

ارائه روشی برای جایگزینی نقاط کنترل زمینی در بهبود مدل‌های ارتفاعی حاصل از تصاویر استرنو Cartosat-1

حامد افشارنیا^۱، حسین عارفی^{۲*}، محمدعلی شریفی^۳

^۱ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

afsharnia@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

hossein.arefi@ut.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

sharifi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت آذر ۱۳۹۶، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۷)

چکیده

اگرچه ضرایب توجیه تصاویر ماهواره‌ای یا همان اطلاعات RPC باعث سهولت پردازش هندسی تصاویر ماهواره‌ای شده‌اند اما به علت وجود بایاس در این ضرایب، نیازمند اطلاعات کنترل زمینی هستند. از طرف دیگر مرحله جمع‌آوری مستقیم اطلاعات کنترل زمینی با به-کارگیری مدل‌های ارتفاعی موجود از منطقه قابل جایگزینی می‌باشد. برای این منظور، با در اختیار داشتن حداقل یک زوج تصویر ماهواره-ای و تولید ابر نقاط سه‌بعدی از پوشش مشترک این تصاویر به کمک اطلاعات خام RPC، بحث انطباق این مدل نامنظم ارتفاعی (مدل نسبی) با یک مدل ارتفاعی منظم (مدل مطلق) مطرح می‌شود. در این تحقیق، یک روش انطباق مدل‌های ارتفاعی بر مبنای توسعه روش شیب-مبنا معرفی می‌شود به نحوی که علاوه بر انتقال سه‌بعدی، مدل نسبی در یک مرحله جداگانه تراز می‌شود. ویژگی مهم روش پیشنهادی، عدم تغییر سیستم مختصات مدل نسبی و در نتیجه برآورد خطای حاصل از بایاس اطلاعات RPC در همین سیستم مختصات می‌باشد. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، یک زوج تصویر ماهواره‌ای Cartosat-1 و مدل ارتفاعی SRTM از منطقه‌ای کوهستانی تدارک دیده شده است. در ارزیابی به کمک نقاط کنترل زمینی، مقادیر آفست مسطحاتی محاسبه شده با روش پیشنهادی در راستای طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۰/۷۷ متر و ۱/۲۳ متر با میانگین آفست محاسبه شده بر روی نقاط کنترل زمینی اختلاف نشان می‌دهد که با توجه به ابعاد پیکسل زمینی ۲/۵ متری تصاویر Cartosat-1، این برآورد با دقت حدوداً ۰/۵۸ پیکسل انجام شده است.

واژگان کلیدی: تصاویر استرنو ماهواره‌ای، بایاس اطلاعات RPC، مدل رقومی زمین، SRTM، انطباق مدل‌های ارتفاعی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

پس از انجام تناظریابی میان زوج تصویر ماهواره‌ای و تولید یک مدل ارتفاعی نسبی به کمک تقاطع فضایی بر مبنای توابع رشنال، می‌توان آن را با یک مدل ارتفاعی جهانی (مدل مطلق) که صحت مسطحاتی و ارتفاعی آن برای کاربر معلوم است، هم‌مرجع‌سازی نمود. با وجود آن‌که مدل‌های ارتفاعی جهانی، معمولاً دارای رزولوشن پائینی هستند اما صحت مسطحاتی این مدل‌ها به مراتب بهتر از مدل‌های نسبی حاصل از زوج تصاویر Cartosat-1 می‌باشد. در نتیجه، پس از هم‌مرجع‌سازی دو مدل، یک محصول با رزولوشنی بهتر از مدل مطلق و صحتی بالاتر از مدل نسبی تولید می‌گردد. این فرایند، بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی، اثر بایاس اطلاعات RPC^۱ تصاویر در محصول تولیدی را کاهش می‌دهد.

توجیه مطلق مدل‌های استرئو در حالتی که اطلاعات کنترلی از یک مدل ارتفاعی موجود استخراج شده باشد را اصطلاحاً انطباق مدل‌های ارتفاعی^۲ می‌گویند. این روش تنها برای تناظریابی میان دو مدل ارتفاعی ۲/۵ بعدی کاربرد دارد و تناظریابی دو سطح سه‌بعدی در این قالب طرح نمی‌شود. این راه‌حل نخستین بار توسط ابنر و همکارش [۱، ۲] ارائه شد. سپس روابط ریاضی کامل آن توسط Rosenholm و همکارش [۳] بر اساس بسط روش حداقل‌سازی مربعات اختلاف دو مدل ارتفاعی در راستای قائم، توسعه داده شد.

راه‌حل متداول تناظریابی سطوح سه‌بعدی تحت عنوان روش کمترین مربعات سه‌بعدی (LS3D^۳) برای نخستین بار در سال ۲۰۰۵ ارائه شد [۴] که طی آن پارامترهای یک ترانسفورماسیون هندسی میان دو سطح ارتفاعی از طریق حداقل‌سازی مجموع مربعات فواصل اقلیدسی در راستای نرمال بر سطح، برآورد می‌شوند. اما در روش شیب-مبنا که توسط Streutker و همکاران [۵] برای تناظریابی سطوح ۲/۵ بعدی مطرح شد، تنها با تحلیل آماری ارتباط میان شیب محلی حول نقاط و اختلاف ارتفاع دو سطح، به تناظریابی آن‌ها پرداخته می‌شود.

در مقابل روش آماری که کل داده را به‌صورت یکجا وارد محاسبات آماری می‌کند، روش‌های متنوعی نیز در تحقیقات پیشین به سراغ تناظریابی مدل‌های ارتفاعی رفته‌اند. صداقت و همکارش [۶]، عملگرهای مختلفی را جهت استخراج عوارض نظیر و تناظریابی آن‌ها به کار گرفته‌اند. نویسندگان مقاله مذکور، راه‌حل تناظریابی عارضه-مبنای خود را با راه‌حل ناحیه-مبنای مبتنی بر روش اطلاعات متقابل^۴ مقایسه کرده‌اند که در حالت به-کارگیری مدل ریاضی افاین سه‌بعدی، برتری قابل ملاحظه‌ای مشاهده شده است. روانبخش و همکارش [۷] در سال ۲۰۱۳ با تعمیم روش اطلاعات متقابل به کمک اطلاعات گرادینان^۵ مدل ارتفاعی (که معادل پارامتر شیب می‌باشد) نتیجه گرفته بودند که روش پیشنهادی پایداری محاسباتی بیشتری در انطباق مدل‌های ارتفاعی داشته که در نتیجه، نسبت به روش اطلاعات متقابل نتایج بهتری حاصل شده است.

حمزه [۸] روشی ترکیبی را ارائه نموده است که طی آن ابتدا یک سری خصوصیات توپولوژیکی دو مدل ارتفاعی (نقاط منفرد مورس^۶ نشانگر نقاط اکسترمم و عطف محلی) را استخراج نموده و تناظریابی را میان این خصوصیات که حجم بسیار کمتری نسبت به مدل‌های ارتفاعی دارند انجام می‌دهد. در مرحله بعد به کمک روشی مبتنی بر اطلاعات متقابل و بهینه‌سازی مدل ریاضی آن، پارامترهای ترانسفورماسیون شامل سه آفست و یک دوران میان دو مدل ارتفاعی را برآورد نموده است. این روش هنوز امکان تراز نمودن مدل نسبی را دارا نیست.

در تحقیقات Kim و همکارش [۹، ۱۰]، بهبود تعیین موقعیت از طریق زوج تصاویر دارای هندسه آرایه خطی بررسی شده است. طبق این بررسی‌ها، در حالتی که خطای اطلاعات توجیه تصاویر صرفاً در حد بایاس موقعیتی و دورانی باشد، آنگاه یک ترانسفورماسیون متشابه سه‌بعدی برای انطباق مدل‌های ارتفاعی و کاهش اثر این بایاس کفایت می‌کند.

در تحقیق Rastogi و همکاران [۱۱]، رفع بایاس موجود در CartoDEM که به‌صورت پوششی برای کشور هندوستان تولید شده است با استفاده از داده‌های پروفیل

^۴ Mutual Information (MI)

^۵ Gradient-based Mutual Information (GMI)

^۶ Morse singular points

^۱ Rational Polynomial Coefficients

^۲ DEM Matching

^۳ 3D Least Squares surface matching

بودن شرایط مناسب می‌تواند به دقت مدل‌های فیزیکی نزدیک شود [۱۳، ۱۴]. بنابراین، مدل توابع رشنال، جایگزین مناسبی برای مدل فیزیکی بوده و در حال حاضر، اغلب تصاویر ماهواره‌ای به همراه ضرایب مدل توابع رشنال (اطلاعات RPC) عرضه می‌گردند [۱۵].

پارامترهای مدل فیزیکی به نوبه خود دارای خطاهایی هستند که اثر آن‌ها به ضرایب رشنال نیز منتقل می‌شود. ضرایب رشنال به روش زمین-مستقل^۳ و تنها با برازش توابع رشنال به امتداد اشعه‌های حاصل از مدل فیزیکی برآورد می‌شوند. با وجود دقت بالای برازش [۱۶]، عدم استفاده از نقاط کنترل زمینی در روش زمین-مستقل، سبب باقی‌ماندن خطای پارامترهای فیزیکی در امتداد اشعه‌ها و نهایتاً خطادار شدن ضرایب رشنال می‌شوند [۱۷]. به همین دلیل، خطای مطلق در این ضرایب وجود دارد که معمولاً به کمک نقاط کنترل زمینی کاهش می‌یابد. خوشبختانه مقدار عمده این خطا سیستماتیک بوده و امکان مدل نمودن و کاهش آن جهت افزایش صحت ضرایب وجود دارد [۱۸].

