

تصحیح خودکار rpc های تصاویر ماهواره‌ای irs-p5 توسط مدل‌های رقومی ارتفاعی

امین علیزاده نائینی^{۱*}، صفا خزائی^۲، حسین عارفی^۳، ابوالفضل جمشیدزاده^۴

۱- استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران

۴- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۱۹

چکیده

یکی از راهکارهای اساسی در تولید و به‌روزرسانی داده‌های مکانی از جمله مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) استفاده از تصاویر پوششی ماهواره‌ای است. برای این منظور، معمولاً از ضرایب چندجمله‌ای‌های کسری (RPC ها) که به‌عنوان یک فراداده‌ی اصلی در کنار تصاویر ماهواره‌ای قرار دارند استفاده می‌شود. با این وجود، استفاده از این ضرایب به دلیل یکسری خطاهای سامانمند که در جمع‌آوری آن‌ها وجود دارد منجر به تولید DEM خطادار از منطقه می‌شوند. از این‌رو در این تحقیق روشی ارائه می‌شود تا با رفع خودکار خطای RPC ها در فضای زمین دستیابی به DEM دقیق را مقدور سازد. در این روش از طریق تناظریابی 2.5 بعدی بین DEM حاصل از زوج تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 و DEM ۱۰ متری سازمان نقشه‌برداری کشور، خطای RPC ها بر روی DEM حاصل کاهش داده می‌شود. نتایج تجربی این تحقیق نشان می‌دهد که از طریق DEM های ۱۰ متری سازمان نقشه‌برداری کشور و زوج تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 می‌توان به دقت حدود یک پیکسل یا بهتر در تولید و به‌روزرسانی DEM رسید.

کلیدواژه‌ها: تصحیح ضرایب RPC، مدل رقومی ارتفاعی، تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5، تناظریابی ۲.۵ بعدی

* نویسنده مکاتبه‌کننده: اصفهان، خیابان هزار جریب، دانشگاه اصفهان، دانشکده‌ی فنی، گروه مهندسی نقشه‌برداری

تلفن: ۰۹۱۳۳۲۳۰۴۲۱

Email: amin.al65@gmail.com.

۱- مقدمه

را تصحیح کنند. برای جبران و حذف خطاهای مربوط به RPC ها باید از یکسری نقاط کنترل زمینی دقیق که از طریق نقشه برداری زمینی از جمله مشاهدات تفاضلی^۵ GPS جمع آوری شده‌اند، استفاده کرد. در این روش‌ها معمولاً محققین دنبال آن هستند تا تعداد ترم‌های بهینه و نقاط کنترل زمینی لازم برای تصحیح RPC تصاویر را پیدا کنند [۳]. تصحیح RPC ها با تکیه بر نقاط کنترل زمینی با یکسری مشکلات اساسی روبرو است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد. مشکل اول و اساسی، عدم دسترسی به این‌گونه نقاط در بعضی مناطق از جمله مناطق مرزی و صعب‌العبور است. مشکل دوم، به زمان و هزینه بر می‌گردد؛ عملیات جمع‌آوری داده‌ها باعث زمان‌بر شدن و هزینه‌بر شدن فرآیندهای مختلف از جمله زمین مرجع نمودن خواهد شد. لازم به ذکر است که نتایج زمین مرجع نمودن باید به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین و ابتدایی‌ترین مراحل تهیه و تولید نقشه در اسرع وقت انجام شود. مشکل سوم، وابستگی دقت نهایی محصولات از جمله تصاویر زمین مرجع به دقت نقاط کنترل زمینی است؛ معمولاً نقاط کنترل زمینی توسط سازمان‌های خصوصی تهیه می‌شوند که دقت ارائه شده توسط آن‌ها بعضاً جای بحث دارد. مشکل چهارم در ارتباط با پیدا کردن نقطه‌ی نظیر نقطه‌ی کنترل زمینی روی عکس است که نه تنها فرآیند پیچیده‌ای است بلکه فرآیند زمین مرجع نمودن را نیز به دلیل نیاز به یک شخص خیره از حالت خودکار خارج می‌کند. یکی از راهکارهای اساسی برای حل مشکلات مذکور استفاده از داده‌های رایگان و موجود از منطقه است. از آنجایی که در حال حاضر یکی از داده‌های موجود از قسمت‌های مختلف کشور در بخش اطلاعات مکانی DEM ها هستند؛ هدف این تحقیق ارائه روشی نوین و کارآمد به‌منظور تصحیح خودکار ضرایب RPC

در بسیاری از کاربردهای تصاویر ماهواره‌ای از جمله زمین مرجع نمودن، تولید تصاویر اورتو فتو^۱ و مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM^۲) زمین، نیاز است تا رابطه بین فضای دو بعدی عکس و فضای سه بعدی زمین برقرار شود. در این راستا، مدل‌های توابع کسری^۳ یکی از شناخته شده‌ترین روابط در این زمینه هستند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مدل‌های توابع کسری را بر حسب اینکه ضرایب آنها (RPCها) چگونه به دست می‌آیند، می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد. در روش‌های دسته اول، RPCها توسط مدل‌های چند جمله‌ای نسبتی^۴ زمین مینا و با تکیه بر یکسری نقاط کنترل زمینی به دست می‌آیند. در این روش‌ها، معمولاً محققین تلاش می‌کنند تا تعداد ترم‌های بهینه‌ی چند جمله‌ای‌های نسبتی را تخمین زنند [۱، ۲]. اما از آنجایی که این روش‌ها به تعداد زیادی نقطه‌ی کنترل (حداقل ۴۰ نقطه) با توزیع مناسب نیاز دارند لذا در راستای هدف این تحقیق قرار نگرفتند. در روش‌های دسته دوم، RPCها توسط سازمان‌های تهیه کننده‌ی تصاویر به دست می‌آیند و به همراه تصاویر در اختیار کاربران قرار می‌گیرند. با این حال، این ضرایب به دلیل خطاهای سیستماتیک که در فرآیند جمع‌آوری آنها وجود دارد از دقت بالایی برخوردار نیست [۳]. این عدم صحت در داده‌های IRS-P5 (مورد توجه این تحقیق به دلیل دسترسی کامل سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح به آن) معمولاً حدود چند ده پیکسل (چند ده متر) است [۴] که بسیار قابل ملاحظه است. بنابراین در روش‌های دسته دوم، محققین معمولاً دنبال آن هستند که به نحوی RPC ها

1Orthophoto

2Digital Elevation Model

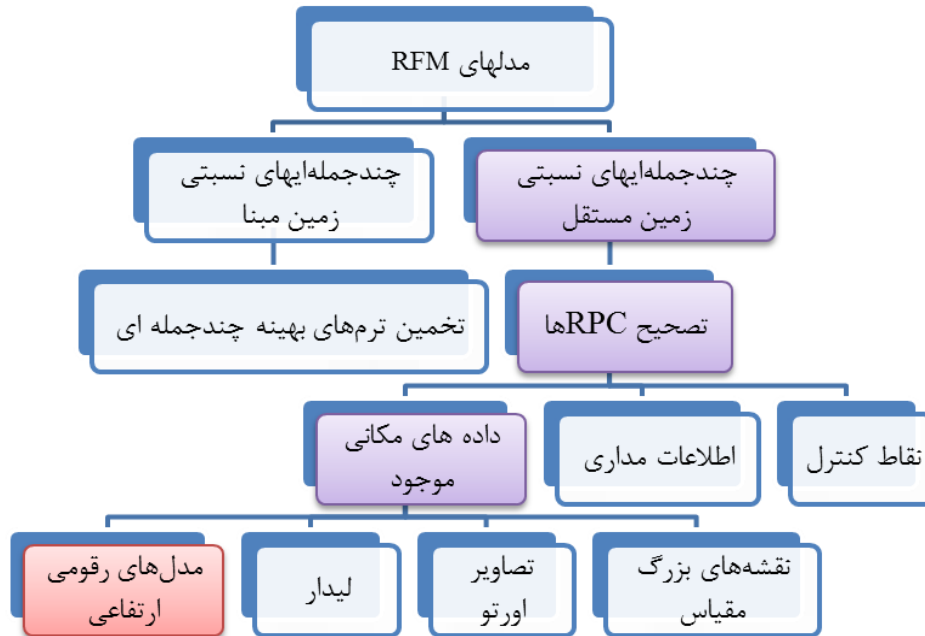
3Rational function model

4Rational polynomials

5Global Positioning System

نقاط کنترل زمینی است.

