

تولید مدل رقومی ارتفاعی دقیق از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی

امین علیزاده نائینی^{۱*}، صفا خزائی^۲

۱- استادیار، دانشگاه اصفهان ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)
 (دریافت: ۹۴/۰۲/۱۵، پذیرش: ۹۴/۰۳/۲۴)

چکیده

تهیه و به‌روزرسانی اطلاعات مکانی برای مناطق استراتژیک کشور به‌ویژه در مناطق مرزی یکی از چالش‌های اساسی در حوزه اطلاعات دفاعی محسوب می‌شود. در این خصوص، مدل رقومی ارتفاعی زمین می‌تواند جهت حذف هر گونه عملیات زمینی در یک فرایند مستقیم بین فضای زمین و تصاویر ماهواره‌ای پوششی استفاده شود. در این فرایند تنها از ضرایب چندجمله‌ای‌های کسری تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. با این وجود، این ضرایب به دلیل خطاهایی که در جمع‌آوری آن‌ها وجود دارد، دارای یک سری خطا هستند که باید به نحوی حذف شوند. در روش پیشنهادی این تحقیق، تأثیرات خطاهای ناشی از این ضرایب برای تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 از طریق تناظریابی ۲٫۵ بعدی بین مدل رقومی ارتفاعی حاصل از زوج تصاویر IRS-P5 و مدل رقومی ارتفاعی جهانی ASTER کاهش می‌یابند. نتایج عددی، حاصل از مقایسه مدل رقومی ارتفاعی حاصل با نقاط چک زمینی نشان دادند که توسط روش پیشنهادی می‌توان به دقت ارتفاعی حدود ۷ متر رسید.

کلید واژه‌ها: تهیه DEM، تناظریابی DEM، تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5

Generating Accurate Digital Elevation Model from IRS-P5 Satellite Images without Utilization of Ground Control Points

A. Alizadeh Naeini*, S. Khazaei

University of Isfahan

(Received: 05/05/2015; Accepted: 14/06/2015)

Abstract

Generating and modifying spatial data for strategic areas of the country, especially boundary areas, is one of the key challenges in the defense technical information community. In this regard, digital elevation model (DEM) can be utilized to remove every ground operations in a direct process between the earth and overlapping satellite images. In this process, rational polynomial function (RPCs) are only used. However, these coefficients due to some errors in their gathering have some errors that must be removed in a manner. In proposed method of this study, the effects of RPC errors on IRS-P5 satellite images are reduced using the 2.5D matching procedure between IRS-P5 derived DEM and ASTER global DEM. Experimental results obtained by comparison between the resulting DEM and few available check points shows that the proposed method can achieve vertical accuracy of about 7 meter.

Keywords: DEM Generation, DEM Matching, IRS-P5 Satellite Images

*Corresponding Author E-mail: a.alizadeh@eng.ui.ac.ir

۱. مقدمه

محققین دنبال آن هستند تا تعداد ترم‌های بهینه و نقاط کنترل زمینی لازم برای تصحیح RPC تصاویر را پیدا کنند [۳]. تصحیح RPC‌ها 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 برمی‌گردد، عملیات جمع‌آوری داده‌ها باعث زمان‌بر شدن و هزینه‌بر شدن فرآیند تولید DEM خواهد شد. لازم به ذکر است که DEM منطقه باید به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین و ابتدایی‌ترین مراحل تهیه و تولید تصاویر زمین مرجع در اسرع وقت انجام شود. مشکل سوم، وابستگی دقت نهایی تولید DEM به دقت نقاط کنترل زمینی است. معمولاً نقاط کنترل زمینی توسط سازمان‌های خصوصی تهیه می‌شوند که دقت ارائه‌شده توسط آن‌ها همیشه جای بحث دارد. مشکل چهارم در ارتباط با پیدا کردن نقطه نظیر نقطه کنترل زمینی روی عکس است که نه تنها فرآیند پیچیده‌ای است بلکه فرآیند تهیه DEM را نیز به دلیل نیاز به یک شخص خبره از حالت خودکار خارج می‌کند.

برای رفع مشکلات مذکور، محققین تلاش نموده‌اند تا با تکیه بر یک‌سری اطلاعات مداری ماهواره [۵] یا داده‌های مکانی موجود و رایگان از منطقه و بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی RPC‌ها را بهبود دهند. در این راستا، تهیه DEM دقیق منطقه با تکیه بر داده‌های مکانی موجود و بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی مورد توجه محققان قرار گرفت. تحقیقات صورت پذیرفته در این حوزه را می‌توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد. در گروه اول، RPC‌ها از طریق نقشه‌های بزرگ مقیاس دیجیتال موجود از منطقه بهبود داده می‌شوند. به‌عنوان مثال اوه و لی [۶] برای تصحیح RPC‌ها یک روش دو مرحله‌ای ارائه کردند. در مرحله اول توسط RPC‌ها نقشه دیجیتال به فضای تصویر منتقل شد. در مرحله بعد از طریق تناظر یابی لبه‌ها توسط روش RECC^۶ در نقشه تصویر شده با تصویر اصلی مقدار شیفت تعیین و تصحیح صورت پذیرفت.

در گروه دوم از کارهای صورت‌پذیرفته، RPC‌ها از طریق تصاویر تصحیح قائم‌شده بهبود داده می‌شوند. مثلاً اوه و همکاران [۷] از تصاویر اورتوتوی موجود در منطقه برای بهبود فراداده‌های RPCs استفاده کردند. این تصاویر اورتوتو با قدرت تفکیک مکانی یک متر توسط USGS^۷ برای منطقه آمریکا تولید شده‌اند. در این مطالعه در ابتدا مختصات تصویر اورتو شده به تصویر Kamposat2، تصویر می‌شود. بنابراین هر پیکسل از تصویر اورتوشده در یک فضایی از تصویر Kamposat2 قرار می‌گیرد. از آنجایی که RPCs برای این انتقال مورد استفاده قرار گرفتند، خطای موجود در تصویر اورتوی تصویر شده در فضای تصویر، نشان‌دهنده خطای RPC‌ها خواهد بود. در مرحله بعد می‌بایست موقعیت صحیح تصویر از طریق تناظر یابی بین تصویر اورتوی تصویر شده و تصویر Kamposat2 به‌دست آید. در

