



سجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال هشتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵
Vol.8, No. 3, Autumn 2016

۱-۱۰



ارزیابی دقت تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا با استفاده از اطلاعات کنترلی

سمیه یآوری^{۱*}، محمدجواد ولدان زوج^۲، محمودرضا صاحبی^۳، مهدی مختارزاده^۴

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳ و ۴. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۲

چکیده

زمین مرجع‌سازی تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، با استفاده از معادلات ریاضی مناسب یکی از مهم‌ترین مراحل استخراج اطلاعات مکانی سه‌بعدی دقیق است. به‌منظور زمین‌مرجع‌سازی تصاویر ماهواره‌ای، ابتدا باید مجموعه‌ای عوارض کنترلی مانند نقاط، خطوط و یا سطوح در دو فضا استخراج شوند. سپس عوارض متناظر از بین کل عوارض استخراج‌شده تعیین و به‌طور مستقیم برای حل تابع انتقال بین دو فضا مشخص شوند. از آنجاکه دقت تصحیح هندسی تصاویر دقت زمین‌مرجع‌سازی را تحت تأثیر مستقیم قرار می‌دهد، در این مقاله این مسئله براساس استفاده از عوارض کنترلی خطی و نیز تلفیق آن با نقاط کنترلی در حل معادلهٔ رشنال بررسی شده است. همچنین اثر آنها در حذف خطاهای سیستماتیک بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که دقت حل معادلهٔ رشنال با استفاده از خطوط کنترلی پایین و در حدود ۳ پیکسل است. همچنین دیاگرام بردار باقی‌مانده‌ها نیز وجود میزان چشمگیر خطاهای سیستماتیک در نتایج نهایی را نشان می‌دهد. دلیل این امر، افزون بر دقت و توزیع خطوط کنترلی، ماهیت خطوط به‌منزلهٔ اطلاعات کنترلی نیز محسوب می‌شود. از سوی دیگر تلفیق خطوط و نقاط کنترلی به‌منظور حل معادله سبب ارتقای دقت تا ۱ پیکسل و حذف بسیاری از خطاهای سیستماتیک می‌شود. از این‌رو، نتایج قابلیت بالای تلفیق خطوط و نقاط کنترلی در ارتقای دقت و نیز کاهش خطاهای سیستماتیک را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، تصحیح هندسی، عوارض خطی، خطاهای سیستماتیک، معادلات رشنال.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ ژئوماتیک و ژئودزی، دپارتمان فتوگرامتری و سنجش از دور. تلفن: ۰۹۱۲۳۹۳۸۹۱۳.

۱- مقدمه

به منظور بهره‌گیری از پتانسیل بالای تصاویر ماهواره‌ای، نیاز است این تصاویر به سیستم مختصات زمینی مشخصی مرجع شود که به این روند زمین مرجع‌سازی (ثبت تصویر به نقشه) گفته می‌شود. روند زمین مرجع‌سازی شامل چهار مرحله اصلی استخراج عوارض کنترلی؛ تناظریابی؛ تخمین پارامترهای تابع انتقال؛ و در نهایت نمونه‌برداری مجدد می‌شود. برای این منظور، عوارض کنترلی مورد استفاده به سه دسته نقاط، خطوط و سطوح تقسیم‌بندی می‌شوند (Goshtasby, 2005; Zitova and Flusser, 2003). با توجه به تحقیقات صورت گرفته می‌توان گفت استفاده عملی از عوارض نقطه‌ای به دلیل معایب آنها مشکل است. از معایب این عوارض می‌توان به این موارد اشاره داشت:

۱. سرعت پایین استخراج و تناظریابی دستی این عوارض؛
۲. استخراج و تناظریابی اتوماتیک بسیار پیچیده این عوارض، به‌ویژه در فضاها نامتجانس (همچون فضای تصویر و زمین) به دلیل ویژگی‌های متفاوت این فضاها (مانند پس‌زمینه، بافت، مفهوم و نمایش متفاوت) و نیز کمبود اطلاعات معنایی برای عوارض تک‌بعدی (عوارض نقطه‌ای)؛
۳. لزوم استفاده از نقاط کنترلی بسیار با کیفیت بالا، توزیع مناسب و تراکم زیاد در صورت استفاده از روش‌های آماری؛
۴. حساسیت بالاتر عوارض نقطه‌ای به نویز در مقایسه با عوارض خطی.

برخلاف عوارض نقطه‌ای، عوارض خطی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان، همچون آسان‌تر بودن استخراج اتوماتیک عوارض خطی به نسبت عوارض نقطه‌ای و نیز فراوانی عوارض خطی در تصاویر ماهواره‌ای به‌ویژه در مناطق شهری، برای روند زمین مرجع‌سازی بسیار مطلوب‌اند (Habib et al., 2004; Yavari et al., 2016). براساس مزایای مطرح شده در بالا می‌توان گفت که عوارض خطی برای بسیاری از کاربردها در حوزه

فتوگرامتری و سنجش از دور مناسب به نظر می‌رسند. به همین دلیل تمایل عمومی محققان به سمت استفاده از این عوارض و گذر از «فتوگرامتری نقطه‌ای» به «فتوگرامتری خطی» و «فتوگرامتری نقاط تعمیم‌یافته»^۱ است (Schenk, 2003; Zhang & Zhang, 2004).

