

کالیبراسیون هندسی تصاویر SAR به منظور حذف خطاهای ناشی از توپوگرافی سطح زمین

مجید اسماعیلزاده^{۱*}، جلال امینی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

m.esmaeilzade@ut.ac.ir

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

jamini@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۴، تاریخ تصویب فروردین ۱۳۹۵)

چکیده

با توجه به هندسه تصویربرداری تصاویر SAR، این تصاویر شامل خطاها یا اعوجاجاتی هندسی هستند که باعث می‌شود اطلاعات تصاویر دارای خطا باشند، لذا باید تصاویر کالیبراسیون هندسی شوند. از آن جاییکه رادارها به صورت پهلونگر تصویربرداری می‌کنند، خطاهایی نظیر سایه، کوتاه‌شدگی^۱ و همپوشانی^۲ به وجود می‌آید. برای اینکه بتوان این خطاها را تصحیح کرد، باید اطلاعاتی در ارتباط با موقعیت سنجنده، هندسه تصویربرداری و ارتفاع هدف نسبت به بیضوی در دسترس باشد. در این مقاله روشی برای تصحیح هندسی تصاویر SAR پیشنهاد می‌شود که از معادلات اساسی برد و داپلر استفاده می‌کند و برای پیاده‌سازی روش مورد استفاده در این مقاله، از تصاویر سنجنده ALOS-PALSAR استفاده می‌شود. در این روش، برای زمین مرجع کردن تصویر، از سه نوع مختلف مدل ارتفاعی رقومی DEM^۳ منطقه استفاده می‌شود که علاوه بر DEM، پارامترهای دقیق مداری سنجنده نیز مورد نیاز است. در روش این مقاله ابتدا مدل ارتفاعی رقومی در راستای برد و آزمون منتقل می‌شود که با اعمال این فرآیند، خطاهای ناشی از توپوگرافی نظیر کوتاه‌شدگی و همپوشانی نیز در این DEM منتقل شده حذف می‌شوند. سپس موقعیت تصویر اصلی روی تصویر این DEM پیدا و با استفاده از بازنمونه‌برداری با انواع تبدیلات دوبعدی، تصویر اصلی بر روی این DEM منطبق می‌شود. پس از اعمال فرآیندهای مذکور، خروجی تصویری زمین مرجع شده است که خطاهای هندسی آن حذف شده است. مزیت روش بیان شده در این مقاله، عدم نیاز به هیچ‌گونه نقطه کنترل و همچنین عدم نیاز به پارامترهای وضعیت و دورانی سنجنده است. از آنجاییکه قدرت تفکیک در راستای برد زمینی تصاویر مورد استفاده حدود ۳۰ متر است، تصویر زمین مرجع شده نیز دارای همین قدرت تفکیک بوده و با استفاده از روش ذکر شده در این تحقیق در حالت مسطحاتی دارای دقتی در حدود ۲۰ متر (کمتر از یک پیکسل) و در حالت ارتفاعی ۳۰ متر برآورد می‌شود.

واژگان کلیدی: زمین مرجع کردن، کوتاه‌شدگی، همپوشانی، سایه، برد - داپلر، مدل ارتفاعی رقومی، معادلات تبدیل

* نویسنده رابط

^۱ Foreshortening

^۲ Layover

^۳ Digital Elevation Model

۱- مقدمه

حوادث طبیعی مانند سیل، زلزله، رانش زمین و غیره از برجسته‌ترین تهدیدات در زندگی جامعه بشری به شمار می‌روند. آشکارسازی و مدیریت تغییرات ناشی از این پدیده‌های ویرانگر به علت شرایط نامساعد جوی، با مشکلاتی مواجه است. سنجنده‌های فعال ماکروویو، به علت عدم وابستگی به شرایط اتمسفری و تغییرات جوی، ابزار مناسبی برای غلبه به این مشکل به شمار می‌روند که البته برای کسب نتایج دقیق و کارآمد، نیازمند اطلاعات بدون خطا و صحیح هستیم. در داده‌های تصاویر سنجنده‌های رادار با روزه ترکیبی^۱، با به‌کارگیری تحلیل‌های کیفی بر روی تصاویر SAR، اطلاعات خاص مورد نظر استخراج می‌گردد که برای کاربردهای متنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت در مناطقی که ارتفاع عوارض زیاد است و سطح از حالت هموار و مسطح خارج می‌شود، زاویه فرودی که به سطح عوارض برخورد می‌کند، از سطح هموار ژئوئید منحرف می‌شود و صحت هندسه تصویر به‌عنوان تابعی از ارتفاع سطح که وابسته به مدل ژئوئید مفروض است، کاهش می‌یابد. بنابراین به دست آوردن اطلاعات صحیح از هندسه تصویر و به‌عبارت‌دیگر کالیبراسیون هندسی دارای اهمیت بسیاری است [۲].

در بحث کالیبراسیون هندسی، مدل‌های توابع کسری^۲ (RFM) به‌طور گسترده‌ای در پردازش هندسی تصاویر اپتیک استفاده می‌شوند اما در داده‌های SAR استفاده نمی‌شدند تا اینکه طبق [۵] برای اولین بار از مدل تابع کسری برای تصحیح هندسی داده‌های SAR استفاده شد. مزیت استفاده از RFM در مقابل مدل‌های RD^۳ این است که این مدل سرعت تبدیل بین سیستم تصویر دوبعدی به سیستم مختصات جغرافیایی سه‌بعدی را با سرعت بالا انجام می‌دهد، بدون اینکه به طور قابل ملاحظه‌ای از دقت و صحت محاسبات کاسته شود. استفاده از RFM فقط به یک سری از محاسبات ساده ضرب، جمع و تقسیم نیاز دارد اما نیاز به دانستن اطلاعات دقیق سنجنده نظیر موقعیت و وضعیت سنجنده دارد که یکی از معایب این روش است. مشکل اساسی دیگر نیاز به

داشتن حداقل ۳۹ نقطه کنترل در تصویر جهت پیدا کردن ضرایب RPC^۴ می‌باشد.

تاخیر در انتشار موج ارسالی در راستای برد به دلیل تغییرات در یونسفر و خطاهای اندازه‌گیری زمان به دلیل این تاخیرات جهت تعیین فاصله بین سنجنده و هدف، دو منبع عمده خطا در تعیین دقت هندسی SAR است. طبق مقاله [۶] روشی مبتنی بر شبیه‌سازی تصویر SAR با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و تطبیق تصویر واقعی به شبیه‌سازی‌شده، به‌منظور تعیین و تصحیح این دو خطا ایجاد شد. پس از آن یک مدل RPC ساخته‌شده و سپس به‌منظور مختصات دهی صحیح به داده‌های SAR استفاده شد اما باز هم آگاهی از وضعیت سنجنده و نقاط کنترل مشکل‌ساز بودند.