بخش عمده‌ای از مناطق مرزی کشور به دلیل عواملی از قبیل تهدیدات نظامی آمریکا و برخی کشورهای منطقه، تردد گروه‌های معاند و تروریستی، تردد قاچاقچیان و وجود میادین مین و مهمات عمل نکرده ناامن تلقی می‌شوند. این محدودیت‌ها در کنار مسائل زمین‌شناختی منطقه (توپوگرافی خشن و عدم دسترسی به راه‌ها) در زمینه جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مکانی باعث پرهزینه شدن و افزایش ریسک‌پذیری در خصوص مطالعه و اجرای پروژه‌های دفاعی و عمرانی در مناطق مرزی شده است. بنابراین یافتن راهی مطمئن برای کسب اطلاعات مکانی دقیق از مناطق مرزی کشور موضوعی مهم از دیدگاه پدافند غیرعامل محسوب می‌شود. مدل رقومی ارتفاعی (DEM^۱) یک منبع اصلی تولید اطلاعات مکانی نظیر نقشه‌های شیب و جهت شیب زمین و نیز تصاویر هوایی و ماهواره‌ای تصحیح قائم شده (اورتوتو)^۲ است که به دلیل هزینه‌های بسیار بالای عملیات‌های میدانی نقشه‌برداری، معمولاً از تصاویر پوششی هوایی و ماهواره‌ای تولید می‌شود. اما از آنجا که در مناطق مرزی اجازه پرواز و برداشت داده توسط هواپیماها با دشواری و خطر زیادی همراه است، بهترین راه حل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است.

اغلب تصاویر ماهواره‌ای از جمله IRS-P5 دارای ضرایب چندجمله‌ای‌های نسبتی (RPC^۳) هستند که از طریق آن‌ها تهیه و تولید DEM به سادگی قابل انجام است. بر اساس این‌که رابطه بین فضای تصویر و زمین چگونه برقرار شده باشد، روش‌های تهیه DEM را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. در روش‌های دسته اول، تهیه DEM توسط مدل‌های چندجمله‌ای نسبتی^۴ زمین مبنا و با تکیه بر یک‌سری نقاط کنترل زمینی انجام می‌شوند. در این روش‌ها، معمولاً محققین تلاش می‌کنند تا تعداد ترم‌های بهینه چندجمله‌ای‌های نسبتی را تخمین زنند [۱ و ۲]. اما از آنجایی که این روش‌ها به تعداد زیادی نقطه کنترل با توزیع مناسب نیاز دارند، بنابراین در راستای هدف این تحقیق نیستند. در روش‌های دسته دوم، DEM منطقه توسط مدل‌های نسبتی زمین مستقل و به‌صورت مستقیم به‌دست می‌آیند. با این حال، این DEM به دلیل خطاهای سیستماتیک که در RPC‌ها 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 به آن) معمولاً حدود چند ده پیکسل است [۴] که بسیار قابل‌ملاحظه است. بنابراین در روش‌های دسته دوم، محققین معمولاً دنبال آن هستند که به نحوی RPC‌ها را تصحیح کنند. برای جبران و حذف خطاهای مربوط به RPC‌ها باید از یک‌سری نقاط کنترل زمینی دقیق که از طریق نقشه‌برداری زمینی از جمله مشاهدات تفاضلی GPS^۵ جمع‌آوری شده‌اند، استفاده کرد. در این روش‌ها معمولاً

¹ Digital Elevation Model

² Ortho-Rectified Image

³ Rational Polynomial Coefficient

⁴ Rational Polynomials

⁵ Global Positioning System

⁶ Relative Edge Cross Correlation

⁷ United States Geological Surveys

داده‌های SRTM DEM و تناظریابی سه‌بعدی بین DEM استخراج‌شده در مرحله قبل و SRTM DEM RPCها بهبود نهایی می‌یابند. در کار مشابه دیگری از همین محققان [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. محققان 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 خواهد خورد. برای رفع این مشکل در مناطق مسطح در [۱۲]، با بلوکی از عکس‌ها کار شد تا با تعداد بالای پرتوهای نوری مربوط به هر نقطه به دقت بالایی دست پیدا کنند.

برای بهبود DEM حاصل از RPCهای خطادار، در این تحقیق، در مرحله اول، DEM نسبی زوج تصاویر IRS-P5 تهیه می‌شود. در مرحله دوم با استفاده از روش تناظریابی Mutual، DEM نسبی نسبت به ASTER DEM [۱۴] که به صورت رایگان از تمامی مناطق جهان وجود دارد، توجیه می‌شود و در نهایت در مرحله سوم از طریق اعمال یک شیفت ارتفاعی به DEM نسبی، مدل توجیه و در نهایت تصحیح خواهد شد.

بر خلاف سایر تحقیقات صورت پذیرفته که توجیه 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 به جای روش‌های تناظریابی سه‌بعدی از یک طرف و DEMهای رستر به جای ابر نقاط از طرف دیگر، روش پیشنهادی با سرعت و دقت بالاتری قادر به مدیریت داده‌های ارتفاعی (DEM) با حجم بالا خواهد بود [۱۷-۱۵]. از طرف دیگر روش پیشنهاد شده در این تحقیق به اختلاف اندازه و قدرت تفکیک مکانی بین دو DEM حساس نبوده و بنابراین با استفاده از آن به راحتی می‌توان DEMهایی با قدرت تفکیک مکانی بالا را از طریق DEMهای رایگان مثل ASTER GDEM تهیه کرد. در این راستا، در این تحقیق سعی شده است با استفاده از DEM رایگان ASTER، DEM ۱۰ متری منطقه تهیه شود.