از سوی دیگر، تخمین پارامترهای تابع انتقال مناسب و به‌عبارت دیگر، تصحیح هندسی تصاویر یکی از مهم‌ترین مراحل در این پروسه محسوب می‌شود. برای این منظور معادلات مورد استفاده به دو دسته کلی معادلات پارامتریک و غیرپارامتریک تقسیم‌بندی می‌شوند. معادلات پارامتریک معادلاتی‌اند که هندسه تصویر در لحظه تصویربرداری را بازسازی می‌کنند و ارتباط بین فضای تصویر و زمین را براساس معادلات شرط هم‌خطی برقرار می‌کنند (Valadan Zoej & Sadeghian, 2003; Petrie, 1998). در زمینه مدل‌های پارامتریک، بسیاری از محققان روش‌های ثبت براساس معادلات شرط هم‌خطی و یا هم‌صفحه‌ای را برای تصاویر هوایی مطرح کرده‌اند (Akav et al., 2004; Habib & Kelley, 2001; Jaw & Perny, 2008; Junior & Tommaselli, 2013). مرور جامعی در زمینه استفاده از عوارض خطی و معادله شرط هم‌خطی و نیز مزایای آن بر معادله شرط هم‌صفحه‌ای را می‌توان در کار شنک^۲ (۲۰۰۳) و یافت که مدل شرط هم‌خطی توسعه‌یافته را برای ثبت تصویر عرضه کرده است. در این روش برای مثلث‌بندی هوایی، بر استفاده از خطوط کنترلی به جای نقاط کنترل تأکید شده است. برای این منظور، از فرم پارامتریک خط در فضای تصویر و هر نقطه روی خط متناظر در فضای زمین استفاده شده است. به همین دلیل نیازی نیست نقاط ابتدا و انتهای خطوط متناظر نیز در دو فضا متناظر باشند و فقط تناظر خطوط کافی است. این مدل به خطوط بدون شکل^۳ نیز قابل بسط

1. generalized point photogrammetry
2. Schenk
3. Free form linear features

ذاتاً مدل‌های درون‌یاب^۵ محسوب می‌شوند (Fraser & Hanley, 2003; Fraser & Yamakawa, 2004; Tao & Hu, 2001; Teo, 2013; Valadan Zoej et al., 2007; Yavari et al., 2012 & 2013).

در زمینه زمین‌مرجع‌سازی با استفاده از معادلات غیرپارامتریک، تحقیقات صورت گرفته بیشتر براساس استفاده از ضرایب معلوم رشنال^۶ و یا معادلات ساده‌تر همچون کانفرمال خطی است. از تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از معادلات غیرپارامتریک برای کاربردهای ثبت می‌توان به این موارد اشاره داشت (Liu et al., 2012; Lu et al., 2013; Song et al., 2013; Zang et al., 2011).

برای نمونه، یک روش ثبت اتوماتیک تصویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا به نقشه برداری براساس عوارض خطی و با استفاده از ضرایب معلوم رشنال به‌منزله پارامترهای توجیه اولیه را می‌توان در کار لو و همکاران^۷ (۲۰۱۳) یافت.

همچنین در مقاله زانگ و همکاران^۸ (۲۰۱۱)، برای ثبت تصاویر سنجش‌ازدوری هواپیماهای بدون سرنشین^۹، از عوارض خطی مستقیم و مدل MIHT^{۱۰} برای تخمین پارامترهای یک تابع ترانسفورماسیون افاین استفاده شده است.

برخلاف معادلات پارامتریک، معادلات غیرپارامتریک مزایایی دارند که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره داشت: ۱. عمومیت داشتن^{۱۱} این معادلات (این معادلات مستقل از سیستم مختصات جغرافیایی مورد استفاده و نوع سنجنده‌اند)؛ ۲. نیازداشتن به اطلاعات اولیه

است. از دیگر تحقیقات صورت گرفته می‌توان به تحقیق تئو و چن^۱ (۲۰۱۰) اشاره داشت که از تلفیق عوارض خطی و نقطه‌ای در معادله شرطهم خطی استفاده کرده است.

معادلات پارامتریک ویژگی‌های منحصربه‌فردی دارند که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. امکان معرفی نقاط کنترل زمینی و یا پارامترهای توجیه داخلی و خارجی غیردقیق به‌منزله شبه‌مشاهده^۲ در روند سرشکنی برای ارتقای دقت آنها؛

۲. نیاز این معادلات به نقاط کنترل بسیار اندک؛

۳. بازسازی هندسه تصویر در لحظه تصویربرداری؛

۴. قابلیت حذف خطاهای سیستماتیک از روی تصویر؛

۵. تفسیر فیزیکی پارامترهای این معادلات.