تصاویر ماهواره ای IRS-P5 با دقت مکانی زیرپیکسل با تکیه بر استفاده از DEM های موجود و بدون نیاز به



شکل ۱: مدل های چندجمله ایهای نسبتی

محلی (به غیر از شیف) بین تصویر و نقشه رقومی حذف شود. در مرحله ی بعد از طریق تناظرایی لبه ها توسط روش RECC^۱ در نقشه ی تصویر شده با تصویر اصلی مقدار شیف تعیین و تصحیح صورت می پذیرد.

در گروه دوم از تحقیقات صورت پذیرفته، RPC ها از طریق تصاویر تصحیح قائم شده بهبود داده می شوند. مثلاً در تحقیق [۷]، از تصاویر اورتوفتوی موجود در منطقه برای بهبود فراداده های RPC استفاده شده است. این تصاویر اورتوفتو با قدرت تفکیک مکانی یک متر توسط USGS^۲ برای منطقه آمریکا تولید شده اند. در تحقیق مذکور، ابتدا مختصات تصویر اورتو شده، به تصویر Kamposat2 تصویر می شود تا هر پیکسل از تصویر اورتو شده در یک فضای از تصویر Kamposat2 قرار گیرد. تصویر کردن اورتو اثر خطاهای هندسی مختلف مثل جابه جایی ناشی از اختلاف ارتفاع را

برای رفع مشکلات مذکور، محققین تلاش نموده اند تا با تکیه بر یکسری اطلاعات مداری ماهواره [۵] یا داده های مکانی موجود و رایگان از منطقه و بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی RPCها را بهبود دهند. به دلیل اینکه اطلاعات مداری ماهواره ها معمولاً در دسترس کاربران قرار نمی گیرد، زمین مرجع نمودن مستقیم تصاویر ماهواره ای با تکیه بر داده های مکانی موجود مورد توجه قرار گرفت.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تحقیقات صورت پذیرفته در این حوزه (تصحیح RPC ها بدون استفاده از GCPs) را می توان به چهار دسته ی کلی تقسیم کرد. در گروه اول، RPC ها از طریق نقشه های رقومی بزرگ مقیاس موجود از منطقه بهبود داده می شوند. به عنوان مثال در تحقیق [۶] برای تصحیح RPC ها یک روش دومرحله ای ارائه شده است. در مرحله ی اول با استفاده از RPC ها، نقشه رقومی به فضای تصویر منتقل می شود. این کار به این خاطر است که اعوجاجات

1 Relative edge cross correlation

2 United states geological surveys

بین DEM نسبی حاصل از تناظریابی زوج تصویر ماهواره‌ای و یک DEM مرجع در فضای زمین می‌توان RPC ها را بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی بهبود داد. در تحقیق مشابه دیگری از کیم [۱۱]، فراداده‌های RPC مربوط به تصاویر ماهواره‌ای SPOT-5 با تکیه بر تناظریابی DEM نسبی با SRTM DEM بهبود یافتند. نویسندگان در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که با تکیه بر SRTM DEM می‌توان به دقتی حدود دو پیکسل سایز در مسطحات و حتی بهتر از این مقدار در ارتفاعات برسند [۱۱]. در تحقیق [۱۲]، نویسندگان متذکر شده‌اند که RPC ها از اطلاعات مداری و موقعیتی ماهواره‌ها استخراج شده و دقت بسیار پایین‌تری نسبت به قدرت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای دارند؛ بنابراین برای استفاده از این تصاویر به منظور تولید اورتوفتو یا DEM بایستی RPC ها توسط رابطه‌ی افاین و حداقل سه نقطه‌ی کنترل زمینی یا تصویری بهبود یابند. در این مطالعه، GCPs ها به صورت خودکار از داده‌های رایگان ETM⁺ و SRTM DEM استخراج می‌شوند. برای این منظور، RPC ها در ابتدا با تکیه بر داده‌های ETM⁺ بهبود اولیه یافتند. سپس با استفاده از این RPC ها و زوج تصویر CARTOSAT-1، DEM منطقه استخراج شد. در نهایت با استفاده از داده‌های SRTM DEM و تناظریابی سه‌بعدی بین DEM استخراج شده در مرحله‌ی قبل و SRTM DEM، RPC ها بهبود نهایی می‌یابند. در کار مشابه دیگری از همین نویسندگان [۱۳]، ارزیابی‌ها بر روی ۱۸ منطقه مختلف صورت پذیرفت که میانگین خطای افقی ۶/۷ متر و میانگین خطای قائم ۵/۱ متر بوده است. نویسندگان همچنین متذکر شده‌اند که روش تناظریابی DEM برای مناطق کوهستانی و دشت بسیار خوب عمل می‌کند. این در حالی است که در مناطق مسطح این روش با تکیه بر زوج تصویر شکست

4 Enhanced Thematic Mapper Plus

حداقل می‌کند. از آنجایی که RPC ها برای این انتقال مورد استفاده قرار گرفتند، خطای موجود در تصویر اورتوی تصویر شده در فضای تصویر، نشان دهنده‌ی خطای RPC ها خواهد بود. در نهایت از طریق تناظریابی بین تصویر اورتوی تصویر شده و تصویر Kamposat2 خطای RPC ها مشخص شد.

در گروه سوم، از داده‌های لیزر اسکنر هوایی (لیدار) برای تصحیح RPC ها استفاده می‌شود. در تحقیق [۸]، تصاویر ماهواره‌ای اپتیک به صورت خودکار و از طریق داده‌های لیدار هوایی زمین مرجع شدند. در این روش در ابتدا با تکیه بر مفهوم توجیه نسبی و تناظریابی بین دو تصویر، DEM نسبی منطقه تهیه شد. سپس با استفاده از روش تناظریابی سه‌بعدی کمترین مربعات^۱، تناظریابی بین مدل سه‌بعدی نسبی و داده‌های سه‌بعدی لیدار صورت پذیرفت. در نهایت پارامترهای انتقال هلمرت بین تصویر و زمین از طریق فرآیند توجیه مطلق به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان دادند که با استفاده از روش مذکور می‌توان تصاویر اورتوی WV2 و IKONOS را با دقت ۰.۵ متر روی زمین تولید کرد.

در گروه چهارم، RPC ها یا DEM حاصل از آن‌ها از طریق DEM های موجود از منطقه یا DEM های رایگان مانند ASTER GDEM^۲ بهبود داده می‌شوند. در تحقیق [۹]، با تکیه بر تناظریابی، DEM تصاویر SPOT-5 با دقت قابل قبولی زمین مرجع شدند. در این کار، در ابتدا با تکیه بر تناظریابی زوج تصویر و توجیه نسبی، DEM نسبی منطقه تهیه می‌شود، سپس از طریق تناظریابی DEM نسبی و SRTM^۳ DEM، زمین مرجع نمودن انجام می‌شود. کیم و همکارانش در تحقیق [۱۰] نشان دادند که با تکیه بر تناظریابی

1 Least squares 3D Matching

2 Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model

3 Shuttle Radar Topography Mission

زمینی و با تکیه بر DEM موجود از منطقه، DEM حاصل از RPC های خطادار با دقت زیرپیکسل بهبود داده می شود.