۲. تهیه DEM با تکیه بر مدل RPC تصاویر ماهواره‌ای

مدل توابع چندجمله‌ای‌های کسری (RPC)، رابطه بین یک نقطه روی تصویر (L,s) و نقطه نظیرش روی زمین یعنی (B,L,H) را از طریق نسبت دو چندجمله‌ای از درجه سه مشخص می‌کند (رابطه (۱)).

$$\begin{cases} 1 = \frac{P_1(B,L,H)}{P_2(B,L,H)} \\ s = \frac{P_3(B,L,H)}{P_4(B,L,H)} \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه بالا، L و s مختصات نرمال شده نقطه در سامانه مختصات تصویری و B و L و H به ترتیب عرض و طول جغرافیایی و ارتفاع نرمال شده نقطه هستند. نرمالیزاسیون نقاط طبق رابطه (۲) به دست می‌آید:

نهایت خروجی تناظریابی یک تعداد GCPs در فضای تصویر است که در زمین مرجع نمودن تصویر مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

در گروه سوم، از داده‌های لیزر اسکنر هوایی (لیدار) برای تصحیح RPCها استفاده می‌شود. تئو و هووانگ [۸] روشی ارائه دادند که در آن 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 را تهیه کردند. سپس با استفاده از روش تناظریابی سه‌بعدی مربعات تناظریابی بین مدل سه‌بعدی نسبی و داده‌های سه‌بعدی لیدار صورت پذیرفت. 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، RPCها یا DEM^۱ حاصل از آن‌ها از طریق DEMهای موجود از منطقه یا DEMهای رایگان مانند ASTER GDEM^۲ بهبود داده می‌شوند. از آنجایی که از منطقه مورد مطالعه هیچ نقشه، تصویر اورتو یا داده لیداری وجود نداشت، در این تحقیق روش چهارم مورد توجه قرار گرفته است و برای همین منظور تحقیقات بیشتری در این زمینه مورد توجه و ارزیابی قرار گرفته است. در تحقیقی گونچالوز [۹]، با تکیه بر تناظریابی، DEM، تصاویر SPOT-5 را با دقت ۱۰ متر زمین مرجع کرد. 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 DEM^۳ زمین مرجع نمودن انجام می‌شود. کیم و همکارانش [۱۰] نشان دادند که با تکیه بر تناظریابی بین DEM نسبی حاصل از تناظریابی زوج تصویر ماهواره‌ای و یک DEM مرجع در فضای زمین می‌توان RPCها را بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی بهبود داد. در تحقیق مشابه دیگری از کیم [۱۱]، فراداده‌های RPCs مربوط به تصاویر ماهواره‌ای Spot-5 با تکیه بر تناظریابی DEM نسبی با SRTM DEM بهبود یافتند. محققان در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که با تکیه بر SRTM DEM می‌توان به دقتی حدود دو پیکسل سبزه در مسطحات و حتی بهتر از این مقدار در ارتفاعات برسند [۱۱]. دی‌آنجلو و راینارتز [۱۲]، متذکر شده‌اند که RPCها 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 اورتو یا DEM می‌بایست RPCها توسط رابطه افاین و حداقل سه نقطه کنترل زمینی یا تصویری بهبود یابند. در این مطالعه، GCPها به صورت خودکار از داده‌های رایگان ETM^۴ و SRTM DEM استخراج می‌شوند. برای این منظور، RPCها در ابتدا با تکیه بر داده‌های ETM+ بهبود اولیه یافتند. سپس با استفاده از این RPCها و زوج تصویر CARTOSAT-1، DEM منطقه استخراج شد. در نهایت با استفاده از

¹ Digital Elevation Model

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

³ Shuttle Radar Topography Mission

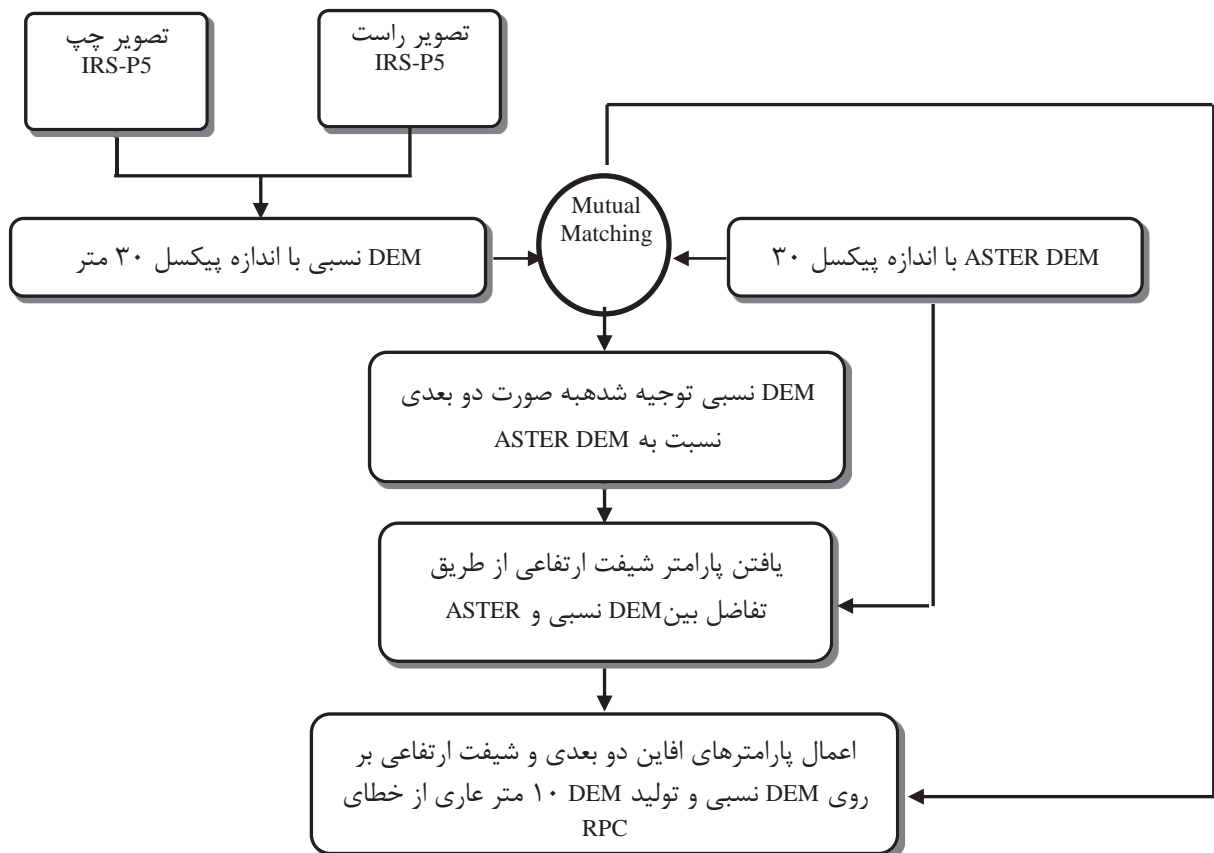
⁴ Ground Control Points

⁵ Enhanced Thematic Mapper Plus

شیفت و مقیاس (رابطه (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 به‌دست آورد [۱۸].

