده در مدارهای بازدید مجدد، حتی در زمین‌های کاملاً کوهستانی، قابل

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، تغییرات اندازه این بردارها روندی کاملاً سیستماتیک را نشان می‌دهند. این موضوع، مجدداً بیان کننده عدم تأثیر تغییرات ارتفاعی بر پارالاکس x است که در بخش قبل مطرح گردید. شکل (۳) و (۴) به تفکیک، پارالاکس y و پارالاکس x که از بردارهای شکل (۲) استخراج شده‌اند را نشان می‌دهند.



شکل ۳- پارالاکس y نقاط متناظر برای تصاویر اپوکهای (۲۰۰۹/۲۰۰۸)



شکل ۴- پارالاکس x نقاط متناظر برای تصاویر اپوکهای (۲۰۰۹/۲۰۰۸)

همانطور که در شکل (۳) و (۴) مشاهده می‌شود روند تغییرات پارالاکس‌های y و x وضعیتی غیر خطی را نشان می‌دهد که ناشی از تغییرات جزئی در عناصر توجیه سنجنده در دو اپوک زمانی است. برخلاف تصاویر اخذ شده بوسیله‌ی دوربینهای تک- مرکزی که در آنها دوران‌ها سبب جابجائی- های وابسته در مؤلفه‌های x و y می‌گردند، تصاویر آرایه خطی، به دلیل عدم اتصال خطوط اسکن در راستای حرکت ماهواره، از این قاعده پیروی نمیکنند. بنابراین، با توجه به هندسه تصاویر آرایه خطی، عناصر تأثیرگذار در پارالاکسهای x و y را میتوان با روابط کلی زیر، بیان کرد:

$$\begin{cases} dp_x = f(d\varphi, d\kappa, BX) \\ dp_y = f(d\omega, BY, B\varphi) \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه بالا، $B\varphi$ عنصری است که از تلفیق BZ و φ بدست آمده است. تعریف این عنصر جدید، به این علت است که تفکیک BZ و φ و حل جداگانه آنها در توجیه نسبی تصاویر آرایه خطی امکان‌پذیر نیست؛ زیرا تغییرات مختصات ناشی از تغییرات عنصر φ ، در امتداد محور y به صورت تغییر مقیاسی مشابه با اثر BZ در همین راستا خواهد بود. این موضوع با رجوع به شکل (۱) به سادگی قابل تشخیص است: تغییر دوران φ در دو اپوک، با توجه به رابطه‌ی زیر، معادل با تغییر مقیاس است:

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) = \left(\frac{H / \cos \varphi_1}{H / \cos \varphi_2} \right) = \left(\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \right) \quad (4)$$

در رابطه بالا اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشان دهنده اپوکهای زمانی متفاوت هستند. معادله (۴) بیان کننده‌ی این نکته است که هرگونه تغییر در دوران φ در دو اپوک زمانی، تغییر مقیاسی در جهت y ایجاد خواهد کرد. بدین ترتیب، دو عنصر φ و BZ فقط در صورتی قابل تفکیک خواهند بود که دوران φ از معادله پارالاکس x (رابطه ۳،۱) قابل محاسبه باشد. ولیبه علت حرکت انتقالی مرکز تصویر در سنجنده‌های آرایه خطی، دوران φ سبب کشیدگی و یا فشردگی تصویر، که معادل با تغییر مقیاس است، در جهت حرکت ماهواره خواهد شد. در حالی که این تغییر مقیاس، به نوبه خود متأثر از تغییر سرعت ماهواره، نرخ نمونه برداری و دوران κ نیز خواهد بود. همانطور که در قسمتهای بعدی این مقاله نشان داده خواهد شد، اثر دوران κ میتواند از اثرات ناشی از تغییر نرخ نمونه برداری و تغییر سرعت ماهواره تفکیک شود، ولی تغییر مختصات x ناشی از دوران φ ، کماکان در جهت حرکت ماهواره، قابل تفکیک از تغییر مقیاس ناشی از تغییر نرخ نمونه برداری و تغییر سرعت ماهواره نخواهد بود و بنابراین، المان φ نمیتواند از رابطه ۳،۱ محاسبه شود. به این دلیل، حل عنصر تلفیقی $B\varphi$ فقط از طریق معادله‌ی ۳،۲ و مختصات y امکان‌پذیر خواهد بود. پارالاکس y ناشی از اثر المان $B\varphi$ در امتداد محور y ، با توجه به مطالب بالا می‌تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$py = y * B\varphi \quad (5)$$

در رابطه بالا، y مختصات پیکسل نسبت به نقطه اصلی سنجنده در نظر گرفته شده است. با استدلالی مشابه با قبل و با توجه به هندسه تصاویر آرایه خطی، می‌توان نشان داد که

مولفه BX در نظر گرفت. با توجه به این نکته، و نیز با ملحوظ کردن مولفه‌ی شیفت برای المان BX، معادله‌ی ۳،۱ می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$dpx = f(BX_{shift}, BX_{drift}, \kappa) \quad (9)$$

از آنجایی که اثر دریفت در BX برای کلیه پیکسل‌ها ثابت است ولی اثر دوران K طبق رابطه‌ی (۷) جابجایی پیکسلی متفاوتی را در امتداد x ایجاد می‌کند، می‌توان چنین نتیجه گرفت که اثر K قابل تفکیک از اثر ناشی از دریفت در BX خواهد بود مشروط بر اینکه برای محاسبه شیفت و دریفت در BX از پیکسل‌های مرکزی خطوط اسکن که در آنها مختصات y برابر با صفر است استفاده شود. بنابراین، معادله ۹ با فرض کوچک بودن K به صورت زیر می‌تواند بازنویسی شود:

$$px = BX_{shif} + x * BX_{drift} + y * \kappa \quad (10)$$

۲-۳- بررسی اثر عنصر BY

برخلاف دوربینهای تک- مرکزی که در آنها مقدار BY برای یک فریم همیشه ثابت است، در تصاویر آرایه خطی، این عنصر برای تصاویر اخذ شده در بازدیدهای مجدد مداری، می‌تواند دارای تغییرات شیفت و دریفت نیز باشد. شکل (۵) به صورتی کلی دریفت BY که به علت تغییر جهت حرکت ماهواره ایجاد شده است را نشان می‌دهد. دریفت در BY به علت نوساناتی جزئی در زاویه میل مدار ماهواره (به علت اغتشاش مداری) می‌تواند ایجاد شود (البته، این نکته، نیاز به بررسی بیشتر دارد). تغییر مختصات پیکسلی ناشی از دریفت BY در امتداد مولفه y خواهد بود و بنابراین با المان $B\varphi$ وابستگی پیدا خواهد کرد. در نتیجه، تخمین میزان دریفت BY فقط موقعی میسر است که اثر آن از اثر عنصر $B\varphi$ تفکیک پذیر باشد. البته، بسادگی می‌توان نشان داد که این تفکیک پذیری میسر است زیرا اثر عنصر $B\varphi$ در پیکسل‌های مرکزی خطوط اسکن، با توجه به معادله‌ی (۵)، صفر است، و در نتیجه، مقدار دریفت BY در پیکسل‌های مرکزی، وابسته به $B\varphi$ نبوده و به صورت مستقل قابل محاسبه خواهد بود. به علت خطی بودن مقدار دریفت BY، معادله زیر جهت محاسبه مقادیر شیفت و دریفت پیشنهاد می‌شود:

دوران ω در جهت حرکت ماهواره، جابجایی پیکسلی ایجاد نخواهد کرد و فقط در امتداد محور y تاثیرگذار است. جابجایی پیکسلی py ناشی از دوران ω با ارجاع به مفاهیم پایه‌ای فتوگرامتری، از رابطه‌ی زیر می‌تواند محاسبه شود:

$$py = \frac{y^2 \sin \omega}{f} \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا، f فاصله کانونی سنجنده و y مختصات پیکسل نسبت به نقطه اصلی است. برخلاف دوران ω ، دوران K در امتداد محور x (جهت حرکت ماهواره) جابجایی پیکسلی ایجاد کرده و در امتداد محور y اثرش بسیار کوچک و قابل اغماض است. بنابراین مدل ریاضی جابجایی پیکسلی ناشی از دوران K می‌تواند به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$px = y \tan \kappa \quad (7)$$

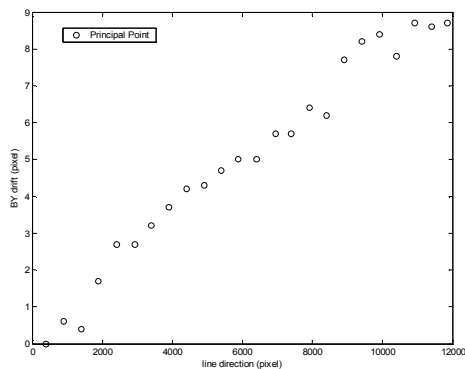
۳-۱- بررسی اثر عنصر BX

همانطور که در بالا اشاره شد، تغییرات پارالاکس x تابعی از دوران φ ، دوران K و تغییر سرعت ماهواره است. نرخ نمونه برداری در جهت حرکت ماهواره نیز باید به عنوان عنصری موثر در تغییر پارالاکس x به حساب آید، ولی از آنجایی که نرخ نمونه برداری با دقت بالایی در اپوکهای زمانی، ثابت می‌ماند و تابعی از اغتشاشات مداری نیست، این عنصر می‌تواند در تغییرات نسبی پارالاکس x نادیده گرفته شود. از آنجایی که اثر دوران φ در امتداد حرکت ماهواره، جابجایی نسبتاً یکسانی برای کلیه پیکسلها در امتداد حرکت ماهواره ایجاد خواهد کرد، عنصر φ اثری مشابه با اثر تغییر سرعت در جهت حرکت ماهواره خواهد داشت. مجموع اثر این دو عنصر، ایجاد فشردگی و یا کشیدگی در امتداد محور x در تصویر خواهد کرد که می‌تواند به صورت تغییر مقیاس λ_x به صورت تابع زیر بیان شود:

$$\lambda_x = f(\Delta v, \varphi) \quad (8)$$

در رابطه بالا، Δv بیان کننده تغییر سرعت نسبی ماهواره در اپوکهای زمانی متفاوت است. بنابراین، مشابه با المان $B\varphi$ ، تفکیک دو عنصر Δv و φ از یکدیگر امکان پذیر نخواهد بود. ولی از نگاهی دیگر، میتوان ترکیب این دو عنصر را به صورت حضور یک دریفت خطی در

شد. مقدار شیفت BY حدود ۱۰۷۸ پیکسل و ضریب دریفت برابر با ۰/۰۰۷۶ با انحراف معیاری برابر با ۰/۴۶ پیکسل برای تصاویر اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ برآورد گردید. با توجه به ضریب دریفت محاسبه شده، حداکثر مقدار دریفت BY برای یک فریم در تصاویر اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ حدود ۹ پیکسل تخمین زده شد که معادل با ۲,۶ دقیقه، نوسان زاویه میل مدار ماهواره^۱ در فاصله زمانی یکسال است. این مقدار تغییر زاویه میل مدار، در صورت صحت پیش فرض ارائه شده در بالا، قاعدتاً می بایست سبب تغییر ۲۵ درصدی پوشش تصاویر بازدید مجدد، در مناطق نزدیک به قطب شود. البته، این موضوع، صرفاً یک پیش فرض است و نیاز به بررسی دارد.



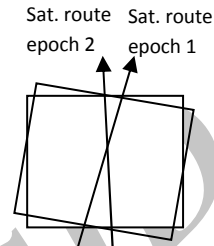
شکل ۶- دریفت BY در جهت حرکت ماهواره برای تصاویر اپوکهای ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹

۴-۲- تخمین شیفت و دریفت در BX

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، برای محاسبه‌ی المان‌های شیفت و دریفت در BX می بایست از نقاط مرکزی خطوط اسکن استفاده شود تا اثر جابجایی ناشی از K خنثی گردد. بدین منظور، ۲۳ نقطه که قبلاً در امتداد محور مرکزی تصاویر، اندازه‌گیری شد بود مورد استفاده قرار گرفت و از طریق برازش خط به اختلاف مختصات مولفه x نقاط، دریفت BX محاسبه گردید. مقدار شیفت BX و ضریب دریفت، به ترتیب ۱۸۴/۵۵ پیکسل و ۰/۰۰۱۰۰۶۵ با انحراف معیاری برابر با ۰/۲۶ پیکسل برآورد گردید. با احتساب ضریب دریفت محاسبه شده، مقدار دریفت BX برای یک فریم، حدود ۱/۲ پیکسل خواهد بود. دریفت BX، همانطور که قبلاً اشاره شد، میتواند معادل با ضریب تغییر مقیاس (معادله‌ی ۸)، در راستای حرکت ماهواره، در نظر گرفته شود. شکل (۷) دریفت BX در جهت حرکت ماهواره را برای دو اپوک زمانی نشان می‌دهد.

$$py = BY_{shift} + x * BY_{drift} \quad (11)$$

همانطور که در معادلات ۵ الی ۱۱ قابل مشاهده است، پارالاکس x و پارالاکس y برخلاف دویبنهای تک-مرکزی، به یکدیگر وابستگی ندارند و بنابراین، معادلات توجیه نسبی، به صورت مستقل بر روی px و py قابل حل خواهند بود. در بخش بعدی این مقاله، پیاده سازی مرحله‌ای توجیه نسبی برای تصاویر با زوایای دید مشابه ارائه می‌شود.



شکل ۵- تغییر جهت حرکت ماهواره در دو اپوک زمانی

۴- پیاده سازی توجیه نسبی چند مرحله‌ای

برای تایید بحثی که در بخش‌های قبلی این مقاله ارائه گردید و نیز جهت درک دقیقتر توجیه نسبی در تصاویر اخذ شده در بازدیدهای مجدد مداری، در این بخش، اثرات المانهای بحث شده در بخش‌های قبل در حذف پارالاکس y و پارالاکس x بصورت مجزا بررسی خواهد شد. برای این منظور از تصاویر IRS-P5 که در دو اپوک زمانی ۲۰۰۹/۲۰۰۸ اخذ شده‌اند استفاده شد.

همانطور که در بخش قبل به صورتی مبسوط مطرح گردید، قبل از تصحیح اثرات المانهای دورانی، میبایست اثرات شیفت و دریفت در عناصر BX و BY تصحیح گردد زیرا عناصر دورانی به نحوی وابسته به این دو المان هستند. در بخش‌های بعدی این مقاله، تصحیح هر یک از عناصر توجیه نسبی به تفکیک بررسی خواهد شد.