۲- زمین مرجع نمودن مستقیم تصاویر ماهواره ای یا استفاده از مدل RPC

مدل توابع چندجمله ای های کسری (RPC)، رابطه بین یک نقطه روی تصویر (l,s) و نقطه ی نظیرش روی زمین یعنی (B,L,H) را از طریق نسبت دو چندجمله ای از درجه ی سه مشخص می کند (رابطه ی ۱).

$$\begin{cases} l = \frac{P_1(B,L,H)}{P_2(B,L,H)} \\ s = \frac{P_3(B,L,H)}{P_4(B,L,H)} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه ی بالا l و s مختصات نرمال شده نقطه در سیستم مختصات تصویری و B و L و H به ترتیب عرض و طول جغرافیایی و ارتفاع نرمال شده ی نقطه هستند. اگر بخواهیم همزمان با تقاطع مختصات تصویری را به صورت معمولی داشته باشیم می توانیم از رابطه ی ۲ استفاده کنیم [۱۴]:

خواهد خورد. برای رفع این مشکل در مناطق مسطح در [۱۲]، با بلوکی از عکس ها کار شد تا با تعداد بالای پرتوهای نوری مربوط به هر نقطه به دقت بالایی دست پیدا کنند.

از آنجایی که معمولاً از مناطق مورد مطالعه در ایران هیچ نقشه ی بزرگ مقیاس، تصویر اورتوفتو یا داده ی لیداری وجود ندارد، در این تحقیق روش چهارم مورد توجه قرار گرفته است. در ارتباط با مشارکت و نوآوریهای تحقیق می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- در همه ی تحقیقات پیشین مربوط به روش چهارم، از فن تناظریایی سه بعدی برای تناظریایی بین سطوح نسبی و سطوح مطلق استفاده شده است؛ درحالی که در این تحقیق برای اولین بار از یک روش تناظریایی 2.5 بعدی استفاده می شود. با استفاده از این روش تناظریایی و نیز DEM های رستر به جای ابر نقاط از طرف دیگر، روش پیشنهادی با سرعت و دقت بالاتری قادر به مدیریت داده های ارتفاعی (DEM) با حجم بالا خواهد بود.

۲- در این تحقیق، بدون نیاز به هیچ نقطه ی کنترل
رابطه (۲)

$$s = S_0 + S_s \begin{pmatrix} \frac{\partial K}{\partial B} & \frac{\partial K}{\partial L} & \frac{\partial K}{\partial H} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\varphi_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{h_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix}$$

$$l = l_0 + l_s \begin{pmatrix} \frac{\partial J}{\partial B} & \frac{\partial J}{\partial L} & \frac{\partial J}{\partial H} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\varphi_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{h_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix}$$

زمینی نرمالیزه شده و (φ, λ, H) مختصات نقاط در سیستم تصویر ژئودتیک می باشد که بردار مجهولات را تشکیل می دهند.

که در این رابطه k و J بیانگر معادلات اول و دوم در تابع رشنال (رابطه ی ۱)، s و l مختصات تصویر در جهت سمپل و لاین و اندیس های 0 و s به ترتیب بیانگر شیفت و مقیاس هستند. (B, L, H) مختصات

که به تناظریابی 2.5 بعدی معروف است در ابتدا از طریق یک انتقال دوبعدی مثل افاین [۱۶] رابطه‌ی بین فضای تصویر و زمین به دست می‌آید و نهایتاً از طریق تفاضل بین دو سطح سه‌بعدی مؤلفه انتقالی در راستای قائم به دست خواهد آمد.

۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهاد شده (شکل ۲) در این تحقیق در ابتدا DEM حاصل از زوج تصویر IRS-P5 با استفاده از RPC ها تولید خواهد شد (بخش ۲). از آنجایی که اندازه‌ی پیکسل DEM سازمان نقشه‌برداری (NCC۲ DEM) ۱۰ متر است، DEM نسبی نیز با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر تهیه می‌شود تا تناظریابی با دقت بالاتری بین دو DEM صورت پذیرد. در مرحله‌ی بعدی، DEM نسبی با استفاده از روش تناظریابی متقابل ۳ (بخش ۳-۱) نسبت به NCC DEM توجیه می‌شود. مدلی که برای برقراری این ارتباط استفاده می‌شود مدل افاین دوبعدی است که برای این تصاویر توصیه شده است [۴, ۱۷]. در مرحله‌ی بعد از طریق تفاضل بین DEM نسبی بهبود داده شده در دو بعد و DEM سازمان نقشه‌برداری و میانگین مقادیر به دست آمده، شیفت ارتفاعی به دست می‌آید. در نهایت، با اعمال این پارامترها به DEM نسبی می‌توان به DEM نسبی بهبود یافته دست یافت.

۳-۱- تناظریابی از طریق اطلاعات متقابل^۴ (MI)

اندازه‌گیری MI بین دو تصویر، ترکیبی از مقادیر آنتروپی دو تصویر است. در یک تعبیر ساده، آنتروپی اندازه‌گیری پراکندگی یک توزیع احتمال است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری آنتروپی وجود دارد که یکی از رایج‌ترین آن‌ها روش شنون^۵ است [۱۸].

مدل توابع کسری یا RPC یک نگاهت ریاضی (رابطه‌ی ۱) بین فضای سه‌بعدی زمین و فضای دوبعدی تصاویر است. همان‌طور که مشخص است این مدل از چهار چند جمله‌ای با درجه‌ی سه تشکیل شده است که هر یک از این چند جمله‌ای‌ها دارای ۲۰ ضریب است؛ بنابراین در مجموع ۸۰ ضریب وجود دارد که این ضرایب به ضرایب RPC معروف هستند. این ضرایب بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی و با تکیه بر اطلاعات GPS/IMU توسط سازمان فضایی مربوطه تهیه شده و به همراه داده‌ها در اختیار کاربران قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که ۸۰ ضریب چهار چند جمله‌ای اشاره شده در بالا به همراه پارامترهای شیفت و مقیاس (رابطه‌ی ۲) در یک فایل جداگانه در کنار داده‌ها در اختیار کاربر قرار می‌گیرند و کاربر می‌تواند از طریق آن‌ها و با تکیه بر مفهوم تقاطع مختصات زمینی نقاط را به دست آورد [۱۴].

همان‌طور که اشاره شد اگرچه مدل‌های کسری می‌توانند در مواردی جایگزین خوبی برای مدل‌های فیزیکی باشند ولی خطای سامانمند قابل ملاحظه‌ای بین مختصات واقعی نقاط و مختصات به دست آمده از طریق RPCها وجود دارد که باید به نحوی تصحیح گردد. برای حذف این خطاها دو راهکار اساسی وجود دارد که در ادامه به هر یک از آن‌ها اشاره خواهد شد. در راهکار اول خطاها به وسیله‌ی یک پولی نومیال در فضای تصویر یا فضای زمین مدل می‌شوند در حالیکه در راهکار دوم RPCها دوباره محاسبه و باز تولید خواهند شد [۱۵]. در این تحقیق نویسندگان تلاش می‌کنند تا RPCها را در فضای زمین و از طریق اعمال آن‌ها بر روی نقاط DEM نشان تصحیح کنند.

از آنجایی که در این تحقیق از تصاویر رنج^۱ به جای ابر نقاط استفاده شده است روش جدیدی برای تصحیح RPCها در فضای زمین ارائه شده است. در این روش