۳. روش پیشنهادی

فلوچارت روش پیشنهادی برای تصحیح DEM به‌دست‌آمده از RPC‌های خطادار تصاویر پوششی IRS-P5 در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، در ابتدا DEM حاصل از زوج تصویر IRS-P5 با استفاده از RPCها تولید خواهد شد (بخش ۲). از آنجایی که اندازه پیکسل DEM ASTER ۳۰ متر است، DEM نسبی نیز با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه می‌شود تا تناظرایی با دقت بالاتری بین دو DEM صورت پذیرد. در مرحله بعدی، DEM نسبی با استفاده از روش تناظرایی mutual (بخش ۳-۱) نسبت به DEM ASTER توجیه می‌شود. مدلی که برای برقراری این ارتباط استفاده می‌شود، مدل Affine دو بعدی است که برای این تصاویر توصیه شده است [۴ و ۱۹]. در مرحله بعد از طریق تفاضل بین DEM نسبی بهبود داده شده در دو بعد و DEM ASTER و میانگین مقادیر به‌دست آمده، شیفت ارتفاعی به‌دست می‌آید. در نهایت، با اعمال این پارامترها به DEM نسبی با هر قدرت تفکیکی (در اینجا ۱۰ متر) می‌توان به DEM نسبی بهبودیافته‌شده، دست یافت.



شکل ۱. روش پیشنهادی برای تصحیح DEM حاصل از RPCهای خطادار

$$\begin{cases} l = \frac{Line-LINE_OFF}{LINE_SCALE}, & s = \frac{Sample-SAMPLE_OFF}{SAMPLE_SCALE} \\ B = \frac{\phi-LAT_OFF}{LAT_SCALE}, & L = \frac{\lambda-LONG_OFF}{LONG_SCALE} \\ H = \frac{h-HEIGHT_OFF}{HEIGHT_SCALE} \end{cases} \quad (2)$$

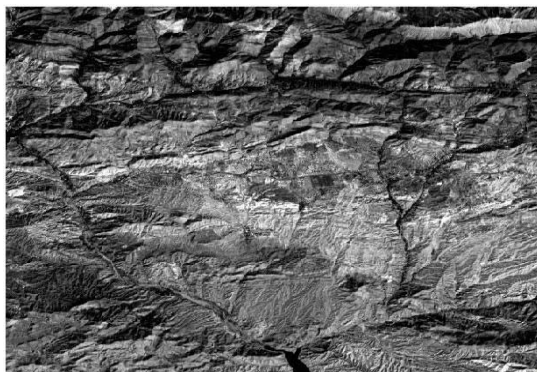
در روابط بالا، l و s مختصات تصاویر نقاط، $LINE_OFF$ ، $SAMPLE_OFF$ ، $LINE_SCALE$ ، $SAMPLE_SCALE$ به‌ترتیب مقادیر شیفت و مقیاس برای l و s هستند. ϕ ، λ و h عرض و طول جغرافیایی و ارتفاع نقطه هستند. LAT_OFF ، $LONG_OFF$ و $HEIGHT_OFF$ مقادیر شیفت برای سه مؤلفه مذکور و در نهایت LAT_SCALE ، $LONG_SCALE$ و $HEIGHT_SCALE$ مقادیر مقیاس برای عرض و طول جغرافیایی و ارتفاع نقاط هستند.

مدل توابع کسری یا RPC یک نگاشت ریاضی (رابطه (۱)) بین فضای سه‌بعدی زمین و فضای دو بعدی تصاویر است. همان‌طور که مشخص است این مدل از چهار چندجمله‌ای با درجه سه تشکیل شده است که هر یک از این چندجمله‌ای‌ها دارای ۲۰ ضریب است. بنابراین در مجموع ۸۰ ضریب وجود دارد که این ضرایب به 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 چندجمله‌ای اشاره‌شده در بالا به‌همراه پارامترهای

اندازه‌گیری MI^1 بین دو تصویر، ترکیبی از مقادیر آنروپی دو تصویر

۳-۱. تناظرایی از طریق Mutual Information

زمینی که مختصات آن‌ها در جدول (۱) آورده شده، استفاده شده است. لازم به ذکر است که این نقاط از طریق GPS دو فرکانسه و به صورت تفاضلی توسط سازمان جغرافیایی جمع‌آوری شده‌اند. در **شکل (۴)**، نقاط چک روی DEM منطقه نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲. زوج تصویر IRS-P5 از منطقه بومهن؛ الف: تصویر سمت چپ، ب: تصویر سمت راست

جدول ۱. نقاط چک زمینی مورد استفاده در این تحقیق

| شماره نقطه | X (UTM) | Y (UTM) | Z _{EL} ⁴ |
|------------|------------|-------------|------------------------------|
| ۱ | ۵۷۶۷۷۱/۸۱۹ | ۳۹۵۰۰۷۱/۹۷۰ | ۱۶۶۹/۸۵۲ |
| ۲ | ۵۷۶۱۸۱/۳۱۴ | ۳۹۵۰۱۸۵/۸۹۱ | ۱۶۴۲/۵۹۳ |
| ۳ | ۵۷۵۷۹۳/۵۱۳ | ۳۹۵۰۶۱۵/۸۵۳ | ۱۷۱۲/۰۷۳ |
| ۴ | ۵۷۵۷۰۱/۲۷۳ | ۳۹۴۹۵۲۹/۸۳۴ | ۱۶۲۵/۹۵۳ |

بعد از انتخاب زوج تصویر با تکیه بر مفهوم تقاطع و استفاده از RPC، DEM نسبی منطقه تولید خواهد شد که این مدل در **شکل (۳)** نمایش داده شده است. در مرحله بعد می‌بایست خطای سیستماتیک این مدل رقومی ناشی از خطاهای موجود در RPCها به دلیل وجود یکسری خطا در جمع‌آوری آن‌ها مرتفع شود. در **شکل (۴)** 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. برای این منظور همان‌طور که گفته شد از ASTER DEM منطقه که در **شکل (۵)** نمایش داده شده، استفاده می‌شود.