اما قابلیت انجام توجیه نسبی دقیق به کمک RPC زوج تصاویر، نشان‌دهنده دقت بالای این برازش است زیرا با این که باقیمانده‌های توجیه نسبی روی نقاط گرهی عمدتاً دارای مؤلفه چندپیکسلی در جهت عمود بر حرکت ماهواره می‌باشند، انحراف معیار این باقیمانده‌ها در هر تصویر بسیار کوچک است [۱۹]. منشأ بروز این خطای نسبی، محاسبه مستقل ضرایب برای هر تصویر می‌باشد. برخلاف خطای مطلق موجود در ضرایب، خطای نسبی مشکلی در تعیین موقعیت زمینی ایجاد نمی‌کند. لازم به ذکر است در روش تناظریابی پیشنهادی در این مقاله، در مرحله تناظریابی اولیه به منظور تولید نقاط شروع، نیاز به مدل‌سازی اثر خطای نسبی ضرایب مطرح خواهد شد.

۳- روش پیشنهادی

در فتوگرامتری کلاسیک مرحله تصحیح هندسی یا مرتبط کردن فضای تصویر و زمین به سه مرحله توجیه داخلی، توجیه نسبی و توجیه مطلق تقسیم می‌گردد. پس از انجام مرحله توجیه داخلی، در مرحله توجیه نسبی مدل سه‌بعدی تولید شده و در نهایت توجیه مطلق با حل هفت

لایدار ماهواره‌ای ICESat به انجام رسیده است. نویسندگان تحقیق مذکور از روش شیب-مبنا جهت تناظریابی CartoDEM با پروفیل‌های لایدار بهره برده‌اند و تنها به حل سه پارامتر شیفت سیستماتیک بین دو مدل ارتفاعی پرداخته‌اند. اما در مقاله حاضر، روش شیب-مبنا جهت حل پارامترهای دوران بین دو مدل ارتفاعی توسعه داده شده است. همچنین از مدل ارتفاعی SRTM^۱ به جای پروفیل ارتفاعی ICESat استفاده شده است.

روش پیشنهادی انطباق مدل‌های ارتفاعی، به‌صورت تدریجی پارامترهای ترانسفورماسیون میان دو مدل ارتفاعی را حل می‌کند. مشابه فرایند توجیه مطلق در فتوگرامتری کلاسیک، ابتدا یک مرحله شیفت و دوران در روند تکرار انجام شده و سپس مدل نسبی بر اساس مدل مطلق تراز می‌شود. مزیت روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های موجود، عدم تبدیل سیستم مختصات داده‌های اورجینال و در نتیجه محاسبه پارامترهای ترانسفورماسیون در همین سیستم مختصات می‌باشد.

در بخش ۲ به مشخصات مدل توجیه تصاویر ماهواره‌ای و به‌طور خلاصه به منابع ایجاد خطا در این مدل پرداخته خواهد شد. بخش ۳ به معرفی روش پیشنهادی جهت کشف میزان بایاس ناشی از خطای اطلاعات توجیه تصاویر در مدل ارتفاعی می‌پردازد. در بخش ۴ به علت اهمیت موضوع نحوه تولید مدل ارتفاعی از زوج تصویر استرئو، به خصوصیات روش تناظریابی تصویری اشاره خواهد شد. نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی و تفسیر این نتایج نیز در بخش ۵ مطرح می‌شود.

۲- مدل‌های توجیه تصاویر ماهواره‌ای

متداول‌ترین مدل ژنریک در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، مدل توابع رشنال (RFM)^۲ است. مدل توابع رشنال که به صورت نسبت چندجمله‌ای‌های از مرتبه سه نوشته می‌شود ساده‌تر از مدل فیزیکی بوده و بدون اطلاع از شرایط فیزیکی و هندسه داخلی سنجنده و حتی پارامترهای مداری سکو، برای کاربران قابل استفاده است [۱۲]. همچنین این مدل با وجود آن که به منابع ایجاد خطای هندسی در تصویر نمی‌پردازد، در صورت فراهم

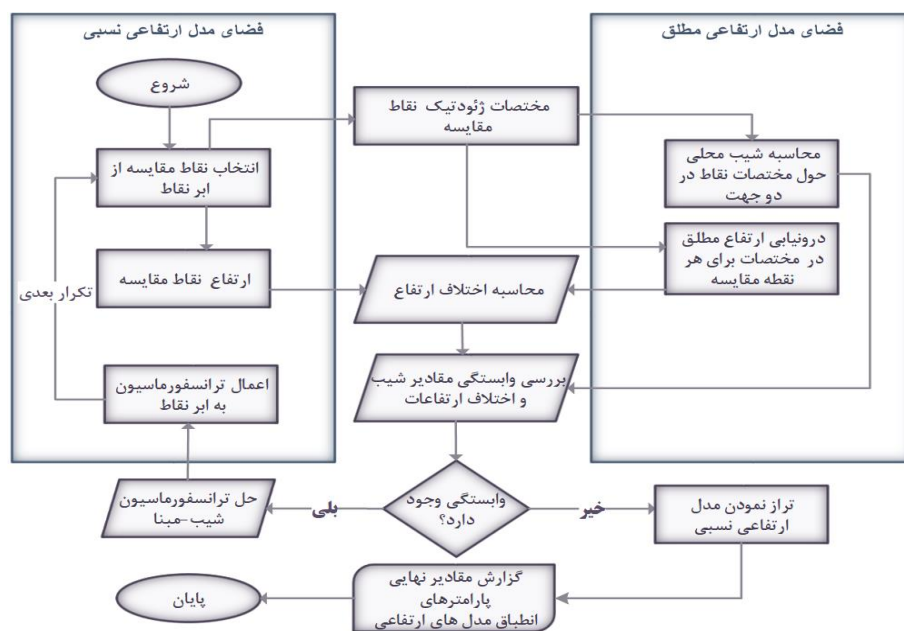
^۳ Terrain-Independent approach

^۱ Shuttle Radar Topography Mission

^۲ Rational Function Model

پارامتر، ارتباط مدل سه‌بعدی نسبی را با سیستم مختصات مرجع زمینی برقرار می‌شود. در راه‌حلی که بر مبنای تولید مدل ارتفاعی نسبی عمل می‌کند نیز فرایندی مطابق فتوگرامتری کلاسیک طی می‌شود. به این صورت که ابتدا یک مدل نسبی به کمک زوج تصویر تولید شده و در مرحله توجیه مطلق، مدل نسبی با یک مدل مطلق تناظریابی شده و پارامترهای ترانسفورماسیون محاسبه می‌شوند. البته مدل‌های مورد استفاده، به منظور تولید اطلاعات قابل اعتماد، عمدتاً نیازمند اطلاعات کنترل و یا اطلاعات مداری سنجنده در لحظه اخذ تصویر هستند. در روش‌های مختلف، مدل ریاضی انجام توجیه مطلق و همچنین طریقه وارد کردن اطلاعات کنترلی به مدل ریاضی مربوطه، متفاوت است. اطلاعات کنترلی ممکن است به صورت نقاط کنترل و یا سایر انواع اطلاعات، نظیر خطوط

کنترل جمع‌آوری شده باشند [۲۰]. در حالتی که یک سطح ارتفاعی با صحت و دقت معلوم از منطقه موجود باشد، آنگاه با توجه به روش و مدل ریاضی انتخابی می‌توان مدل نسبی را به کمک سطح ارتفاعی موجود، توجیه مطلق نمود. در صورت به‌کارگیری روش انطباق مدل‌های ارتفاعی، بدون انجام فرایند بهبود RPC در ابتدای کار، پس از تولید مدل ارتفاعی نسبی با رزولوشن مورد نظر، میان این مدل ارتفاعی و مدل ارتفاعی جهانی نظیر SRTM از منطقه حل شده و مدل نسبی، توجیه مطلق می‌شود. پس از بهبود مدل نسبی، امکان انجام تحلیل میزان بهبود موقعیت مدل به کمک اطلاعات کنترلی وجود خواهد داشت. در نهایت نیز به کمک نقاط کنترل زمینی بررسی می‌شود که این روش تا چه میزان موفق شده است تا بهبود صحت مورد انتظار را فراهم کند.



شکل ۱- فلوچارت روش پیشنهادی انطباق مدل‌های ارتفاعی

فلوچارت کلی روش پیشنهادی به عنوان جایگزین جمع‌آوری مستقیم نقطه کنترل زمینی، جهت تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای در شکل ۱ آورده شده است. در این فلوچارت منظور از نقاط مقایسه، نقاطی از ابر نقاط مدل نسبی است که در محاسبه پارامترهای ترانسفورماسیون حضور دارند.

۳-۱- توسعه مدل ریاضی انطباق مدل‌های ارتفاعی

مدل‌های ریاضی مختلفی در تحقیقات مشابه به کار رفته‌اند که برای نمونه می‌توان به تحقیق علیزاده و همکاران [۲۱] اشاره کرد که از مدل افاین دو بعدی به

همراه آفست ارتفاعی استفاده شده است که با توجه به ماهیت خطای موجود در اطلاعات RPC و اولویت قرار دادن سرعت اجرای الگوریتم، این مدل ریاضی برای انطباق کامل مدل‌های ارتفاعی کفایت نمی‌کند. در تحقیق صداقت و همکارش [۶] سه مدل ریاضی مختلف شامل مدل صلب سه‌بعدی، متشابه سه‌بعدی و افاین سه‌بعدی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به منظم‌سازی ابر نقاط، انطباق مدل‌های ارتفاعی در فضای ۲/۵ بعدی انجام شده است.