2 National Cartographic Center

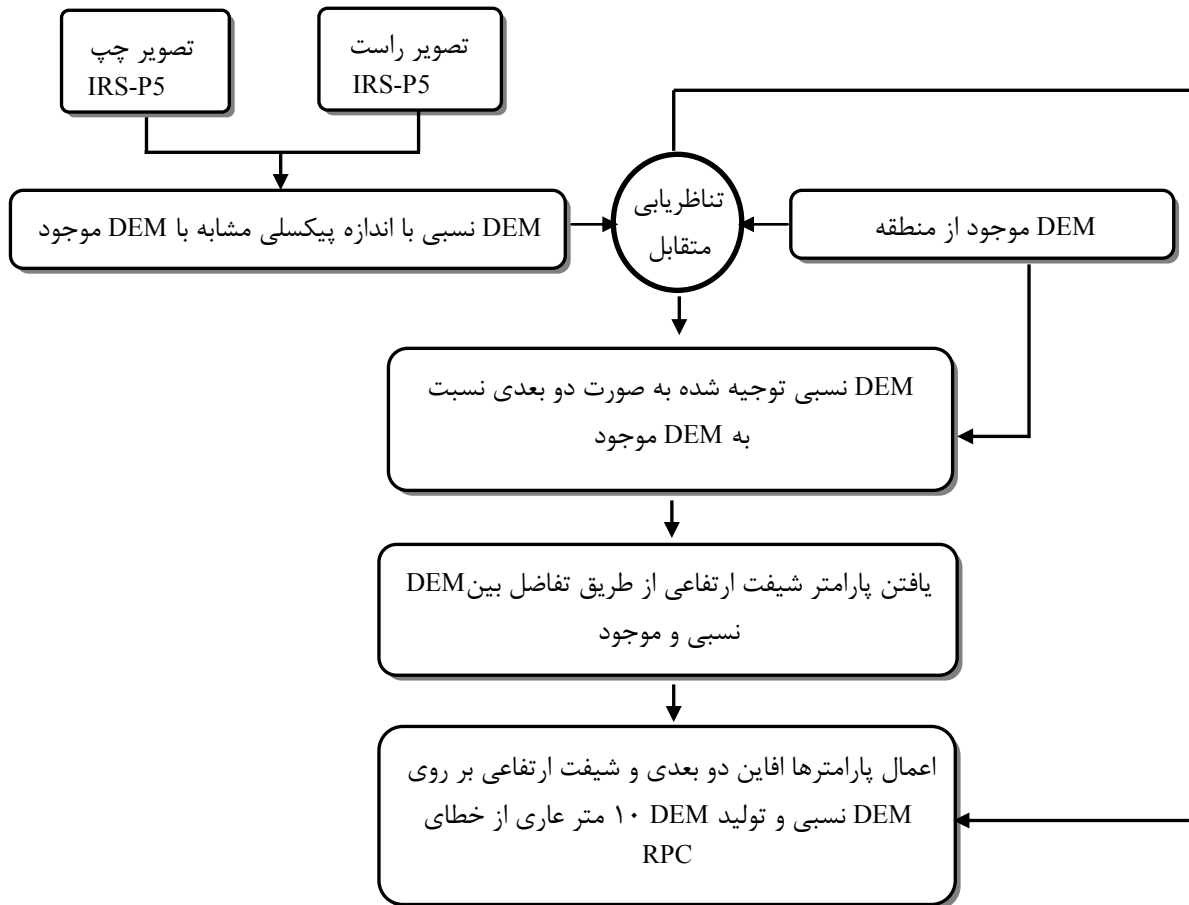
3 Mutual matching

4 Mutual information

5 Shannon

1 Range Image

تصحیح خودکار RPC های تصاویر ماهواره ای...
 امین علیزاده نائینی، صفا خزانی، حسین عارفی، و ...



شکل ۲: روش پیشنهادی برای تصحیح DEM حاصل از RPC های خطادار

افزایش می‌یابد؛ بنابراین ثبت هندسی تصویر به تصویر یا سطح به سطح در ارتباط با DEM ها از طریق حداقل کردن آنتروپی مشترک می‌تواند صورت پذیرد. باین‌حال، اگر آنتروپی هر یک از تصاویر نیز در نظر گرفته شود به معیار جامع‌تری دست خواهیم یافت که در رابطه‌ی ۴ آورده شده است.

$$MI(U, V) = H(U) + H(V) - H(U, V) \quad (4)$$

در این رابطه $H(U)$ آنتروپی تصویر U ، $H(V)$ آنتروپی تصویر V و $H(U, V)$ آنتروپی مشترک است. بنابراین یک ثبت هندسی بهینه می‌تواند از طریق حداکثر کردن معیار MI بین دو تصویر حاصل شود.

آنتروپی شنون برای n پیکسل با احتمالات p_1 تا p_n طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(1/p_i) \quad (3)$$

برای محاسبه‌ی آنتروپی از هیستوگرام تصویر استفاده می‌شود که در آن هر جزء نشان‌دهنده‌ی احتمال پیکسل‌هاست. از سوی دیگر، برای محاسبه‌ی آنتروپی مشترک^۱ باید از هیستوگرام مشترک دو تصویر استفاده شود. هر چه دو تصویر به هم شبیه‌تر باشند میزان آنتروپی مشترک آن‌ها پایین‌تر خواهد بود؛ بنابراین اگر دو تصویر نسبت به هم ثبت هندسی نباشند، پراکندگی هیستوگرام مشترک آن‌ها

1 Joint entropy

۴- مطالعه موردی

در این بخش در ابتدا در ارتباط با داده‌های مورد استفاده صحبت خواهد شد و سپس از طریق تعدادی نقاط کنترل از منطقه‌ی مورد مطالعه و نقاط^۱ ICESAT به ارزیابی روش پیشنهادی پرداخته خواهد شد.

۴-۱- داده‌های مورد استفاده

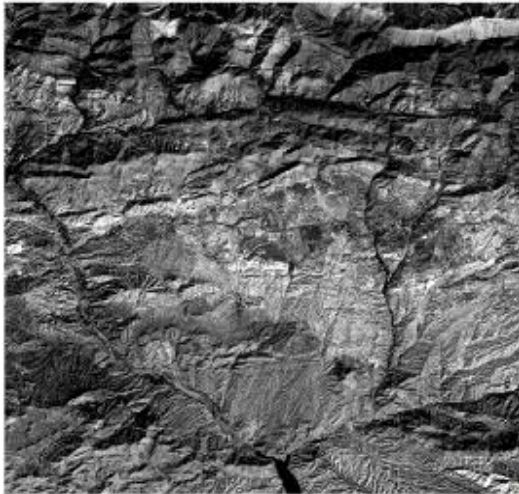
محدوده‌ی مورد مطالعه منطقه‌ای در شمال شرق استان تهران واقع در نزدیکی شهر بومهن در نظر گرفته شد. این محدوده نه تنها کوهستانی است بلکه در بخش‌های از آن مناطق دشتی و مسکونی نیز وجود دارد. داده‌های مورد استفاده در این بخش زوج تصاویر پوششی IRS-P5 و DEM سازمان نقشه‌برداری کشور هستند که در ادامه هر یک از آنها شرح داده خواهند شد.

۴-۱-۱- تصاویر پوششی IRS-P5

شکل ۳ زوج تصویر IRS-P5 از منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به این تصاویر آورده شده است.

۴-۱-۲- مدل رقومی ارتفاعی سازمان نقشه‌برداری کشور

این مدل (NCC DEM) که توسط سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شده است دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر می‌باشد. مبنای تولید این داده‌ها نقشه‌های 1/25000 است که با شبکه نقاط ارتفاعی مرجع کشور کنترل شده و مبنای سطح ارتفاعی آن ایستگاه بندرعباس است [۱۹].



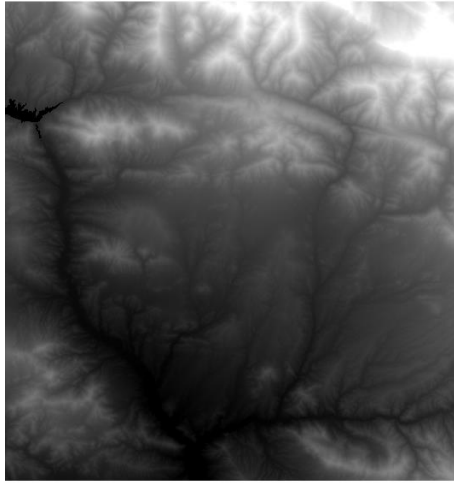
شکل ۳: زوج تصویر IRS-P5 از منطقه‌ی بومهن