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^۲ است [۲۰]. آنتروپی شنون برای n پیکسل با احتمالات p_1 تا p_n طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H = \sum_{i=1}^n p_i \log(1/p_i) \quad (۳)$$

برای محاسبه آنتروپی از هیستوگرام تصویر استفاده می‌شود که در آن هر جزء نشان‌دهنده احتمال پیکسل‌ها است. از سوی دیگر، برای محاسبه آنتروپی مشترک^۳ 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 افزایش می‌یابد. بنابراین ثبت هندسی تصویر به تصویر یا سطح به سطح در ارتباط با DEMها از طریق حداقل کردن آنتروپی مشترک می‌تواند صورت پذیرد. با این حال، اگر آنتروپی هر یک از تصاویر نیز در نظر گرفته شود به معیار جامع‌تری دست خواهیم یافت که در رابطه (۴) آورده شده است.

$$MI(U, V) = H(U) + H(V) - H(U, V) \quad (۴)$$

در این رابطه، $H(U)$ آنتروپی تصویر U ، $H(V)$ آنتروپی تصویر V و $H(U, V)$ آنتروپی مشترک است. بنابراین یک ثبت بهینه می‌تواند از طریق حداکثر کردن معیار MI بین دو تصویر حاصل شود. لازم به ذکر است که معیار MI در برابر تغییراتی که به خاطر تغییر حسگر حاصل می‌شود، پایدار است و بنابراین می‌توان از آن برای تناظریابی تصاویر یا سطوح با قدرت تفکیک‌های مختلف استفاده کرد.

۴. مطالعه موردی

۴-۱. داده‌های مورد استفاده ۱۶۶۹/۸۵۲

تصاویر مورد استفاده در این تحقیق، جفت تصویر IRS-P5 با اندازه پیکسل ۲/۵ متر است. دلیل انتخاب این تصاویر، دسترسی کامل سازمان جغرافیایی به این داده‌ها است. از آنجایی که برای ارزیابی روش پیشنهادی هیچ نقطه چک زمینی از مناطق مرزی موجود نبود، تصمیم گرفته شد تا از تصاویر مربوط به محدوده‌ای استفاده شود که (۱) نقاط چک برای ارزیابی آن موجود باشد و (۲) ویژگی‌های مناطق مرزی (کوهستانی یا دشتی) را در بعضی از بخش‌های خود داشته باشد. بنابراین محدوده مورد مطالعه منطقه‌ای در شمال شرق استان تهران نزدیک شهر بومهن در نظر گرفته شد که نه تنها کوهستانی است بلکه در بخش‌هایی از آن مناطق دشتی و مسکونی نیز وجود دارد (**شکل (۲)**).

۴-۲. ارزیابی دقت روش پیشنهادی

به‌منظور ارزیابی روش ارائه‌شده، در این تحقیق از چهار نقطه چک

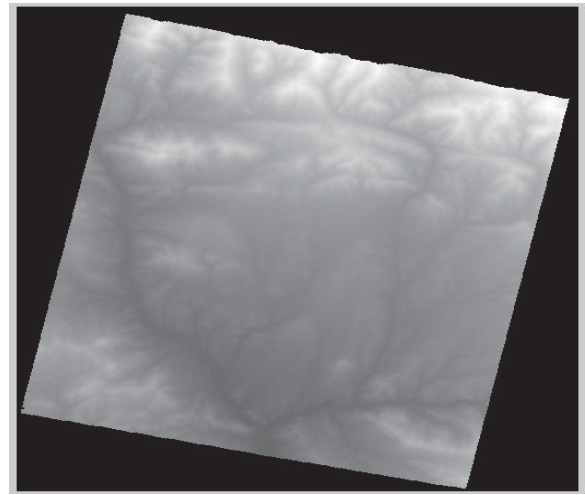
¹ Mutual Information

² Shannon

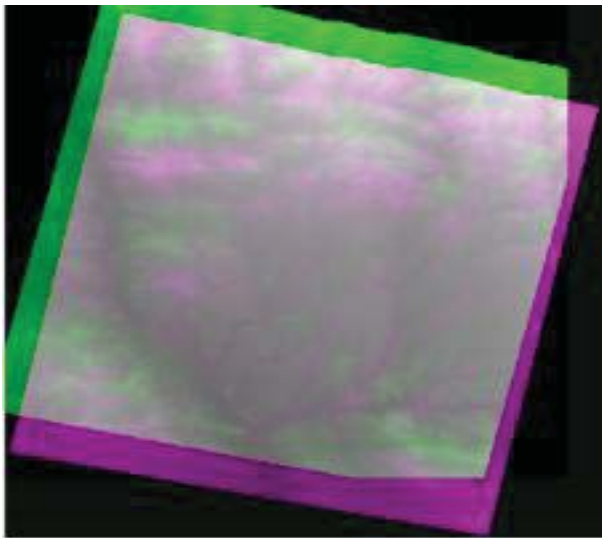
³ Joint Entropy

⁴ Ellipsoid

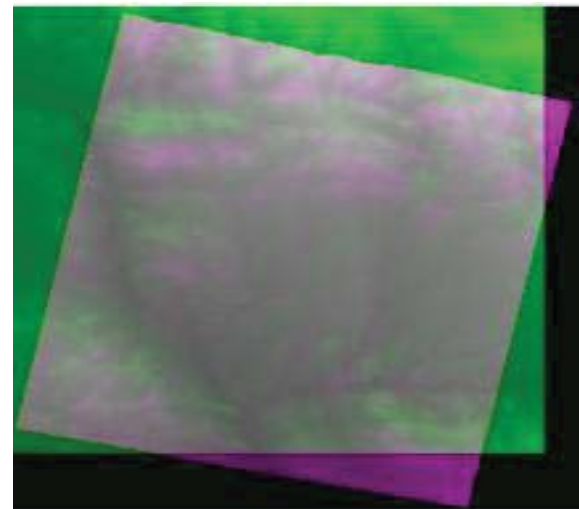
ارتباط بین دو مدل رقومی از مدل افاین دو بعدی استفاده شد. زیرا در تحقیقات نشان داده شد که خطای مسطحاتی موجود در DEM حاصل از تصاویر IRS-P5 از نوع افاین دوبعدی است [۱۹]. همان‌طور که در شکل (۶-ب) ملاحظه می‌شود، DEM نسبی با دقت بالایی نسبت به مدل رقومی ارتفاعی در فضای دو بعدی توجیه شده است و رنگ خاکستری نشان‌دهنده 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 (۶-الف) موقعیت DEM نسبی قبل و بعد از تناظریابی آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش تناظریابی mutual قادر بوده خطای مسطحاتی DEM نسبی (حدود ۶۳ پیکسل در راستای لاین و ۱۵ پیکسل در راستای سمپل) را به‌طور کامل مرتفع سازد.