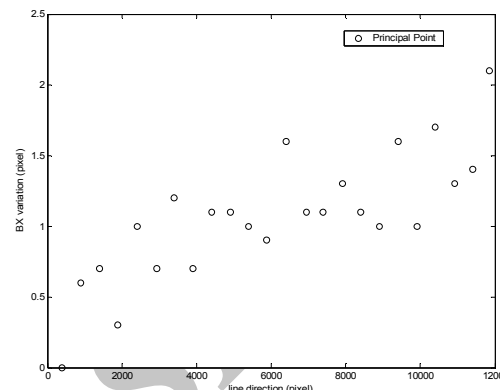
۴-۱- تخمین شیفت و دریفت در BY

برای محاسبه شیفت و دریفت BY همانطور که قبلاً اشاره شد می بایست از نقاط نزدیک به محور مرکزی تصویر در جهت حرکت ماهواره استفاده شود تا اثر عناصر دورانی φ و ω حذف شود. بدین منظور تعداد ۲۳ نقطه در امتداد محور مرکزی تصاویر اپوکهای ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ اندازه‌گیری شد و پارالاکس y این نقاط محاسبه گردید شکل (۶) دریفت BY در جهت حرکت ماهواره را برای این دو بازه زمانی نشان می‌دهد. معادله‌ی (۱۱) به کلیه نقاط شکل (۶) برازش داده

^۱ Orbital inclination oscillation

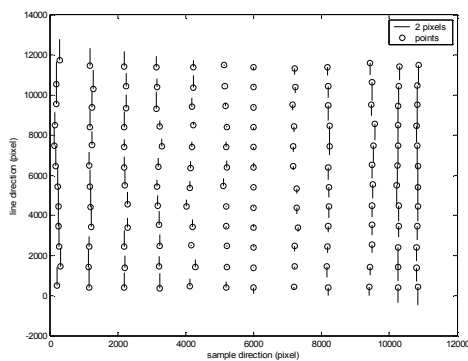
۳-۴- تصحیح اثر BY و BX

همانطور که قبلاً اشاره شد، با تصحیح اثرات شیفت و دریفت در BY ، پارالاکس‌های y فقط تابعی از عناصر ω و $B\varphi$ خواهند بود. پارالاکس‌های باقیمانده برای ۱۴۴ نقطه-ی متناظر در تصاویر ایپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ پس از حذف اثر دریفت در BY در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷- دریفت BX در جهت حرکت ماهواره برای تصاویر ایپوکهای ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹

تصحیح اثر شیفت و دریفت BX نیز برای بردارهای پارالاکس x برای ۱۴۴ نقطه صورت گرفت. پارالاکس‌های x باقیمانده پس از حذف اثر BX در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- px باقیمانده پس از حذف اثر BX .

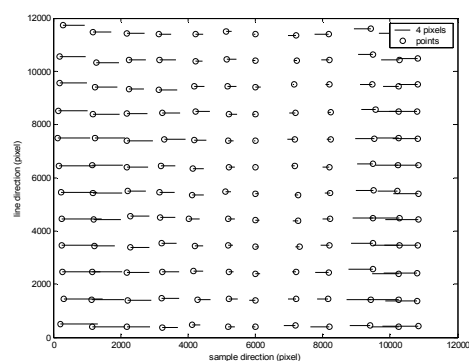
حداکثر و حداقل مقدار px پس از تصحیح خطای شیفت و دریفت BX به ترتیب $+2/1$ و $-2/2$ پیکسل برآورد گردید. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، پارالاکس‌های x باقیمانده پس از حذف اثر شیفت و دریفت BX نسبت به محور مرکزی، تغییراتی متقارن و در جهت عکس یکدیگر دارند که با اثر دوران K بخوبی سازگار است. به عبارت دیگر، پس از تصحیح اثرات ناشی از شیفت و دریفت BX ، پارالاکس‌های x باقیمانده فقط تابعی از دوران K گردیده‌اند و این امر نشان دهنده این نکته است که پارالاکس x می‌تواند به خوبی در حل عنصر K مشارکت نماید. البته این امر فقط موقعی میسر است که px ها از تغییرات ارتفاعی متأثر نشده باشند. همانطور که در بخش اول این مقاله نشان داده شد، تصاویر عقب‌نگر در بازدیدهای مجدد مداری با دقت خوبی این شرط را متحقق می‌کنند.

۴-۴- تصحیح اثر K

با توجه به بردارهای px که در شکل (۹) نشان داده شده‌اند و نیز بحث مطرح شده در بالا، می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۷)، دوران نسبی K را با استفاده از دستگاه معادلات زیر، که برای n پیکسل نوشته شده است محاسبه کرد:

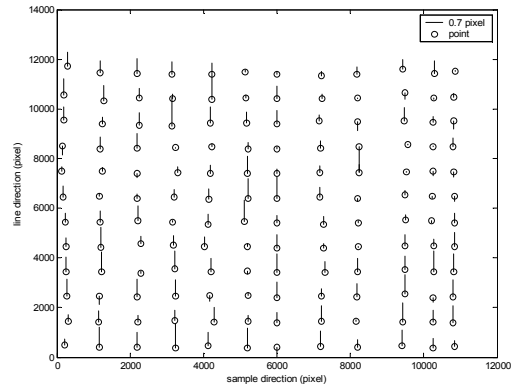
$$\begin{pmatrix} px_1 \\ px_2 \\ \vdots \\ px_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} * \tan \kappa \quad (12)$$

حداکثر و حداقل مقدار py پس از تصحیح خطای شیفت و دریفت BY به ترتیب $+5/8$ و $-5/5$ پیکسل برآورد گردید. همانطور که در شکل (۸) به نحوی مشاهده می‌شود، py ها تقریباً نسبت به محور مرکزی تصویر، متقارن هستند و به سمت محور مرکزی تصویر مقدار آنها کاهش می‌یابد. این امر تأیید کننده این است که py های باقیمانده، به مقدار قابل توجهی از عنصر $B\varphi$ ناشی شده‌اند، در حالیکه عنصر ω سبب کاهش در تقارن گردیده است و این امر سازگار با بحث مطرح شده در قسمت اول این مقاله است (به معادلات ۵ و ۶ رجوع شود). مقایسه‌ی شکل (۳) که نشان دهنده py ها قبل از حذف اثر BY است و شکل (۸) که در آن اثر شیفت و دریفت BY حذف شده است نیز تأیید کننده نکته مطرح شده در بالا است.



شکل ۸- py باقیمانده پس از حذف اثر BY

بردارهای باقیمانده، پس از تصحیح اثر K در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- بردارهای جابجایی px پس از تصحیح دوران K و تصحیح دریافت در BX

مقدار K از رابطه‌ی (۱۲) برای تصاویر اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ حدود ۶۶ ثانیه با انحراف معیاری برابر با ۰/۳ پیکسل تخمین زده شد. خطای سیستماتیکی که در شکل (۱۰) قابل مشاهده است، ممکن است از خطای محاسبه پارامتر شیفت در BX ناشی شده باشد. دوران‌های K برای خطوط اسکن مرکزی تصاویر اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸، استخراج شده از $metadata$ در جدول (۲) ارائه گردیده است.