در روش پیشنهادی تحقیق حاضر با توجه به حفظ ساختار سه‌بعدی ابر نقاط، از دو مدل ریاضی مجزا به منظور

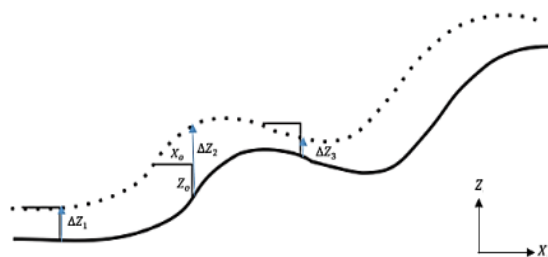
مثال یک بعدی این روش در مقاله [۵] با رابطه (۲) ارائه شده است. همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می گردد، اختلاف ارتفاعی در راستای قائم را می توان به یک آفست قائم و یک آفست افقی به ازای شیب سطح تجزیه نمود و بدین ترتیب با داشتن مقادیر اختلاف ارتفاعی در چندین نقطه، ضمن برازش یک چندجمله ای درجه اول، مقادیر آفست قائم و افقی را محاسبه نمود:

$$\Delta Z_i = Z_o - G_{X_i} \cdot X_o \quad (2)$$

ΔZ_i : اختلاف ارتفاع دو خم در راستای قائم در نقطه i

X_o, Z_o : مقادیر آفست افقی و قائم بین دو خم

G_{X_i} : مقدار شیب خم حول نقطه i



شکل ۳- تجزیه فاصله قائم (اختلاف ارتفاع) دو خم به دو آفست افقی و آفست قائم

در حالت دو بعدی به هر دو مقدار شیب در راستای محور x و محور y در مدل سازی اختلاف ارتفاعی دو سطح توجه می شود و حتی می توان این کار را در چند تکرار انجام داد تا اثری از خطای سیستماتیک میان اختلاف ارتفاع و مقادیر شیب به حداقل ممکن رسیده باشد. رابطه ریاضی در حالت دو بعدی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\Delta Z_i = Z_o - G_{X_i} \cdot X_o - G_{Y_i} \cdot Y_o \quad (3)$$

ΔZ_i : اختلاف ارتفاع دو سطح در راستای قائم در نقطه i

X_o, Y_o, Z_o : مقادیر آفست افقی در دو جهت و آفست قائم بین دو سطح

G_{X_i}, G_{Y_i} : مقدار شیب سطح در دو جهت حول نقطه i

در صورت مسطح بودن منطقه، آفست افقی دو سطح همپوشان قابل تشخیص نخواهد بود اما در مناطق شیب دار، تغییرات اختلاف ارتفاع تا حدود زیادی ناشی از آفست افقی می باشد. هر قدر شیب محلی بیشتر باشد تاثیر این آفست افقی بیشتر ملاحظه شده و قابل تشخیص خواهد بود.

ارائه معادلات ریاضی تناظرایی مدل های ارتفاعی نیازمند معرفی ساختار داده ها و سیستم مختصات آنها است. مدل نسبی به صورت ابر نقاط نامنظم بوده که با

آفست و دوران ابر نقاط در دو مرحله جداگانه استفاده شده است. مرحله نخست بر اساس مدل پیشنهادی ابر توسعه یافته است. مدل ریاضی روش ابر که بر مبنای ترانسفورماسیون متشابه سه بعدی نوشته می شود شامل سه پارامتر آفست، سه پارامتر دوران و یک ضریب مقیاس است:

$$V_{Z_i} = -\left(\frac{\partial Z_a}{\partial X}\right)_i \cdot X_o - \left(\frac{\partial Z_a}{\partial Y}\right)_i \cdot Y_o + Z_o + (-X_{r_i} - \left(\frac{\partial Z_a}{\partial X}\right)_i \cdot Z_{r_i}) \cdot \Phi + \left(Y_{r_i} + \left(\frac{\partial Z_a}{\partial Y}\right)_i \cdot Z_{r_i}\right) \cdot \Omega + \left(\left(\frac{\partial Z_a}{\partial X}\right)_i \cdot Y_{r_i} - \left(\frac{\partial Z_a}{\partial Y}\right)_i \cdot X_{r_i}\right) \cdot K + \left(Z_{r_i} - \left(\frac{\partial Z_a}{\partial X}\right)_i \cdot X_{r_i} - \left(\frac{\partial Z_a}{\partial Y}\right)_i \cdot Y_{r_i}\right) \cdot m - [Z_a(X_{r_i}, Y_{r_i}) - Z_{r_i}] \quad (1)$$

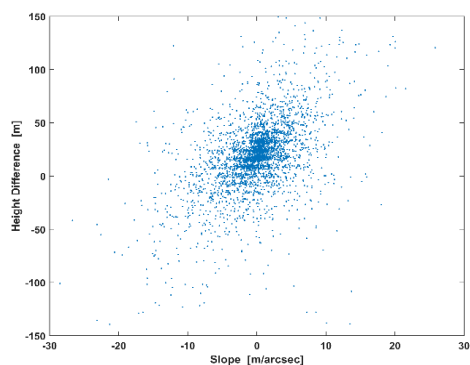
Z_{a_i} : ارتفاع نقطه i در سطح مدل ارتفاعی مطلق

$X_{r_i}, Y_{r_i}, Z_{r_i}$: مختصات نقطه i در مدل ارتفاعی نسبی

$m, \Omega, \Phi, K, X_o, Y_o, Z_o$: پارامترهای ترانسفورماسیون متشابه سه بعدی

در روش LS3D نقاط مقایسه در راستای نرمال بر سطح انتخاب شده در حالی که در روش شیب-مبنا همه نقاط مقایسه در راستای تقاطع محور Z با دو سطح مشخص می شوند. به بیان دیگر در روش LS3D، نقطه نظیر هر نقطه از سطح اول، با امتداد نرمال بر سطح در آن نقطه و تقاطع آن با سطح دوم به دست می آید. بدیهی است که امتداد نرمال بر سطح در هر نقطه کاملاً متفاوت از سایر نقاط است. اما در روش شیب-مبنا، موقعیت نقاط نظیر، محل برخورد امتداد قائم (موازی با امتداد محور Z مدل ارتفاعی مطلق) با دو سطح است. در نتیجه، محاسبات روش دوم ساده تر از روش اول خواهد بود.

در مقابل روش ابر، روش شیب-مبنا کل داده را به صورت یکجا وارد تحلیل آماری می کند و لذا نیازی به تشخیص نقاط نظیر یا استخراج ویژگی از سطوح ندارد. فرض اصلی این روش، وجود بزرگ ترین اختلاف های ارتفاعی بین سطوح در محل های با بزرگ ترین مقادیر شیب است. در حالت ساده می توان یک ارتباط خطی مطابق شکل ۲ میان این دو پدیده در نظر گرفت.



شکل ۲- وابستگی میان اختلاف ارتفاع دو سطح با شیب سطح

توجه به خصوصیات اطلاعات RPC، موقعیت نقاط در قالب مختصات ژئودتیک و ارتفاع نقاط نسبت به بیضوی مرجع WGS84 به دست آمده است. با توجه به روش تناظریابی مدل های ارتفاعی، ابر نقاط مستقیماً وارد محاسبات می شود و نیازی به منظم سازی ابر نقاط یا تبدیل سیستم مختصات نیست. تنها تغییر ضروری، تبدیل دیتوم ارتفاعی SRTM از EGM96 به WGS84 است تا دیتوم دو مدل همسان شود.

۳-۱-۱- ترانسفورماسیون شیب-مبنا

برخلاف روش ابنر که برای عکس های استرئو با هندسه فریم پیشنهاد شده بود، با توجه به فرض وجود بایاس در اطلاعات RPC، پارامتر ضریب مقیاس میان دو مدل ارتفاعی برابر با واحد در نظر گرفته شده است و لذا با حذف این پارامتر، شش پارامتر ترانسفورماسیون متشابه باقی می ماند. البته در مرحله تراز نمودن مدل، یک پارامتر عرض از مبدأ هم وارد معادلات می شود که مجدداً می بایست هفت پارامتر مدل سازی شده و سپس حل شوند. معادلات تناظریابی بر مبنای رابطه (۴) نوشته شده و به ازای هر نقطه مقایسه، یک معادله وارد دستگاه معادلات می شود تا چهار مجهول دستگاه که آفست های مسطحاتی و ارتفاعی و دوران حول محور Z هستند برآورد گردند:

$$\begin{bmatrix} Z_{r_1} - Z_{a_1} \\ \vdots \\ Z_{r_n} - Z_{a_n} \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} -G_{\lambda_1} & -G_{\varphi_1} & 1 & (G_{\lambda_1} \cdot \varphi_1 - G_{\varphi_1} \cdot \lambda_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -G_{\lambda_n} & -G_{\varphi_n} & 1 & (G_{\lambda_n} \cdot \varphi_n - G_{\varphi_n} \cdot \lambda_n) \end{bmatrix}_{n \times 4} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \varphi_0 \\ Z_0 \\ K \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (4)$$

Z_{r_i} : مختص ارتفاع نقطه i در مدل ارتفاعی نسبی
 Z_{a_i} : مقدار درونیابی شده ارتفاع از مدل ارتفاعی مطلق در موقعیت مسطحاتی نقطه i
 $\lambda_0, \varphi_0, Z_0$: مقادیر آفست دو مدل ارتفاعی در راستای طول و عرض ژئودتیک و در جهت ارتفاع از بیضوی WGS84
 K : مقدار دوران مدل نسبی حول محور قائم
 $G_{\lambda_i}, G_{\varphi_i}$: مقدار شیب (گرادیان) مدل ارتفاعی مطلق در دو راستای طول و عرض ژئودتیک حول نقطه i
 n : تعداد نقاط مقایسه

از آنجا که این روش بر مبنای شیب محلی SRTM حول نقاط عمل می نماید، با اعمال آفست حاصل از حل تناظریابی به ابر نقاط، موقعیت نقطه مورد مقایسه در سطح مدل SRTM نیز تغییر کرده و شیب محلی حول

نقطه نیز مقدار جدیدی خواهد داشت. بنابراین، فرایند تناظریابی مدل ها باید با داده های جدید تکرار گردد. این تکرارها تا رفع وابستگی میان شیب های محلی با اختلاف های ارتفاع دو مدل ادامه می یابد. تعداد تکرارها نیز به میزان آفست موجود میان دو مدل ارتفاعی وابسته است.