در مقاله [۷] با استفاده از مدل‌های برد-داپلر، یک مدل ریاضی به‌منظور مکان‌یابی مستقیم پیکسل‌های تصویر SAR ایجاد شده و پارامترهای تصحیح هندسی نیز تعیین گردید اما به دلیل عدم استفاده از یک منبع اطلاعاتی دیگر، این روش قادر به حذف پدیده کوتاه‌شدگی و همپوشانی نبود.

در جمع‌بندی مقالات مرور شده در این تحقیق می‌توان گفت که روش‌های ارائه شده توسط افراد مختلف جهت زمین مرجع کردن تصاویر راداری به نقاط کنترل و پارامترهای وضعیت و دوران سنجنده نیاز است و در بعضی موارد توانایی حذف خطاهای ناشی از توپوگرافی را ندارد درحالی‌که روش ارائه شده در این مقاله از هیچ نقطه کنترلی جهت زمین مرجع کردن تصاویر راداری استفاده نمی‌کند و به جای آن از DEM منطقه بهره می‌گیرد و توانایی حذف خطاهای ناشی از توپوگرافی را نیز دارد.

در ادامه این مقاله در بخش ۲ تئوری‌ها و مواد لازم این تحقیق، بخش ۳ ارائه روش پیشنهادی، در بخش ۴ نتیجه‌گیری و ارزیابی روش ارائه شده روی داده‌های مورد استفاده و در بخش ۵ نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- تئوری و مواد لازم روش تحقیق

برای یک سطح صاف و هموار و با عوارض دارای ارتفاع یکسان، یک رابطه غیرخطی $(1/\sin\eta)$ بین فاصله سنجنده تا هدف و موقعیت هدف در راستای عمود بر

^۱ Synthetic Aperture Radar (SAR)

^۲ Rational Function Models (RFM)

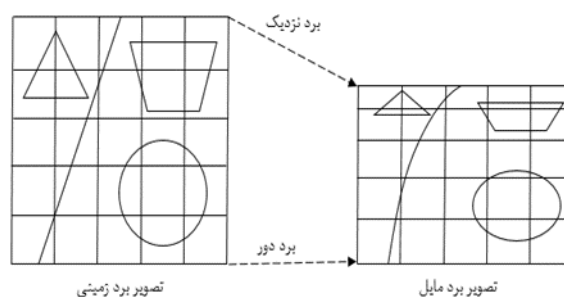
^۳ Range – Doppler (RD)

^۴ Rational Polynomial Coefficient (RPC)

می‌آید. به‌طور مشابه، شرایط ایجاد همپوشانی برای جاهایی ایجاد می‌شود که $\alpha \geq \eta$ است. برای نواحی زمینی که شیب آن‌ها موافق با دید رادار است (α^+)، زاویه ورودی تأثیرگذار کوچک‌تر شده و بنابراین، فاصله بین پیکسل‌ها در راستای عمود بر مسیر پرواز افزایش می‌یابد. برای نواحی زمینی که شیب آن‌ها مخالف با دید رادار است (α^-)، زاویه ورودی تأثیرگذار بزرگ‌تر شده و بنابراین سائز پیکسل‌ها در راستای برد نیز کاهش می‌یابد.

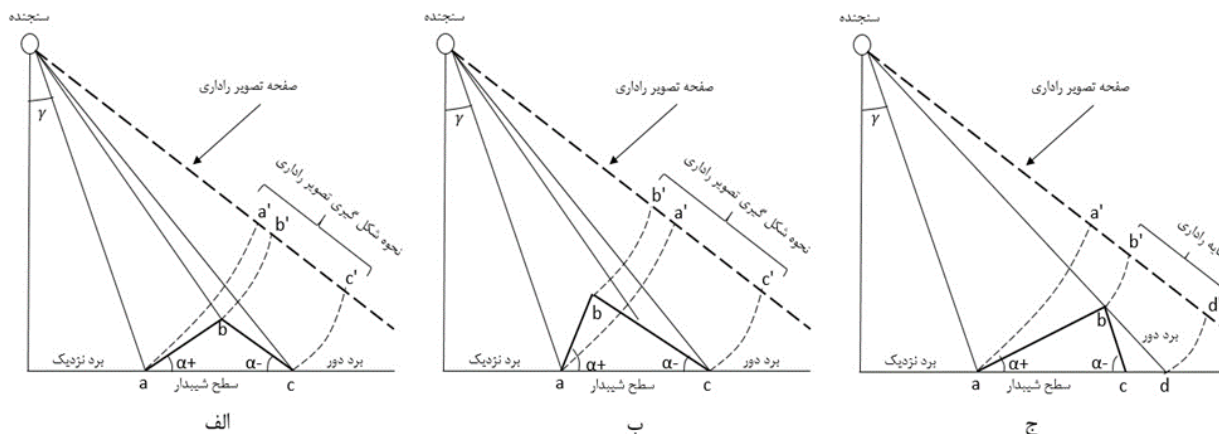
همچنین مطابق شکل ۲-ب، در مناطق با ارتفاع زیاد، پدیده همپوشانی به وجود می‌آید به‌گونه‌ای که بالای قله کوه در یک فاصله نزدیک‌تر از دامنه کوه دیده می‌شود. در این هنگام، تصویر کوه دچار اعوجاج شده به‌گونه‌ای که قله کوه در تصویر دارای مکان هندسی نزدیک‌تر از دامنه کوه است. اعوجاج دیگری در تصویر که در ارتباط با همپوشانی است، سایه رادار است که در شکل ۲-ج نشان داده شده است. زمانی که شرایط وقوع سایه فراهم می‌شود، در بعضی نواحی هیچ‌گونه سیگنالی دریافت نمی‌شود که بخواهد پراکنش صورت گیرد. در تصاویر تصحیح‌شده، این نواحی به‌عنوان نواحی‌ای که سطح سیگنال آن‌ها برابر با صفر بوده و به‌صورت تیره هستند، نمایش داده می‌شوند. این خطا را نمی‌توان در تصاویر تصحیح‌شده هندسی از بین برد.