جدول ۲- مقادیر دوران K بر حسب درجه، برای خطوط اسکن مرکزی تصاویر P5 در اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸

SceneCenterYaw=2.95240186 (اپوک ۲۰۰۸)
SceneCenterYaw=2.97923689 (اپوک ۲۰۰۹)

تفاضل مقادیر ارائه شده در جدول (۲) حدود ۹۶ ثانیه است که تفاوتی را در حدود ۳۰ ثانیه با مقدار محاسبه شده در این تحقیق نشان می‌دهد.

۴-۵- تصحیح اثر $B\phi$ و ω

اگر معادلات (۵) برای n پیکسل نوشته شود، دستگاه معادلات زیر برای تصحیح اثر $B\phi$ می‌تواند بکار رود:

$$\begin{pmatrix} py_1 \\ py_2 \\ \vdots \\ py_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} (B\phi) \quad (13)$$

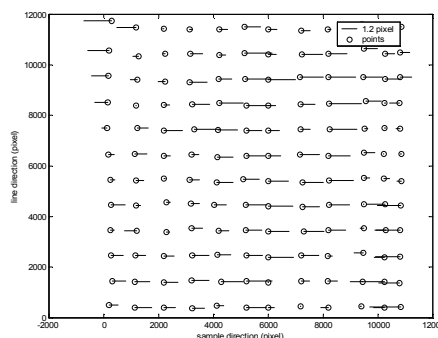
با استفاده از ۱۴۴ نقطه متناظر که در تصاویر اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ اندازه‌گیری شده‌اند، اثر مشترک المانهای BZ و

ϕ از معادله (۱۳) حدود ۲۳۹/۳ پیکسل برآورد گردید که با در نظر گرفتن مقیاس تصویربرداری، معادل با ۵۹۳ متر است که می‌تواند از اثرات مشترک تغییر در ارتفاع پرواز ماهواره و دوران ϕ در بازه زمانی یک سال ناشی شده باشد. مقدار دوران ϕ نسبی در دو تصویر سالهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ برای خطوط اسکن مرکزی گزارش شده در $metadata$ حدود ۹۸ ثانیه است که معادل با تغییر مقیاسی برابر با: ۰/۹۹۹۹۵۸۳۷۲ خواهد بود. این تغییر مقیاس، معادل با ۱۰ پیکسل تغییر در ارتفاع پرواز است. با این پیش فرض، میتوان شیفت نسبی BZ را حدود ۵۶۸ متر تخمین زد. ولی همانطور که در بخش‌های قبلی این مقاله اشاره شد، به علت وابستگی بین دوران ϕ و تغییرات BZ رفع ابهام و تفکیک این دو پارامتر بدون اطلاعات کمکی امکان‌پذیر نخواهد بود و بنابراین، طبق معادله‌ی (۱۳) ترکیب این دو پارامتر بعنوان یک مجهول باید در نظر گرفته شود.

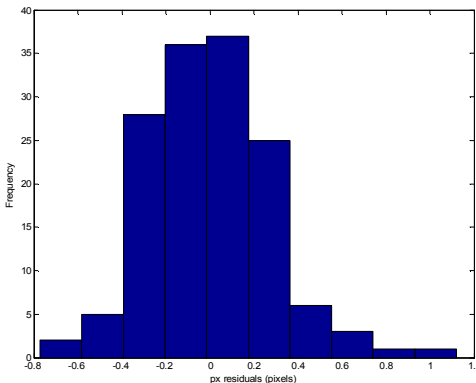
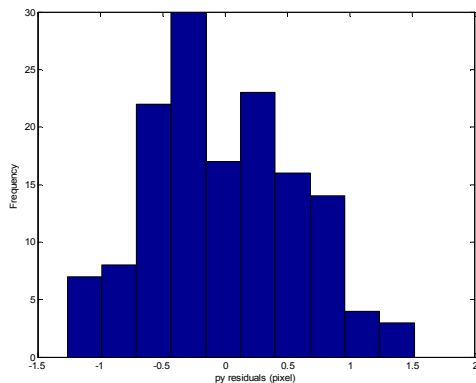
بر خلاف دوران ϕ که قابل تفکیک از تغییرات ارتفاعی ماهواره نیست، دوران ω به صورت مستقل با استفاده از معادله (۶) که برای n پیکسل نوشته شده است، می‌تواند محاسبه شود:

$$\begin{pmatrix} py_1 \\ py_2 \\ \vdots \\ py_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1^2 \\ f \\ y_2^2 \\ f \\ \vdots \\ y_n^2 \\ f \end{pmatrix} (\sin \omega) \quad (14)$$

با استفاده از نقاط متناظر اندازه‌گیری شده در اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ مقدار ω از رابطه‌ی (۱۴) حدود ۰/۷ درجه تخمین زده شد. مقدار گزارش شده در $metadata$ حدود ۹۶ ثانیه است که اختلافی فاحش با مقدار محاسبه شده دارد. علت این اختلاف برای نگارندگان این مقاله هنوز مشخص نشده است. بردارهای باقیمانده پس از تصحیح اثر $B\phi$ و ω در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

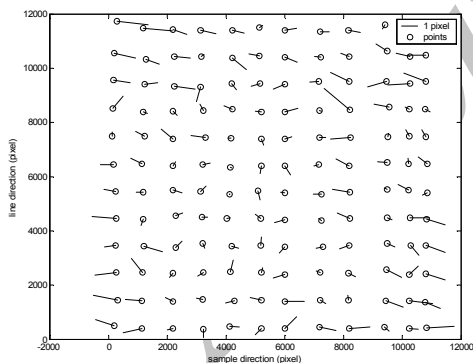


شکل ۱۱- بردارهای جابجایی py پس از تصحیح $B\phi$ و دوران ω

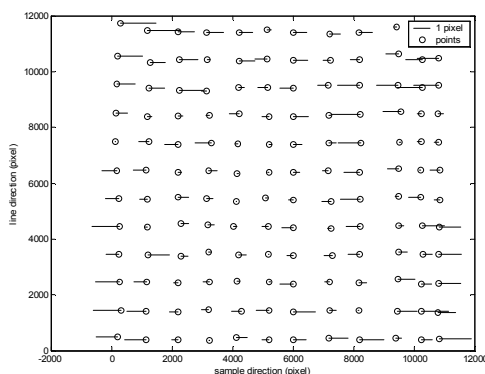


شکل ۱۲- هیستوگرام باقیمانده‌های py (بالا) و px (پایین) پس از اجرای توجیه نسبی یکجا (معادله ۱۵)، بر روی ۱۴۴ نقطه‌ی اندازه‌گیری شده در اپوکهای (۲۰۰۹/۲۰۰۸)

بردارهای باقیمانده و نیز مقادیر px و py برای ۱۴۴ نقطه، به تفکیک در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است.



شکل ۱۳- برآیند باقیمانده‌های px و py پس از حل توجیه نسبی یکجا



شکل ۱۴- مقادیر py پس از حل توجیه نسبی یکجا

بردارهای باقیمانده که در شکل (۱۰) و شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند حالت کاملاً رندومی را نشان نمی‌دهند. این امر می‌تواند به علت اجرای چند مرحله‌ای توجیه نسبی و در نتیجه تجمع خطاها در روند محاسبات باشد. در بخش بعدی این مقاله گزارشی از اجرای توجیه نسبی یک مرحله‌ای ارائه خواهد شد.