۳-۱-۲- تراز نمودن مدل نسبی

پس از حل جابجایی میان ابر نقاط نسبی و مدل مطلق، نوبت به بررسی تراز بودن مدل نسبی می رسد. بردار اختلاف ارتفاعات در راستای قائم پس از آخرین تکرار تناظریابی، می تواند در این امر مورد استفاده قرار گیرد. وابستگی خطی میان مختصات ژئودتیک نقاط با اختلاف ارتفاعات پس از مرحله ترانسفورماسیون شیب-مبنا در شکل ۸ در بخش ۵ نمایش داده شده است. جهت تراز نمودن مدل نسبی، ابتدا دو دوران حول جهات اصلی مختصاتی محاسبه شده و سپس بر اساس این زوایا، مقادیر جدید ارتفاع برای نقاط مدل نسبی محاسبه می گردد:

$$\begin{bmatrix} \tilde{Z}_{r_1} - Z_{a_1} \\ \vdots \\ \tilde{Z}_{r_n} - Z_{a_n} \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \lambda_{r_1} & \varphi_{r_1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{r_n} & \varphi_{r_n} & 1 \end{bmatrix}_{n \times 3} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (5)$$

P_1, P_2, P_3 : پارامترهای تراز نمودن مدل نسبی
 $\tilde{Z}_{r_i}$: مختص ارتفاع نقطه i در مدل ارتفاعی نسبی پس از ترانسفورماسیون شیب-مبنا

پس از محاسبه پارامترهای آفست و دوران در دو مرحله ای که شرح داده شد این پارامترها جهت رفع بایاس مدل ارتفاعی مستخرج از تصاویر استرئو ماهواره ای به کار گرفته می شوند.

به روزرسانی ابر نقاط در مرحله ترانسفورماسیون شیب-مبنا در انتهای هر تکرار انجام می شود. به این صورت که آفست سه بعدی محاسبه شده در جهت مخالف به کلیه نقاط افزوده شده و سپس ابر نقاط حول محور Z به اندازه پارامتر K و در خلاف جهت آن دوران می یابند. هر چند که این پارامترها در هر تکرار به نقاط اعمال شده اما مجموع مقادیر آن ها در کل تکرارها به عنوان خروجی ترانسفورماسیون گزارش می شود.

یک مرحله به روزرسانی ابر نقاط نیز از طریق پارامترهای رابطه ۵ انجام می پذیرد. در این مرحله، تنها ارتفاع نقاط تصحیح می شود و مختصات مسطحاتی نقاط دست نخورده باقی می ماند. در توجیه این موضوع کافی

۴-۱- تناظریابی تصویری

خصوصیات مطلوب برای مدل ارتفاعی نسبی، استراتژی تناظریابی تصویری را تعیین می‌کند. باید توجه داشت که این مدل نسبی پس از انجام توجیه مطلق، یک مدل با کیفیت و کاربردی خواهد بود.

در مقاله حاضر، انجام تناظریابی متراکم مدّ نظر بوده که در تولید مدل ارتفاعی کاربرد دارد. از این رو از راه حل ناحیه‌مبنا^۳ استفاده شده است تا محدودیت‌های راه حل عارضه‌مبنا^۴ در افزایش تراکم تناظریابی در آن مطرح نباشد. روش تناظریابی کمترین مربعات (LSM)^۵ به عنوان یک روش ناحیه‌مبنا، پتانسیل دستیابی به دقت‌های بالا را دارد و عمدتاً به عنوان بهبود دهنده دقت تناظریابی روش-های دیگر به کار می‌رود [۲۲]. با این وجود روش LSM، شعاع همگرایی پایینی داشته و امکان گرفتار شدن در مینیمم‌های محلی تابع همبستگی^۶ وجود دارد که به نوبه خود باعث کاهش اعتمادپذیری نتایج تناظریابی می‌شود. در نتیجه، تولید نقاط شروع مناسب که در شعاع همگرایی کوچک این روش قرار گیرند اهمیت فراوانی دارد. این نقاط شروع با استفاده از اطلاعات خام RPC و مدل ارتفاعی SRTM به دست می‌آیند.

در این راستا یک گرید منظم بر روی تصویر اول فرض شده و پس از استخراج نقاط شروع در شعاع همگرایی روش LSM، تناظریابی دقیق به کمک این روش انجام می‌گیرد.

۴-۱-۱- استخراج نقاط شروع تناظریابی

با کمک اطلاعات خام RPC زوج تصویر، هر نقطه از گرید ابتدا به سطح مدل ارتفاعی SRTM منطقه منتقل شده و سپس محل تقاطع با مدل ارتفاعی به فضای تصویر دوم نگاشت می‌شود. البته ابتدا باید اثر خطای نسبی ضرایب خام زوج تصویر، مدل‌سازی شده و در محاسبات در نظر گرفته شود. برای این منظور کافی است تا تقاطع فضایی بر روی تعداد اندکی نقطه متناظر دستی اجرا شده و باقیمانده در هر تصویر که عمدتاً در جهت عمود بر مسیر ماهواره است محاسبه شود. سپس با یک مدل خطی ساده

است دقت شود که عدم تراز بودن مدل نسبی ناشی از مقادیر دوران مدل حول دو امتداد مسطحاتی است که طبق مشاهدات همانند مقدار دوران K باید در حد چند ثانیه باشند و تصحیح آن‌ها تغییر محسوسی در موقعیت مسطحاتی نقاط نخواهد داشت.

۴- تولید مدل ارتفاعی نسبی

یکی از روش‌های متداول تولید مدل ارتفاعی از سطح زمین، تناظریابی تصاویر استرئو و استخراج ابر نقاط حاصل از تقاطع اشعه‌های نظیر است. زوج تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالای ماهواره‌ای (HRSI)^۱، یکی از منابع مهم تولید این مدل‌های ارتفاعی هستند. قدرت تفکیک مکانی این تصاویر، پائین‌تر از قدرت تفکیک تصاویر VHRS^۲ در بازه ۱ تا ۵ متر بوده و لذا هر تصویر چندین کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد.

مهم‌ترین نکته‌ای که باید در کلیه مراحل تولید مدل ارتفاعی نسبی رعایت شود، عدم اعمال تصحیحات به مدل است تا کلیه خطاهای موجود در اطلاعات RPC تصاویر، مستقیماً به مدل ارتفاعی منتقل گردد. تنها در مرحله تولید نقاط شروع تناظریابی، تصحیحاتی در نظر گرفته می‌شود که تأثیری در نتایج نهایی کار نخواهد داشت. منظور از این تصحیحات، افزودن هرگونه تصحیح به توابع رشنال در هنگام تقاطع فضایی و یا تولید تصاویر اپی‌پولار در مرحله تناظریابی می‌باشد. در صورت انجام این تصحیحات، شناسایی مقادیر واقعی خطای اطلاعات RPC و کاهش اثر آن در مدل ارتفاعی نهایی امکان‌پذیر نخواهد بود. به طور خلاصه باید گفت یکی از اهداف اصلی تحقیق حاضر، عدم اعمال تصحیحات هندسی تا پیش از توجیه مطلق مدل نسبی است. برای این منظور یک روش تناظریابی طراحی شد و در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد.

در صورتی که مدل ارتفاعی نسبی با نرم افزار PCI Geomatica تهیه شود، نتایج تناظریابی دو مدل ارتفاعی، تفاوت معنی‌داری با حالت قبل مشاهده می‌گردد که در بخش‌های پیاده‌سازی و نتیجه‌گیری مقاله به آن پرداخته شده است.

^۳ Area-based image matching

^۴ Feature-based image matching

^۵ Least Squares image Matching

^۶ Correlation function

^۱ High Resolution Satellite Imagery

^۲ Very High Resolution Satellite Imagery

مطابق رابطه (۶)، دو ضریب تصحیح برای هر تصویر محاسبه شود. این مدل در انتقال نقاط میان دو تصویر به واسطه فضای زمینی در نظر گرفته می‌شود.

در اغلب زوج تصاویر ماهواره‌ای، باقیمانده‌های روی مختص لاین (شماره سطر در تصویر) پس از انجام تقاطع بسیار کوچک است و تنها باقیمانده بر روی مختص سمپل (شماره پیکسل در داخل سطر مربوطه) نقاط چشمگیر و در حد چند ده پیکسل بوده که از این رو تنها به تصحیح تابع رشنال تولیدکننده سمپل پرداخته خواهد شد. مقدار باقیمانده هر مشاهده سمپل با توجه به مقدار مختصات تصویری مربوطه مدل می‌شود و ضرایب تصحیح کلی برای هر تصویر محاسبه می‌شوند [۲۳]:

$$dS_i = a_0 + a_1 \cdot S_i \quad (6)$$

a_0 و a_1 : ضرایب مدل تصحیح

dS_i : مقدار تصحیح مختص سمپل در نقطه i

S_i : مختص سمپل نقطه i

تعداد معادلات تشکیل شده به کمک رابطه (۶) برابر با تعداد نقاط گرهی می‌باشد که به منظور برآورد پارامترهای مجهول همین رابطه ریاضی تشکیل می‌شوند. لازم به ذکر است که این تصحیحات تنها در تولید نقاط شروع تناظریابی استفاده شده و ضرایب خام RPC بدون تغییر وارد مراحل تناظریابی دقیق و تقاطع فضایی می‌شوند.

