

Comparison of Direct and Indirect Georeferencing Methods Using Satellite Linear Array Images

A. Izadipour^{1*}, B. Akbari², A. Sharifi³ and M. Yousefzade⁴

1 and 2. Department of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University

3. Department of School of Surveying and Geospatial Engineering, Tehran University

4. Department of Geographic Information Science and Earth Observation, University of Twente, Netherlands

*Postal Code: 1411713116, Tehran, IRAN

izadipour@modares.ac.ir

Comparison of direct and indirect methods for georeferencing of satellite linear array stereo images is proposed in this paper. In direct method, collinear condition and orbital elements are used for geolocation of pixels and ground control points (GCPs) are used in indirect method. After geolocation of initial points, a polynomial transformation is used to change pixels coordinates into corresponding geographical values. We validate these methods through experiment with SPOT-4 and IRS-P6 images. Experimental results indicate that indirect method can be used for georeferencing of satellite linear array images and the accuracy is as much as or even better than that of the direct method but it is time- and cost-consuming and also needs operator.

Keywords: Indirect geometric correction method, Direct geometric correction method, Georeferencing, Collinear condition, Ground control point, Resampling

1. PhD Student (Corresponding Author)
2. Assistant Professor
3. PhD Student
4. PhD Student

مقایسه روش‌های تصحیح هندسی مستقیم و غیر مستقیم با استفاده از تصاویر آرایه خطی ماهواره‌ای

احمد ایزدی پور^{۱*}، بهزاد اکبری^۲، علیرضا شریفی^۳ و میثم یوسفزاده^۴

۱ و ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

۴- دانشکده علوم اطلاعات جغرافیایی و مشاهدات زمین، دانشگاه تونته هلند

*تهران، کدپستی: ۱۴۱۱۷۱۳۱۱۶

izadipour@modares.ac.ir

در این مقاله، تصحیح هندسی تصاویر آرایه خطی ماهواره‌ای با استفاده از دو روش مستقیم و غیر مستقیم انجام می‌شود. در روش مستقیم برای تعیین مختصات زمینی، پیکسل‌ها از پارامترهای مداری ماهواره و شرط هم‌خطی استفاده می‌شود. در روش غیر مستقیم، نقاط کنترل زمینی برای این منظور به کار گرفته می‌شود. پس از تعیین مختصات زمینی تعدادی از پیکسل‌ها، بقیه پیکسل‌های تصویر با استفاده از تبدیل چند جمله‌ای درجه دو بر روی زمین نگاشت می‌شوند. نتایج اعمال این دو روش بر تصاویر سنجنده LISS-4 ماهواره IRS-P6 و ماهواره SPOT-4، مقایسه و تحلیل آن گزارش شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، در روش غیر مستقیم نسبت به روش دیگر، با صرف هزینه و زمان بیشتر می‌توان به دقت به مراتب بهتر دست یافت. در مقابل از مزایای روش مستقیم می‌توان به مستقل بودن از موقعیت زمینی، عدم نیاز به اپراتور و صرف هزینه و زمان اندک برای تصحیح اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: روش غیرمستقیم تصحیح هندسی، روش مستقیم تصحیح هندسی، زمین مبنا کردن، شرط هم‌خطی، نقطه کنترل زمینی (GCP)، نمونه‌برداری مجدد

ECR	سیستم مختصات زمین ثابت
$(\theta_g, \lambda_g, h_g)$	مختصات ژئودتیک
(X, Y, Z)	بردار موقعیت در سیستم مختصات ECR
ECR	
V_{ECR}	سرعت ماهواره در سیستم مختصات ECR
R_x	آرایه دوران حول محورهای X
R_z	آرایه دوران حول محور Z
R_L^g	آرایه تبدیل از سیستم مختصات ژئودتیک به محلی
n	تعداد کل CCD سنجنده آرایه خطی
(X_0, Y_0, Z_0)	مختصات ماهواره در سیستم مختصات محلی مداری
φ_c	عرض جغرافیایی با فرض کرویت زمین
φ_g	عرض جغرافیایی با فرض بیضوی بودن زمین

علائم و اختصارات

f	فاصله کانونی
e	فشرده‌گی بیضوی زمین
a	قطر بزرگ زمین
b	قطر کوچک زمین
θ	زاویه side real
ECI	سیستم اینرشیال زمین مرکز

۱. دانشجوی دکتری (نویسنده مخاطب)

۲. استادیار

۳. دانشجوی دکتری

۴. دانشجوی دکتری

مقدمه

در رویکرد جزء به جزء، عوامل مختلف اعوجاجات شناسایی شده و به ترتیب اثر معکوس آنها بر روی تصویر اعمال می‌شود. پس از اعمال تغییرات لازم، با استفاده از مختصات چهار گوشه تصویر که به همراه تصویر توسط ماهواره به زمین ارسال می‌شود، تصحیح هندسی انجام می‌شود [۳].

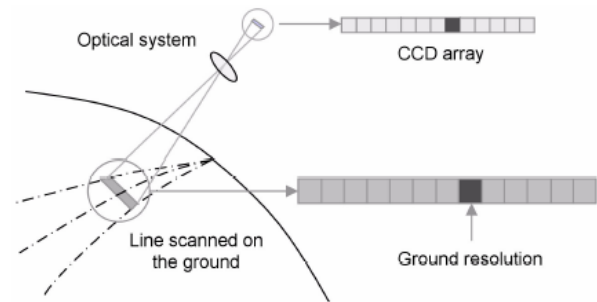
در رویکرد تصحیح یکجا، با ارائه یک مدل کلی، تمامی تصحیحات لازم به تصویر اعمال شده و به صورت یکجا تصویر زمین‌مبنای^۷ می‌شود. استفاده از این رویکرد بستگی به میزان دسترسی به اطلاعات افرید^۸ دارد.

همچنین روش‌هایی نیز وجود دارند که از ترکیب این دو رویکرد برای تصحیح هندسی استفاده می‌کنند. در این روش‌ها، بخشی از اعوجاجات که اثرات قابل توجه و عمدتاً غیریکنواختی دارند، به صورت جزء به جزء تصحیح شده و مابقی تصحیحات، به همراه زمین‌مبنا کردن، به صورت یکجا انجام می‌شود [۳].

در روش تصحیح با استفاده از GCP (روش مستقیم)، از یک تابع نگاشت بهره می‌گیریم. این تابع نگاشت، از حل دستگاه معادلات با مقادیر اولیه^۹ GCP و معیار کمترین مربعات خطا به دست می‌آید. در نهایت تصویر خام به وسیله تابع نگاشت به تصویر تصحیح شده با مختصات زمینی تبدیل می‌شود [۳].