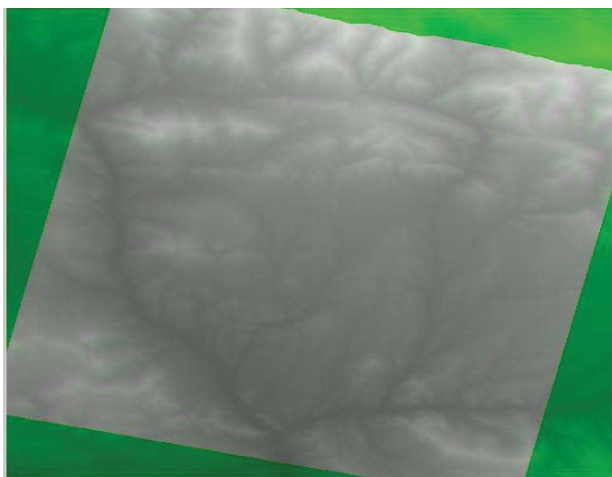
شکل ۳. DEM نسبی تهیه‌شده با استفاده از RPCهای زوج تصویر IRS-P5



الف



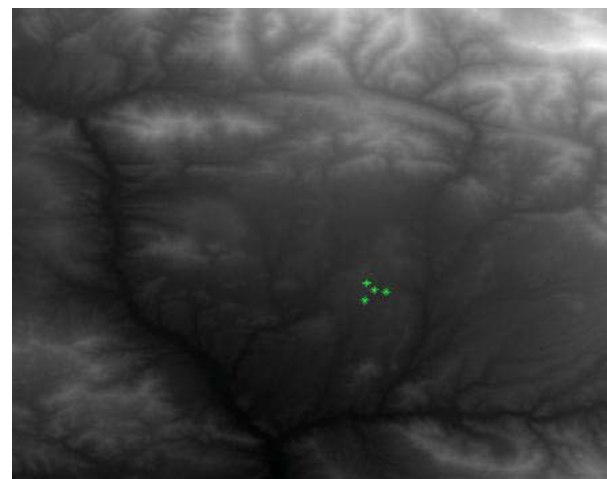
شکل ۴. موقعیت DEM نسبی و ASTER DEM نسبت به یکدیگر



ب

شکل ۶. توجیه DEM نسبی. الف: مقایسه DEM نسبی قبل و بعد از تناظریابی؛ ب: ثبت هندسی DEM نسبی نسبت به ASTER DEM

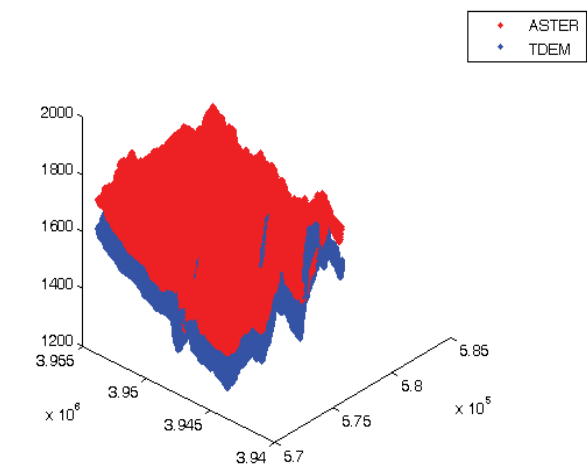
لازم به توضیح است اگر تناظریابی بین DEMهای مورد مطالعه به‌صورت دقیق صورت نپذیرد، رنگ خاکستری بین DEM نسبی و DEM جهانی به رنگ صورتی تغییر خواهد کرد که بسته به خطای



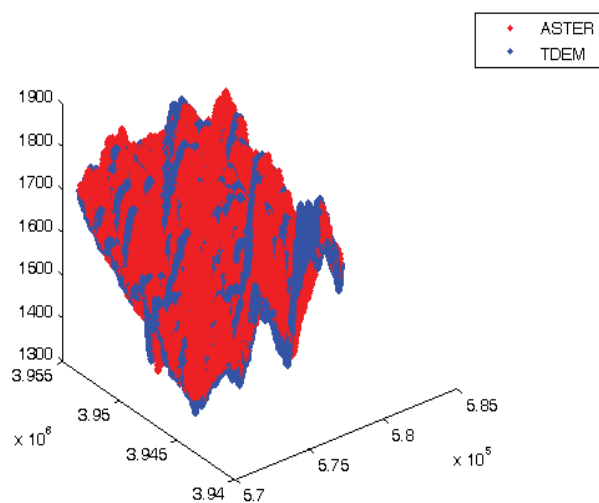
شکل ۵. ASTER DEM از منطقه مورد مطالعه به‌همراه نقاط چک زمینی مورد استفاده (جدول ۱)

همان‌طور که در بخش سه توضیح داده شد این خطا را می‌توان از طریق تناظریابی ۲/۵ بعدی مرتفع کرد. برای این منظور از روش تناظریابی mutual استفاده شد و همان‌طور که ذکر شد برای ایجاد

روش پیشنهادی این تحقیق قادر است به دقتی بهتر از یک پیکسل (یعنی ۱۰ متر) دست یابد. از سوی دیگر، اگر در ارزیابی کمی اندازه پیکسل تصویر مورد توجه قرار گیرد، استفاده از روش پیشنهادی به دقتی بهتر از ۳ پیکسل منجر می‌شود.