پس از رفع اثر خطای نسبی، این اطمینان به وجود می‌آید که مختص سمپل نقطه انتقالی در تصویر دوم، دقت مناسبی دارد. اما مختص لاین نقطه باید بهبود یابد تا این نقطه بتواند به عنوان نقطه شروع تناظریابی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به رزولوشن پایین‌تر مدل ارتفاعی SRTM نسبت به رزولوشن تصویر، یک جستجوی یک‌بعدی محدود در امتداد مسیر ماهواره انجام می‌گیرد. محدوده جستجو به‌طور مستقیم وابسته به توپوگرافی منطقه و خطای ارتفاعی SRTM بوده و لذا در منطقه مورد مطالعه، شعاع تجربی ۵۰ پیکسل برای این منطقه در نظر گرفته شد. از آنجا که انتخاب شعاع بزرگتر، باعث افزایش مدت زمان جستجو خواهد شد، با توجه به محل وقوع بیشینه تابع همبستگی متقابل^۱ در چند نقطه نمونه، مقدار شعاع تجربی ۵۰ پیکسل که در زوج تصاویر Cartosat-1

معادل خطای ± 200 متری حول ارتفاع اولیه می‌باشد [۲۳] برای جستجو برگزیده شد. مختص لاین نقطه شروع با یافتن بیشینه همبستگی متقابل نرمال شده (ZNCC)^۲ در این امتداد به دست می‌آید.

گرید منظمی بر روی تصویر عقب‌نگر در نظر گرفته شده و هر نقطه به تصویر دوم منتقل می‌شود. فاصله نقاط گرید بر مبنای رزولوشن مورد نظر برای مدل ارتفاعی (نیم ثانیه کمائی)، ۶ پیکسل اختیار شد. نیم ثانیه کمائی بر روی سطح زمین تقریباً برابر با ۱۵ متر بوده و با توجه به پیکسل سائز زمینی تصاویر Cartosat-1 که حدوداً ۲/۵ متر است، هر ۶ پیکسل نیز حدوداً معادل ۱۵ متر بر روی زمین بوده و جهت تولید مدل ارتفاعی مربوطه کفایت می‌کند.

۴-۱-۲- تناظریابی دقیق

همان‌طور که در مقدمه این بخش اشاره شد، تکنیک تناظریابی کمترین مربعات جهت بهبود موقعیت نقاط شروع در نظر گرفته شده است. روابط ریاضی این روش در تحقیقات پیشین آورده شده است که برای نمونه می‌توان به [۲۴] اشاره کرد. این مرحله کاملاً در فضای تصویر و با اتکاء بر درجات خاکستری پنجره‌های تصویری انجام می‌پذیرد. ابعاد پنجره مربعی تناظریابی با توجه به تحلیل تابع خودهمبستگی^۳ پنجره تمپلت، ۳۵ پیکسل در نظر گرفته شده است [۲۵]. حد آستانه‌های ۰/۰۵ پیکسل برای شیفت پنجره تناظریابی، تعداد ۳۰ برای بیشینه تکرار و ۰/۸ برای ضریب کورلشن دو پنجره در تکرار آخر در نظر گرفته شد. حذف نقاطی که در این حد آستانه‌ها صدق نکنند منجر به کاهش اشتباهات مرحله تقاطع فضایی خواهد شد.

۴-۱-۳- تقاطع فضایی و استخراج ابر نقاط

نقاط متناظر حاصل از مرحله تناظریابی به همراه اطلاعات خام RPC زوج تصویر در تولید ابر نقاط سه‌بعدی به‌کار گرفته می‌شوند.

روابط ریاضی توابع رشنال، مبتنی بر اطلاعات RPC همراه تصاویر ماهواره‌ای، به‌صورت مستقیم نقطه زمینی را به فضای تصویر منتقل می‌کنند. معادلات تقاطع فضایی که مختصات تصویری در آن معلوم و نقطه زمینی به

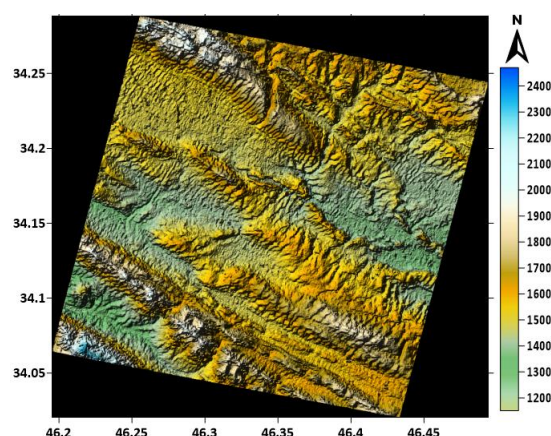
^۲ Zero-mean Normalized Cross-Correlation

^۳ Autocorrelation function

^۱ Cross-correlation function

عنوان مجهول مطرح است نیز بر اساس ضرایب توابع مستقیم نوشته شوند. در نتیجه، به علت غیر خطی بودن معادلات نسبت به مجهولات، خطی سازی معادلات تقاطع فضایی و حل تکراری مسئله اجتناب ناپذیر است.

معادلات تقاطع فضایی به مقادیر اولیه حساسیت بالایی ندارند؛ بر همین اساس مرکز منطقه مورد مطالعه به عنوان مقدار اولیه جهت شروع تکرارها برای همه نقاط در نظر گرفته شد. روابط تقاطع فضایی بر مبنای اطلاعات RPC در مراجع [۱۶، ۲۶] آورده شده است.



شکل ۴- مدل نسبی مستخرج از زوج تصویر ماهواره‌ای (MATDEM) جهت نمایش بازه تغییرات ارتفاعی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

در این مرحله نیز بر اساس دو معیار تعداد تکرار و باقیمانده حاصل از تقاطع در فضای تصاویر، تعدادی از نقاط تولیدی حذف شدند. حد آستانه تعداد تکرارها سه تکرار بوده و باقیمانده‌هایی که با باقیمانده عمده نقاط همخوانی نداشتند حذف شدند. زیرا همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، انحراف معیار باقیمانده تقاطع فضایی به کمک اطلاعات خام RPC مقدار اندکی هست و باقیمانده متفاوت نسبت به سایر نقاط به معنای اشتباه در تناظریابی آن نقطه است.

به عنوان جمع‌بندی باید گفت، کیفیت هندسی مدل ارتفاعی نسبی به طور مستقیم وابسته به کیفیت تناظریابی تصویری است و در صورت باقی ماندن اشتباهات در تناظریابی تصویری، اشتباهاتی در سطح مدل ارتفاعی نیز بروز می‌کند و انطباق مدل‌های ارتفاعی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. از این رو فرایندی جهت شناسایی و حذف اشتباهات تناظریابی در نظر گرفته شده است که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

۱- تعیین حد آستانه برای تعداد تکرار تناظریابی دقیق با هدف حذف نقاطی که در آن‌ها تکرار تناظریابی به سمت همگرایی به یک جواب مشخص پیش نرفته است.

۲- افزایش ابعاد پنجره تناظریابی دقیق در صورت عدم موفقیت تناظریابی (که این کار سبب افزایش محتوای تصویری پنجره شده و احتمال موفقیت تناظریابی را افزایش می‌دهد).

۳- حذف نقاطی که باقیمانده تقاطع فضایی بر روی آنها با میانگین باقیمانده اکثریت نقاط تفاوت عمده دارد. این تفاوت به صورت تجربی به اندازه چهار پیکسل در نظر گرفته شد. این معیار کمک بزرگی در شناسایی اشتباهات تناظریابی می‌کند که در مراحل قبل کشف نشده‌اند.

۴- تولید یک مدل ارتفاعی موقت با اعمال یک median filter با ابعاد ۷ در ۷ از ابر نقاط و نمونه‌برداری و مقایسه تک تک نقاط از ابر نقاط با سطح این مدل ارتفاعی موقت که سبب شناسایی نقاط اشتباه در مدل ارتفاعی و حذف آن‌ها از ابر نقاط می‌شود. ابر نقاط بهبود یافته وارد مرحله انطباق مدل‌های ارتفاعی خواهد شد.

ابر نقاط سه‌بعدی با وجود اینکه از یک گرید منظم تصویر حاصل شده است اما گرید منظمی بر روی زمین نخواهد بود. تنها جهت نمایش مدل ارتفاعی نسبی (شکل ۴)، منظم‌سازی انجام می‌پذیرد.

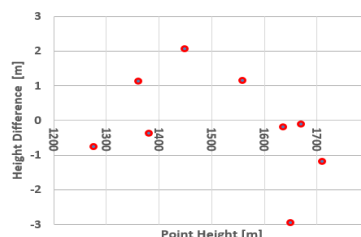
۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

۵-۱- معرفی داده مورد استفاده

داده تصویری شامل یک زوج تصویر Cartosat-1 می‌باشد که در تاریخ نهم اکتبر ۲۰۰۸ از بخشی از شهرستان گیلانغرب استان کرمانشاه اخذ و با فرمت Orthokit عرضه شده است.

ضرایب خام RPC تصاویر در دسترس بوده و علاوه بر آن تعداد ۹ نقطه کنترل زمینی کامل و مدل ارتفاعی SRTM فراهم شده‌اند. مدل SRTM دارای رزولوشن یک ثانیه کمانی، نسخه ویرایش سوم این مدل جهانی بوده و در تاریخ ۶ سپتامبر ۲۰۱۲ بازتولید شده است. ارزیابی کیفیت ارتفاعی SRTM به کمک نقاط کنترل زمینی که با GPS برداشت شده‌اند انجام شد و نتایج در شکل ۵ ارائه گردید. در منطقه مورد مطالعه، مقدار RMSE اختلاف ارتفاع سطح رویه SRTM نسبت به نقاط کنترل زمینی در

بازه اطمینان ۹۰ درصد (LE90) برابر با ۲/۳ متر به دست آمد. البته طبق مطالعات پیشین محققین بر روی این مدل ارتفاعی جهانی مشخص شده است که خطای مطلق ارتفاعی آن به‌طور کلی بین ۴/۷ تا ۹/۸ متر در قاره‌های مختلف متغیر بوده است [۲۷، ۲۸]. در صورت در اختیار داشتن تعداد نقاط کنترل زمینی بیشتر، امکان برآورد بهتر کیفیت مدل SRTM در منطقه مورد مطالعه نیز وجود داشت.