روش کرسی^۹ [۴] جزء اولین کارهای ارائه شده روش مستقیم است که در آن موقعیت ماهواره از روی روابط معلوم مداری استخراج می‌شود و تغییرات دوران‌ها با استفاده از یک تابع ساده چندجمله‌ای مدل‌سازی می‌شود. برای حل توجیه داخلی با استفاده از self calibration دو پارامتر اضافی برای تصحیحات فاصله کانونی و مرکز تصویر به معادلات اضافه می‌شود. پارامترهای توجیه خارجی و پارامترهای اضافی در یک سرشکنی به روش کمترین مربعات محاسبه می‌شوند. در روشی دیگر، که دانشگاه کالج لندن (UCL) ارائه کرد، حرکت ماهواره با استفاده از دو پارامتر مداری (انومالی واقعی و زاویه راستگرد نقطه صعودی) به صورت تغییرات خطی زاویه‌ای مدل‌سازی شده و وارد معادلات شرط هم‌خطی می‌شود. در این روش، تغییرات زوایا به صورت نرخ تغییرات خطا بیان می‌شود [۵]. در زمینه روش غیرمستقیم تصحیح هندسی، می‌توان به [۶] اشاره کرد که به ارزیابی دقت روش غیرمستقیم روی تصویر هوایی سنجنده‌ای با سه آرایه CCD خطی و سیستم اپتیکی تک لنزی، می‌پردازد. در مرجع [۷] برای مقایسه بین دو روش مستقیم و غیرمستقیم یک مدل شبیه‌ساز سخت‌افزاری پیشنهاد داده است. این شبیه‌ساز با عکس‌برداری از یک تصویر با استفاده از دوربین دیجیتال (Canon 500D) با رزولوشن ۱۵ مگاپیکسل، تصویری

امروزه، طیف وسیعی از سنجنده‌های گوناگون برای مشاهده و تصویربرداری زمین به کارگرفته می‌شوند. در میان آنها، سنجنده‌های آرایه خطی جایگاه ویژه‌ای دارند که به طور وسیع در تصویربرداری از سطح زمین، در مقیاس‌های مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سنجنده‌های آرایه خطی یک مجموعه از CCDها به صورت خطی در صفحه کانونی سنجنده قرار گرفته و یک سطر از تصویر را تشکیل می‌دهند که با حرکت ماهواره تصویر کامل تشکیل می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- تصویربرداری یک سطر در سنجنده آرایه خطی [۸]

تصویر خام یک سنجنده آرایه خطی که به این صورت تولید می‌شود، به دلایل مختلف دارای ارزش هندسی پایینی برای کارهای اندازه‌گیری است. برخی از این دلایل عبارتند از [۲]:

- همزمان نبودن تصویربرداری سطرهای تصویر
 - اختلاف زوایای نصب سنجنده بر روی ماهواره نسبت به سیستم مختصات ماهواره
 - اثر دوران زمین بر روی تصویر
 - اثر کرویت زمین
 - اختلاف ابعاد زمینی پیکسل‌های وسط و کناره‌های سطرها
- برای رفع این مشکلات از تصحیح هندسی استفاده می‌شود. تصحیح هندسی، به معنی جابه‌جا کردن موقعیت پیکسل‌های تصویر است تا آنها نسبت به هم در موقعیت درست قرار گیرند و تصویر با زمین منطبق شود. در نهایت باید یک سیستم مختصات زمینی به تصویر تصحیح شده اعمال شود. بنابراین، محصول نهایی به دست آمده از فرآیند تصحیح هندسی، یک تصویر دیجیتال است که هرکدام از پیکسل‌های آن دارای مختصات زمینی منحصر به فردی است.
- به طور کلی دو روش اصلی برای تصحیح هندسی وجود دارد: یکی روش مستقیم که شامل دو رویکرد جزء به جزء و یکجا^{۱۰} است؛ و دیگری روش غیرمستقیم که با استفاده از نقاط کنترل زمینی (GCP^{۱۱}) تصحیح هندسی انجام می‌شود [۱].

7. Georeference
8. Ephemerid
9. Krathy

5. Bulk
6. Ground Control Point

فراهم می‌کند که با دو روش مستقیم و غیرمستقیم به تصحیح هندسی آن می‌پردازد و با نرم‌افزار ERDAS به مقایسه دقت این دو روش می‌پردازد. به عبارت دیگر از تصویر هوایی یا ماهواره‌ای برای آزمایش دقت استفاده نشده است و پارامترهای توجیه داخلی و خارجی برای مدل شبیه‌ساز طراحی شده، در نظر گرفته شده است.

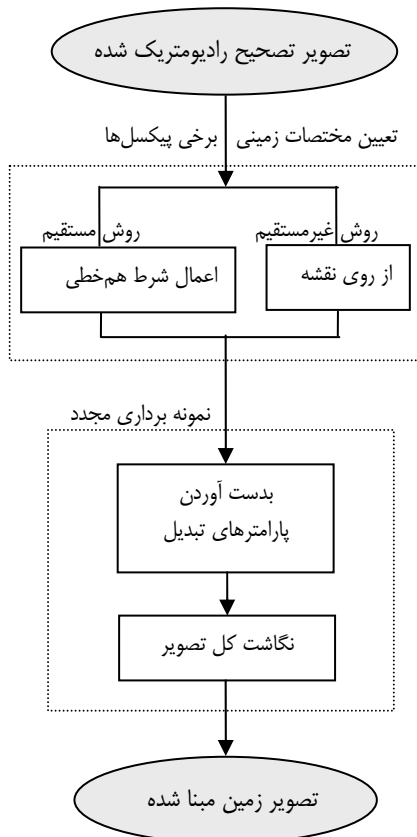
یوسف‌زاده و صادقیان، فرایند کامل زمین‌منا کردن تصاویر آراییه خطی با استفاده از پارامترهای مداری را برای تصاویر ماهواره IRS-P6 ارائه کردند [۸ و ۹]. آنها به علت عدم دسترسی به زوایای نصب سنجنده بر روی ماهواره و محاسبه این زوایا از روی نقاط واریسی، دقت تصحیح هندسی پایینی به دست آوردند. پس از آن نویسندگان به توسعه و ادامه کار آنها برای افزایش دقت روش مستقیم تصحیح هندسی و مقایسه با روش غیرمستقیم تصحیح هندسی پرداختند [۱۰]. در این مقاله، با توجه به دسترسی به فایل خام سنجنده LISS-4 ماهواره IRS-P6 و فایل خام ماهواره SPOT-4 به دنبال مقایسه این دو روش تصحیح هندسی هستیم.

روش کار

در این مقاله، برای تصحیح هندسی از دو روش، یکی روش استفاده از GCP و دیگری روش یکجا، بهره گرفته می‌شود. در طی فرایند تصحیح هندسی هدف این است که تصویر تصحیح رادیومتریک شده به تصویر زمین‌منا تبدیل شود. در شکل (۲) نحوه انجام تصحیح هندسی با استفاده از دو روش مستقیم و غیرمستقیم به منظور مقایسه این دو روش نمایش داده شده است.

در اولین مرحله، مختصات زمینی برخی از پیکسل‌های تصویر تعیین می‌شود. در روش غیرمستقیم به کمک نقشه می‌توان مختصات زمینی پیکسل‌های مورد نظر را تعیین کرد. در روش مستقیم این کار با استفاده از شبیه‌سازی پرتوهای نوری و حل معادله شرط هم‌خطی صورت می‌گیرد. در مرحله نمونه‌برداری مجدد^۱، با توجه به رابطه بین مختصات زمینی پیکسل‌های مورد نظر با مختصات تصویری آنها، پارامترهای تبدیل استخراج می‌شود که به کمک آنها می‌توان کل تصویر را به تصویر تصحیح شده زمین‌منا، نگاشت کرد.

محصول نهایی این فرایند تصویر زمین‌منا شده است. در این تصویر علاوه بر این که پیکسل‌ها به موقعیت واقعی خود منتقل شده‌اند هر یک دارای مختصات زمینی نیز هستند. مختصات زمینی می‌تواند به صورت طول و عرض جغرافیایی (λ, φ) یا مختصات کارتزین (x, y) در سیستم تصویر معین مانند UTM، بیان شود. در ادامه به توضیح هر یک از مراحل شکل (۲) خواهیم پرداخت.