۵- توجیه نسبی یک مرحله‌ای

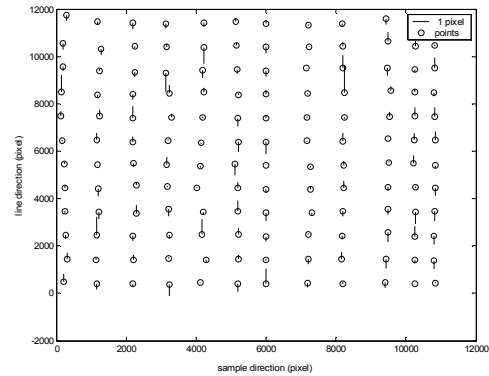
در بخش قبلی این مقاله، اثرات عناصر توجیه نسبی و مدل ریاضی مرتبط با هر عنصر به صورتی مجزا بررسی گردید. ولی همانطور که در بخش قبل اشاره شد، برای رسیدن به حداکثر دقت ممکن، اجرای یک مرحله‌ای توجیه نسبی ضروری است. برای اجرای توجیه نسبی یک مرحله‌ای، المانهای استخراج شده در بخش قبلی این مقاله، در یک راه حل یکجا، به صورت دستگاه معادلات زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$\begin{pmatrix} 1 & x_1 & \frac{y_1}{f} & \frac{y_1^2}{f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & \frac{y_n}{f} & \frac{y_n^2}{f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_n & y_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} BY_{shift} \\ BY_{drift} \\ B\phi \\ \sin \omega \\ BX_{shift} \\ BX_{drift} \\ \tan \kappa \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} py_1 \\ px_1 \\ \vdots \\ py_n \\ px_n \end{pmatrix} \quad (15)$$

همانطور که قبلاً اشاره شد، به علت عدم وابستگی مؤلفه‌های px و py به یکدیگر، دستگاه معادلات (۱۵) می‌تواند به صورت مجزا برای این دو مؤلفه حل شود بدون اینکه لطمه‌ای به دقت حل مسئله وارد شود. نتایج بدست آمده بر روی ۱۴۴ نقطه و هیستوگرام باقیمانده‌ها در جدول (۳) و شکل (۱۲) به تفکیک برای مؤلفه‌های px و py ارائه گردیده است.

جدول ۳- نتایج بدست آمده از اجرای توجیه نسبی یکجا (معادله ۱۵) بر روی ۱۴۴ نقطه اندازه‌گیری شده در اپوکهای (۲۰۰۹/۲۰۰۸)

مدل ریاضی	حداقل/حداکثر (پیکسل) px	حداقل/حداکثر py (پیکسل)	خطای مربعی متوسط px (پیکسل)	خطای مربعی متوسط py (پیکسل)
توجیه نسبی یکجا	۱/۱۲ -۰/۷۷	۱/۶ -۱/۲۹	۰/۲۸	۰/۶۰



شکل ۱۵- مقادیر px پس از حل توجیه نسبی یکجا

در تصحیح اثر ذوزنقه‌ای در تغییر شکل نسبی تصویر را در مدل ریاضی دخالت دهیم که همان حاصلضرب مختصات (x^*y) خواهد بود. این تغییر شکل ذوزنقه‌ای، با فرض ناشی شدن از تغییر خطی ارتفاع پرواز ماهواره، می‌تواند بعنوان دریافت در ارتفاع پرواز، BZ_{drift} ، در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، همانند مؤلفه‌های BX و BY، دریافت در مؤلفه-BZ ی نیز وقوع یافته است. بدین ترتیب، مدل بهینه برای حل توجیه نسبی تصاویر ماهواره‌ای آرایه خطی از نوع along track با زوایای دید مشابه، با پیش فرض مطرح شده در بالا، به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 \\ \vdots & & & & & & \\ 1 & x_n & y_n & x_n y_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_n & y_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} BY_{shift} \\ BY_{drift} \\ B\phi \\ BZ_{drift} \\ BX_{shift} \\ BX_{drift} \\ \tan \kappa \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} py_1 \\ px_1 \\ \vdots \\ py_n \\ px_n \end{pmatrix} \quad (16)$$

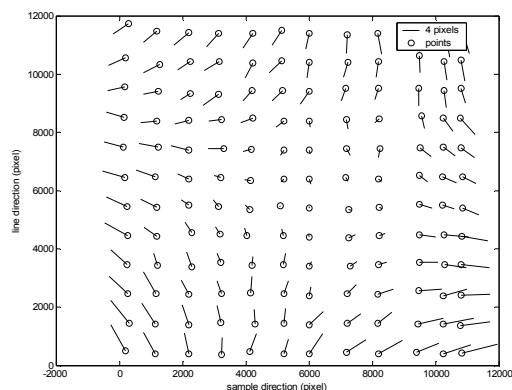
ترم (x^*y) در معادله بالا در صورتی اثر ذوزنقه‌ای ایجاد خواهد کرد که وابستگی بین مختصات x و y در معادلات وجود نداشته باشد که البته همانطور که در معادله مشاهده می‌شود و نیز همانطور که در قسمت‌های قبلی این مقاله نشان داده شد این وابستگی نزدیک به صفر است. نکته دیگری که در مورد معادله (۱۶) باید مطرح شود نبود عنصر ω در معادله است. حذف این عنصر برای تصاویر along track به علت کوچک بودن دوران ω ، می‌تواند از پارامتریزه شدن بیش از حد معادلات^۳ جلوگیری نماید، زیرا دوران کوچک ω جابجایی کوچک در امتداد محور y ایجاد خواهد کرد که این جابجایی نزدیک به خطای رندوم است و در صورت افزایش ترم‌ها اثر تخریبی در معادله (۱۶) خواهد داشت. بدیهی است برای تصاویر across track که در آنها دوران ω جابجایی قابل توجه پیکسلی ایجاد می‌نماید، حضور این دوران در معادله، قاعدتاً باید اجتناب ناپذیر در نظر گرفته شود. معادله‌ی (۱۶)، همانند معادلات قبلی، بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده برای ۱۴۴ نقطه متناظر در اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ اجرا گردید. نتایج بدست آمده در جدول (۴) ارائه شده است. نمایش گرافیکی مقادیر py همراه با هیستوگرام py نیز در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.