مسیر پرواز در تصویر وجود دارد. از آنجایی که برای رادارهای پهلونگر، زاویه فرودی η در طول پهنای نوار متغیر است، فاصله زمینی نمایش داده‌شده توسط هر پیکسل برابر و یکنواخت نیست. اثری که این نوع نگرش به اهداف دارد، این است که اندازه اشیا در فاصله برد نزدیک فشرده‌تر از اشیا در فاصله دور هستند (شکل ۱). فقط برای سطوح صاف و هموار است که فاصله بین پیکسل‌ها در برد مایل و فاصله بین پیکسل‌ها در برد زمینی را می‌توان با $\sin \eta$ مرتبط کرد [۲].



شکل ۱- رابطه بین برد مایل و برد زمینی برای رادارهای پهلونگر

هنگامی که سطح محلی مورد دید سنجنده از حالت صاف و مسطح دور می‌شود و سطح دارای ارتفاع می‌گردد، اعوجاجات هندسی جدیدی که وابسته به سطح واقعی زمین است، به وجود می‌آید. این اثر که در شکل ۲-الف نمایش داده می‌شود، کوتاه‌شدگی نام دارد و زمانی اتفاق می‌افتد که شیب سطح محلی α از زاویه فرودی η کمتر است، به وجود



شکل ۲- اعوجاجات هندسی در تصاویر SAR. (الف) کوتاه‌شدگی، (ب) همپوشانی، (ج) سایه

نسبت به یک شبکه‌ی ثابت زمینی مثل سیستم UTM^۱ تعیین گردد، تصاویر می‌توانند به‌صورت هندسی با تصحیح

از نظر هندسی، تصویر خام SLC دارای اعوجاجات هندسی ذکر شده با توجه به هندسه دید جانبی SAR، سطح زمین، خطاهای نمونه‌برداری سیستم و تغییرات سرعت سکو است. با فرض اینکه محل هر پیکسل می‌تواند

^۱ Universal Transverse Mercator

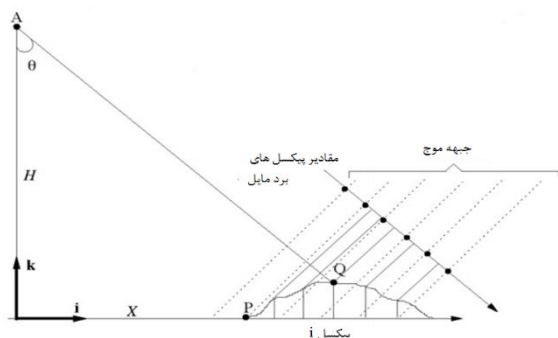
اعوجاجات ذکرشده با انجام یک نمونه‌برداری مجدد تصحیح گردند. بخشی از تصحیح هندسی، تبدیل تصویر ایجادشده در راستای برد مایل به تصویری در راستای برد زمینی است که این عمل با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی زمین انجام می‌شود. چون ثبت داده‌های SAR در راستای برد مایل است، فواصل نسبی زمینی آن‌ها در راستای برد مایل یکسان نخواهد بود، لذا با توجه به اینکه کاربران نیاز به فواصل و اندازه‌های زمینی دارند باید داده‌های جمع‌آوری‌شده در راستای برد مایل تبدیل به راستای برد زمینی شوند. لذا این تبدیل با استفاده از DEM منطقه انجام می‌شود.

۳- روش پیشنهادی این تحقیق

در شکل ۳ تمامی مراحل روش پیشنهادی این مقاله جهت کالیبراسیون هندسی تصاویر SAR بر اساس معادلات برد - داپلر نشان داده شده است. مطابق شکل پس از خواندن تصویر خام SLC^۱ که به صورت مختلط است، تصویر دامنه ایجاد می‌شود. از سوی دیگر نیز با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی منطقه، تصویری از این مدل ارتفاعی در راستای برد و آزیموت شبیه‌سازی‌شده می‌شود که این تصویر عاری از خطاهای ناشی از توپوگرافی منطقه است. سپس با توجه به وجود و یا عدم وجود فرکانس داپلر، موقعیت تصویر اصلی بر روی DEM منتقل شده در راستای برد و آزیموت را تعیین می‌کنیم و با تطبیق تصویر اصلی بر روی این تصویر با استفاده از معادلات تبدیل دوبعدی، تصویری خواهیم داشت که زمین مرجع شده و خطاهای توپوگرافی آن نیز حذف شده است. در ادامه به تشریح جزییات روش ارائه شده می‌پردازیم.

همان‌طور که ملاحظه شد مطابق روش ارائه شده در شکل ۳، ابتدا مدل ارتفاعی رقومی به راستای برد مایل منتقل‌شده (شکل ۴) تا تمامی نقاط این مدل علاوه بر مختصات جغرافیایی، دارای مختصات در راستای برد و آزیموت نیز باشند. حال مکان تصویر اصلی موردنظر، بر روی مدل ارتفاعی رقومی منتقل‌شده پیدا می‌شود و سپس DEM انتقال داده شده را که در راستای برد و آزیموت است با تصویر اصلی SAR که دارای خطا نیز می‌باشد با یک نمونه‌برداری و استفاده از معادلات تبدیل دوبعدی،

منطبق می‌کنیم. در واقع، مدل ارتفاعی رقومی بدون خطا بوده و با انتقال این مدل به راستای برد - آزیموت، تصویری بدون خطا داریم. سپس با انتقال تصویر اصلی SAR و اطلاعات رادیومتری آن بر روی این مدل ارتفاعی رقومی منتقل شده، خروجی یک تصویر زمین مرجع شده در سیستم مختصات ژئودتیک (یا هر سیستم مختصات دیگر) است که خطاهای ناشی از توپوگرافی آن نیز حذف شده است.



شکل ۴- انتقال تصویر به راستای برد مایل

برای انتقال DEM به راستای برد - آزیموت، پیش‌پردازش‌هایی نیز لازم است. تمامی نقاط در مدل ارتفاعی رقومی در سیستم مختصات ژئودتیک (ϕ, λ, h) هستند ولی بردارهای موقعیت سنجنده در سیستم مختصات زمین مرکز (X, Y, Z) است. برای این منظور مختصات تمامی نقاط مدل ارتفاعی رقومی را باید از سیستم مختصات ژئودتیک به سیستم مختصات زمین مرکز منتقل کنیم تا هر دو نوع داده برای محاسبات بعدی دارای یک سیستم مختصات باشند.

برای تبدیل مختصات از سیستم مختصات ژئودتیک به سیستم مختصات زمین مرکز، از روابط زیر استفاده می‌شود. e خروج از مرکزیت اول و a و b به ترتیب نیم قطرهای بلند و کوتاه بیضوی هستند و N شعاع انحنای قائم اولیه است [۱۲].