جدول ۱: ویژگی‌های زوج تصویر IRS-P5 مورد استفاده در این تحقیق

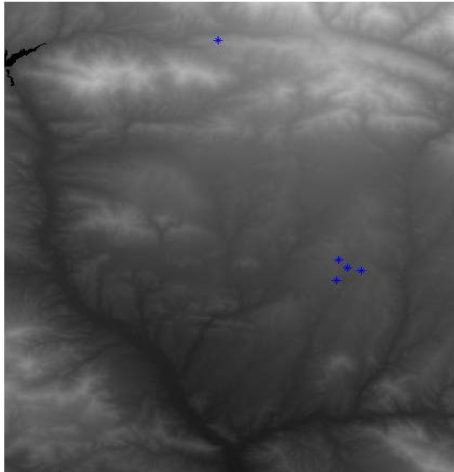
ویژگی	تصویر چپ	تصویر راست
قدرت تفکیک مکانی	۲.۵	۲.۵
قدرت تفکیک رادیومتریکی (بیت تصویر)	۱۰	۱۰
زمان اخذ داده	19NOV2014	19NOV2014
زاویه‌ی تیلت	-5°	26°
اندازه‌ی تصویر	12000×12000	12000×12000
فرمت تصویر	GEOTIFF	GEOTIFF

¹ Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite

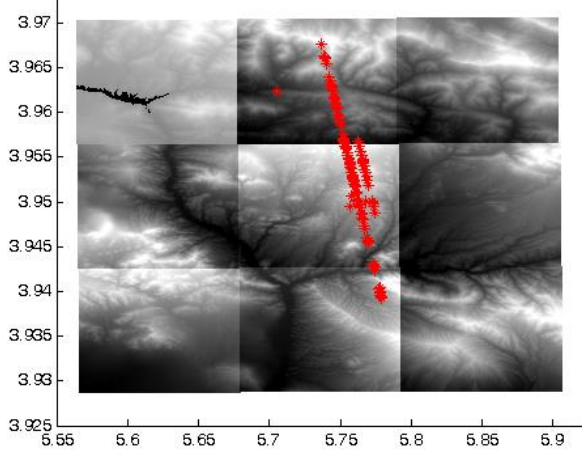
الف



ب



ج



شکل ۴: الف: DEM سازمان نقشه برداری، ب: DEM سازمان به همراه پنج نقطه‌ی چک موجود، ج: DEM سازمان به همراه ۱۱۸ نقطه‌ی چک موجود از منطقه شامل نقاط Icesat و پنج نقطه‌ی چک

۴-۲- ارزیابی دقت روش پیشنهادی

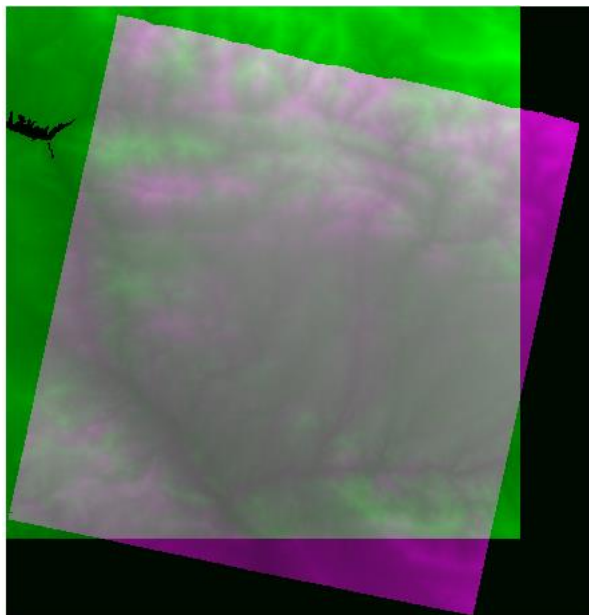
به منظور ارزیابی روش ارائه شده، در این تحقیق از پنج نقطه‌ی کنترل زمینی که مختصات آن‌ها در جدول ۲ آورده شده، استفاده شده است (شکل ۴-ب). لازم به ذکر است که این نقاط از طریق DGPS جمع‌آوری شده‌اند. همچنین داده‌های لیزری ماهواره ICESAT (به صورت یک نوار مورب در شکل ۴-ج) به همراه یک نقطه‌ی کنترل چندمنظوره از سازمان نقشه برداری (نقطه‌ی شماره‌ی ۵ در جدول ۲) در ارزیابی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفتند.

DEM های سازمان نقشه برداری در منطقه مورد مطالعه از نه بخش تشکیل شده‌اند (شکل ۴-ج) که می‌بایست این ۹ بخش به نحوی به کمک یکی از نرم‌افزارهای سنجش از دوری از جمله PCI Geomatica موزاییک شوند تا به صورت یکجا در بحث تناظر یابی مورد استفاده قرار گیرند. برای این منظور از بخش موزاییک نرم‌افزار PCI Geomatica استفاده شد ولی از آنجایی که تفاوت در مرزها بسیار مشهود بود تصمیم گرفته شد تا از راهکار دیگری استفاده گردد. برای این منظور و رفع این مشکل، مختصات سه بعدی هر نه عدد DEM به صورت یکپارچه و ابر نقاط در نظر گرفته شد و سپس با تکیه بر فن واسطه یابی بای لینیئر^۱ این ابر نقاط در نرم‌افزار مطلب به یک تصویر رنج یا همان DEM یکپارچه تبدیل شد (شکل ۴-الف).

جدول ۲: نقاط چک برای ارزیابی روش پیشنهادی

شماره نقطه	X (UTM)	Y(UTM)	Z _{EL} ^۲
۱	576771.819	3950071.970	1669.852
۲	576181.314	3950185.891	1642.593
۳	575793.513	3950615.853	1712.073
۴	575701.273	3949529.834	1625.953
۵	570547.464	3962308.086	2172.8255

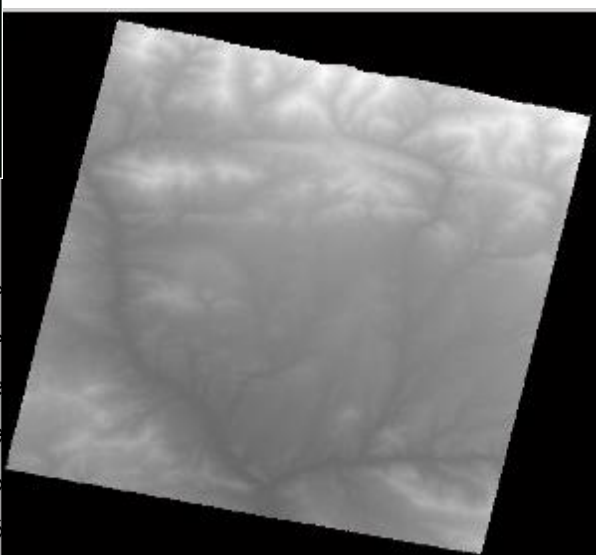
1 Bilinear
2 Ellipsoid



شکل ۶: موقعیت DEM نسبی و NCC DEM نسبت به یکدیگر

همان‌طور که در بخش سه توضیح داده شد این خطا را می‌توان از طریق تناظریابی 2.5 بعدی حذف نمود. برای این منظور از روش تناظریابی متقابل استفاده شد و همان‌طور که ذکر شد برای ایجاد ارتباط بین دو مدل رقومی از مدل افاین دوبعدی استفاده گردید؛ زیرا در تحقیقات نشان داده شد که خطای مسطحاتی موجود در DEM حاصل از تصاویر IRS-P5 از نوع افاین دوبعدی است [۱۷]. همان‌طور که در شکل ۷-ب ملاحظه می‌شود، DEM نسبی با دقت بالایی نسبت به مدل رقومی ارتفاعی در فضای دوبعدی توجیه شده است و رنگ خاکستری نشان‌دهنده آن است که فقط یک شیفت ارتفاعی بین دو مدل رقومی باقی مانده است که باید به نحوی حذف گردد. برای نشان دادن بهتر عملکرد الگوریتم در شکل ۷-الف موقعیت DEM نسبی قبل و بعد از تناظریابی آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روش تناظریابی متقابل قادر بوده خطای مسطحاتی DEM نسبی را به طور کامل مرتفع سازد.

بعد از انتخاب زوج تصویر با تکیه بر مفهوم تقاطع و استفاده از ضرایب RPC، DEM نسبی منطقه با استفاده از نرم‌افزار PCI Geomatica تولید شد که این مدل در شکل ۵ نمایش داده شده است. در فرآیند تولید DEM، نقاط گرهی به صورت خودکار و با تکیه بر روش تناظریابی فاز^۱ انتخاب شدند. سپس، سرشکنی دسته اشعه با تکیه بر RPCها و نقاط گرهی نظیر صورت پذیرفت و در انتها DEM منطقه با تکیه بر نقاط کنترل گرهی حاصل از مرحله‌ی قبل تولید شد.