شکل ۲- فلوجارت مقایسه دو روش مستقیم و غیرمستقیم در انجام تصحیح هندسی

تعیین مختصات زمینی از روی نقشه (روش غیرمستقیم)

به منظور تهیه GCP باید با توجه به رزولوشن تصویر ماهواره‌ای از نقشه‌هایی با دقت مناسب استفاده کرد. دقت مسطحاتی نقشه از معادله (۱) محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$\sigma_{x,y} = 2 \times 10^{-4} \times ScaleFactor \quad (1)$$

که Scale Factor عدد مقیاس نقشه است. با توجه به اینکه رزولوشن تصویر ماهواره‌ای LISS-4 حدود ۶ متر است، طبق معادله (۱) عدد مقیاس نقشه برای استخراج GCP عبارت است از [۱۱]:

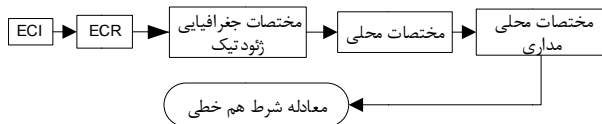
$$6 = 2 \times 10^{-4} \times ScaleFactor \Rightarrow ScaleFactor = 30000 \quad (2)$$

بنابراین، باید از نقشه‌های با مقیاس ۱:۳۰۰۰۰ یا بالاتر استفاده کرد که در این مقاله از نقشه‌های پوششی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح استفاده شده است.

نقاط کنترل باید در مناطقی انتخاب شوند که پایداری مناسب و کمترین تغییرات را داشته باشند. برای مثال در میان عوارض طبیعی نمی‌توان از لبه‌های رودخانه و دشت‌ها به عنوان GCP استفاده کرد.

سیستم مختصات محلی و سیستم مختصات محلی مداری. توضیحات تفصیلی در ارتباط با این سیستم‌های مختصات و تبدیل میان آنها در بخش بعدی ذکر خواهد شد.

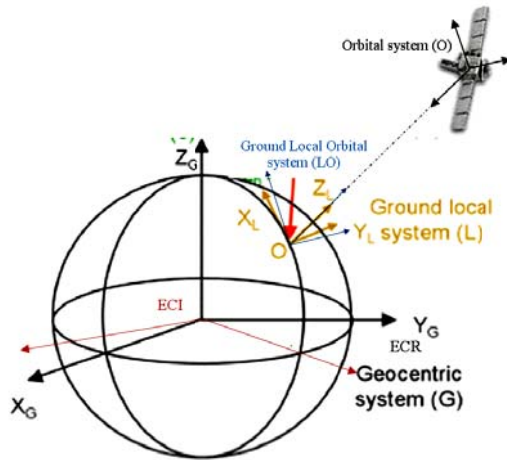
شکل (۳) مراحل تبدیل سیستم‌های مختصات برای زمین میناکردن تصویر را نشان می‌دهد. طی این فرآیند مختصات زمینی هر یک از پیکسل‌های مورد نظر به دست می‌آید.



شکل ۳- تبدیل سیستم‌های مختصات برای زمین میناکردن مستقیم تصویر

معرفی سیستم‌های مختصات

سیستم مختصات نقاط موجود در فایل اطلاعات افرمید، یک سیستم ECI سیستم ماناست که مبدأ آن در مرکز ثقل زمین قرار دارد و محور Z به سمت قطب شمال است. محور X بر روی صفحه استوا قرار داشته و جهت آن به سمت نقطه ورنال^{۱۹} است و محور Y به گونه‌ای است که سیستم مختصات راستگرد باشد (شکل ۴).



شکل ۴- مجموعه سیستم‌های مختصات: ECI، ECR (G)، محلی (L)، محلی مداری (LO)، روی ماهواره: مداری (O)

همان‌طور که در شکل (۳) دیدید، ابتدا باید این سیستم به سیستم مختصات زمین ثابت تبدیل شود. سیستم مختصات ECR نسبت به کره زمین و گردش آن کاملاً ثابت و بدون تغییر است. مرکز آن در مرکز ثقل زمین قرار دارد و محور Z به سمت قطب شمال است. محور X در راستای تقاطع استوا و نصف‌النهار مبدأ یا گرینویچ قرار دارد و محور Y نسبت به دو محور X و Z عمود بوده و سیستم راستگرد

الته روده‌های جاری در مابین کوه‌ها می‌توانند نقاط مناسبی باشند چون اثر فرسایش بر روی آنها تأثیر کمتری دارد و پایداری بیشتری دارند. در میان عوارض مصنوعی می‌توان از تقاطع جاده‌ها و گوشه ساختمان‌ها به‌عنوان GCP استفاده کرد.

تعیین مختصات زمینی با اعمال شرط هم‌خطی (روش مستقیم)

در این بخش، فرآیند استخراج مختصات زمینی برای تعداد مشخصی از پیکسل‌های تصویر با استفاده از پارامترهای مداری تشریح می‌شود. برای این منظور مراحل زیر اجرا می‌شود:

- استخراج اطلاعات افرمید

- استخراج اطلاعات تصویر

- محاسبه مختصات زمینی متناظر با مختصات تصویر

اطلاعات افرمید شامل تمامی اطلاعات مورد نیاز برای توجیه داخلی^{۱۱} و خارجی^{۱۲} تصویر است که برای تصحیح هندسی استفاده می‌شود و از روی داده‌های ارسالی ماهواره استخراج می‌شود. اطلاعات توجیه داخلی شامل فاصله کانونی، ابعاد CCD، زوایای قرارگیری دوربین نسبت به سیستم مختصات سکو که در سرآیند^{۱۳} تصویر وجود دارد [۱۲] و اطلاعات مربوط به اعوجاجات احتمالی CCDهاست. اطلاعات توجیه خارجی شامل زمان، بردار موقعیت ماهواره، بردار سرعت ماهواره، دوران سنجنده نسبت به راستای قائم و در جهت سطرها^{۱۴}، راستای قائم و در جهت مسیر پرواز^{۱۵} و حول راستای قائم^{۱۶} است.

فایل تصویر خام، حاوی مقادیر پیکسل هر سطر تصویر است. در ابتدای هر سطر یک سرآیند قرار دارد که در آن شماره و زمان برداشت سطر مورد نظر ثبت شده است. در ادامه این سرآیند اطلاعات پیکسل‌های تصویر قرار دارد. با تناظریابی بین زمان اطلاعات افرمید (که با فاصله زمانی هر ۰/۱۲۵ ثانیه تهیه می‌شود) و زمان سطرهای تصویر، سطر متناظر با اطلاعات افرمید تعیین می‌شود.

در مرحله بعد با حل معادله شرط هم‌خطی می‌توان مختصات زمینی هر پیکسل را پیدا کرد. برای به‌کارگیری این معادله باید اطلاعات موجود به سیستم مختصاتی منتقل شود که پارامترهای معادله شرط هم خطی در آن سیستم صدق کنند. برای رسیدن به این منظور، باید انتقال بین پنج سیستم مختصات انجام شود که این سیستم‌ها به ترتیب عبارتند از: سیستم اینرشیال زمین مرکز یا ECI^{۱۷}، سیستم مختصات زمین ثابت یا ECR^{۱۸}، سیستم مختصات مداری،

11. Interior Orientation
12. Exterior Orientation
13. Header
14. Roll
15. Pitch
16. Yaw
17. Earth Centered Inertial System
18. Earth Centered Reference System

۱۹. نقطه‌ای ثابت در فضا که امتداد تقاطع صفحه استوا و صفحه دوران زمین به دور خورشید است.