ترکیب همه این ویژگی‌ها سبب می‌شود این معادلات، ضمن داشتن دقت بالا، توانایی حذف خطاهای سیستماتیک را نیز دارا باشند. از این رو، به این معادلات مدل‌های دقیق^۳ نیز اطلاق می‌شود. به‌رغم این مزایا، این معادلات معایبی نیز دارند که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱. وابستگی به سیستم مختصات زمینی خاص (سیستم CI)؛ ۲. وابستگی به سنجنده مورد استفاده؛ ۳. نیاز به داشتن مقادیر تقریبی پارامترهای توجیه داخلی و خارجی و دیگر داده‌های مداری مرتبط؛ ۴. زاویه دید باریک^۴ تصاویر با قدرت تفکیک بالا که منجر به ناپایداری ریاضی در روند مثلث‌بندی می‌شود؛ ۵. پیچیدگی ریاضی بالای این معادلات به‌همراه زمان محاسباتی بسیار. افزون بر این موارد، درمورد تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، تصاویر خام و اطلاعات مداری به‌دلیل سیاست‌های کمپانی‌های ارائه‌کننده تصاویر در اختیار کاربران قرار نمی‌گیرد. این نبود دسترسی به پارامترهای مداری و تصاویر خام سبب شده است تا محققان به‌سمت استفاده از معادلات غیرپارامتریک متمایل شوند.

معادلات غیرپارامتریک ارتباط بین فضای تصویر و زمین را از طریق معادلات ریاضی تعیین می‌کنند و

1. Teo & Chen
2. Quasi-observation
3. rigorous models
4. field of view
5. interpolative MODELS
6. Rational Polynomial Coefficients (RPCs)
7. Lu et al.
8. Zang et al.
9. Unmanned Aerial Vehicles (UAV)
10. Modified Iterative Hough Transform (MIHT)
11. generality

امکان‌پذیر نیست. همچنین ممکن است ضرایب معلوم رشنال همواره در اختیار کاربران قرار نگیرد. در غیاب مدل سنجنده، معادلات رشنال با استفاده از اطلاعات کنترلی بسیاری، با توزیع مناسب، قابل حل است (یاوری، ۱۳۸۵).

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اطلاعات کنترلی مورد استفاده شامل نقاط، خطوط و سطوح می‌شود. در این بین خطوط کنترلی، با توجه به مزایای مطرح‌شده، گزینه مناسبی برای این منظور محسوب می‌شوند. به همین دلیل در این مقاله، حل معادلات رشنال با استفاده از خطوط کنترلی و نیز تلفیق آن با نقاط کنترلی از نظر دقت و توانایی حذف خطاهای سیستماتیک بررسی شده است. از این‌رو در این بخش، در مورد روش‌های استفاده از خطوط کنترلی در حل معادله رشنال به‌طور خلاصه بحث کرده‌ایم و خوانندگان برای توضیحات بیشتر به یاوری (۱۳۹۴) ارجاع داده می‌شوند.

به‌منظور استفاده از عوارض خطی در معادلات ریاضی، مدل‌های گوناگونی مطرح شده است (Teo, 2013; Elaksher, 2011; Li & Shi, 2014). در روش الکشر^۱ (2011)، مدل جدیدی معرفی شده است که فقط برای معادلات ریاضی ساده همانند افاین به‌کار می‌رود. همچنین فرمول منتج در این روش مشابه مدل بیان‌شده برای حل نقطه‌ای نیست که در حقیقت ترکیب انواع عوارض (خطی و نقطه‌ای) را با مشکل مواجه می‌کند. در بررسی تئو (۲۰۱۳)، فرم برداری و پارامتریک عوارض خطی در فضای تصویر و هر نقطه واقع روی خط متناظر در فضای زمین مشابه با روش شنک (2003, 2004) برای حل تابع ترانفورماسیون رشنال سنتی و نیز روند جبران بایاس مطرح شده است.

1. ephemeris data
2. Partial images
3. Terrain-Independent
4. Terrain-Dependent
5. Bias-compensation
6. Elaksher

در مورد پارامترهای سنجنده، همچون داده‌های افریز^۱ و یا پارامترهای توجیه داخلی و خارجی؛^۳ قابلیت به‌کارگیری این معادلات برای تصاویر غیرکامل^۲ (این تصاویر در معادلات پارامتریک قابل استفاده نیستند)؛^۴ سادگی محاسباتی همراه با زمان اجرای سریع این معادلات در مقایسه با معادلات پارامتریک. از میان معادلات غیرپارامتریک، معادلات رشنال به این دلیل که همه مزایای معادلات غیرپارامتریک را دارند به مدل‌های بسیار مناسبی تبدیل شده‌اند و بسیار مورد توجه محققان فتوگرامتری و سنج از دور قرار گرفته‌اند. با توجه به توضیحات، در این مقاله مسئله استفاده از خطوط کنترلی و تلفیق آن با نقاط کنترلی در تخمین پارامترهای معادله رشنال به‌منظور ارزیابی دقت و توانایی آنها در حذف خطاهای سیستماتیک بررسی شده است.