شکل ۵: DEM نسبی تهیه شده با استفاده از RPC های زوج تصویر IRS-P5

در مرحله‌ی بعد لازم است خطای سامانمند این مدل رقومی ناشی از خطاهای موجود در RPC ها، به دلیل وجود یکسری خطا در جمع‌آوری آن‌ها از جمله خطاهای GPS/IMU، مرتفع گردد. برای این منظور همان‌طور که قبلاً گفته شد از NCC DEM منطقه که در شکل ۴-الف نمایش داده شده، استفاده می‌شود. در شکل ۶ موقعیت DEM نسبی نسبت به DEM مطلق نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود این دو DEM نسبت به هم دارای خطای مسطحاتی قابل ملاحظه‌ای هستند.

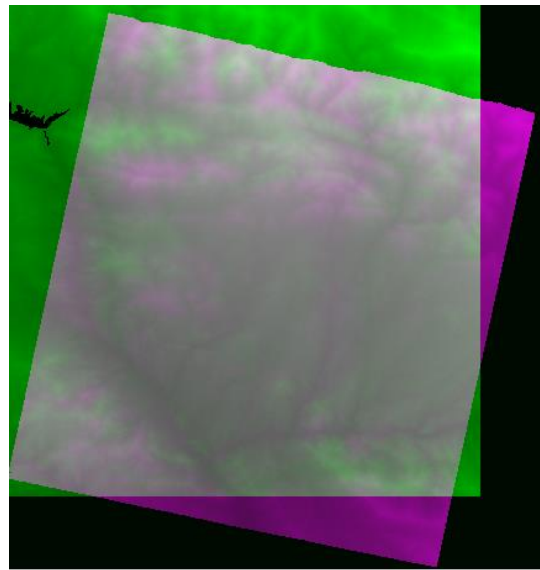
1 Fast Fourier transform phase matching

قدرت تفکیک مکانی بالا^۱ (مانند DEM حاصل از لیدار^۲) خطای مسطحاتی را مشخص نمود. سپس باید با اعمال خطای مسطحاتی بر روی نقاط و به دست آوردن موقعیت دقیق آنها، خطای ارتفاعی را از طریق اختلاف ارتفاع نقاط نظیر به دست آورد. همانطور که مشخص است در این حالت علاوه بر خطای ارتفاعی خطای مسطحاتی نقاط نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد.

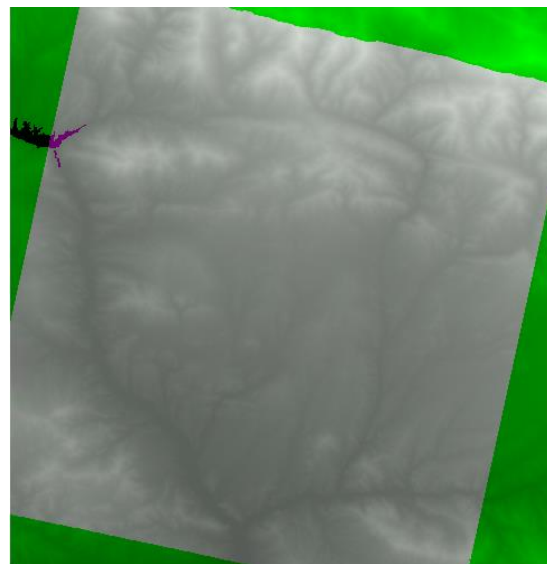
همانطور که در شکل ۷-ب ملاحظه می شود، DEM نسبی با دقت بالایی نسبت به مدل رقومی ارتفاعی در فضای دوبعدی توجیه شده است و رنگ خاکستری نشان دهنده آن است که یک شیفت ارتفاعی بین دو مدل رقومی وجود دارد. برای این منظور و پیدا کردن این شیفت ارتفاعی دو مدل رقومی را از یکدیگر کم کرده و میانگین تفاضلات را به عنوان شیفت ارتفاعی در نظر می گیریم. بعد از اعمال این شیفت، مدل رقومی ارتفاعی موردنظر تصحیح خواهد شد.

در شکل ۸ بخشی از DEM تصحیح شده به همراه نقاط کنترل زمینی نشان داده شده است. همانطور که در زیر بخش های این شکل نشان داده شده است، روش پیشنهادی قادر بوده تا بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی DEM نسبی منطقه را بهبود دهد. در این شکل، DEM نسبی بهبود یافته ی منطقه (به رنگ آبی) در کنار DEM مطلق (به رنگ قرمز) در دو حالت نمایش داده شده اند. در یک حالت این دو DEM با تراکم بالایی از نقاط نشان داده شده اند تا میزان انطباق آنها و موفقیت روش پیشنهادی به خوبی مشخص گردد؛ در حالت دیگر این دو DEM با تراکم پایین نقاط و به همراه نقطه چک (علامت ستاره) نشان داده شده اند تا میزان انطباق این دو DEM