شکل ۵- خطای ارتفاعی SRTM در موقعیت نقاط کنترل زمینی

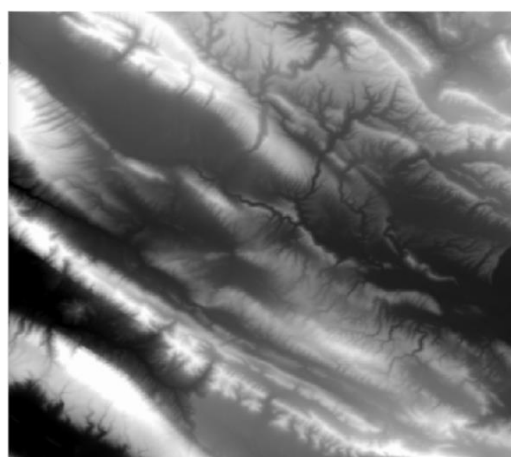
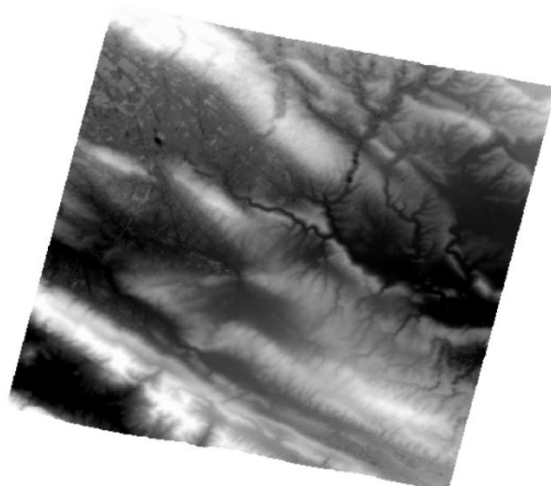
مطابق آنچه در مقدمه بخش ۴ گفته شد، دو مدل ارتفاعی نسبی به کمک اطلاعات ورودی تهیه گردید. مدل

نخست به کمک برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB و مدل دوم با استفاده از ماژول OrthoEngine نرم‌افزار PCIGeomatica که به ترتیب به نام اختصاری MATDEM و PCIDEM نام‌گذاری شده‌اند (جدول ۱).

جدول ۱- معرفی مشخصات مدل‌های ارتفاعی نسبی و مطلق

نام مدل	SRTM	MATDEM	PCIDEM
نحوه تهیه داده	وبسایت ناسا	نرم‌افزار MATLAB	نرم‌افزار PCIGeomatica
فرمت داده	رستر با فرمت GeoTiff	ابرنقاط	ابرنقاط
رزولوشن	۱ ثانیه کمانی	۰/۵ ثانیه کمانی	۰/۵ ثانیه کمانی
دیتوم مسطحاتی	WGS84	WGS84	WGS84
دیتوم ارتفاعی	EGM96	WGS84	WGS84

برای مقایسه بصری مدل MATDEM با رزولوشن ۰/۵ ثانیه کمانی با مدل SRTM با رزولوشن ۱ ثانیه کمانی می‌توان به شکل ۶ مراجعه نمود.

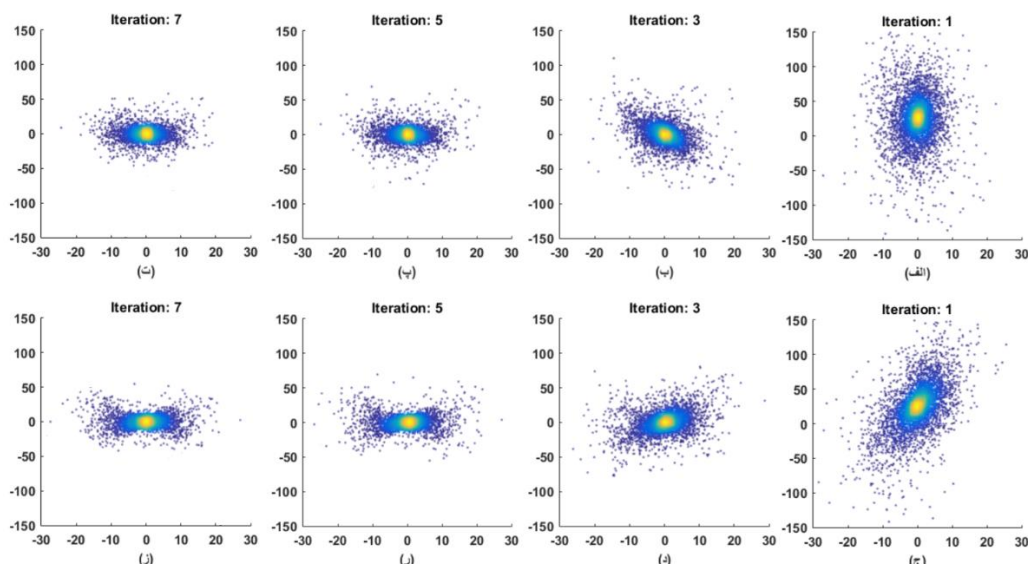


شکل ۶- بخشی از مدل مطلق SRTM با رزولوشن ۱ ثانیه کمانی (سمت راست) و مدل ارتفاعی نسبی MATDEM با رزولوشن ۰/۵ ثانیه کمانی (سمت چپ)

گردد. برای نمونه در صورتی که یک آفست سه‌بعدی بر روی مدل نسبی تولید شده توسط نرم‌افزار PCIGeomatica اعمال شده باشد، مدل حاصل، PCIDEM3 نام‌گذاری خواهد شد.

در تناظریابی مدل‌های ارتفاعی با مدل پیشنهادی، شروط پایان تکرارهای مرحله ترانسفورماسیون شیب-مبنا در طی ۷ تکرار تأمین شد و وابستگی میان شیب‌های محلی در دو امتداد اصلی و اختلاف‌های ارتفاع دو مدل تا حد زیادی برطرف شد. شکل ۷ روند تدریجی کاهش این وابستگی‌ها را در طول تکرارها نمایش می‌دهد.

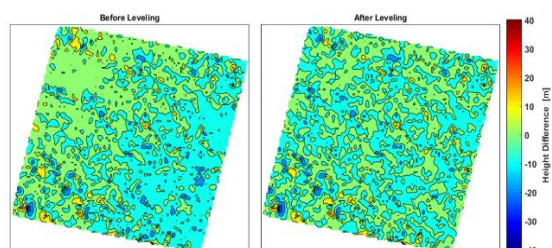
در مرحله انطباق این مدل‌های ارتفاعی با مدل ارتفاعی مطلق، با توجه به تعداد پارامترهای به‌کار رفته در مدل ریاضی، عدد ۳ یا ۷ نیز به انتهای نام مدل ارتفاعی نسبی افزوده می‌شود تا وضعیت مدل نسبی به‌طور دقیق مشخص



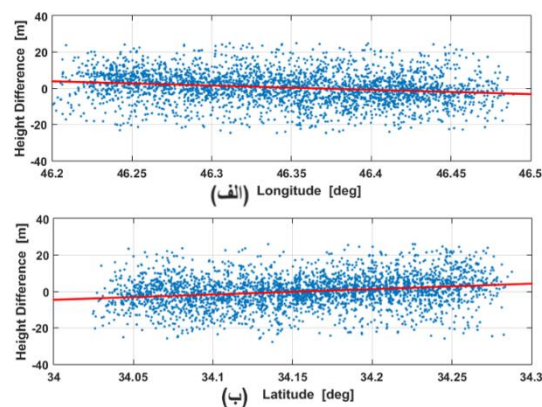
شکل ۷- تکرارهای مرحله ترانسفورماسیون شیب-مبنا در تناظریابی دو مدل نسبی MATDEM و مدل مطلق SRTM. کاهش تدریجی وابستگی اختلاف ارتفاع دو مدل: (الف) تا (ت) نسبت به شیب محلی در امتداد طول ژئودتیک، (ج) تا (ز) نسبت به شیب محلی در امتداد عرض ژئودتیک

وابستگی اختلاف ارتفاع به مختصات ژئودتیک نقاط در شکل ۸ ارائه شده است. نقشه‌های اختلاف ارتفاع باقیمانده در شکل ۹، قبل و بعد از تراز نمودن مدل نسبی قابل مشاهده هستند. وجود دوران در مدل نسبی در شکل کاملاً مشخص بوده که تقریباً نسبت به راستای قطر مدل است. البته در اینجا، تراز نمودن حول دو راستای اصلی جغرافیایی انجام پذیرفت.

مدل ریاضی انطباق مدل‌های ارتفاعی در نظر گرفته شد. در حالت پنج نیز، به جای مدل SRTM، از نقاط کنترل زمینی به عنوان اطلاعات کنترل استفاده شد. در صورت انجام تقاطع فضایی با ضرایب خام RPC، مقدار متوسط خطای زمینی در ۹ نقطه کنترل زمینی محاسبه شده و میانگین آفست سه‌بعدی در این نقاط کنترل در قالب حالت ۵ در جدول ۲ آورده شد.