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} / a \quad (1)$$

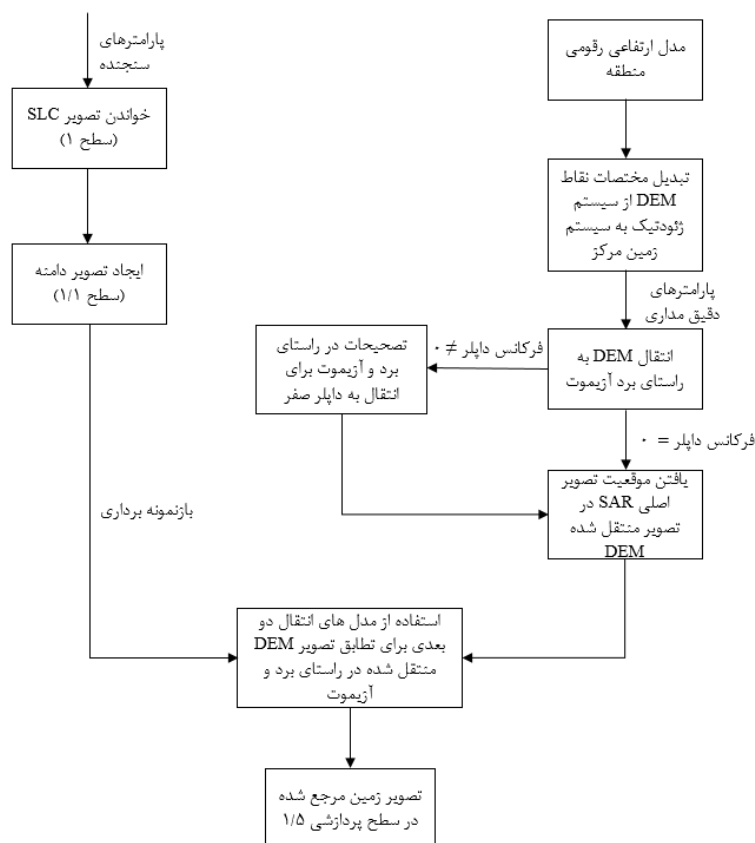
$$N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi} \quad (2)$$

$$X = (N + h) \cos \phi \cos \lambda \quad (3)$$

$$Y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda \quad (4)$$

$$Z = [N(1 - e^2) + h] \sin \phi \quad (5)$$

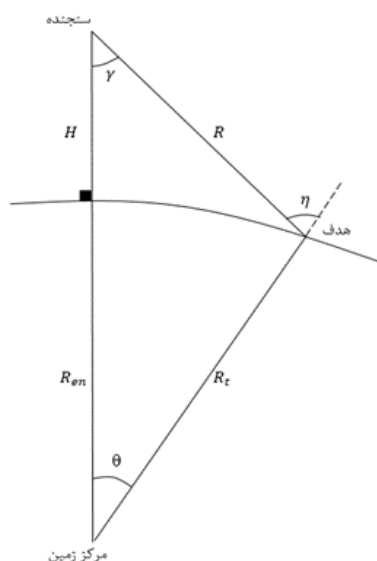
^۱ Single Look Complex



شکل ۳- فلودیگرام روش پیشنهادی این تحقیق

سنجنده در مدار) در سیستم مختصاتی زمین مرکز هستند. ابتدا فاصله هر نقطه روی مدل ارتفاعی رقومی تا تمامی نقاط بر روی مدار سنجنده طبق رابطه ۸ محاسبه می‌کنیم.

$$d = \sqrt{(X_{DEM} - X_{Orb})^2 + (Y_{DEM} - Y_{Orb})^2 + (Z_{DEM} - Z_{Orb})^2} \quad (۸)$$



شکل ۵- هندسه تصویربرداری سنجنده‌های SAR

پس از تبدیل مختصات ژئودتیک DEM به زمین مرکز، اصلی‌ترین مرحله، انتقال مدل ارتفاعی رقومی به سیستم مختصات برد - آزمون است. برای انجام این فرآیند از معادلات اساسی برد - داپلر (معادلات ۶ و ۷) استفاده می‌کنیم. معادله اول، معادله برد و معادله دوم داپلر نام دارد.

$$R = |R_S - R_t| \quad (۶)$$

$$f_{DC} = \frac{2}{\lambda R} (V_S - V_t) \cdot (R_S - R_t) \quad (۷)$$

R فاصله برد مایل بین سنجنده تا هدف، R_t بردار موقعیت هدف و $R_S = H + R_{en}$ بردار موقعیت سنجنده، f_{DC} فرکانس داپلر مرکزی λ طول موج و V_S و V_t سرعت سنجنده و هدف است (شکل ۵).

برای اینکه بتوان مدل ارتفاعی رقومی را در راستای برد شبیه‌سازی نمود، برای هر نقطه می‌بایست یک فاصله به‌منظور پیدا کردن موقعیت در راستای برد و یک زمان به‌منظور پیدا کردن موقعیت در راستای آزمون محاسبه کرد. تمامی مختصات‌ها (مدل ارتفاعی رقومی و موقعیت

نقطه در مدل ارتفاعی رقومی در سیستم مختصات برد - آزیموت تعیین می‌شود. به عبارتی داریم:

$$(\varphi, \lambda, h) \rightarrow (X, Y, Z) \rightarrow (tm, rng) \rightarrow (azimuth, range) \quad (13)$$

در انتها با انطباق تصویر اصلی SAR که دارای خطاهای هندسی است بر روی این DEM منتقل شده، به تصویری می‌رسیم که در آن تمامی خطاهای هندسی تصحیح شده و نسبت به سیستم مختصات زمینی، زمین مرجع شده است.

سه روش برای انطباق تصویر اصلی SAR بر روی تصویر DEM منتقل شده استفاده گردید. بدین منظور از معادلات تبدیل کانفورمال^۱، آفاین^۲ و پروژکتیو^۳ استفاده شد. معادلات ریاضی این تبدیل‌ها و پارامترهای آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- معادلات تبدیل دوبعدی برای انطباق تصویر SAR		
پارامترها	رابطه ریاضی	معادله تبدیل
a, b, c, d	$X = ax + by + c$ $Y = -bx + ay + d$	کانفورمال
a, b, c, d, e, f	$X = ax + by + c$ $Y = dx + ey + f$	آفاین
a, b, c, d, e, f, g, h	$X = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1}$ $Y = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1}$	پروژکتیو

(X, Y) مختصات نقاط در DEM منتقل شده و (x, y) نیز مختصات همان نقاط بر روی تصویر اصلی SAR هستند. جهت تعیین ضرایب $\{a, b, c, d, e, f, g, h\}$ استفاده از تبدیل پروژکتیو، نیاز به حداقل ۴ نقطه کنترل در دو تصویر است. تبدیل‌های آفاین و کانفورمال، به ترتیب نیاز به حداقل ۳ و ۲ نقطه کنترل دارند. چهار گوشه هر دو تصویر را می‌توان به عنوان نقاط کنترلی که دارای دقت بالایی هستند انتخاب کرد.

نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد، تبدیل تصاویر از حالت تک منظره^۴ به چند منظره^۵، قبل از زمین مرجع کردن تصاویر است. مدل‌های ارتفاعی رقومی موجود، به طور

کمترین فاصله بین مدل ارتفاعی رقومی تا سنجنده، فاصله موردنظر (r_{ng}) و زمان سنجنده بر روی مدار در آن موقعیت که کمترین فاصله را دارا می‌باشد، زمان موردنظر (t_m) است. این فرآیند را برای تمامی نقاط مدل ارتفاعی رقومی انجام می‌دهیم تا برای هر پیکسل یک فاصله و یک زمان داشته باشیم. پس‌از آن طبق معادلات ۹ و ۱۰، چنانچه مقدار فرکانس داپلر برابر صفر باشد، مختصات در راستای برد و آزیموت برای هر نقطه در مدل ارتفاعی رقومی محاسبه می‌شود.

$minR_{ng}$ نزدیک‌ترین فاصله برد سنجنده، t_1 زمان شروع تصویربرداری، PRF فرکانس نمونه‌برداری پالس، f_s نرخ نمونه‌برداری در راستای برد و c نیز سرعت نور است. R_{ng} و t_m نیز کمترین فاصله محاسبه‌شده و زمان موردنظر بود.

$$r_1 = 2f_s(R_{rng} - minR_{rng})/c \quad (9)$$

$$a_1 = PRF * (t_m - t_1) \quad (10)$$

چنانچه فرکانس داپلر سنجنده نیز صفر نباشد (که معمولاً صفر نیست)، تصحیحاتی را می‌بایست در راستای برد و آزیموت اعمال کرد. F_d فرکانس داپلر، V_s سرعت ماهواره و λ نیز طول موج ارسالی است که این مقادیر درون فایلی همراه با تصویر معلوم است. موقعیت برد و آزیموت تصحیح‌شده توسط معادلات ۱۱ و ۱۲ بیان می‌شود.

$$r_2 = r_1 + (\lambda^2 F_d^2 R_{rng} f_s / 4c V_s^2) \quad (11)$$

$$a_2 = a_1 + (PRF \lambda F_d R_{rng} / 2V_s^2) \quad (12)$$

با انجام محاسبات بالا، DEM به سیستم مختصات برد - آزیموت منتقل می‌شود. در واقع این تصویر همان مدل ارتفاعی رقومی منطقه است که هر پیکسل آن علاوه بر موقعیت‌های جغرافیایی طول، عرض و ارتفاع از بیضوی، دارای موقعیت در راستای برد و آزیموت می‌شود که خطاهای ناشی از توپوگرافی آن شامل کوتاه‌شدگی و همپوشانی در آن حذف شده است.

به این ترتیب، برای هر نقطه در مدل ارتفاعی رقومی، ابتدا مختصات ژئودتیک آن به مختصات ژئوسنتریک تبدیل می‌شود و سپس فاصله و زمان متعلق به آن نقطه طبق معادلات برد - داپلر محاسبه و در انتها موقعیت هر

^۱ Conformal
^۲ Affine
^۳ Projective
^۴ Single - look
^۵ Multi - look

۴-۱- داده‌ها و محدوده مورد مطالعه

در این مقاله به منظور پیاده‌سازی و ارزیابی روش ارائه شده، از دو مجموعه تصویر ماهواره‌ای با روزه ترکیبی استفاده شده است. این تصاویر متعلق به ماهواره ALOS مربوط به سنجنده PALSAR می‌باشد. مناطق تحت پوشش این تصاویر، دارای مناطق با ارتفاع کم و مسطح تا مناطق کوهستانی است. تصویر اول مربوط به مرز بین دو کشور آمریکا و مکزیک و تصویر دوم متعلق به ایران است. موقعیت تقریبی این تصاویر در شکل ۶ نمایش داده شده است. این تصویر توسط نرم‌افزار Google Earth گرفته شده است. مستطیل‌های مشخص شده در شکل ۵، نواحی تحت پوشش این تصاویر را نشان می‌دهد. منطقه شهری El Centro و Mexicali در نزدیکی دریاچه Salton که توسط نواحی کوهستانی و زمین‌های کشاورزی احاطه شده‌است، به عنوان تصویر اول انتخاب شده است. تصویر دوم شامل نواحی کوهستانی و جنگلی در کنار دریای خزر است که شامل شهرهای رشت و بندر انزلی می‌باشد. اطلاعات عمومی مربوط به این تصاویر در جدول ۲ بیان شده است. برای بیان بهتر، تصاویر را با حروف A و B نمادگذاری کردیم که در شکل ۶ نیز دیده می‌شود. قدرت تفکیک مکانی تصاویر ALOS PALSAR در راستای برد زمینی برابر ۳۰ متر است و قدرت تفکیک مکانی در راستای آزمون در حدود ۵ متر است.

به منظور زمین مرجع کردن تصاویر SAR، از سه نوع مدل ارتفاعی رقومی استفاده شده است. این مدل‌ها شامل ACE2 GDEM و SRTM DEM، ASTER GDEM V2 هستند. قدرت تفکیک مکانی مدل‌های مورد استفاده برای تصویر A به ترتیب برابر ۳۰ متر، ۳۰ متر و ۲۷۰ متر می‌باشد و قدرت تفکیک مکانی مدل‌های مورد استفاده برای تصویر B به ترتیب ۳۰ متر، ۹۰ متر و ۲۷۰ متر است. مدل ارتفاعی رقومی SRTM دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در قاره آمریکا و ۹۰ متر در سایر نقاط جهان است. مدل ارتفاعی رقومی ACE2 توسط دانشگاه De Montfort انگلستان و به وسیله تلفیق داده‌های SRTM با داده‌های ماهواره‌های ارتفاع سنجی ایجاد شده است [۱۰].