۲- حل معادلات رشنال با استفاده از اطلاعات کنترلی

معادلات رشنال به دو صورت قابل حل است: مستقل از زمین^۳ و وابسته به زمین^۴. در روش مستقل از زمین، پارامترهای معادله رشنال و یا همان ضرایب معلوم رشنال با استفاده از مدل سنجنده و از سوی کمپانی عرضه‌کننده تصاویر حل و به‌همراه مجموعه‌ای از تصاویر عرضه می‌شود. از آنجاکه برای حل این معادلات از مدل سنجنده استفاده شده است، می‌توان این معادلات را جایگزین مدل‌های پارامتریک دانست؛ هرچند که این ضرایب دارای مقداری خطای اولیه‌اند که برای کاهش آنها باید از روش‌های جبران بایاس^۵ استفاده کرد (Tong et al., 2010). دقت ضرایب رشنال پس از این روند با دقت معادلات پارامتریک قابل قیاس است. چون پارامترهای توجیه داخلی و خارجی و مدل سنجنده برای تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا از سوی کمپانی‌های عرضه‌کننده تصاویر در اختیار کاربران قرار نمی‌گیرد، به‌دست‌آوردن ضرایب رشنال براساس روش‌های مستقل از زمین برای کاربران نهایی

در نتیجه، برای حل یک معادله ریاضی با n پارامتر مجهول دست کم نیاز به $n/2$ خط کنترلی است. این مدل را می‌توان به روش مستقیم و یا تکراری مشابه مدل رشنال نقطه‌ای حل کرد.

۳- نتایج تجربی و ارزیابی دقت

۳-۱- داده مورد استفاده

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، از یک تصویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا استفاده شده است. تصویر مورد استفاده تصویر GeoEye-1 از شهر ارومیه در شمال غرب ایران با آزمون اسکن $269/71$ درجه و ابعاد 30784×19220 پیکسل و نیز اندازه پیکسل $0/5$ متر است. همچنین نقشه $1:2000$ منطقه مورد نظر به منزله داده برداری به کار رفته است. برای این منظور، ابتدا 132 خط در فضای تصویر و 276 خط در فضای زمین استخراج شده‌اند. سپس با استفاده از یک روش تناظری جدید با عنوان تناظریابی ساختاری بر اساس عوارض خطی^۱ و یا به اختصار SLIM (Yavari et al., 2016) تناظر 91 خط متناظر مشخص شده است. این خطوط، در نقش خطوط کنترلی^۲، به‌طور مستقیم برای حل معادله رشنال استفاده شده است. همچنین 84 نقطه کنترلی نیز استخراج شده که از این تعداد 40 نقطه را نقاط کنترل زمینی^۳ و بقیه را نقاط چک زمینی^۴ در نظر گرفته‌ایم. مجموعه داده مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

به منظور بهره‌گیری از عوارض خطی در معادلات ریاضی، در این مقاله از فرم پارامتریک خط در فضای تصویر بر اساس رابطه (۱) استفاده شده است.

$$y = mx + b \quad \text{رابطه (۱)}$$

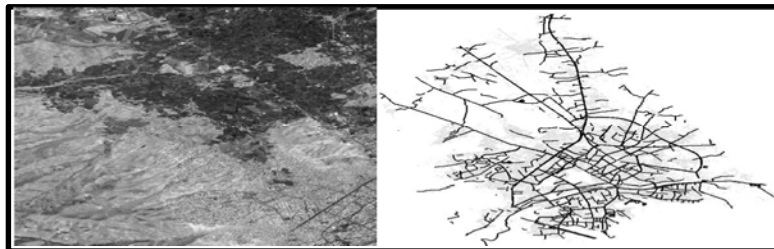
در این معادله، (x, y) مختصات نقاط ابتدا و انتهای خطوط در فضای تصویر و (m, b) پارامترهای خط‌اند.

به منظور تعریف خطوط در فضای زمین در معادلات ریاضی، می‌توان از مختصات ابتدا و انتهای این خطوط بهره مستقیم برد. در این صورت برای انتقال از فضای تصویر به زمین، بر اساس عوارض خطی رابطه (۲) برقرار است.

$$\begin{cases} x = F(X, Y, Z) \\ y = G(X, Y, Z) \end{cases} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این معادله، (x, y) مختصات در فضای تصویر و (X, Y, Z) مختصات در فضای زمین است. همچنین دو تابع F و G معادلات مورد نظر انتقال بین دو فضا به‌شمار می‌روند. این معادله می‌تواند یک معادله رشنال استاندارد سنتی برای انتقال از فضای زمین به تصویر با استفاده از تقسیم دو چندجمله‌ای باشد. از آنجاکه در بیشتر کاربردهای فتوگرامتری فرض می‌شود که مخرج دو چندجمله‌ای یکسان است، در این مقاله نیز از معادلات رشنال با مخرج مساوی استفاده شده است (Tao & Hu, 2001; Hu & Tao, 2002; Yavari et al., 2012 & 2013) و (یآوری، ۱۳۹۴).

این معادلات برای هر نقطه از یک خط در فضای زمین و خط متناظر آن در فضای تصویر صدق می‌کند.



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای به همراه نقشه $1:2000$ مورد استفاده از منطقه ارومیه

1. Structural Linear Feature-based Matching method (SLIM)
2. Ground Control Lines (GCLs)
3. Ground Control Points (GCPs)
4. Independent Check Points (ICPs)

۳-۲- تست‌های تجربی

در این بخش براساس داده مورد استفاده، معادله رشنال در دو حالت استفاده از خطوط کنترلی و نیز تلفیق خطوط و نقاط کنترلی حل شده و اثر آنها در دقت معادلات رشنال بررسی شده است. همچنین به منظور بررسی قابلیت مدل مورد نظر در حذف خطاهای سیستماتیک، دیاگرام بردار باقی‌مانده‌ها نیز برای نتایج به دست آمده قرار گرفته است. در این دیاگرام‌ها برای نمایش بهتر، از ضریب اغراق ۱۰۰۰ استفاده شده است. بر این اساس نتایج حل معادله رشنال برای ترم‌های گوناگون با استفاده از اطلاعات کنترلی در جدول ۱ آمده است. در این جدول، تعداد خطوط کنترلی، نقاط کنترل و نقاط چک به ترتیب ۹۱، ۴۰ و ۴۴ هستند. همچنین بهترین ترم برای هر یک از حالت‌ها در جدول زیر مشخص شده است. افزون بر این، دیاگرام بردار باقی‌مانده‌ها روی مجموعه داده مورد استفاده برای بهترین ترم در هر حالت نیز در شکل ۲ آورده شده است.