ژئودتیک یا همان طول و عرض جغرافیایی تبدیل می‌شود. اگر $(X, Y, Z)_{ECR}$ مؤلفه‌های مختصات ماهواره در سیستم ECR باشند، با استفاده از معادله (۴) می‌توان طول جغرافیایی ماهواره را به دست آورد. تعیین عرض جغرافیایی به سادگی امکان‌پذیر نیست و ابتدا نیازمند حل معادلات چهارگانه رابطه (۴) به روش تکرار است [۳].

$$\lambda_g = \tan^{-1}(Y/X)$$

$$\varphi_i = \text{Arc tan}\left(\frac{Z}{ri}\right) \quad e = \frac{a-b}{a} \quad (4)$$

$$Ni = \frac{a}{\sqrt{1-(2e-e^2)\text{Sin}^2\varphi_i}}$$

$$hi = \frac{Z}{\text{Sin}\varphi_i} - (1-e)^2 Ni$$

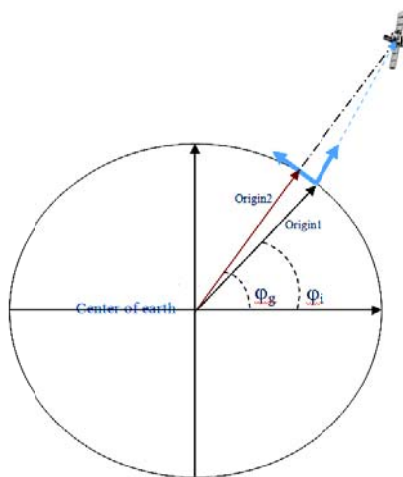
$$ri = \sqrt{X^2 + Y^2} \left[1 - (2e - e^2) \frac{Ni}{Ni + hi} \right]$$

تکرار این معادلات تا جایی ادامه می‌یابد که دقت مورد نیاز تأمین شود و مقدار φ_i تقریباً ثابت شود. عرض جغرافیایی به دست آمده نقطه‌ای از سطح بیضوی مبنا را مشخص می‌کند که بردار شتاب ثقل ماهواره از آن نقطه عبور می‌کند. این محل با محل برخورد بردار اتصال ماهواره به مرکز زمین متفاوت است. شکل (۵) به درک بهتر موضوع کمک می‌کند [۳].

با داشتن مختصات ماهواره در سیستم ECR می‌توان عرض جغرافیایی آن را با استفاده از معادله (۵) محاسبه کرد.

$$\varphi_c = \tan^{-1}\left(\frac{Z_{ECR}}{\sqrt{X_{ECR}^2 + Y_{ECR}^2}}\right) \quad (5)$$

$$\varphi_g = \tan^{-1}\left(\left(\frac{a}{b}\right)^2 \cdot \tan(\varphi_c)\right)$$



شکل ۵- نمایش عرض جغرافیایی تقاطع بردار شاغولی ماهواره روی بیضوی (φ_i) ، عرض جغرافیایی ماهواره (φ_g) ، بردار جابه‌جایی سیستم ECR به محلی (Origin1)، بردار جابه‌جایی نقاط زمینی به دست آمده از شرط هم‌خطی به سیستم ECR (Origin2).

است. برای ناظر زمینی، این سیستم مختصات نسبت به گذر زمان کاملاً ثابت و منحصر به فرد است.

سیستم مختصات محلی (L)، سیستم مختصات متعامدی است که مرکز آن بر روی سطح بیضوی قرار دارد و محور Z آن منطبق بر راستای شاغولی است که از مرکز ماهواره عبور می‌کند. مبدأ این سیستم نسبت به سیستم مختصات ECR دارای جابه‌جایی است و محورهای آن نسبت به این سیستم دوران دارد. با داشتن اطلاعات بیضوی مبنای زمین این دو سیستم مختصات به یکدیگر قابل تبدیل هستند. محور X این سیستم به سمت قطب شمال بوده و محور Y راستگرد است.

سیستم مختصات مداری (O)، سیستم مختصات متعامدی است که مبدأ آن در مرکز ماهواره قرار دارد و محور Z آن منطبق بر راستای شاغولی و در خلاف جهت محور Z سیستم مختصات محلی است. محور X و محور Y آن، به ترتیب در راستای بردار سرعت ماهواره (جهت حرکت ماهواره) و راستای عمود بر آن به صورت چپ‌گرد است. سیستم مختصات محلی مداری (LO)، سیستم مختصات متعامدی است که با سیستم مختصات محلی هم مبدأ بوده و محور Z آن بر محور Z این سیستم منطبق است. با این حال محورهای X و Y آن موازی محورهای X و Y در سیستم مختصات مداری هستند. دلیل استفاده از این سیستم مختصات، آن است که زوایای دوران سطرها، مسیر پرواز و حول راستای قائم، در این سیستم مختصات تعریف شده‌اند. شکل (۴) مبدأ و محورهای این سیستم‌های مختصات را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۳) دیدید، از مختصات جغرافیایی ژئودتیک نیز استفاده می‌شود که در آن، مانند ECR، هر نقطه زمینی مقداری منحصر به فرد دارد که مستقل از زمان بوده و مختصات هر نقطه با زوایای مرکزی زمین نسبت به محورهای X و Z سیستم ECR و همچنین ارتفاع نقطه از روی بیضوی بیان می‌شود. در ادامه روابط و تبدیلات این سیستم‌های مختصات به یکدیگر توضیح داده می‌شود.

برای تبدیل بردارهای مختصات و سرعت از سیستم ECI به ECR، از زاویه α^0 Side real که از اطلاعات افمیرید به دست آمده است، استفاده می‌شود (معادله ۳).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ECR} = R_Z(\theta) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ECI} \quad (2)$$

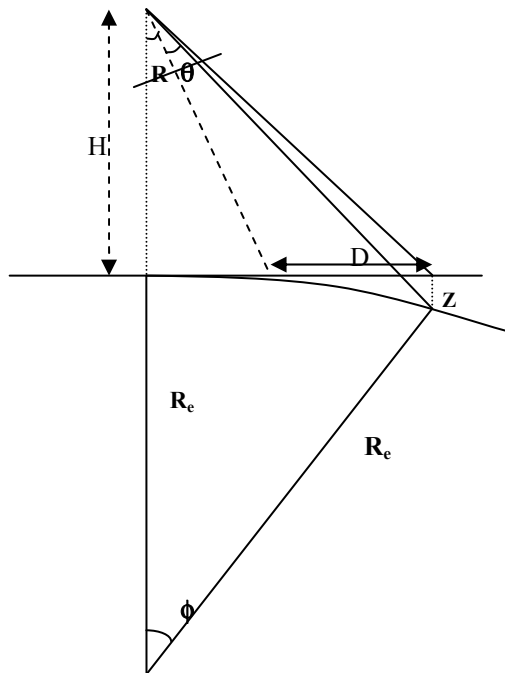
برای طی کردن مراحل بعدی، باید طول و عرض جغرافیایی ماهواره محاسبه شود. در این مرحله، مختصات ECR به مختصات

از آنجا که هدف از این فرایند، تعیین مختصات برای تعدادی از پیکسل‌های هر سطر تصویر است، مقدار پارامتر y بسته به موقعیت آن پیکسل می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در معادله (۸)، عناصر ماتریس دوران سنجیده نسبت به سیستم مختصات محلی مداری یعنی R_c^p است و Z تابعی از انحنای سطح زمین است.