شکل ۹- نقشه اختلاف ارتفاع دو مدل قبل (سمت چپ) و بعد از تراز نمودن مدل نسبی (سمت راست). با در نظر گرفتن یک خط قطری در شکل سمت چپ، مقادیر متقارن اختلاف ارتفاع حول این خط فرضی قابل تشخیص است



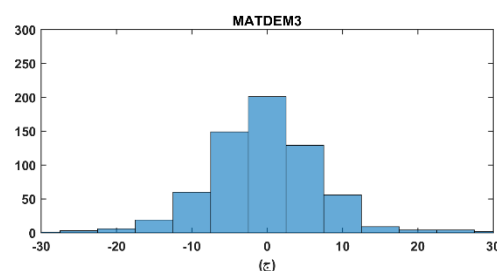
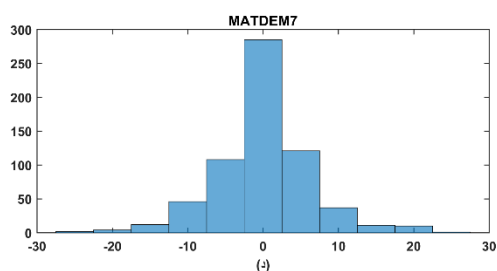
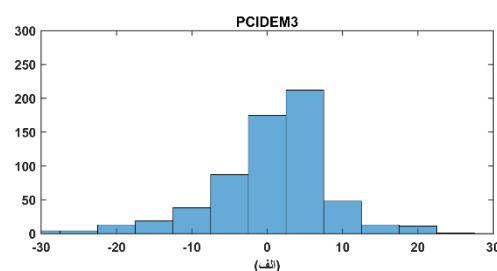
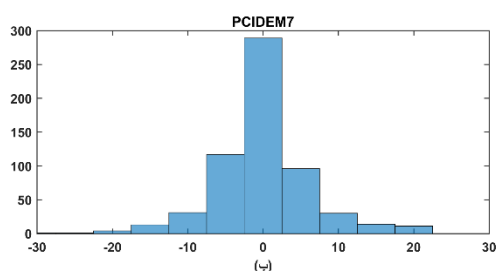
شکل ۸- (الف) وابستگی اختلاف ارتفاع باقیمانده به طول ژئودتیک نقاط پس از حل پارامترهای ترانسفورماسیون شیب-مبنا (ب) وابستگی اختلاف ارتفاع باقیمانده به عرض ژئودتیک نقاط پس از حل وابستگی به طول ژئودتیک

پراکندگی اختلاف ارتفاعات میان دو مدل پس از انجام حالت‌های مختلف در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به نزدیکی نمودار توزیع مقادیر فاصله سطوح ارتفاعی به توزیع نرمال در هر چهار حالت امکان برازش تابع گوسین به این نمودارها وجود دارد اما به جهت ارائه توزیع واقعی نتایج، در این شکل تنها به نمایش هیستوگرام ترسیمی اکتفا شده است. با مشاهده نتایج به دست آمده در حالت‌های مختلف می‌توان تفاسیر زیر را مطرح نمود:

به منظور کشف میزان خطای موجود در مدل ارتفاعی تولیدی از زوج تصویر استرئو، حالت‌های مختلف طراحی شد. چهار حالت مختلف بر اساس نرم‌افزار مورد استفاده در تولید مدل ارتفاعی و همچنین تعداد پارامترهای موجود در

- مقادیر پارامترهای آفست، به ویژه آفست λ_0 برای PCIDEM با MATDEM متفاوت است. دلایل این اختلاف در الگوریتم تولید مدل نسبی در نرم‌افزار PCIGeomatica نهفته بوده که نیازمند بررسی در تحقیقات آتی است.
- یکی از مهم‌ترین دستاوردهای تحقیق حاضر، کشف مقادیر واقعی‌تر خطاهای موجود در مدل ارتفاعی MATDEM7 دانست زیرا همان‌طور که در مقدمه بخش ۴ اشاره شد، یکی از اهداف مهم این تحقیق،

- عدم دخالت در هندسه تصاویر و ضرایب خام RPC در طی مراحل تولید مدل نسبی بوده است. معیار این ارزیابی، آفست محاسبه شده به کمک نقاط کنترل زمینی بوده که در جدول ۲ به عنوان حالت پنج مطرح شده است.
- البته مقدار آفست ارتفاعی در PCIDEM برآورد بهتری داشته است که این امر را می‌توان به فیلتر نشدن برخی نقاط با ارتفاع اشتباه، موجود در MATDEM نسبت داد.



شکل ۱۰- مقایسه نحوه توزیع مقادیر فاصله قائم مدل نسبی با مدل مطلق در چهار حالت (واحد محور افقی: متر). (الف) و (ب) این دو نمودار مربوط به خروجی‌های نرم‌افزار PCIGeomatica می‌شوند، قله هیستوگرام که در حالت آفست ۳ بعدی از صفر فاصله گرفته پس از تراز شدن مدل نسبی در نمودار (ب)، وضعیت توزیع هیستوگرام بهبود یافته است. اما در (ج) و (د) که حاصل تولید مدل ارتفاعی از طریق برنامه‌نویسی هستند بیشینه فراوانی در نزدیکی صفر رخ داده است و پس از تراز شدن مدل نسبی، این هیستوگرام نیز در نمودار (د) توزیع مناسب‌تری یافته است

- قله هیستوگرام نیز بر روی ۵+ متر قرار گرفته است. اما هیستوگرام مدل MATDEM3 این مشکل را نداشته و انتظار می‌رود که تراز نمودن آن ساده‌تر باشد. طبق انتظار، مقادیر برآورد شده برای پارامترهای مرحله تراز نمودن این دو مدل (P_1, P_2, P_3) نیز در جدول ۲ با یکدیگر بسیار متفاوت بوده است. پس از تراز شدن مشاهده می‌شود که هر دو مدل ارتفاعی در نمودارهای (ب) و (د) تقریباً مشابه یکدیگر شده‌اند.
- برخلاف سایر روش‌های موجود که ابتدا یک تبدیل مختصات به کمک سیستم‌های تصویر در مدل‌های ارتفاعی اعمال می‌کنند، مدل ریاضی پیشنهادی جهت انجام تناظریابی مدل‌های ارتفاعی، بر اساس سیستم مختصات داده‌های ورودی (سیستم مختصات

- وارد نمودن دوران‌ها به مدل ریاضی روش شیب-مبنا توانسته است تناظریابی بهتری میان دو مدل ارتفاعی ارائه کند. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، حالت‌های PCIDEM7 و MATDEM7 عملکرد بهتری نسبت به وضعیت سه پارامتری خود داشته‌اند. منظور از عملکرد بهتر، افزایش فراوانی هیستوگرام اختلاف دو مدل ارتفاعی در نزدیکی صفر و همچنین افزایش انطباق هیستوگرام به توزیع نرمال است.
- با نگاه به نمودارهای (الف) و (ج) در شکل ۱۰ تفاوت آشکاری میان دو حالت PCIDEM3 و MATDEM3 که تنها آفست سه‌بعدی یافته‌اند وجود دارد. این تفاوت نشان‌دهنده شدت عدم تراز بودن مدل نسبی حاصل از نرم‌افزار PCIGeomatica می‌باشد که در نتیجه آن، هیستوگرام از توزیع نرمال تبعیت نکرده و

مختصات داده‌های ورودی، قابلیت بهبود اطلاعات RPC تصاویر می‌باشد که آن‌ها نیز در همین سیستم مختصات ژئودتیک بیان می‌شوند. به این موضوع در تحقیقات آتی پرداخته خواهد شد.

ژئودتیک) توسعه داده شده است. بدین ترتیب، مقادیر آفست و دوران مدل نسبی، در همین چارچوب مختصاتی به دست می‌آید. مزیت کشف پارامترهای انطباق دو مدل ارتفاعی در سیستم

جدول ۲- پارامترهای تناظرایی مدل‌های ارتفاعی در چهار حالت مختلف با روش پیشنهادی و مقایسه با نتایج حاصل از به‌کارگیری نقاط کنترل زمینی- اعداد ۳ و ۷ در انتهای نام اختصاری هر حالت به معنای تعداد پارامترهای انطباق مدل‌های ارتفاعی است. مقادیر آفست مسطحاتی به کمک بیضوی مرجع WGS84 تبدیل به واحد متر نیز شده‌اند تا درک بهتری از این مقادیر ایجاد شود. انحراف معیار برآورد پارامترهای دو حالت سه و چهار در زیر مقدار برآورد شده آمده است.

نام اختصاری مدل نسبی	λ_0		φ_0		Z_0	K	P_1	P_2	P_3
	(m)	(arcsec)	(m)	(arcsec)	(m)	(sec)	(m/deg)	(m/deg)	(m)
حالت یک	PCIDEM3	+۶/۰۱	+۱۵۳/۹۴	-۸/۴۷	-۲۶۰/۹۸	+۲۶/۵۵	×	×	×
حالت دو	MATDEM3	+۶/۲۸	+۱۶۰/۸۶	-۸/۳۵	-۲۵۷/۲۸	+۲۵/۴۵	×	×	×
حالت سه	PCIDEM7	+۶/۰۶	+۱۵۵/۲۲	-۸/۵۳	-۲۶۲/۸۳	+۲۶/۵۹	+۳۴/۵۶	-۴۶/۳۲	+۷۳۸/۰۴
		+۰/۰۲	×	+۰/۰۱	×	+۰/۰۴	+۰/۰۰۱۵	+۰/۶۰	۳۴/۹۴
حالت چهار	MATDEM7	+۶/۴۱	+۱۶۴/۱۹	-۸/۵۳	-۲۶۲/۸۳	+۲۵/۴۸	+۳۳/۹۸	-۲۶/۳۶	+۴۳۰/۶۲
		+۰/۰۲	×	+۰/۰۲	×	+۰/۰۴	+۰/۰۰۱۴	+۰/۵۹	۳۳/۳۴
حالت پنج	GCP3	+۶/۳۸	+۱۶۳/۴۲	-۸/۵۷	-۲۶۴/۰۶	+۲۷/۰۹	×	×	×

منطقه به عنوان یک مدل ارتفاعی منظم ۲/۵ بعدی (مدل مطلق) منطبق می‌شود. ابر نقاط سه‌بعدی حاصل تقاطع اشعه‌های نظیر از دو تصویر به کمک اطلاعات RPC این تصاویر می‌باشد. با این فرض که بایاس موجود در این ضرایب به مختصات نقاط زمینی منتقل گشته، تلاش شده است تا اثر بایاس به کمک اطلاعات کنترل زمینی شناسایی و مدل‌سازی گردد. برخلاف روش متداول که جمع‌آوری نقاط کنترل زمینی است، در این تحقیق از مدل ارتفاعی جهانی موجود به عنوان مدل مطلق یا همان اطلاعات کنترل زمینی استفاده شده است.