همان‌طور که از نتایج به دست آمده در جدول ۱ مشخص است، معادله رشنال سنتی با استفاده از خطوط کنترلی دقتی کمتر از حالت تلفیق اطلاعات کنترلی دارد. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که در بیشتر موارد، با افزایش ترم، دقت در هر دو حالت کاهش می‌یابد که این ممکن است به دلیل وابستگی بین ترم‌ها باشد. به عبارت دیگر، یکی از معایب معادلات رشنال نبود تفسیر فیزیکی پارامترهاست که سبب می‌شود انتخاب ترکیب بهینه ترم‌ها برای مجموعه داده مورد نظر به صورت سنتی (از روش سعی و خطا) عملاً امکان‌پذیر نباشد. در نتیجه، می‌توان گفت انتخاب ترم‌های وابسته به دلیل تفسیرناپذیری ترم‌ها در معادلات رشنال سبب کاهش دقت و نیز بروز خطاهای سیستماتیک روی نتایج نهایی می‌شود.

جدول ۱. اثر استفاده از خطوط کنترلی و نیز تلفیق خطوط و نقاط

کنترلی در دقت معادله رشنال در ترم‌های گوناگون		ترم‌های معادله رشنال
حل معادله رشنال با استفاده از خطوط کنترلی	حل معادله رشنال با استفاده از تلفیق خطوط و نقاط کنترلی	
RMSE نقاط چک (برحسب پیکسل)	RMSE نقاط چک (برحسب پیکسل)	
۴/۳۹	۵/۶۴	درجه ۱ (۱۱ ترم)
۳/۳۰	۴/۰۵	+XY
۲/۵۴	۴/۱۳	+XZ
۲/۸۳	۵/۰۲	+YZ
۱/۶۶	۳/۲۹	+X ²
۱/۰۳	۳/۷۴	+Y ²
۱/۴۲	۳/۵۱	+Z ²
۱/۱۶	۳/۵۲	+XYZ
۱/۹۷	۴/۹۰	+X ² Y
۲/۳۷	۴/۶۱	+X(Y ²)
۱۶/۹۵	۳/۶۳	+X ² Z
۵/۶۵	۴/۴۹	+X(Z ²)
۱۹/۶۰	۵/۸۵	+Y ² Z
۹/۹۳	۱۳/۳۷	+Y(Z ²)
۴۹/۴۴	۱۰/۴۱	+X ³
۴۳/۰۳	۴/۴۹	+Y ³
۲۹/۶۹	۴/۵۴	+Z ³

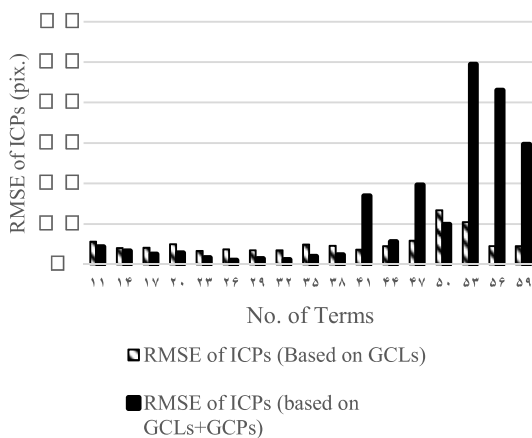
از دیگر سو دیاگرام بردار باقی‌مانده‌ها (شکل ۲. الف) وجود خطاهای سیستماتیک چشمگیر در نتایج نهایی را در حالت استفاده از خطوط کنترلی نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲. ب نشان می‌دهد که تلفیق اطلاعات کنترلی می‌تواند تأثیر بسیاری در کاهش خطاهای سیستماتیک داشته باشد. دلیل آن، افزون بر موارد مطرح شده، می‌تواند به ماهیت خطوط به‌منزله اطلاعات کنترلی مربوط باشد.