همانطور که شکل (۱۵) و هیستوگرام شکل (۱۲) و نیز مقادیر ارائه شده در جدول (۳) به خوبی نشان می‌دهند، معادله‌ی پیشنهادی برای مؤلفه px با سه عنصر شیفت و دریافت BX و دوران κ ، توانایی کامل برای حل توجیه نسبی در امتداد حرکت ماهواره با خطای مربعی متوسط 0.28 پیکسل برای سطح اطمینان 0.88 را دارد. این شیفت و دریافت BX، معادل با ضریب λ_x است که از طریق معادله (۸) بیان گردید. مقادیر باقیمانده در امتداد مؤلفه py اگرچه نسبت به روش چند مرحله‌ای، با خطای مربعی متوسط 0.60 پیکسل افزایش دقت را نشان می‌دهد، ولی کماکان خطای سیستماتیک در جهت حرکت ماهواره مشهود است. این خطا همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود روندی ذوزنقه‌ای داشته و از این جهت، متناظر با تغییر مقیاسی خطی در جهت حرکت ماهواره است. به نظر نگارندگان، تنها توجیهی که برای این تغییر مقیاس، می‌تواند مطرح شود این است که در یک اپوک نسبت به اپوک دیگر که با فاصله زمانی یکسال برداشته شده است مقدار $B\phi$ به صورتی خطی تغییر کرده است. ولی از آنجایی که در زمان بسیار کوتاه تصویربرداری یک فریم، امکان تغییر خطی اثرگذار برای دوران ϕ وجود ندارد، قاعدتاً می‌بایست ارتفاع پرواز ماهواره به صورتی خطی در جهت حرکت ماهواره تغییر کرده باشد. این امر ممکن است به علت جابجایی نقطه حضیض مدار ماهواره در مدت زمان یکسال صورت گرفته باشد که در نتیجه این جابجایی، مسیر حرکت ماهواره ممکن است توازی خود را به صورتی اندک از دست داده باشد. توجیه دقیق‌تر این موضوع، بررسی بیشتری را در تحقیقات آتی می‌طلبد. اگر فرض مطرح شده در بالا را بپذیریم، در این صورت برای تصحیح آن باید ترم‌های اثرگذار

^۳ Over parametrization

^۲ perigee

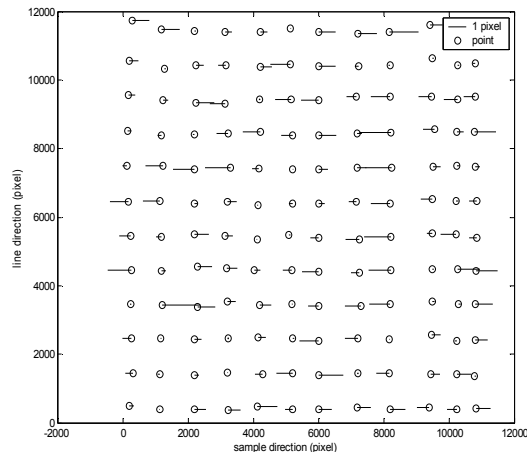
مولفه‌ی y برای تصاویر along track در بر نداشته است. در ضمن، برای مقایسه جامع‌تر، تبدیل افاین نیز با تبدیلات بهینه مقایسه گردید که نتیجه‌ی آن در جدول (۴) ارائه گردیده است. همانطور که در جدول قابل مشاهده است کارکرد تبدیل افاین در امتداد محور y ضعیف‌تر از مدل پیشنهادی است. نتیجه‌ی تبدیل کانفورمال نیز در جدول (۴) و شکل (۱۸) نشان داده شده است. این امر صرفاً به این دلیل صورت گرفت تا پیچیدگی خطاها و ناتوانی این تبدیل در حل مسئله نمایانده شود.



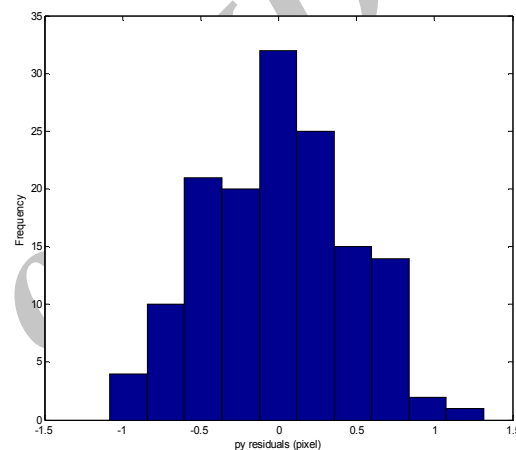
شکل ۱۸- برآیند مولفه‌های px و py پس از حل توجیه نسبی با تبدیل کانفورمال.

۴- حل توجیه نسبی شبه فیزیکی با استفاده از نقاط گروبر

با توجه به اینکه مدل بهینه‌ی پیشنهاد شده در این مقاله، یک متد شبه فیزیکی است و نه یک مدل برازشی، می‌بایست این مدل، توان حل مسئله با حداقل نقاط متناظر را داشته باشد. بهینه‌ترین موقعیت نقاط در یک زوج تصویر، منطبق بر موقعیت‌هایی است که تحت عنوان "نقاط گروبر" نامگذاری شده‌اند. این نقاط، برای تصاویر ماهواره‌ای با پوشش نزدیک به صد در صد در محورهای مرکزی و جانبی تصاویر قرار می‌گیرند. با در نظر گرفتن تحلیل رفتار پاراکس‌های x و y که در بخش‌های قبلی این مقاله صورت گرفت، موقعیت‌های بهینه نقاط گروبر می‌تواند در مناطق نُه‌گانه‌ی نشان داده شده در شکل (۱۹) در نظر گرفته شود. در صورت انتخاب یک نقطه در هر یک از مناطق نُه‌گانه، در مجموع حداقل ۹ نقطه متناظر برای حل بهینه مسئله پیشنهاد می‌شود ولی به منظور ارزیابی قرائت‌های اشتباه، حداقل دو نقطه در هر منطقه توصیه می‌شود که مجموعاً ۱۸ نقطه خواهد شد.



شکل ۱۶- مقادیر py پس از حل توجیه نسبی یکجا با معادله‌ی (۱۶) بر روی نقاط اندازه‌گیری شده در اپوکهای (۲۰۰۹/۲۰۰۸)

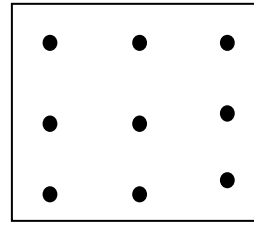


شکل ۱۷- هیستوگرام مقادیر py برای نقاط شکل (۱۷)

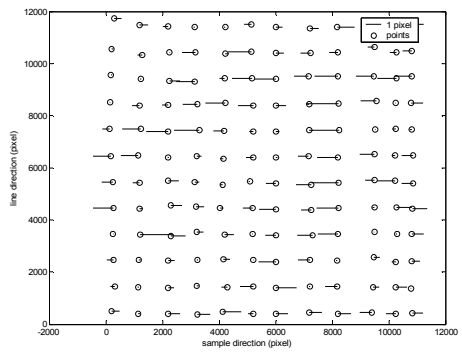
جدول ۴- نتایج بدست آمده از اجرای توجیه نسبی یکجا (معادله ۱۶)، بر روی ۱۴۴ نقطه اندازه‌گیری شده در اپوکهای (۲۰۰۹/۲۰۰۸) و مقایسه نتایج با سایر تبدیلات

مدل ریاضی	حداقل/حداکثر px (پیکسل)	حداقل/حداکثر py (پیکسل)	خطای مربعی متوسط px (پیکسل)	خطای مربعی متوسط py (پیکسل)
افاین	۱/۱۲ - ۰/۷۷	۱/۶۱ - ۱/۲۹	۰/۲۸	۰/۶۰
ترم y^2	۱/۱۲ - ۰/۷۷	۱/۵۲ - ۱/۲۶	۰/۲۸	۰/۶۰
ترم $x*y$	۱/۱۲ - ۰/۷۷	۱/۳۲ - ۱/۰۸	۰/۲۸	۰/۴۵
کانفورمال	۵/۰۱ - ۳/۲۲	۳/۹۸ - ۳/۸۴	۱/۸۵	۱/۷۶