1 High resolution DEM
2 Lidar



الف



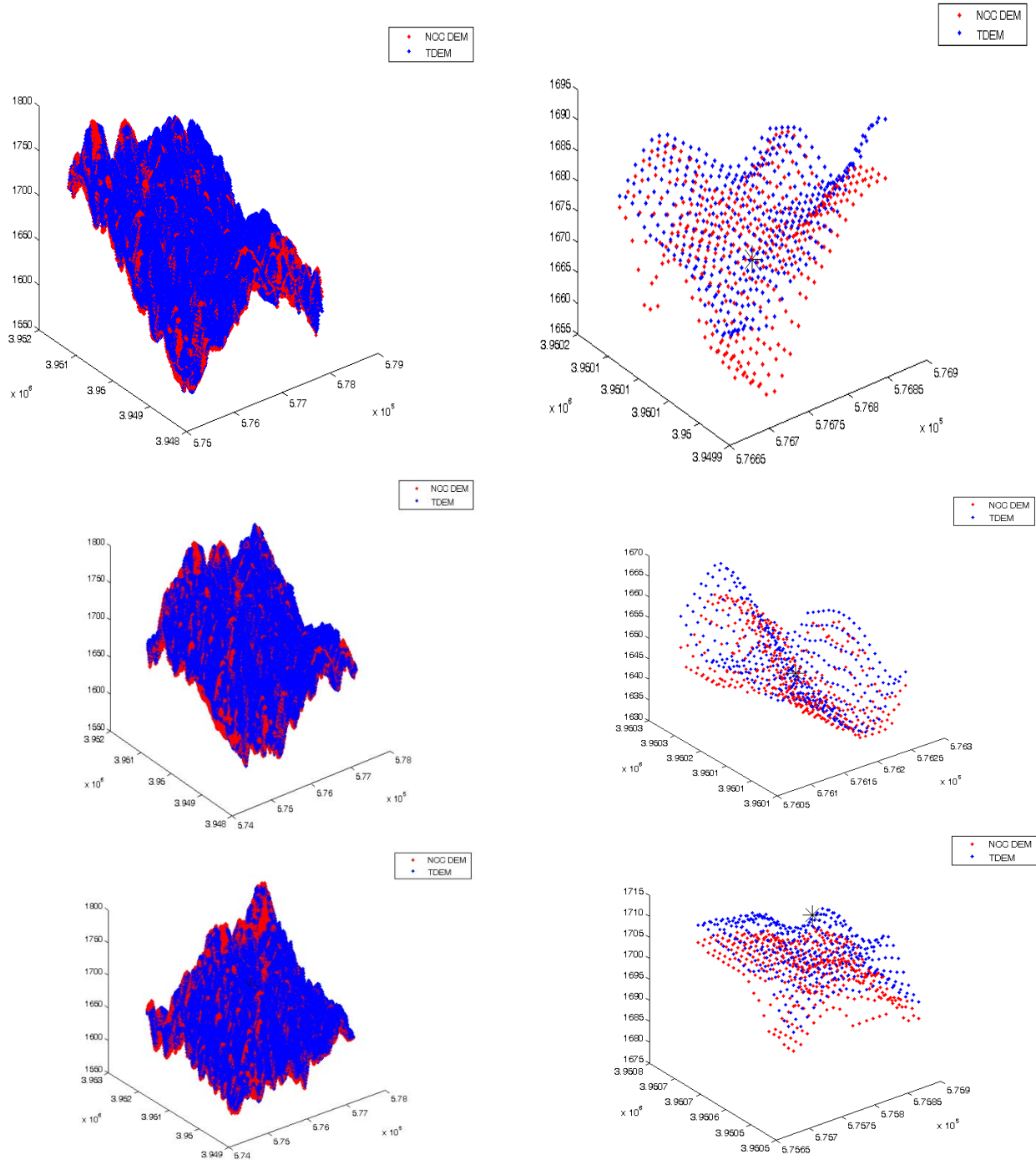
ب

شکل ۷: مقایسه ی DEM نسبی با NCC DEM. الف: قبل از تناظریابی، ب: بعد از تناظریابی

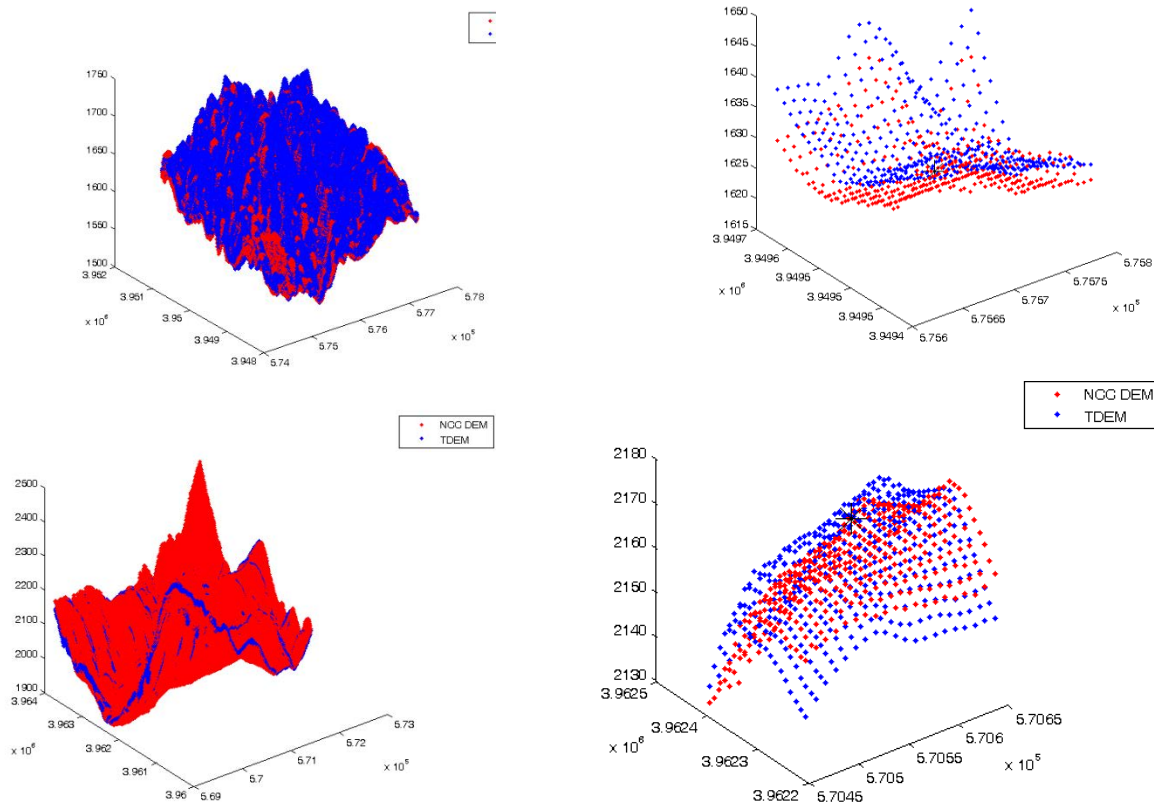
لازم به توضیح است اگر تناظریابی بین DEM های مورد مطالعه به صورت دقیق صورت نپذیرد رنگ خاکستری بین DEM نسبی و NCC DEM به رنگ صورتی تغییر خواهد کرد که بسته به خطای تناظریابی، شدت و میزان این رنگ متفاوت خواهد بود. با این حال، اگر تناظریابی بین دو DEM به صورت خطا دار صورت پذیرد در مرحله ی اول لازم است با تکیه بر یک DEM با

انطباق بصری بالایی بین DEM بهبود یافته، DEM مطلق و نقطه‌ای چک می‌باشد.

با نقاط چک را نشان دهند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود بهبود DEM نسبی توسط روش ارائه شده به نحوی است که در هر پنج نقطه‌ای چک



تصحیح خودکار RPC های تصاویر ماهواره ای...
امین علیزاده نائینی، صفا خزانی، حسین عارفی، و ...



شکل ۸: بخشی از DEM بهبود یافته اطراف نقاط کنترل. محورهای X و Y به ترتیب طول و عرض نقاط در سیستم مختصات UTM و محور z ارتفاع نقاط از بیضوی WGS84 را نمایش می‌دهد و واحد هر سه پارامتر متر است.

در انتهای این بخش مقایسه‌ی روش پیشنهادی این تحقیق با سایر روش‌ها براساس سرعت الگوریتم مورد استفاده و تعداد نقاط کنترل مورد استفاده در تصحیح RPCها انجام می‌شود. در ارتباط با سرعت الگوریتم پیشنهادی، بر خلاف سایر تحقیقات صورت پذیرفته که توجه DEM نسبی به DEM مطلق به صورت سه‌بعدی انجام می‌شود؛ در این تحقیق از یک روش تناظریابی 2.5D استفاده شد. با استفاده از این روش تناظریابی به‌جای روش‌های تناظریابی سه‌بعدی از یک‌طرف و DEMهای رستر به‌جای ابر نقاط از طرف دیگر، روش پیشنهادی با سرعت و دقت بالاتری قادر به مدیریت داده‌های ارتفاعی (DEM) با حجم بالا خواهد بود [۲۰-۲۲].

در ارتباط با تصحیح RPCها با تکیه بر نقاط کنترل زمینی و مقایسه‌ی آنها با روش پیشنهادی،

به‌منظور ارزیابی کمی، از $RMSE^1$ نقاط کنترل استفاده گردید (جدول ۳). همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود روش پیشنهادی قادر بوده است به دقت یک پیکسل و زیرپیکسل برای تمامی نقاط چک برسد.

جدول ۳: $RMSE$ محاسبه شده برای نقاط کنترل استفاده شده

نقاط کنترل مورد استفاده برای ارزیابی	RMSE (m)
تمامی نقاط شامل نقاط کنترل و نقاط ICESAT	2.6666
پنج نقطه‌ی کنترل موجود از منطقه ICESAT	1.7200
نقاط ICESAT	2.7117

¹ Root mean square error

نسبی منطقه با استفاده از تصاویر پوششی IRS-P5 و RPC های آن‌ها تولید شد. سپس از طریق تناظریابی 2.5 بعدی بین DEM خادار حاصله (به دلیل وجود خطا در RPC ها) و NCC DEM صحت DEM نسبی با دقت فوق‌العاده خوبی بهبود یافت. بر اساس نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق، از طریق روش پیشنهادی می‌توان با دقت بسیار خوب RPC تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 را بهبود داد که از نتایج آن می‌توان به تولید نقشه، تصاویر تصحیح قائم شده و مدل ارتفاعی رقومی دقیق از منطقه اشاره کرد.

لازم به ذکر است که سازمان نقشه‌برداری کشور دنبال راه‌حلی برای به‌روز رسانی DEM های خود می‌باشد که می‌توان این روش را به‌عنوان یک روش سریع و دقیق برای به‌روز رسانی DEM های سازمان نقشه‌برداری کشور معرفی کرد. از سوی دیگر سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح دنبال آن است تا با تکیه بر تصاویر IRS-P5 خویش DEM های رقومی با قدرت تفکیک مکانی بالا از ایران تهیه کند که این روش می‌تواند برای این منظور معرفی گردد.