معمول دارای قدرت تفکیک مکانی کمتری از تصاویر SAR هستند. بنابراین، هر پیکسل در مدل ارتفاعی رقومی مطابق با چندین پیکسل در تصویر SAR است. لذا، جهت کاستن نویز لکه‌ای، تصاویر SAR به صورت چند منظره نمایش داده می‌شوند. ضرایب مورد استفاده جهت تبدیل تصویر تک منظره به چند منظره، با استفاده از مقایسه بین قدرت تفکیک مکانی مدل ارتفاعی رقومی و فاصله بین پیکسل‌ها در راستای برد و آزمون در تصویر SAR، تعیین می‌شوند. این ضرایب توسط معادلات ۱۴ و ۱۵ بیان می‌شوند.

$$N_A = [\sigma_{DEM} \sin \theta / 2\sigma_r + 0.5] \quad (14)$$

$$N_R = [N_A \sigma_r / \sin \theta \sigma_a + 0.5] \quad (15)$$

N_A و N_R ضرایب چند منظره در راستای آزمون و برد، σ_{DEM} قدرت تفکیک مکانی مدل ارتفاعی رقومی، σ_a و σ_r فاصله بین پیکسل‌ها در راستای آزمون و برد در تصویر SAR و θ نیز زاویه دید سنجنده است. [] نشان‌دهنده عملگر عدد صحیح است.

۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج روش پیشنهادی

در این بخش، نتایج بکارگیری مدل‌های مختلف بر روی تصاویر مورد نظر جهت ارزیابی پتانسیل مدل مورد استفاده، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ارزیابی اول به منظور یافتن بهترین معادله تبدیل دوبعدی از میان سه معادله تبدیل جهت انطباق تصاویر است.

در ادامه به مقایسه تصاویر زمین مرجع شده SAR که با استفاده از سه نوع مدل ارتفاعی رقومی، زمین مرجع شده‌اند، خواهیم پرداخت. سپس به بررسی تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل ارتفاعی رقومی مورد استفاده بر روی تصاویر زمین مرجع شده خواهیم پرداخت. در انتها نیز به بررسی تأثیر ابعاد تصویر بر روی دقت تصویر زمین مرجع شده خواهیم پرداخت.

جدول ۲- اطلاعات عمومی تصاویر مورد استفاده

نوع سنجنده	نماد داده	منطقه	تاریخ تصویربرداری	نوع تصویربرداری	سطح پردازشی	ابعاد تصویر	محدوده ارتفاعی (متر)
ALOS PALSAR	A	El Centro مکزیک	۲۰۰۹/۱۱/۹	FBD	SLC	۲۷۶۴۸ × ۱۱۳۰۴	(-۱۱۵ , ۱۸۰۰)
ALOS PALSAR	B	رشت، ایران	۲۰۰۸/۷/۱۹	FBD	SLC	۲۷۶۴۸ × ۵۶۵۲	(-۷۵۰ , ۳۳۰۰)



الف



ب

شکل ۶- موقعیت جغرافیایی و منطقه تحت پوشش تصاویر. الف) El Centro، مکزیک، ب) رشت، ایران.

۲-۴- پیش پردازش

همراه با تصاویر ALOS در سطح ۱/۰، دو فایل نیز با پسوندهای PRM و A_0 وجود دارد. فایل PRM حاوی اطلاعاتی در ارتباط با پارامترهای سخت افزاری سنجنده نظیر شعاع متوسط زمین، شعاع استوایی و قطبی زمین، فرکانس داپلر، طول پالس، طول موج، فرکانس نمونه برداری در راستای برد و ابعاد تصویر موردنظر است و فایل با پسوند A_0 که موسوم به فایل Leader نیز می باشد، حاوی تاریخ دقیق اخذ تصویر با دقت کسری از ثانیه و همچنین پارامترهای دقیق مداری همچون بردارهای موقعیت و سرعت سنجنده است. وجود هر دو فایل به منظور زمین مرجع کردن تصاویر الزامی است.

با استفاده از رابطه ۱۶، تصاویر دامنه موردنظر که به صورت تک منظره و چند منظره می باشند، در شکل ۷ نشان داده شده است. برای اینکه بتوان تصویر را از لحاظ بصری بهتر دید و مقداری از نویز لکه کاسته شود، تصویر به صورت چند منظره نمایش داده می شود به گونه ای که قدرت تفکیک مکانی تصویر در راستای آزیموت و برد تقریباً باهم برابر باشند. این تصویر چند منظره حاصل دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است.

تصاویر ALOS PALSAR در سطح پردازشی ۱/۰ با فرمت SLC می باشد. تصاویر سنجنده PALSAR به طور معمول در سطوح ۱/۰، ۱/۱ و ۱/۵ هستند. تصاویر سطح ۱/۰، حاصل پردازش داده های خام در سطح (۰) است که در آن هر پیکسل به صورت عدد مختلط $I+jQ$ بیان می شود. I و Q مقادیر حقیقی و موهومی تصویر SLC در سطح ۱/۱ است. تصاویر سطح ۱/۱، تصویر دامنه هستند که با استفاده از پردازش مؤلفه های حقیقی و موهومی تصویر به دست می آید. این تصاویر زمین مرجع شده نیستند و مقدار دامنه هر پیکسل توسط رابطه زیر حاصل می شود.

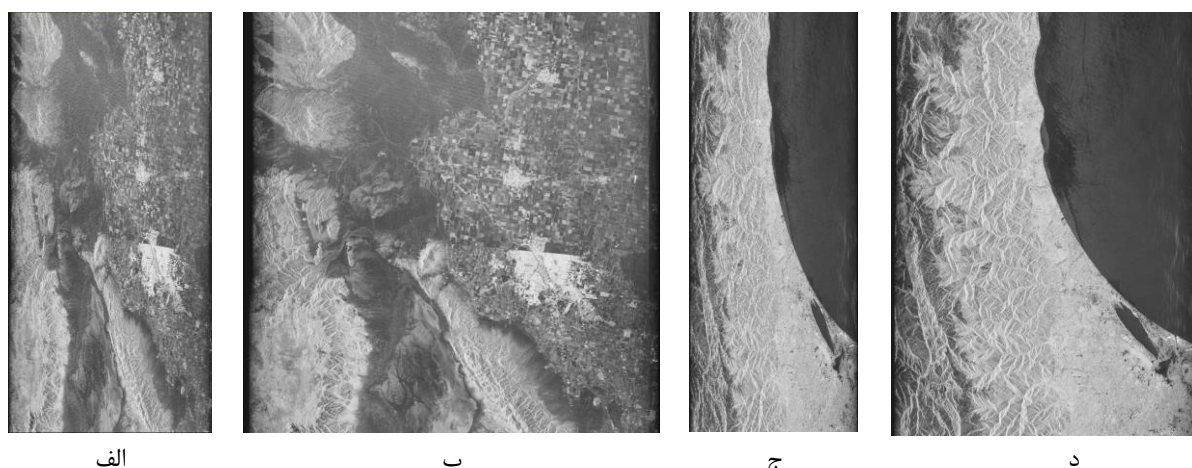
$$Amplitude = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (16)$$

تصاویر سطح ۱/۵، همان تصویر دامنه است اما به صورت زمین مرجع شده هستند. هدف این مقاله نیز اعمال پردازش هایی به منظور تبدیل تصویر از سطح ۱/۰ به سطح ۱/۵ است.