۳-۳- ارزیابی دقت

براساس نتایج به دست آمده، می‌توان گفت:

۱. به رغم مزایای بیان شده برای معادلات رشنال، این معادلات و دیگر مدل‌های غیرپارامتریک معایبی دارند شامل: حساسیت این مدل‌ها به تعداد، توزیع

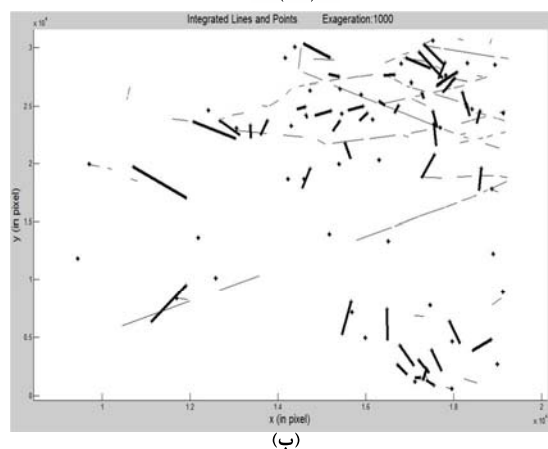
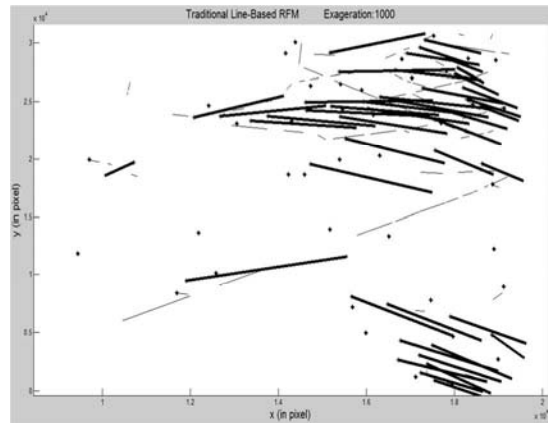
انباشتگی پارامترها^۱ و نیز جلوگیری از حذف خطاهای سیستماتیک از طریق مدل می‌شود. به همین دلیل در هیچ‌یک از دو حالت استفاده از خطوط کنترلی و نیز تلفیق اطلاعات کنترلی، مدل قادر به رسیدن به دقت زیر پیکسل^۲ نیست (شکل ۳).
 ۲. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که با افزایش ترم‌ها دقت نتایج در بیشتر موارد کاهش می‌یابد. این امر ممکن است به دلیل خطای انباشتگی پارامترهای ایجادشده بر اثر انتخاب ترم‌های وابسته غیرضروری و نیز کاهش درجه آزادی باشد (شکل ۳).
 ۳. همچنین دقت حل مدل مورد نظر با استفاده از خطوط کنترلی به‌مراتب کمتر از حالت تلفیقی است (شکل ۳).



شکل ۳. نمودار RMSE نقاط چک در دو حالت حل براساس خطوط کنترلی و نیز حالت تلفیقی

۴. افزون بر این، دیاگرام بردار باقی‌مانده‌ها نیز نشان می‌دهد که نتایج استفاده از خطوط کنترلی شامل مقادیر بیشتری از خطاهای سیستماتیک‌اند که با تلفیق اطلاعات کنترلی، افزون بر افزایش دقت، میزان این خطاها نیز به‌شدت کاهش می‌یابد؛ هرچند هیچ‌یک از حالت‌ها قادر به حذف کامل خطاهای سیستماتیک از روی نتایج نیستند.
 ۵. علاوه بر دلایل مطرح‌شده در بالا نتایج به‌دست‌آمده چه

1. over-parameterization errors
 2. sub-pixel accuracy



شکل ۲. دیاگرام بردار باقی‌مانده‌ها برای بهترین ترم‌های معادله رشنال از جدول (الف: الف) با استفاده از خطوط کنترلی؛ (ب) با استفاده از تلفیق خطوط و نقاط کنترلی

(مسطحاتی و ارتفاعی) و دقت اطلاعات کنترلی؛ حساسیت به درجه انتخابی چندجمله‌ای‌ها (عوامل گوناگونی همچون توپوگرافی، توزیع، دقت و تعداد اطلاعات زمینی به‌همراه نوع و هندسه تصاویر مورد استفاده در تعیین ترم و درجه مناسب چندجمله‌ای مؤثر است)؛ و در نهایت نبود تفسیر فیزیکی پارامترهای معادله رشنال. به همین دلیل، وابستگی ترم‌ها سبب می‌شود روند یافتن ترکیب مناسب ترم‌ها معمولاً ناممکن باشد. استفاده از درجه و ترکیب نامناسب ترم‌ها، افزون بر افزایش تعداد اطلاعات کنترلی مورد نیاز برای حل پارامترهای مجهول سبب بروز خطای اضافی با نام خطای

که وابسته به اطلاعات کنترلی مورد استفاده برای حل پارامترهای مجهول است، به شدت متأثر از این اطلاعات و نیز وابسته به رویه برازش داده شده بر آن‌اند. این موضوع سبب بروز خطایی با عنوان انباشتگی پارامترها می‌شود که بر اثر انتخاب ترم‌های وابسته نامناسب رخ می‌دهد. به همین دلیل همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، می‌توان معایب اصلی معادلات رشنال را این‌گونه بیان کرد:

۱. نبود تفسیر فیزیکی پارامترهای مجهول که منجر به استفاده از ترم‌های نامناسب بسیاری می‌شود؛
 ۲. نیاز این معادلات به استفاده از اطلاعات کنترلی بسیار، به دلیل انتخاب نادرست ترم‌ها؛
- در نتیجه، یافتن ترم مناسب معادلات رشنال به‌طور سنتی ناممکن است. از دیگر سو استفاده از یک ترکیب وابسته، علاوه بر معرفی خطای انباشتگی پارامترها، سبب می‌شود مدل قادر به حذف خطاهای سیستماتیک نباشد. این مشکلات تعداد اطلاعات کنترلی مورد نیاز را افزایش چشمگیری می‌دهد. بر این اساس، اثر روش‌های بهینه‌سازی در یافتن ترم‌های بهینه در مقاله دیگری از نویسندگان این مقاله بررسی شده است. افزون بر این، از نتایج مشخص می‌شود که دقت معادله رشنال بر پایه تلفیق اطلاعات کنترلی (نقاط و خطوط) بیشتر از خطوط کنترلی به تنهایی است. به عبارت دیگر، حل معادله رشنال با استفاده از خطوط کنترلی به دقت در حدود ۳ پیکسل رسیده است که با تلفیق نقاط و خطوط کنترلی، این دقت به حدود ۱ پیکسل ارتقا پیدا کرده است. از سوی دیگر، دیگرام بردار باقی‌مانده‌ها نیز قابلیت اطلاعات تلفیقی برای کاهش خطاهای سیستماتیک را، در مقایسه با حل براساس خطوط کنترلی، نشان می‌دهد. دقت کمتر در معادلات بر پایه خطوط کنترلی چه بسا به دلیل ویژگی‌های این عوارض باشد. به دیگر سخن، تلفیق خطوط و نقاط کنترلی سبب ارتقای دقت مدل و نیز کاهش بسیار خطاهای سیستماتیک می‌شود؛ هر چند هیچ‌یک از دو حالت مورد بررسی، به دلیل طبیعت معادلات

- بسا به دلیل ویژگی‌های خطوط به عنوان اطلاعات کنترلی نیز باشد. در این صورت می‌توان گفت:
- برای هر خط کنترلی فرض می‌شود که تمامی نقاط قرار گرفته روی آن، در فضای تصویر، رفتار خطای مشابهی با نقاط ابتدا و انتهای آن دارند. هر چند در تصاویر پوش‌بروم (همانند تصویر مورد استفاده در تست‌ها) یک خط کنترلی روی چندین خط تصویری با هندسه‌های متفاوت قرار می‌گیرد. همچنین این نوع از تصاویر خطاهای پانورامیک دارند. این موضوع ممکن است یکی از دلایل معرفی خطاهای سیستماتیک، به ویژه در جهت y ، با استفاده از خطوط کنترلی باشد.
 - از آنجاکه مدل‌های غیر پارامتریک (همچون معادله رشنال) به‌طور ذاتی درون‌یابی انجام می‌دهند، یک رویه به اطلاعات کنترلی مورد استفاده برازش می‌دهند. این رویه ممکن است برای یک منطقه با توپوگرافی خاص (برای نمونه، منطقه شهری) مناسب باشد. هر چند تصاویر ماهواره‌ای، به دلیل پوشش زیاد، ذوعارضه‌اند و در نتیجه این رویه نمی‌تواند برای همه مناطق موجود در تصویر مناسب باشد.
 - ۶. بر این اساس، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که یک خطای اضافی در معادلات بر پایه خطوط کنترلی معرفی می‌شود. این خطا، در مقایسه با حل براساس تلفیق اطلاعات کنترلی، سبب بروز خطاهای سیستماتیک بیشتر می‌گشود. افزون بر این چه بسا این موضوع دلیل دقت کمتر این معادلات در حالت استفاده از خطوط کنترلی به تنهایی نیز باشد.

۴- نتیجه‌گیری

به منظور انتقال بین دو فضای تصویر و زمین از معادله رشنال استفاده شده است زیرا مزایای منحصر به فردی دارد همچون عمومیت داشتن و نیاز نداشتن به اطلاعات اولیه در مورد پارامترهای توجیه داخلی و خارجی و نیز مدل سنجنده. هر چند این معادلات، به دلیل ماهیتشان

sation in Rational Functions for Ikonos Satellite Imagery, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69(1), PP. 53–57.

Fraser, C.S. & Yamakawa, T., 2004, **Insights into the Affine Model for High-resolution Satellite Sensor Orientation**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 58, PP. 275–288.

Goshtasby, A.A., 2005, **2-D and 3-D Image Registration for Medical**, Remote Sensing, and Industrial Applications, Wiley.

Habib, A. & Kelley, D., 2001, **Automatic Relative Orientation of Large Scale Imagery over Urban Areas Using Modified Iterated Hough Transform**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 56, PP. 29–41.

Habib, A., Morgan, M., Kim, E.M. & Cheng, R., 2004, **Linear Features in Photogrammetric Activities**, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, Automated Geo-Spatial Data Production and Updating, P. 610, 12-23 July.

Hu, Y. & Tao, C.V., 2002, **Updating Solutions of the Rational Function Model Using Additional Control Information**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68(7), PP. 715–723.

Jaw, J. & Perny, N., 2008, **Line Feature Correspondence between Object Space and Image Space**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 74(12), PP. 1521–1528.

Junior, J.M. & Tommaselli, A.M.G., 2013, **Exterior Orientation of CBERS-2B Imagery Using Multi-feature Control and Orbital Data**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79, PP. 219–225.

Li, Ch. & Shi, W., 2014, **The Generalized-Line-based Iterative Transformation Model for Imagery Registration and Rectification**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11 (8), PP. 1394–1398.