۶- تشکر و قدردانی

در این قسمت نویسندگان لازم می‌دانند تا از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح کشور به خاطر زوج تصویر استریو IRS-P5 و سازمان نقشه‌برداری کشور بالأخص دکتر اردلان به خاطر DEM های ۱۰ متری منطقه‌ی مورد مطالعه نهایت تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

لازم به توضیح است که به دلیل عدم دسترسی به نقاط کنترل زمینی با تعداد و توزیع مناسب از یک سو و عدم تشخیص دقیق موقعیت نقاط موجود بر روی تصویر از سوی دیگر، در این تحقیق امکان پیاده‌سازی حالتی که در آن RPC ها از طریق نقاط کنترل زمینی بهبود می‌یابند میسر نبود. ولی از آنجایی که تحقیقات متعددی از جمله [۲۳] به تصحیح RPC های این تصاویر پرداخته‌اند تصمیم گرفته شد تا نتایج روش پیشنهادی با حالتی که RPC ها از طریق نقاط کنترل زمینی بهبود می‌یابند مقایسه گردند. طبق منابع مختلف، تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 در حالیکه RPC آنها از طریق رابطه‌ی افاین و با حداقل ۶ نقطه‌ی کنترل زمینی با توزیع و دقت مناسب بهبود یابند قطعاً به دقت زیر یک پیکسل منجر خواهند شد. با این حال، در این تحقیق نشان داده شد که بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی و مشکلات استفاده از آن می‌توان به دقت حدود یک پیکسل و بهتر رسید.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تصحیح RPC تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5، DEM سازمان نقشه‌برداری کشور با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر استفاده شد. به علت وجود خطاهای RPC، دقت زمین مرجع نمودن این تصاویر در حدود چند ده متر (چند ده پیکسل) است. در این تحقیق برای رفع این خطاها ابتدا DEM

مراجع

- [1] H. Bagheri, S. Sadeghian, "intelligent geometric correction of satellite images (Case study: IKONOS image using Genetic algorithm) ", satellite development for sustainable development, 2012 (In Persian).
- [2] S. Yavari, M. J. Valadan Zoj, A. Mohammadzadeh, and M. Mokhtarzade, "Particle swarm optimization of RFM for georeferencing of satellite images," Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol. 10, pp. 135-139, 2013.
- [3] X. Tong, S. Liu, and Q. Weng, "Bias-corrected rational polynomial coefficients for high accuracy geo-positioning of QuickBird stereo imagery," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,

- vol. 65, pp. 218-226, 2010.
- [4] P. d'Angelo, M. Lehner, T. Krauss, D. Hoja, and P. Reinartz, "Towards automated DEM generation from high resolution stereo satellite images," in International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, pp. 1137-1342.
- [5] T. Toutin, C. Schmitt, and H. Wang, "Impact of no GCP on elevation extraction from WorldView stereo data," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 72, pp. 73-79, 2012.
- [6] J. Oh and C. Lee, "Automated bias-compensation of rational polynomial coefficients of high resolution satellite imagery based on topographic maps," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 100, 2015.
- [7] J. Oh, C. Lee, and D. C. Seo, "Automated HRSI georegistration using orthoimage and SRTM: Focusing KOMPSAT-2 imagery," Computers & Geosciences, vol. 52, pp. 77-84, 2013.
- [8] T.-A. Teo and S.-H. Huang, "Automatic co-registration of optical satellite images and airborne LiDAR data using relative and absolute orientations," Ieee Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing, vol. 6, pp. 2229-2237, 2013.
- [9] J. Gonçalves, "Orientation of SPOT stereopairs by means of matching a relative DEM and the SRTM DEM," in Proceedings of the Internaionaf Calibration and Orientation Workshop-EuroCow2006, 2006.
- [10] T. Kim and J. Jeong, "DEM matching for bias compensation of rigorous pushbroom sensor models," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66, pp. 692-699, 2011.
- [11] J. Jeong and T. Kim, "The Use of Existing Global Elevation Dataset for Absolute Orientation of High Resolution Image Without Gcps," ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 1, pp. 287-290, 2012.
- [12] P. d'Angelo and P. Reinartz, "DSM based orientation of large stereo satellite image blocks," Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, vol. 39, pp. 209-214, 2012.
- [13] P. d'Angelo, A. Uttenthaler, S. Carl, F. Barner, and P. Reinartz, "Automatic Generation of High Quality DSM Based on IRS-P5 Cartosat-1 Stereo Data," in ESA Living Planet Symposium, Bergen 28-Jun to 02-Jul-2010, Special Publication SP, 2010.
- [14] J. Grodecki, G. Dial, and J. Lutes, "Mathematical model for 3D feature extraction from multiple satellite images described by RPCs," in ASPRS Annual Conference Proceedings, Denver, Colorado, 2004.
- [15] C. Li, Y. Shen, B. Li, G. Qiao, S. Liu, W. Wang, et al" „An improved geopositioning model of QuickBird high resolution satellite imagery by compensating spatial correlated errors," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 96, pp. 12-19, 2014.
- [16] J. Amini, "Analytical Photogrammetry", University of Tehran, 2013, (In Persian).
- [17] H. Topan, "First experience with figure condition analysis aided bias compensated rational function model for georeferencing of high resolution satellite images," Journal of the Indian Society of Remote Sensing, vol. 41, pp. 807-818, 2013.
- [18] R. C. Gonzalez, Digital image processing: Pearson Education India, 2009.
- [19] A. Seif, B. Ebrahimi, "Evaluation of the accuracy of SRTM AND GDEM using NIDEM", Iranian Journal of Remote Sencing & GIS, 2012 (In Persian).

- [20] R. Fabio, "From point cloud to surface: the modeling and visualization problem," International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34, p. W10, 2003.
- [21] Z. C. Marton, R. B. Rusu, and M. Beetz, "On fast surface reconstruction methods for large and noisy point clouds," in Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on, 2009, pp. 3218-3223.
- [22] I. Foster, Y. Zhao, I. Raicu, and S. Lu, "Cloud computing and grid computing 360-degree compared," in Grid Computing Environments Workshop, 2008. GCE'08, 2008, pp. 1-10.
- [23] E. Baltsavias, S. Kocaman, and K. Wolff, "Analysis of Cartosat- 1 images regarding image quality, 3D point measurement and DSM generation," The Photogrammetric Record, vol. 23, pp. 305-322, 2008.

..



Automated bias compensation of RPCs of IRS-P5 satellite images using DEM

Amin Alizadeh Naeini^{*1}, Safa Khazaie², Hossein Arefi³, Abolfazl Jamshidzadeh⁴

1- Assistant professor in Department of Geomatics, College of Engineering, University of Isfahn

2- Assistant professor in Department of Civil Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran

3- Assistant professor in Faculty of Geomatics and spatial information, College of Engineering, University of Tehran

4- MS graduated in Remote Sensing, Faculty of Geomatics and spatial information, University of Tehran

Abstract

Overlapping satellite images are one of the key solutions in both generating and updating of spatial data like digital elevation model (DEM). To do this, rational polynomial coefficients (RPCs), as an essential Meta data for satellite images, are regularly used. Nonetheless, these coefficients due to some systematic errors in their gathering lead to an erroneous DEM. Accordingly, in this study a new method is proposed to make it possible to obtain an accurate DEM using automated bias compensation of the RPCs in object space. In this method, RPC biases on the resulting DEM are nearly removed using a 2.5D matching procedure between IRS-P5 derived DEM and the national-cartographic-center DEM (NCC DEM). The experimental results of this study showed that using both 10-meter NCC DEM and stereo images of IRS-P5 satellite images can achieve about one pixel level of accuracy or better in both DEM generating and updating.

Key words: Bias compensation of the RPCs, DEMs, IRS-P5 satellite images, 2.5 matching