الف



ب

شکل ۷. نمایش: الف- DEM نسبی قبل از اعمال شیفت ارتفاعی،
ب- DEM نسبی بعد از اعمال شیفت ارتفاعی

تناظریابی، شدت و میزان این رنگ متفاوت خواهد بود. با این حال، اگر تناظریابی بین دو DEM به صورت خطادار صورت پذیرد در مرحله اول لازم است با تکیه بر یک DEM با قدرت تفکیک مکانی بالا^۱ (مانند DEM حاصل از لیدار^۲) خطای مسطحاتی را پیدا کرد. 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 می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

برای این منظور و پیدا کردن این شیفت ارتفاعی دو مدل رقومی را از هم کم کرده و میانگین تفاضلات را به عنوان شیفت ارتفاعی در نظر گرفته می‌شود. بعد از اعمال این شیفت (حدود ۹۱ متر)، مدل رقومی ارتفاعی مورد نظر تصحیح خواهد شد که در شکل (۶) این مدل در مقایسه با مدل ASTER نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که قدرت تفکیک مکانی DEM بهبود یافته سه برابر بهتر از ASTER DEM است و به خاطر همین مطلب تعداد این نقاط در شکل بیشتر است. لازم به ذکر است که در شکل‌های (۶ و ۷) محورهای x و y به ترتیب طول و عرض نقاط در سامانه مختصات UTM^۳ و محور z ارتفاع نقاط از بیضوی 84 WGS^۴ را نمایش می‌دهد که واحد هر سه پارامتر متر است.

همان‌طور که گفته شد از چهار نقطه چک زمینی برای ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شد که بخشی از DEM تصحیح شده را به همراه نقاط چک زمینی در شکل (۸) مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در زیر بخش‌های شکل (۸) نشان داده شده است، DEM نسبی تصحیح شده به خوبی بر نقاط چک زمینی موجود در منطقه منطبق شده است که این امر به صورت بصری نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر بوده تا بدون نیاز به نقاط چک زمینی DEM نسبی منطقه را بهبود دهد.

اصولاً ارزیابی کمی روش‌های تهیه DEM با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از طریق محاسبه شاخص RMSE^۵ نقاط چک زمینی صورت می‌پذیرد که معمولاً به صورت ضربی از اندازه پیکسل بیان می‌شود. لازم به توضیح است که اندازه پیکسل می‌تواند اندازه پیکسل تصویر (۲/۵ متر) و یا اندازه پیکسل DEM تولید شده (۱۰ متر) باشد که هر دو حالت در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.

بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، RMSE نقاط چک زمینی مورد استفاده برابر ۷/۴۹ متر می‌باشد. اگر در ارزیابی کمی مسئله DEM نهایی و اندازه آن مورد توجه قرار گیرد (یعنی ۱۰ متر)

^۱ High Resolution DEM

^۲ LIDAR

^۳ Universal Transverse Mercator

^۴ World Geodetic System

^۵ Root Mean Square Error

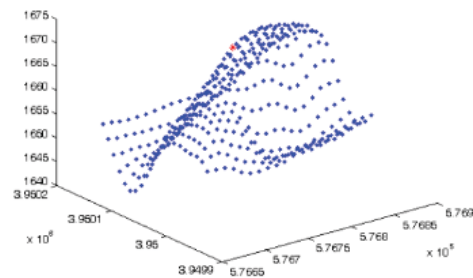
و بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی، RPC تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 به گونه‌ای بهبود یافت که DEM دقیق منطقه تولید شود. حاصل از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 به دلیل خطای RPCها با خطای بعضاً فاحشی در حدود چند ده متر همراه است. برای این منظور در این تحقیق در ابتدا DEM نسبی منطقه با استفاده از تصاویر پوششی IRS-P5 و RPCهای آن‌ها تولید شد. سپس از طریق تناظرایی بین DEM خطادار حاصله به دلیل وجود خطا در RPCها و ASTER DEM صحت DEM نسبی بهبود یافت. بر اساس نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق، از طریق روش پیشنهادی می‌توان به دقت ارتفاعی قابل قبول حدود ۷ متر در تولید DEM منطقه رسید که از نتایج آن می‌توان به تولید نقشه، تصاویر تصحیح قائم شده و تصاویر زمین مرجع زمینی دقیق از منطقه اشاره کرد. در اینجا لازم به توضیح است که به دلیل عدم دسترسی به نقاط کنترل زمینی با تعداد و توزیع مناسب از یکسو و عدم تشخیص دقیق موقعیت نقاط موجود بر روی تصویر از سوی دیگر، در این تحقیق امکان پیاده‌سازی حالتی که در آن RPCها از طریق نقاط کنترل زمینی بهبود می‌یابند، میسر نبود. ولی از آنجایی که تحقیقات متعدد از جمله [۲۱] بر روی تصحیح RPCهای این تصاویر کار کردند، تصمیم گرفته شد تا نتایج روش پیشنهادی با حالتی که RPCها از طریق نقاط کنترل زمینی بهبود می‌یابند، مقایسه شوند. طبق منابع مختلف تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 در حالی که RPCها از طریق رابطه افاین و با حداقل ۶ نقطه کنترل زمینی با توزیع و دقت مناسب بهبود یابند، قطعاً به دقت زیر یک پیکسل منجر خواهند شد. اگرچه در این حالت تهیه DEM و به دنبال آن زمین مرجع نمودن و تولید تصاویر اورتو با دقت بسیار بالایی صورت می‌پذیرد ولی مشکلاتی از قبیل عدم دسترسی به نقاط کنترل در مناطق مرزی و عدم تشخیص صحیح نقاط کنترل زمینی روی تصویر، استفاده از روش پیشنهادی این تحقیق را توجیه خواهد کرد.