Liu, Z., An, J. & Jing, Y., 2012, **A Simple and Robust Feature Point Matching Algorithm Based on Restricted Spatial Order Constraints for Aerial Image Registration**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(2), PP. 514–527.

غیرپارامتریک که پیش‌تر اشاره شد، قادر به حذف کامل خطاهای سیستماتیک نیست.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از سازمان نقشه‌برداری کشور برای در اختیار قراردادن نقشه‌های ۱:۲۰۰۰ شهر ارومیه سپاسگزارند.

۶- منابع

یآوری، س.، ۱۳۹۴، زمین‌مرجع‌سازی اتوماتیک تصاویر با توان تفکیک بالای ماهواره‌ای با استفاده از مدل‌های ریاضی سه‌بعدی غیرپارامتریک، رسالهٔ دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ ژئودزی و ژئوماتیک، دپارتمان فتوگرامتری و سنجش از دور.

یآوری، س.، ۱۳۸۵، تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای مخدوش‌شده با استفاده از مدل‌های ریاضی سه‌بعدی غیرپارامتریک، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ ژئودزی و ژئوماتیک، دپارتمان فتوگرامتری و سنجش از دور.

Akav, A., Zalmanson, G.H. & Doytsher, Y., 2004, **Linear Feature Based Aerial Triangulation, Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 12–23 July, Istanbul, Turkey, 35 (B/3), PP. 7–12.

Dare, P. & Dowman, I., 2001, **An Improved Model for Automatic Feature-based Registration of SAR and SPOT Images**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 56(1), PP. 13–28.

Elaksher, A., 2011, **Potential of Using Automatically Extracted Straight Lines in Rectifying High Resolution Satellite Images**, ASPRS 2011 Annual Conference Milwaukee, Wisconsin, May 1–5.

Fraser, C. & Hanley, H., 2003, **Bias Compen-**

- Lu, L., Zhang, Y., Tao, P., Zhang, Z. & Zhang, Y., 2013, **Estimation of Transformation Parameters between Center-Line Vector Road Maps and High Resolution Satellite Images**, Photogrammetric Record, 28(142), PP. 130–144.
- Schenk, T., 2003, **Progress in Automatic Aerial Triangulation**, Photogrammetric Week, available: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo03/schenk.pdf>.
- Schenk, T., 2004, **From Point-based to Feature-based Aerial Triangulation**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 58, PP. 315–329.
- Song, W., Keller, J.M., Haithcoat, T.L., Davis, C.H. & Hinsin, J.B., 2013, **An Automated Approach for the Conflation of Vector Parcel Map with Imagery**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 6(9), PP. 535–543.
- Tao, C.V. & Hu, Y., 2001, **A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67(12), PP. 1347–1357.
- Tao, C.V. & Hu, Y., 2002, **3D Construction Methods Based on the Rational Function Model Photogrammetric Processing**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68(7), PP. 705–714.
- Teo, T. & Chen, L., 2010, **The Registration of 3D Models and a 2D Image Using Point and Line Features**, ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5–7, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7^a.
- Teo, T., 2013, **Line-based Rational Function Model for High-resolution Satellite Imagery**, International Journal of Remote Sensing, 34(4), PP. 1355–1372.
- Tong, X., Liu, Sh. & Weng, Q., 2010, **Bias-corrected Rational Polynomial Coefficients for High Accuracy Geo-positioning of QuickBird Stereo Imagery**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65, PP. 218–226.
- Valadan Zoej, M.J. & Petrie, G., 1998, **Mathematical Modeling and Accuracy Testing of SPOT Level 1B Stereo pairs**, Photogrammetric Record, 16(91), PP. 67–82.
- Valadan Zoej, M.J. & Sadeghian, S., 2003, **Orbital Parameter Modeling Accuracy Testing of IKONOS Geo image**, Photogrammetric Journal of Finland, 18(2), PP. 70–80.
- Valadan Zoej, M.J., Mokhtarzade, M., Mansourian, A., Ebadi, H. & Sadeghian, S., 2007, **Rational Function Optimization Using Genetic Algorithms**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9(4), PP. 403–413.
- Yavari, S., Valadan Zoej, M.J., Mokhtarzade, M. & Mohammadzadeh, A., 2012, **Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm in Rational Function Model Optimization**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, , XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- Yavari, S., Valadan Zoej, M.J., Mohammadzadeh, A. & Mokhtarzade, M., 2013, **Particle Swarm Optimization of RFM for Georeferencing of Satellite Images**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10(1).
- Yavari, S., Valadan Zoej, M.J., Sahebi, R. & Mokhtarzade, M., 2016, **An Automatic Novel Structural Linear Feature-based Matching Based on New Concepts of Mathematically Generated Lines and Points**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, In Press.
- Zang, W., Lin, J., Zhang, B., Tao, H. & Wang, Z., 2011, **Line-Based Registration For UAV Remote Sensing Imagery Of Wide-Spanning River Basin**, 19th International Conference on Geoinformatics.
- Zhang, Z. & Zhang, J., 2004, **Generalized Point Photogrammetry and its Application**, Proceedings of The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, 35(B/5), PP. 77–81, 12–23 July.
- Zitova, B. & Flusser, J., 2003, **Image Registration Methods: A Survey**, Image and Vision Computing, 21, PP. 977–1000.