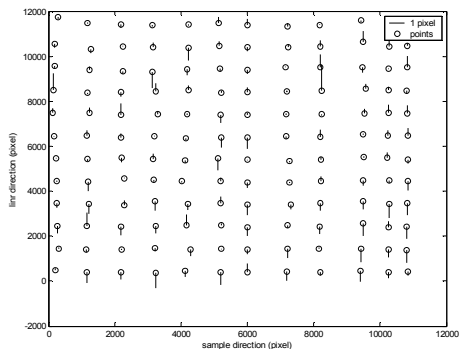
همانطور که در جدول (۴) و نیز شکل (۱۶) و شکل (۱۷) قابل مشاهده است، حضور ترم $(x*y)$ سبب شده است بهبود معناداری در امتداد محور y (با انحراف معیار ۰/۴۵ پیکسل، با سطح اطمینان ۰/۹۵) صورت گیرد. از طرف دیگر، حضور ترم (y^2) برای دوران ω همانطور که قبلاً نیز مطرح گردید، اثر بهبود دهنده‌ای را در امتداد



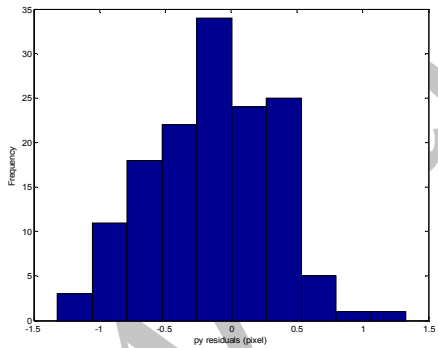
شکل ۱۹- موقعیت نقاط بهینه (گروبر) برای حل توجیه نسبی در تصاویر ماهواره‌ای آرایه خطی با پوشش نزدیک به ۱۰۰٪



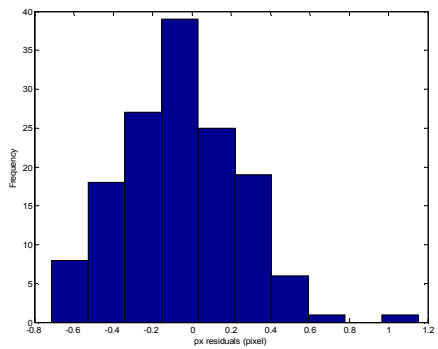
شکل ۲۰- مولفه‌های py پس از حل توجیه نسبی با معادله‌ی (۱۶) برای نقاط چک با ضرائب بدست آمده بر روی نقاط گروبر



شکل ۲۱- مولفه‌های px پس از حل توجیه نسبی با معادله‌ی (۱۶) برای نقاط چک با ضرائب بدست آمده بر روی نقاط گروبر



شکل ۲۲- هیستوگرام مقادیر py پس از حل توجیه نسبی با معادله- ی (۱۶) برای نقاط چک با ضرائب بدست آمده بر روی نقاط گروبر



شکل ۲۳- هیستوگرام مقادیر px پس از حل توجیه نسبی با معادله- ی (۱۶) برای نقاط چک با ضرائب بدست آمده بر روی نقاط گروبر

تبدیل‌های ارائه شده در جدول (۴) بر روی ۱۸ نقطه، واقع در موقعیتهای گروبر، اجراء گردید و باقیمانده‌ی مقادیر px و py بر روی این نقاط و نیز بر روی سایر نقاط متناظر اندازه‌گیری شده در تصاویر اپوکهای ۲۰۰۹/۲۰۰۸ (مجموعاً ۱۲۶ نقطه) به عنوان نقاط چک، محاسبه گردید. نتایج دقت‌های نسبی و مطلق حاصل از هر یک از تبدیل‌ها در جدول (۵) و جدول (۶) ارائه گردیده است.

جدول ۵- نتایج بدست آمده با استفاده از ۱۸ نقطه در مناطق گروبر

مدل ریاضی	حدافل/حداکثر px (پیکسل)	حدافل/حداکثر py (پیکسل)	خطای مربعی متوسط px (پیکسل)	خطای مربعی متوسط py (پیکسل)
افاین	۰/۳۹ -۰/۵۲	۱/۰۵ -۱/۳۸	۰/۲۴	۰/۲۳
ترم y^2	۰/۳۹ -۰/۵۲	۱/۴۷ -۱/۰۱	۰/۲۴	۰/۲۳
ترم $x*y$	۰/۳۹ -۰/۵۲	۰/۴۹ -۰/۷۱	۰/۲۴	۰/۳۸

جدول ۶- مقادیر باقیمانده‌ها با اعمال ضرائب بدست آمده از

نقاط گروبر بر روی نقاط چک

مدل ریاضی	حدافل/حداکثر px (پیکسل)	حدافل/حداکثر py (پیکسل)	خطای مربعی متوسط px (پیکسل)	خطای مربعی متوسط py (پیکسل)
افاین	۱/۱۵ -۰/۷۱	۱/۳۸ -۱/۵۸	۰/۳۰	۰/۶۲
ترم y^2	۱/۱۵ -۰/۷۱	۱/۴۷ -۱/۶۳	۰/۳۰	۰/۶۲
ترم $x*y$	۱/۱۵ -۰/۷۱	۱/۳۳ -۱/۳۲	۰/۳۰	۰/۴۷

مؤلفه‌های px و py همراه با هیستوگرام آن‌ها به ترتیب در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) و (۲۲) و (۲۳) نشان داده شده است. مقایسه جدول (۵) و جدول (۶) و نیز مقایسه مؤلفه‌های px و py همراه با هیستوگرام آن‌ها با شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، هماهنگی خوبی بین نتایج بدست آمده از ۱۴۴ نقطه و نتایج بدست آمده از ۱۸ نقطه در مناطق گروبر را نشان میدهد که نشان دهنده موفقیت مدل پیشنهادی است.

۷- نتیجه‌گیری، بحث و پیشنهادات

در این مقاله، یک متد شبه فیزیکی در حل توجیه نسبی تصاویر آرایه‌ی خطی با زوایای دید مشابه با استفاده از مفاهیم پایه‌ای فتوگرامتری کلاسیک، برای کاربردی نوین ارائه گردید. اهمیت حل توجیه نسبی مطرح شده در این مقاله، باید در افزایش دقت هم‌مرجع سازی تصاویر در اپوکهای زمانی متفاوت، جهت کاربردهایی از قبیل اندازه‌گیری جابجایی ناشی از رانش زمین، در نظر گرفته شود. حداکثر دقت قابل حصول از طریق تصاویر ماهواره‌ای برای نیل به این مقصود، وابسته به دو عامل است: اولین عامل متأثر از دقت تناظریابی نقاط در اپوکهای زمانی متفاوت است که موضوع این مقاله نبوده است و در مطالعات بعدی باید به آن پرداخته شود. دومین عامل تعیین کننده در افزایش دقت تخمین رانش، وابسته به دقت هم‌مرجع سازی تصاویر است. تمرکز اصلی این مقاله، شناسایی عناصر فیزیکی و در نتیجه، توسعه یک مدل شبه فیزیکی در توجیه نسبی، برای دستیابی به روشی دقیق برای حل مسئله هم‌مرجع سازی، بوده است. همانطور که در این مقاله نشان داده شد، امکان حل دقیق توجیه نسبی فقط از طریق استفاده از پارالاکس x در کنار پارالاکس y میسر است و نیز به نحوی نشان داده شد که بدون امکان استفاده از پارالاکس x ، اساساً حل توجیه نسبی برای تصاویر آرایه خطی امکان پذیر نخواهد بود. امکان استفاده از پارالاکس x فقط موقعی میسر است که خطای جابجایی ارتفاعی قابل اغماض باشد که این امر، همانطور که در بخش مقدماتی مقاله نشان داده شد، در مورد تصاویر اپوک‌های بازدید مجدد، کاملاً صادق است. با توجه به نکات فوق، یک مدل فیزیکی برای حل مسئله توجیه نسبی این تصاویر، از طریق آنالیز تأثیر المانهای توجیه نسبی، استنتاج گردید. برای این منظور، ابتدا توجیه نسبی چند مرحله‌ای جهت تحلیل اثر هر یک از المانها پیاده‌سازی شد و سپس عناصر موثر در توجیه نسبی تصاویر آرایه خطی استخراج گردید. این عناصر، در اولین تحلیل بر روی باقیمانده‌های px و py ، عبارتند از:

$$(BY_{shift}, BY_{drift}, B\varphi, \omega, BX_{shift}, BX_{drift}, \kappa)$$

همانطور که در خلال مقاله مطرح گردید، این عناصر از نظر ماهیت و نیز تعداد، متفاوت با عناصر فیزیکی متداول در تصاویر تک-مرکزی هستند. ویژه‌گی‌های دیگر این عناصر به قرار زیر است:

- المان‌های φ و ارتفاع پرواز غیر قابل تفکیک هستند و بعنوان یک مجهول ($B\varphi$) باید در نظر گرفته شوند،
- المان دریافت در BX و دوران K فقط در صورتی قابل حل هستند که جابجایی ارتفاعی قابل اغماض باشد.
- المان دریافت در BX میتواند از دوران K تفکیک شود در صورتی که مختصات x حداقل برای دو نقطه‌ی مرکزی در اختیار باشد. در این صورت، المان BX و دوران K میتوانند به عنوان دو مجهول مستقل در معادله حضور داشته باشند.
- دریافت در BY میتواند از سایر المانهایی که ایجاد پارالاکس y می‌کنند تفکیک شود در صورتی که مختصات y برای حداقل دو نقطه مرکزی اندازه‌گیری شده باشد.
- هیچ نوع وابستگی بین المانهای مؤثر در جهت پرواز ماهواره و المانهای مؤثر در امتداد عمود بر جهت پرواز وجود ندارد. این عدم وابستگی، خاص تصاویر آرایه خطی است.
- تصحیح تغییرات px در امتداد حرکت ماهواره، پیچیدگی کمتری نسبت به تغییرات py در امتداد خطوط اسکن دارد. بنابراین، تصحیحات px با استفاده از سه پارامتر: شیفت و دریافت BX و K به خوبی قابل حل است.
- در خلال تحلیل پارالاکس‌های باقیمانده پس از حذف اثر المانهای توجیه، یک تغییر شکلی دوزنقه‌ای در بردارهای باقیمانده در امتداد حرکت ماهواره مشاهده گردید. این تغییر مقیاس دوزنقه‌ای ممکن است به علت تغییر نقطه $perigee$ در دو اپوک زمانی صورت گرفته باشد. این امر احتیاج به بررسی بیشتر در تحقیقات آتی دارد.
- تغییر مقیاس دوزنقه‌ای اشاره شده در بالا، به عنوان وجود دریافت خطی در BZ در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، المان‌های بهینه مدل فیزیکی برای حل توجیه نسبی، به صورت زیر خواهد بود:

$$BY_{shift}, BY_{drift}, B\varphi, BZ_{drift}, \omega, BX_{shift}, BX_{drift}, \kappa$$

$$(BY_{shift}, BY_{drift}, B\phi, BZ_{drift}, BX_{shift}, BX_{drift}, \kappa)$$

ارزیابی و استخراج این عناصر شاید بتواند به عنوان دستاورد این مقاله در نظر گرفته شود. این نکته نیز باید اشاره شود: مدل پیشنهاد شده در این مقاله، یک مدل فیزیکی، به معنی دقیق این کلمه نیست، و به همین علت آن را شبه فیزیکی نامیده‌ایم، چرا که از یک طرف، پارامترهای فیزیکی غیر قابل تفکیک در آن وجود دارد و از طرف دیگر، ضرائب پارامترهای فیزیکی، فاقد هماهنگی کامل با هندسه تصویربرداری هستند. اولین شرط، یعنی حذف وابستگی پارامترها، همانطور که در خلال مقاله نشان داده شد، امکان‌پذیر نیست، ولی دومین شرط، یعنی استخراج ضرائب دقیقتر برای پارامترهای فیزیکی، میتواند بعنوان تحقیق بعدی در راستای حل توجیه نسبی برای تصاویر آرایه‌ی خطی با زوایای دید مشابه، در نظر گرفته شود. به علاوه، توسعه مدل‌های ریاضی متکی بر شرط هم-صفحه‌ای نیز برای حل توجیه نسبی این تصاویر می‌تواند بعنوان موضوع دیگر تحقیقاتی مد نظر قرار گیرد.

با توجه به عدم وابستگی پارالاکس‌های x و y به یکدیگر، وجود ترم $(x*y)$ برای تصحیح خطای تغییر مقیاس ذوزنقه‌ای کفایت خواهد کرد. بدین ترتیب، برای حل بهینه توجیه نسبی، وجود هشت المان ضروری است. پس از استخراج عناصر مطرح شده در بالا، توجیه نسبی یک مرحله‌ای اجراء و با سایر تبدیلات دوبعدی مقایسه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که تبدیل پیشنهادی در حل توجیه نسبی تصاویر با زوایای دید مشابه دقت بالاتری از تبدیلات دو بعدی دیگر دارد. بهینه بودن تبدیل پیشنهادی، با استفاده از ۱۲۶ نقطه‌ی چک، تأیید گردید. تحلیل‌های انجام شده، برای بررسی دقت مدل پیشنهادی، همچنین نشان داد که برای تصاویر از نوع *along track* حضور دوران ω می‌تواند سبب پارامتریزه شدن بیش از حد معادلات شود. بدین ترتیب برای اینگونه تصاویر، حذف المان ω ، نتایج را کمی بهبود خواهد داد. بنابراین برای تصاویر از نوع *along track* پارامترهای پیشنهادی برای حل توجیه نسبی با مدل شبه فیزیکی به قرار زیر خواهد بود:

مراجع

- [1] Editors: Supper, R., Baron, I. (2010). Landslide Monitoring Technologies & Early Warning Systems, Book of extended abstracts, Open Workshop within the frame of the EU FP7 "SafeLand" Project, February 24th, 2010, Vienna.
- [2] Azizi, A., Afsharnia, H., Hadavand, A. (2013). "Evaluation and analysis of a parametric approach for simultaneous space resection-intersection of high resolution satellite images without using ground control points", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, SMPR 2013, 5 – 8 October, Tehran, Iran.

- [۳] حسینی، س.، ۱۳۹۰، بررسی دقت استخراج پارامترهای هندسی شیب، امتداد و جابجایی در لایه‌های زمین شناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای IRSP5، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
- [۴] هادیلو، ا.، ۱۳۹۱، تعیین جابجایی ناشی از زمین لغزش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای IRSP5، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.