مزیت دوم تحقیق، حل دو مرحله‌ای انطباق مدل‌های ارتفاعی با الهام گرفتن از روش M43 توجیه مطلق عکس-های هوایی است. ورودی هر دو مرحله، اختلاف ارتفاع تعدادی نقطه مقایسه از ابر نقاط نسبت به مدل مطلق است. در مرحله نخست، آفست سه‌بعدی و دوران حول محور Z با تعمیم روش شیب-مبنا در یک روند تکرار حل می‌شوند. در مرحله بعد، مدل نسبی با توجه به مدل مطلق تراز می‌شود.

روش پیشنهادی بر روی دو مدل نسبی تولید شده توسط نرم‌افزار PCIGeomatica و برنامه‌نویسی در محیط MATLAB پیاده‌سازی شده و نشان داده شد که حالت

از آنجا که نقشه شیب منطقه بدون تبدیل مختصات ژئودتیک محاسبه شده بود، مقادیر آفست مسطحاتی نیز در همین سیستم و با واحد ثانیه کمانی محاسبه گشته و با هر دو واحد ثانیه کمانی و متر در جدول ۲ آورده شد. همچنین با توجه به تبدیل ارتفاعات SRTM به ارتفاع از بیضوی، آفست ارتفاعی با واحد متر نسبت به بیضوی مرجع WGS84 گزارش شد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک راه‌حل آماری برای انطباق مدل-های ارتفاعی با تعمیم روش شیب-مبنا ارائه شده است. همان‌طور که از نام این روش برمی‌آید، وجود تغییرات ارتفاعی کافی در منطقه مورد مطالعه، جهت موفقیت روش پیشنهادی ضروری می‌باشد. مزیت نخست روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مشابه، تشکیل مدل ترانسفورماسیون هندسی در فضای سیستم مختصات ژئودتیک داده‌های ورودی است. به این ترتیب، پارامترهای ترانسفورماسیون در همین فضای مختصاتی برآورد شده و امکان بهبود اطلاعات خام RPC تصاویر فراهم می‌شود.

ابر نقاط نامنظم سه‌بعدی مستخرج از زوج تصویر ماهواره‌ای Cartosat-1 (مدل نسبی) به داده SRTM

عمومی روش شیب-مبنا با حل آفست سه‌بعدی موفق نبوده و خصوصاً مدل نسبی تولید شده توسط نرم‌افزار، به‌طور کامل بر مدل مطلق منطبق نشده است.

با حل دوران و تراز شدن، هر دو مدل نسبی، انطباق تقریباً یکسانی در راستای ارتفاع به مدل مطلق نشان دادند. از لحاظ انطباق مسطحاتی با مبنا قرار دادن نقاط کنترل زمینی، مدل نسبی تولید شده توسط نرم‌افزار با دقت ۳/۳ پیکسل (عمده خطا در امتداد طول جغرافیایی) و مدل نسبی تولید شده توسط برنامه‌نویسی با دقت ۰/۵۸ پیکسل به مدل مطلق منطبق شده‌اند. بدیهی است که این

دقت‌ها برای زوج تصویر مورد استفاده و به کمک کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه به دست آمده است. تأثیر شدت توپوگرافی منطقه در حل انطباق مدل‌های ارتفاعی و همچنین بهبود اطلاعات RPC در تحقیقات آتی مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از سازمان جغرافیایی کشور به دلیل فراهم نمودن تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات کنترلی اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] H. Ebner and F. Müller, (1986). "Processing of digital three-line imagery using a generalized model for combined point determination," *Photogrammetria*, vol. 41, no. 3, pp. 173-182.
- [2] H. Ebner and G. Strunz, (1988). "Combined point determination using digital terrain models as control information," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 27, no. B11/3, pp. 578-587.
- [3] D. Rosenholm and K. Torlegard, (1987). "Three-dimensional absolute orientation of stereo models using digital elevation models," *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 54, pp. 1385-1389.
- [4] A. Gruen and D. Akca, (2005). "Least squares 3D surface and curve matching," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 59, no. 3, pp. 151-174.
- [5] D. R. Streutker, N. F. Glenn, and R. Shrestha, (2011). "A slope-based method for matching elevation surfaces," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 77, no. 7, pp. 743-750.
- [6] A. Sedaghat and A. Alizadeh Naeini, (2018). "DEM orientation based on local feature correspondence with global DEMs," *GIScience & Remote Sensing*, vol. 55, no. 1, pp. 110-129.
- [7] M. Ravanbakhsh and C. Fraser, (2013). "A comparative study of DEM registration approaches," *Journal of Spatial Science*, vol. 58, no. 1, pp. 79-89.
- [8] A. B. Hamza, (2016). "Registration of Digital Terrain Images Using Nondegenerate Singular Points," in *Image Feature Detectors and Descriptors*: Springer, pp. 345-366.
- [9] T. Kim and J. Jeong, (2011). "DEM matching for bias compensation of rigorous pushbroom sensor models," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 66, no. 5, pp. 692-699.
- [10] J. Jeong and T. Kim, (2012). "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.
- [11] G. Rastogi, R. Agrawal, and Ajai, (2015). "Bias corrections of CartoDEM using ICESat-GLAS data in hilly regions," *GIScience & Remote Sensing*, vol. 52, no. 5, pp. 571-585.
- [12] R. Li, X. Niu, C. Liu, B. Wu, and S. Deshpande, (2009). "Impact of imaging geometry on 3D geopositioning accuracy of stereo IKONOS imagery," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 75, no. 9, pp. 1119-1125.
- [13] C. S. Fraser, G. Dial, and J. Grodecki, (2006). "Sensor orientation via RPCs," *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 60, no. 3, pp. 182-194.
- [14] H. Topan, M. Oruc, T. Taskanat, and A. Cam, (2014). "Combined efficiency of RPC and DEM accuracy on georeferencing accuracy of orthoimage: Case study with Pléiades panchromatic mono image," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 6, pp. 1148-1152.
- [15] M. Jannati, M. J. Valadan Zoej, and M. Mokhtarzade, (2017). "A Knowledge-Based Search Strategy for Optimally Structuring the Terrain Dependent Rational Function Models," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 4, p. 345.
- [16] C. V. Tao and Y. Hu, (2001). "A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing," *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 67, no. 12, pp. 1347-1358, 0099-1112.

- [17] H. Pan, C. Tao, and Z. Zou, (2016). "Precise georeferencing using the rigorous sensor model and rational function model for Ziyuan-3 strip scenes with minimum control," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 119, pp. 259-266.
- [18] T.-A. Teo, (2011). "Bias compensation in a rigorous sensor model and rational function model for high-resolution satellite images," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 77, no. 12, pp. 1211-1220.
- [19] B. Yang, Y. Pi, X. Li, and M. Wang, (2017). "Relative Geometric Refinement of Patch Images without Use of Ground Control Points for the Geostationary Optical Satellite GaoFen4," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- [20] A. Marsetič, K. Oštir, and M. K. Fras, (2015). "Automatic orthorectification of high-resolution optical satellite images using vector roads," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 11, pp. 6035-6047.
- [21] N. A. Alizadeh, S. Khazaie, H. Arefi, and A. Jamshidzadeh, (2014). "Automated bias compensation of RPCs of IRS-P5 Satellite Images Using DEM," *Journal of Geospatial Information Technology*, vol. 2, p. 16.
- [22] H. G. Sohn, C. H. Park, and H. Chang, (2005). "Rational function model-based image matching for digital elevation models," *The Photogrammetric Record*, vol. 20, no. 112, pp. 366-383.
- [23] H. Afsharnia, (2010). "Digital Elevation Model Generation from High Resolution Satellite Imagery using Constrained Least Squares Image Matching," MSc, University of Tehran.
- [24] H. Afsharnia, A. Azizi, and H. Arefi, (2015). "Accuracy Improvement by the Least Squares Image Matching Evaluated on the CARTOSAT-1," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, no. 1, pp. 11, 1682-1750.
- [25] H. Afsharnia, H. Arefi, and M. A. Sharifi, (2017). "Optimal Weight Design Approach for the Geometrically-Constrained Matching of Satellite Stereo Images," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 9, p. 965.
- [26] C. S. Fraser and H. B. Hanley, (2003). "Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, no. 1, pp. 53-57, 0099-1112.
- [27] P. d'Angelo, A. Utenthaier, S. Carl, F. Barner, and P. Reinartz, (2010). "Automatic Generation of High Quality DSM Based on IRS-P5 Cartosat-1 Stereo Data," *Special Publication SP-686*, pp. 1-5.
- [28] E. Rodríguez et al., (2005). "An assessment of the SRTM topographic products," *Technical Report JPL D-31639*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.