۳-۴- ارزیابی تأثیر معادلات تبدیل دوبعدی

در این بخش، سه روش به منظور تطابق تصویر اصلی بر روی DEM منتقل شده، استفاده گردید. سپس تأثیر هر یک از این روش‌ها بر روی دقت مسطحاتی و ارتفاعی مورد بررسی قرار گرفت. برای زمین مرجع کردن تصاویر، از

مدل ارتفاعی رقومی ASTER استفاده شد. این نکته مهم مورد توجه قرار گیرد که ارتفاع‌های بررسی شده، با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی بدست آمده‌اند و مقدار H در معادلات تبدیل دو بعدی نقشی ندارد. بنابراین، تمامی دقت‌های ارتفاعی بدست آمده مقایسه بین دقت ارتفاع‌ها در مدل ارتفاعی رقومی و نرم‌افزار Google Earth است.



شکل ۷- مقایسه بین تصاویر دامنه تک منظره و چند منظره. الف) تصویر تک منظره A، ب) تصویر چند منظره A، ج) تصویر تک منظره B، د) تصویر چند منظره B

که به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. برای بررسی دقت، میزان ^۱RMSE مسطحاتی و ارتفاعی هر نقطه طبق روابط ۱۷ و ۱۸ محاسبه گردید. X ، Y و H مقادیر طول و عرض جغرافیایی بدست آمده با استفاده از روش مورد استفاده در این در تحقیق و x ، y و h مقادیر طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع با استفاده از Google Earth است.

$$RMSE(planimetry) = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2 \right]} \quad (17)$$

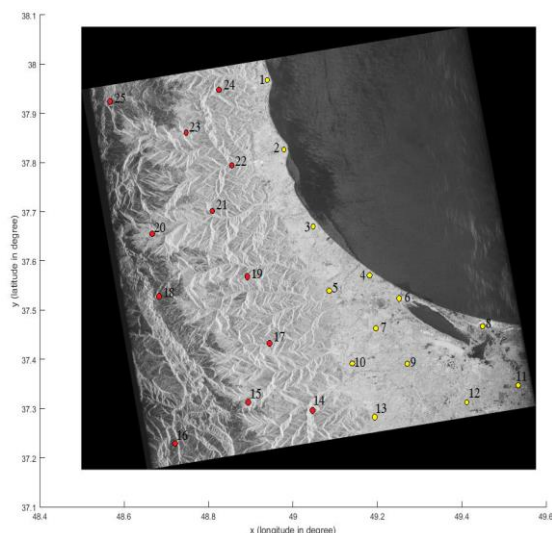
$$RMSE(altimetry) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - h_i)^2} \quad (18)$$

جهت نمایش بهتر تأثیر معادلات تبدیل و درجات آزادی روی زمین مرجع کردن تصاویر، هر سه نوع معادله تبدیل در ۱۶ سطح مختلف از درجات آزادی برای هر دو تصویر، اعمال گردید. نتایج بدست آمده در جدول ۳ نشان داده شده است.

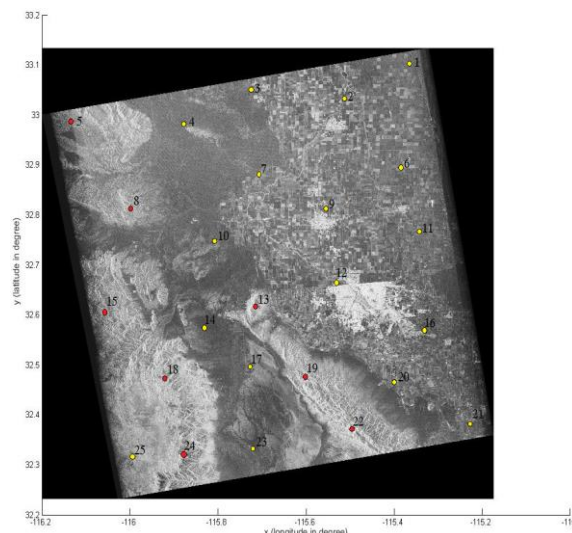
جهت زمین مرجع کردن تصویر اصلی SAR و استفاده از معادلات تبدیل دوبعدی، به نقاط کنترل متعددی نیاز است، لذا ۲۰ نقطه کنترل در تصاویر A و B و با استفاده از نرم‌افزار Google Earth انتخاب شدند. طبق گفته Google Earth، دقت مسطحاتی هر نقطه در این نرم‌افزار در حالت مسطحاتی بین ۳ تا ۸ متر و در حالت ارتفاعی ۵ تا ۱۰ متر است. استفاده از تعداد نقاط کنترل مختلف جهت حل معادلات تبدیل، درجات آزادی مختلفی را در پی خواهد داشت. شکل ۸ تصاویر زمین مرجع شده را نشان می‌دهد که در آن‌ها از معادلات تبدیل پروژکتیو و درجه آزادی با مقدار عددی ۳۰ استفاده شده است.

برای بررسی دقت ارتفاعی و مسطحاتی، ۲۵ نقطه گرهی در هر دو تصویر انتخاب شدند. این نقاط به گونه‌ای در تصویر انتخاب شدند که در تمامی تصویر وجود داشته باشند. نقاطی که در مناطق مسطح انتخاب شدند، با دایره‌های کوچک زرد رنگ و نقاطی که در مناطق کوهستانی انتخاب شدند، با دایره‌های کوچک قرمز رنگ در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. برای هر نقطه دو دسته مختصات داریم: مختصات به‌دست‌آمده با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق و مختصات همین نقاط از Google Earth

^۱ Root Mean Square Error



ب



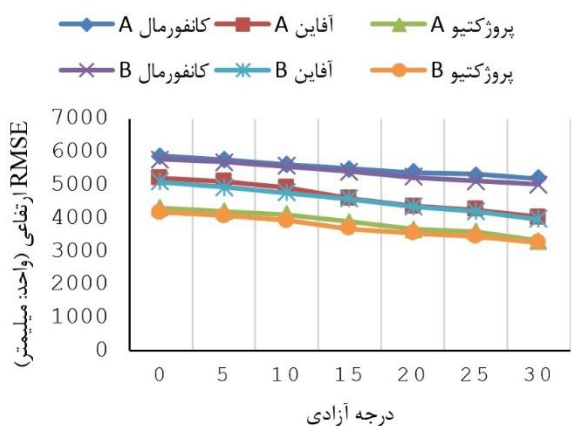
الف

شکل ۸- تصاویر نهایی زمین مرجع شده بدون خطاهای ناشی از توپوگرافی. (الف) تصویر A، (ب) تصویر B

۱۰ این نکته را تأیید می‌کنند که بهترین معادله جهت زمین مرجع کردن تصاویر SAR، معادلات پروژکتیو است.