$$\begin{aligned} \theta &= (i - n/2) \cdot IFOV \\ R_e \cdot \sin(\phi) &= (H + Z) \cdot \tan(Roll + \theta) \\ \Rightarrow \sin(\phi) &= \left(\frac{H + Z}{R_e} \cdot \tan(\theta + Roll) \right) \\ Z &= R_e - R_e \cos(\phi) \\ \Rightarrow \frac{R_e - Z}{R_e} &= \cos(\phi) = \sqrt{1 - \left(\frac{H + Z}{R_e} \tan(Roll + \theta) \right)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

نتیجه معادله (۹) به دست آمدن مختصات در سیستم مختصات محلی مداری با توجه به شکل (۶) است. با استفاده از معکوس ماتریس R_o^L مختصات نقطه در سیستم مختصات محلی واقع بر سطح بیضوی به دست می‌آید. سپس با استفاده از معکوس ماتریس R_L^g محورها با سیستم ECR هم‌جهت شده و با جمع این مقدار با بردار جابه‌جایی (معادله ۱۰) مرکز سیستم مختصات محلی در سیستم ECR مختصات نقطه مورد نظر در سیستم مختصات ECR به دست می‌آید [۱].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ECR} = inv(R_L^g) \cdot inv(R_o^L) \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Local\ Orbital} + \begin{bmatrix} \Delta X_g \\ \Delta Y_g \\ \Delta Z_g \end{bmatrix}_{ECR} \quad (10)$$



شکل ۶- تصحیح هندسی نسبت به انحنای زمین

بردار Origin1 بردار جابه‌جایی مبدأ سیستم مختصات از مرکز زمین به سطح بیضوی است و بردار Origin2 بردار جابه‌جایی از مرکز زمین به سطح زمین در راستای بردار مکان ماهواره است. در این مرحله باید مبدأ سیستم مختصات محلی بر روی بیضوی مشخص شود تا بتوان بردار جابه‌جایی از مبدأ سیستم ECR تا مبدأ این سیستم Origin1 را محاسبه کرد. طول و عرض ژئودتیک ماهواره و مبدأ سیستم مختصات محلی همسان هستند و تنها تفاوت آنها در ارتفاع است. معادله (۶)، معادلات تبدیل سیستم ژئودتیک به ECR را نشان می‌دهد. برای مبدأ سیستم مختصات محلی ارتفاع از سطح بیضوی (h_g) صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - (2e - e^2) \sin^2 \phi_g}} \quad (6)$$

$$\Delta X_g = (N + h_g) \cos \phi_g \cdot \cos \lambda_g$$

$$\Delta Y_g = (N + h_g) \cos \phi_g \cdot \sin \lambda_g$$

$$\Delta Z_g = [(1 - e)^2 N + h_g] \sin \phi_g$$

در معادله (۶)، پارامترهای ($\Delta X_g, \Delta Y_g, \Delta Z_g$) بردار جابه‌جایی مبدأ سیستم مختصات را در سیستم ECR نشان می‌دهد. با استفاده از طول و عرض جغرافیایی ماهواره، مقدار بردارهای موقعیت و سرعت ماهواره در سیستم مختصات محلی واقع بر سطح بیضوی تعیین می‌شود [۱].

$$R_L^g = R_x(90 - \phi_g) R_z(90 - \lambda_g)$$

$$X_L = R_L^g \cdot \begin{bmatrix} X & \Delta X_g \\ Y & \Delta Y_g \\ Z & \Delta Z_g \end{bmatrix}_{ECR} \quad (7)$$

$$V_L = R_L^g \cdot V_{ECR}$$

با تبدیل معادله (۷)، مرکز سیستم مختصات به سطح بیضوی منتقل می‌شود و بردارهای موقعیت و سرعت ماهواره یعنی X_L و V_L در سیستم مختصات محلی به دست می‌آید. در مرحله بعد باید سیستم مختصات نسبت به مسیر پرواز ماهواره توجیه شود، زیرا دوران‌های سه‌گانه ($Pitch$ و $Roll$ و Yaw) که نشان‌دهنده وضعیت ماهواره هستند در این سیستم مختصات تعریف شده‌اند. تبدیل از سیستم مختصات محلی به سیستم مختصات محلی مداری با استفاده از آرایه R_o^L انجام می‌شود. پس از محاسبه مختصات ماهواره در سیستم مداری، با استفاده از معادلات شرط هم‌خطی، مختصات نقطه بر روی زمین را تعیین کرد [۱].

$$R_c^p = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta & \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi + \sin \theta \sin \psi \cos \psi & \cos \theta \sin \psi - \sin \theta \sin \psi \cos \psi & -\sin \theta \cos \psi \\ \sin \theta \sin \psi - \cos \theta \sin \psi \cos \psi & \sin \theta \cos \psi + \cos \theta \sin \psi \cos \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}$$

$$y = (i - n/2) \times PixelSize$$

(۸)

$$X = -(Z - Z_0) \cdot \frac{r_{11}(0) + r_{12}(y) + r_{13}(-f)}{r_{31}(0) + r_{32}(y) + r_{33}(-f)} + X_0$$

$$Y = -(Z - Z_0) \cdot \frac{r_{21}(0) + r_{22}(y) + r_{23}(-f)}{r_{31}(0) + r_{32}(y) + r_{33}(-f)} + Y_0$$

روش تابع مکعبی از ۱۶ پیکسل مجاور مختصات تبدیل شده یک میانگین‌گیری وزن‌دار با تابع وزن سینک ساده شده (چندجمله‌ای درجه سه) انجام می‌شود. با توجه به شکل (۷)، روابط به صورت معادله (۱۲) است:

$$k=1,2,3,4$$

$$g(k) = -n(1-n^2)I_1(r+k-2, c-1) + (1-2n^2+n^3)I_1(r+k-2, c) + n(1+n-n^2)I_1(r+k-2, c+1) + n^2(1-n)I_1(r+k-2, c+2)$$

$$(12)$$

$$I_2(i, j) = m(1-m)^2 g(1) + (1-2m^2+m^3)g(2) + m(1+m-m^2)g(3) + m^2(1-m)g(4)$$

$$r = \text{Int}(y)$$

$$c = \text{Int}(x)$$

$$m = y - r$$

$$n = x - c$$

	$I_1(r-1, c-1)$	$I_1(r-1, c)$	$I_1(r-1, c+1)$	$I_1(r-1, c+2)$
	$I_1(r, c-1)$	$I_1(r, c)$	$I_1(r, c+1)$	$I_1(r, c+2)$
		$I_2(i, j)$	$I_1(r+1, c)$	
	$I_1(r+1, c-1)$	$I_1(r+1, c)$	$I_1(r+1, c+1)$	$I_1(r+1, c+2)$
	$I_1(r+2, c-1)$	$I_1(r+2, c)$	$I_1(r+2, c+1)$	$I_1(r+2, c+2)$

شکل ۷- درون‌یابی مکعبی میان ۱۶ پیکسل تصویر اولیه

شبیه‌سازی

در این بخش با استفاده از دو روش ذکر شده بر روی دو تصویر، تصحیح هندسی صورت گرفته و نتایج این دو روش با یکدیگر مقایسه می‌شوند. تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده یکی مربوط به سنجنده LISS-4 از ماهواره IRS-P6 (شکل ۸-الف) است که از منطقه‌ای مربوط به شرق چابهار با ابعاد 4000×4000 پیکسل تهیه شده است و دیگری سنجنده ماهواره SPOT-4 (شکل ۸-ب) است که از منطقه ورزنه استان فارس با ابعاد 6000×6000 پیکسل تهیه شده است. مشخصات این دو سنجنده در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