۶. تشکر و قدردانی

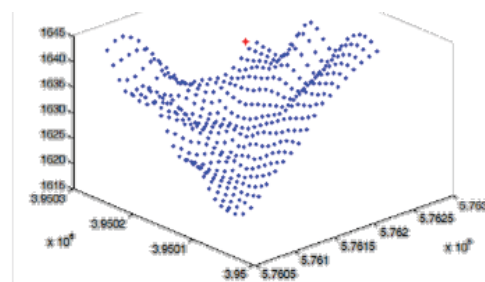
در این قسمت محققان لازم می‌دانند تا از سازمان جغرافیایی کشور به خاطر داده‌های مختلف از جمله زوج تصویر استریو IRS-P5 برای منطقه مورد مطالعه نهایت تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

۷. مراجع

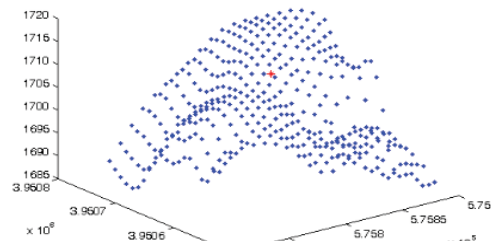
- [1] Bagheri, H.; Sadeghian, S. "Intelligent Geometric Correction of Sattlite Images (Case Study: Ikonos Image Using Genetic Algorithm)"; Sattlite Development for Sustainable Development, 2012 (In Persian).
- [2] Yavari, S.; Valadan Zoej, M. J.; Mohammadzadeh, A.; Mokhtarzade, M. "Particle Swarm Optimization of RFM for Georeferencing of Satellite Images"; IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2013, 10, 135-139.
- [3] Tong, X.; Liu, S.; Weng, Q. "Bias-Corrected Rational Polynomial Coefficients for High Accuracy Geo-Positioning of Quickbird Stereo Imagery"; ISPRS J. Photogramm. 2010, 65, 218-226.
- [4] D'angelo, P.; Lehner, M.; Krauss, T.; Hoja, D.; Reinartz, P. "Towards Automated DEM Generation from High Resolution



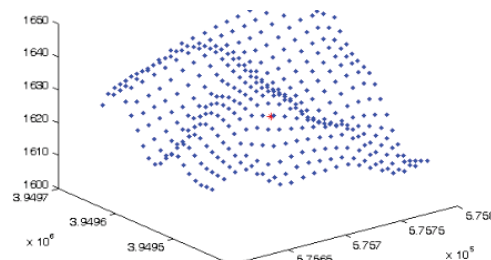
الف



ب



ج



د

شکل ۸. بخشی از DEM بهبود یافته اطراف نقاط چک الف: ۱، ب: ۲، ج: ۳،

د: ۴

۵. نتیجه‌گیری

یکی از دغدغه‌های اساسی در حوزه پدافند غیرعامل دسترسی به اطلاعات مکانی دقیق به‌ویژه DEM از مناطق مرزی است. برای این منظور می‌توان از تصاویر مختلف از جمله تصاویر هوایی و ماهواره‌ای استفاده کرد ولی از آنجایی که در مناطق مرزی هواپیماها اجازه پرواز و برداشت داده را ندارند، بهترین راه‌حل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. در این تحقیق به منظور تهیه DEM دقیق منطقه از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5، ASTER DEM منطقه مورد استفاده قرار گرفت

- [14] NASA "ASTERGDEM"; <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>, 2015.
- [15] Fabio, R. "From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem"; *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2003, 34.
- [16] Marton, Z. C.; Rusu, R. B.; Beetz, M. "On Fast Surface Reconstruction Methods for Large and Noisy Point Clouds"; *Robotics and Automation 2009*, 3218-3223.
- [17] Foster, I.; Zhao, Y.; Raicu, I.; Lu, S. "Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared"; In *Grid Computing Environments Workshop*, 2008. GCE'08, 2008, 1-10.
- [18] Grodecki, J.; Dial, G.; Lutes, J. "Mathematical Model for 3d Feature Extraction from Multiple Satellite Images Described By RPCS"; in *ASPRS Annual Conf. Proc.*, Denver, Colorado, 2004.
- [19] Topan, H. "First Experience with Figure Condition Analysis Aided Bias Compensated Rational Function Model for Georeferencing of High Resolution Satellite Images"; *J. Indian Soc. Remote* 2013, 41, 807-818.
- [20] Gonzalez, R. C. "Digital Image Processing"; Pearson Education India, 2009.
- [21] Baltsavias, E.; Kocaman, S.; Wolff, K. "Analysis of Cartosat-1 Images Regarding Image Quality, 3d Point Measurement and DSM Generation"; *Photogramm Rec.* 2008, 23, 305-322
- Stereo Satellite Images"; In *Int. Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 1137-1342.
- [5] Toutin, T.; Schmitt, C.; Wang, H. "Impact of no Gcp on Elevation Extraction from Worldview Stereo Data"; *ISPRS J. Photogramm.* 2012, 72, 73-79.
- [6] Oh, J.; Lee, C. "Automated Bias-Compensation of Rational Polynomial Coefficients of High Resolution Satellite Imagery Based on Topographic Maps"; *ISPRS J. Photogramm.* 2014.
- [7] Oh, J.; Lee, C.; Chun Seo, D. "Automated HRSI Georegistration Using Orthoimage and SRTM: Focusing Kompsat-2 Imagery"; *Comput. Geosci.* 2013, 52, 77-84.
- [8] Teo, T.-A.; Huang, S.-H. "Automatic Co-Registration of Optical Satellite Images and Airborne Lidar Data Using Relative and Absolute Orientations"; *IEEE J-STARS* 2013, 6, 2229-2237.
- [9] Gonçalves, J. "Orientation of Spot Stereopairs by Means of Matching a Relative Dem and the Srtm Dem"; *Proceedings of the Internaionaf Calibration and Orientation Workshop*, 2006.
- [10] Kim, T.; Jeong, J. "DEM Matching for Bias Compensation of Rigorous Pushbroom Sensor Models"; *ISPRS J. Photogramm.* 2011, 66, 692-699.
- [11] Jeong, J.; Kim, T. "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.* 2012, 1, 287-290.
- [12] D'angelo, P.; Reinartz, P. "DSM Based Orientation of Large Stereo Satellite Image Blocks"; *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2012, 39, 209-214.
- [13] D'angelo, P.; Utenthaler, A.; Carl, S.; Barner, F.; Reinartz, P. "Automatic Generation of High Quality DSM Based on IRS-P5 Cartosat-1 Stereo Data"; in *ESA Living Planet Symposium*, Bergen, Special Publication SP, 2010.