بدین ترتیب مختصات زمینی هرکدام از پیکسل‌های تصویر قابل تعیین است. نتایج حاصل از تابع محاسبه مختصات زمینی به صورت ماتریسی از مختصات ذخیره می‌شود. این ماتریس شامل مختصات سطر و ستون تصویر و مختصات ژئودتیک متناظر آن است. این ماتریس برای نمونه‌برداری مجدد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نمونه‌برداری مجدد

بعد از تعیین مختصات زمینی برخی از پیکسل‌های تصویر فرآیند نمونه‌برداری مجدد برای زمین مینا کردن کل تصویر صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده شد، نمونه‌برداری مجدد شامل دو مرحله است. در مرحله اول با استفاده از یک نگاشت، بین موقعیت پیکسل‌های تصویر دریافتی از ماهواره و مختصات زمینی آنها ارتباط برقرار می‌شود. اگر این تابع نگاشت مشخص شود، با مشخص کردن یک نقطه در تصویر (i, j) می‌توان موقعیت آن را در نقشه (X, Y) پیدا کرد. از آنجا که فرم دقیقی برای تابع نگاشت وجود ندارد، معمولاً آن را به صورت چند جمله‌ای درجه یک^{۲۱}، درجه دو^{۲۲}، درجه سه^{۲۳} یا بیشتر در نظر می‌گیرند. در شبیه‌سازی انجام شده از یک نگاشت درجه دو با هشت پارامتر به صورت معادله (۱۱) استفاده شده است:

$$X = a_1i + a_2j + a_3j^2 + a_4$$

$$Y = b_1i + b_2j + b_3j^2 + b_4$$

$$(11)$$

به این ترتیب با داشتن مختصات تصویر و مختصات زمینی متناظر برای چند نقطه، می‌توان ضرایب مجهول را به دست آورد. در مرحله بعد با استفاده از این تابع نگاشت می‌توان نگاشت کل تصویر را به دست آورد. برای این منظور با انتخاب مختصات زمینی می‌توان مختصات تصویر متناظر را پیدا کرده و سطح روشنایی آن را به مختصات زمینی مربوطه اختصاص داد. اما از آنجا که غالباً مختصات تصویر حاصل به صورت اعشاری به دست می‌آید و در مرکز پیکسل مشخصی از تصویر قرار نمی‌گیرد، با استفاده از برخی توابع نمونه‌برداری می‌توان درجه خاکستری مربوطه را از روی پیکسل‌های مجاور تعیین کرد. از مهم‌ترین این توابع می‌توان به تابع نزدیک‌ترین همسایگی^{۲۴}، تابع دوخطی^{۲۵} و تابع مکعبی یا درجه سه اشاره کرد [۱۳].

در روش نزدیک‌ترین همسایگی با گرد کردن مختصات تبدیل شده، مقدار درجه خاکستری پیکسل مربوطه انتخاب می‌شود. در روش دو خطی با میانگین‌گیری خطی وزن‌دار از درجه خاکستری چهار پیکسل مجاور، مختصات تبدیل شده و درجه خاکستری پیکسل مقصد تعیین می‌شود. در

21. Affine
22. Quadratic
23. Cubic
24. Nearest Neighbor
25. Bilinear

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{11} \\ X_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{11} & y_{11} \\ 1 & x_{12} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_4 \\ Y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{11} & y_{11} \\ 1 & x_{12} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

با توجه به استخراج تعداد ۱۲ عدد GCP، ماتریس‌های X و T و Y معلوم هستند و می‌توان ماتریس ضرایب A و B را محاسبه کرد. در روش تصحیح هندسی مستقیم، با اعمال شرط هم‌خطی مختصات زمینی نقاط مورد نظر تصویر مشخص می‌شود. در شبیه‌سازی انجام شده از بین هر ۱۳ خط تصویر، یک خط انتخاب و از هر خط، ۱۰ پیکسل با فواصل مساوی برای اعمال شرط هم‌خطی انتخاب می‌شوند. نقاطی را که مختصات زمینی آنها استخراج شده است، به‌عنوان GCP در نظر گرفته و سایر پردازش‌ها را مانند روش غیرمستقیم انجام می‌دهیم تا به تصویر تصحیح شده برسیم.

تصویر خروجی مربوط به سنجنده LISS-4 در شکل (۹-۱-ب) و تصویر خروجی ماهواره SPOT-4 در شکل (۹-۲-ب) نشان داده شده است. از آنجا که تصویر خروجی دو روش مستقیم و غیر مستقیم از نظر ظاهری شباهت زیادی با یکدیگر دارند؛ شکل (۹-۱-ج) قاب تصاویر شکل‌های (۹-۱-الف) و (۹-۱-ب) را نمایش می‌دهد و به همین ترتیب شکل (۹-۲-ج) قاب تصاویر شکل‌های (۹-۲-الف) و (۹-۲-ب) را نمایش می‌دهد.

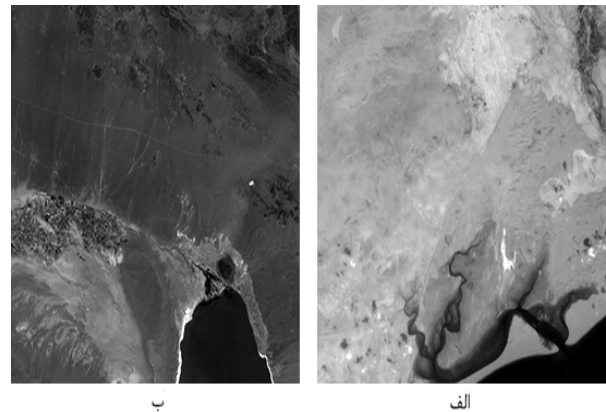
مقایسه نتایج و ارزیابی

برای بررسی دقت تصویر تصحیح شده، نقاطی را به‌عنوان نقاط واریسی^{۲۷} بر روی نقشه انتخاب کرده و با مختصات نقاط متناظر تصویر نهایی مقایسه می‌نماییم. از آنجا که مناطق مورد نظر دارای عوارض مصنوعی و طبیعی قابل استخراج کمی است، تعداد ۶ نقطه واریسی انتخاب شده است. میانگین خطای تصحیح هندسی تصویر LISS-4 در روش غیرمستقیم برابر ۱۴/۵۲ متر (معادل ۲/۵ پیکسل) و در روش مستقیم ۷۶۸/۵۷ متر (معادل ۱۳۳ پیکسل) است که در جدول (۲) نشان داده شده است. به علاوه میانگین خطای تصحیح

جدول ۱- مشخصات سنجنده LISS-4 ماهواره IRS-P6 [۱۲] و سنجنده ماهواره SPOT-4 [۱۴]

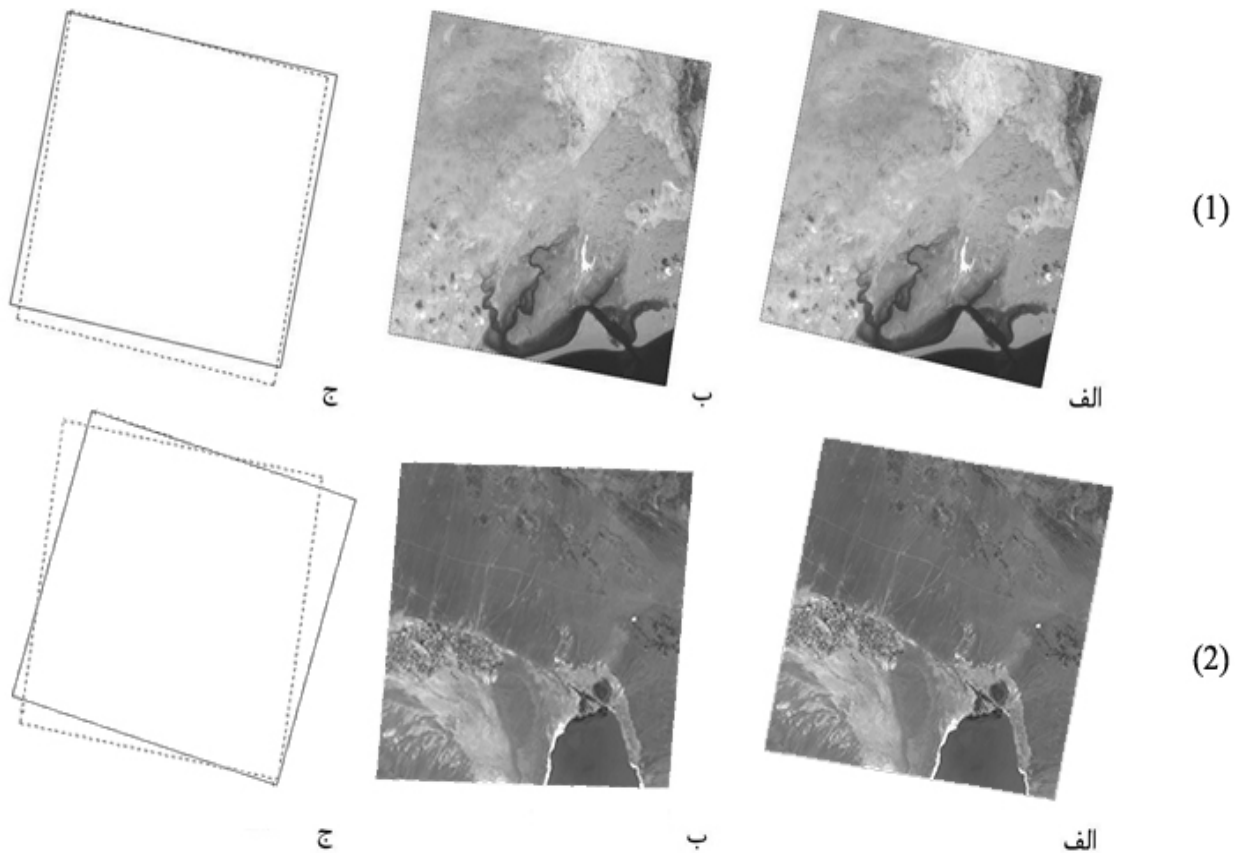
ماهواره	رزولوشن مکانی	خط جاروب	باند های طیفی	کوانتیزاسیون
IRS-P6	۵/۸ متر	۲۳/۹ (چندطیفی) ۷۰/۳ (پانکروماتیک)	--/۶۲-۰/۵۹-۰/۵۲ ۰/۱۸۶-۰/۱۷۷-۰/۱۶۸	۷ بیت
SPOT-4	۲۰ متر	۶۰	--/۶۱-۰/۵۹-۰/۵۰ ۰/۱۸۹-۰/۱۷۸-۰/۱۶۸ ۱/۷۵-۱/۵۸	۸ بیت

در روش غیرمستقیم، به کمک نقشه‌های پوششی ۱:۲۵۰۰۰ تعداد ۱۲، GCP استخراج شده و مختصات زمینی (X_i, Y_i) با مختصات تصویر (x_i, y_i) متناظر می‌شود. مختصات زمینی و مختصات تصویر را می‌توان به کمک تبدیل Affine با معادله (۱۳) به یکدیگر مربوط کرد. در حالت کلی می‌توان این روابط را به صورت ماتریسی، معادله (۱۴) نمایش دهیم.



شکل ۸- تصاویر پایگاه داده: الف) تصویر پانکروماتیک سنجنده LISS-4 ماهواره IRS-P6؛ ب) تصویر پانکروماتیک ماهواره SPOT-4

بعد از تعیین ضرایب A و B به کمک معادله (۴) می‌توان مختصات زمینی گوشه‌های تصویر را تعیین کرده و به این ترتیب قاب تصویر را تشکیل دهیم. سپس با استفاده از تبدیل چند جمله‌ای درجه دو موقعیت تک‌تک نقاط قاب تصویر را مشخص و به کمک روش درون‌یابی مکعبی مقدار سطح خاکستری آنها را تعیین می‌کنیم. تصویر خروجی مربوط به سنجنده LISS-4 در شکل (۹-۱-الف) و تصویر خروجی مربوط به ماهواره SPOT-4 در شکل (۹-۲-الف) مشاهده می‌شود.



شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی بر روی تصاویر پایگاه داده: (۱) تصویر تصحیح هندسی شده سنجنده LISS-4 ماهواره IRS-P6 (الف) روش غیرمستقیم، (ب) روش مستقیم؛ (ج) قاب تصویر تصحیح شده؛ (۲) تصویر تصحیح هندسی شده ماهواره SPOT-4 (الف) روش غیرمستقیم، (ب) روش مستقیم؛ (ج) قاب تصویر تصحیح شده. مربع خط‌پر نشان‌دهنده قاب روش غیرمستقیم و مربع خط‌چین نشان‌دهنده قاب روش مستقیم است.

جدول ۲- مقایسه خطای هر یک از روش‌های تصحیح هندسی در جهت X و Y برای تصویر LISS-4 ماهواره IRS-P6

روش مستقیم			روش غیرمستقیم		
dx	dy	dr	dx	dy	Dr
۵۵۵/۷	۵۵۹/۲۳	۷۸۸/۳۸	-۱۱/۲۵	-۱۲/۶۳	۱۶/۹۱
۴۹۸/۳۷	۵۵۴/۲۵	۷۴۵/۳۶	۱۲/۲۸	-۵/۴۳	۱۳/۴۳
۵۴۶/۰۵	۵۵۰/۴۷	۷۷۵/۳۶	۷/۲۹	۸/۹۶	۱۱/۵۵
۴۶۸/۰۹	۵۹۶/۶۵	۷۵۸/۳۵	-۱۳/۲۴	۷/۰۳	۱۴/۹۹
۵۴۵/۰۸	۵۲۸/۶۳	۷۵۹/۳۲	-۱۲/۱۶	-۷/۹۱	۱۴/۵۱
۵۴۶/۸۲	۵۶۲/۷۷	۷۸۴/۶۸	۱۲/۵۷	۹/۵۳	۱۵/۷۷
میانگین خطا		۷۶۸/۵۸ = ۱۳۳ پیکسل	میانگین خطا		۱۴/۵۲ = ۲/۵ پیکسل

هندسی تصویر ماهواره SPOT-4، در روش غیرمستقیم برابر ۱۵/۹۷ متر (معادل ۳/۲ پیکسل) و در روش مستقیم ۶۹۳/۷۵ متر (معادل ۱۳۹ پیکسل) است که در جدول (۳) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج جدول (۲) و جدول (۳) مشاهده می‌شود دقت روش غیرمستقیم نسبت به روش مستقیم به مراتب بهتر است. علت اصلی این مسئله، وابستگی روش غیرمستقیم به موقعیت زمینی و نگاهت یک‌به‌یک بین فضای تصویر و زمین است.

به منظور نمایش و مقایسه کیفی مناسب‌تر این دو روش به عنوان نمونه در شکل (۱۰) بردارهای خطا به همراه موقعیت GCPها و نقاط واری برای تصویر LISS-4 بر اساس نتایج جدول (۲) نشان داده شده است. بردارهای خطای روش مستقیم همه در یک جهت هستند. دلیل این مسئله آن است که در این روش همه نقاط با استفاده از یک سری پارامترهای مداری مستقل از موقعیت زمینی تصحیح شده‌اند. علت عدم هم‌جهت بودن بردارهای خطای غیرمستقیم، وابستگی به سطح زمین است.

دو روش به لحاظ دقت، هزینه و زمان انجام شد. روش مستقیم تصحیح هندسی به علت استقلال از موقعیت زمینی، هزینه و زمان کمتری نیاز دارد و به اپراتور نیاز ندارد. در مقابل روش غیرمستقیم با صرف هزینه و زمان بیشتر برای تهیه نقاط GCP به دقت به مراتب بهتر از روش مستقیم خواهد رسید.

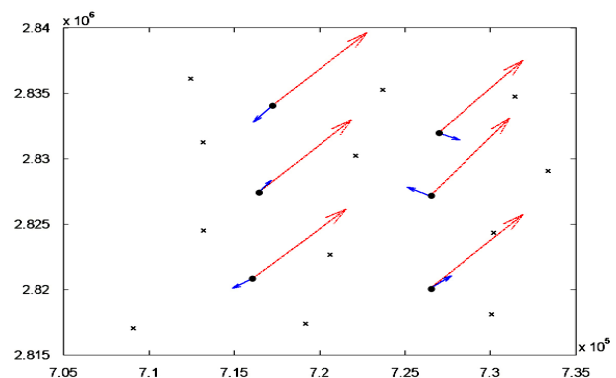
مراجع

- [1] Poli, D., Modeling of Space Borne Linear Array Sensors, (PhD Thesis), Institute of Geodesy and Photogrammetry Swiss Federal Institute of Technology (ETH) CH-8093, Zurich, 2005.
- [2] Richards, J. A. and Jia, X., *Remote Sensing Digital Image Analysis, an Introduction*, 3rd Edition, Springer-Verlag, New York, 1999.
- [3] Shahrokhi, M., Geometric Correction of MODIS Images Using Orbital Parameter, (MSc Thesis), University of Tehran, 2003 (In Persian).
- [4] Kratky, V., "Rigorous Photogrammetric Processing of SPOT Images at CCM Canada," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 44, No. 2, 1989, pp. 53-71.
- [5] Gagan, D. J. and Dowman, I. J. "Accuracy and Completeness of Topographic Mapping from SPOT Imagery," *Photogrammetric Record*, Vol. 12, No. 72, 1988, pp. 787-796.
- [6] Poli, D., "Indirect Georeferencing of Airborne Multi-line Array Sensors: a Simulated Case Study," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34, Issue 3/A, 2002, pp. 246-251.
- [7] Alwan, H., Saleem, B. and Khalid, L., "Simulation Model for the Assessment of Direct and Indirect Georeferencing Techniques in Analytical Photogrammetry," *Journal of Engineering*, Vol. 17, No. 6, 2011, 1633-1642.
- [8] Yousefzadeh, M. and Mojaradi, B., "Combined Rigorous- Generic Direct Orthorectification Procedure for IRS-P6 Sensors," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 74, 2012, pp. 122-132.
- [9] Yousefzadeh, M. and Sadeghian, S., "Implementation of Georeferencing of IRS-P6 Linear Array Using Orbital Parameter," *16th Geomatics Symposium, Tehran University*, 2009 (In Persian).
- [10] Izadipour, A., Sharifi, A. Saleh R. and Yousefzadeh, M. "Accuracy Assessment of Direct and Indirect Georeferencing Methods on LISS-4 Satellite Image," *10th Iranian Aerospace Society Conference*, Tarbiat Modares University, 2011 (In Persian).
- [11] Cavill, J. A. L., *Survey Engineering: A Guide to First Principles* Media Services, La Trobe University, Bendigo, Victoria, Australia, 1995.
- [12] IRS-P6 User Data Manual, National Remote Sensing Agency Department of Space, GOVT. of India Balanagar, Hyderabad, 500037, A.P. India.
- [13] Mather, P. M., *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2004.
- [14] Available, [on line]: http://www.geo-airbusds.com/files/pmedia/public/r233_9_geo_0013_spot_en_low.pdf.

جدول ۳- مقایسه خطای هر یک از روش‌های تصحیح هندسی در جهت X و Y برای تصویر ماهواره SPOT-4

روش مستقیم			روش غیر مستقیم		
dx	dy	dr	Dx	Dy	Dr
۴۳۰/۲۳	۴۱۷/۹۱	۵۹۹/۷۹	۹/۷۳	۸/۲۴	۱۲/۷۵
۵۰۱/۰۸	۵۱۱/۷۷	۷۱۶/۲۳	-۱۰/۱۵	۱۲/۰۹	۱۵/۷۹
۴۷۸/۴۵	۴۶۰/۳۱	۶۷۰/۴۴	-۹/۴۸	-۱۰/۳۳	۱۴/۰۲
۵۰۳/۶۷	۴۹۹/۲۵	۷۰۹/۱۸	۱۲/۶۰	-۱۱/۸۷	۱۷/۳۱
۵۲۳/۴۱	۵۵۰/۶۲	۷۵۹/۷۰	۱۳/۰۷	۱۴/۵۲	۱۹/۵۴
۴۷۶/۰۱	۵۲۲/۹۴	۷۰۷/۱۴	-۱۰/۴۱	۱۲/۶۹	۱۶/۴۱
میانگین خطا		۶۹۳/۷۵ = ۱۳۹ پیکسل	میانگین خطا		۱۵/۹۷ = ۳/۲ پیکسل

در پایان شایان ذکر است که از معایب روش غیرمستقیم می‌توان به صرف هزینه و زمان زیاد برای تهیه GCP اشاره کرد. از طرف دیگر امکان تهیه این نقاط به علت عدم وجود عوارض مصنوعی و طبیعی قابل استخراج، در همه جا وجود ندارد. اما، در مقابل از مزایای روش مستقیم می‌توان به مستقل بودن از موقعیت زمینی، عدم نیاز به اپراتور و صرف هزینه و زمان اندک برای تصحیح اشاره کرد. با توجه به مطالب ذکر شده، روش غیرمستقیم برای کاربردهایی مانند فعالیت‌های عمرانی که به دقت بالایی نیاز است، مناسب بوده و روش مستقیم در کاربردهایی مانند تولید تصاویر زمین‌منا در ایستگاه‌های زمینی پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۰- نمایش بردارهای خطای تصحیح هندسی مستقیم و غیرمستقیم تصویر LISS-4: موقعیت GCPها با علامت (x) و موقعیت نقاط واریاسی با علامت (•)، نشان داده شده است. بردارهای خطای (با مقیاس ۱۰۰ برابر) و خطچین (با مقیاس ۱۰ برابر) به ترتیب نمایانگر اندازه و جهت خطای روش غیرمستقیم و مستقیم هستند.

جمع بندی

در این مقاله، دو روش تصحیح هندسی مستقیم و غیرمستقیم بر روی تصاویر ماهواره SPOT-4 و IRS-P6 بررسی شد و مقایسه این