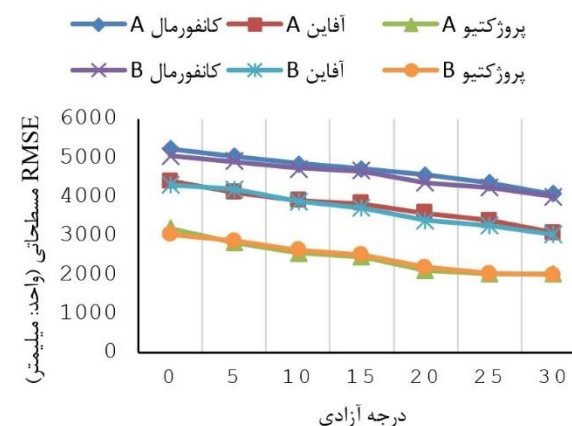
۴-۴- ارزیابی تأثیر مدل ارتفاعی رقومی

در این بخش، تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل‌های ارتفاعی رقومی روی دقت تصاویر زمین مرجع شده بررسی گردید. برای تطابق تصاویر، از معادلات تبدیل پروژکتیو استفاده شد. نتایج بدست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است. تغییرات دقت مسطحاتی و ارتفاعی تصاویر A و B در مقابل نوع مدل ارتفاعی رقومی بکار رفته جهت زمین مرجع کردن تصاویر، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰- نمودار دقت ارتفاعی بر حسب درجه آزادی و معادلات تبدیل

شکل‌های ۹ و ۱۰، نشان‌دهنده افزایش خطای موقعیتیابی پیکسل‌ها با استفاده از معادلات تبدیل کانفورمال است. با استفاده از روش برد - داپلر و معادلات تبدیل پروژکتیو با درجه آزادی ۳۰، تصویر زمین مرجع شده A دارای دقت ۲۰/۱۱ متر و تصویر زمین مرجع شده B دارای دقت ۱۹/۹۴ متر در حالت مسطحاتی است. هر دو دارای عددی کمتر از ۳۰ متر، یعنی مقدار عددی قدرت تفکیک مکانی سنجنده ALOS PALSAR، هستند. جدول ۳ نشان می‌دهد که در درجات آزادی ۲۴ و بیشتر، دقت مسطحاتی همگرا بوده و افزایش درجات آزادی به منظور بهبود دقت، امری بی‌فایده است. شکل‌های ۹ و

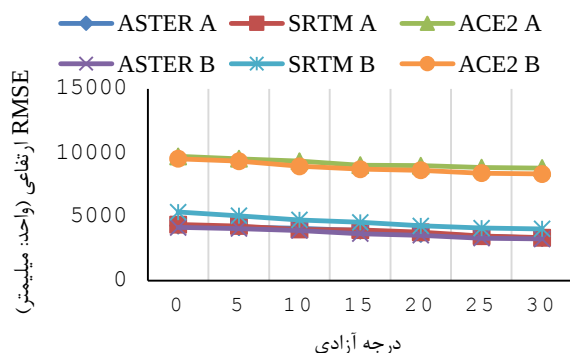


شکل ۹- نمودار دقت مسطحاتی بر حسب درجه آزادی و معادلات تبدیل

جدول ۳- نتایج دقت مسطحاتی و ارتفاعی برای معادلات تبدیل مختلف (واحد: متر)

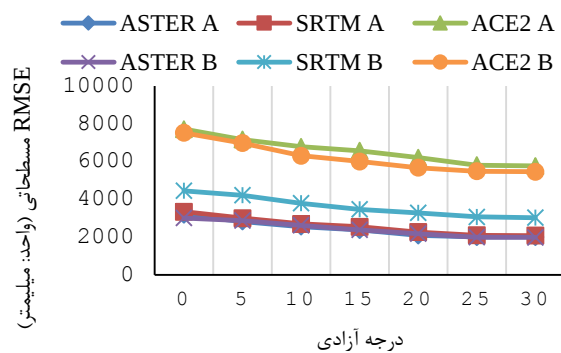
درجه آزادی	تصویر A						تصویر B					
	کانفورمال		آفاین		پروژکتیو		کانفورمال		آفاین		پروژکتیو	
	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE
۰	۵۲/۱۸	۵۸/۸۴	۴۴/۱۰	۵۲/۱۴	۳۱/۸۹	۴۳/۰۴	۵۰/۴۶	۵۷/۷۱	۴۳/۰۷	۵۰/۹۳	۳۰/۱۹	۴۱/۷۳
۲	۵۱/۸۹	۵۸/۲۱	۴۳/۱۵	۵۲/۰۱	۳۰/۷۵	۴۲/۸۳	۴۹/۸۳	۵۷/۶۲	۴۲/۹۱	۵۰/۲۴	۳۰/۰۲	۴۱/۲۲
۴	۵۰/۷۶	۵۷/۷۳	۴۱/۹۷	۵۱/۸۱	۲۹/۴۷	۴۲/۰۷	۴۹/۱۸	۵۷/۱۹	۴۲/۱۴	۴۹/۸۱	۲۹/۴۵	۴۰/۹۱
۶	۴۹/۹۷	۵۷/۳۴	۴۰/۰۶	۵۰/۳۹	۲۷/۳۲	۴۱/۷۳	۴۸/۷۳	۵۶/۸۳	۴۱/۳۳	۴۹/۱۲	۲۸/۱۳	۴۰/۸۰
۸	۴۹/۰۱	۵۶/۸۱	۳۹/۲۴	۴۹/۷۴	۲۶/۱۷	۴۱/۲۹	۴۷/۹۴	۵۶/۲۱	۴۰/۸۱	۴۸/۷۲	۲۷/۰۹	۳۹/۹۴
۱۰	۴۸/۵۲	۵۶/۰۹	۳۸/۹۵	۴۹/۱۸	۲۵/۵۹	۴۱/۰۴	۴۷/۲۷	۵۵/۶۳	۳۸/۷۵	۴۷/۶۵	۲۶/۳۱	۳۹/۳۶
۱۲	۴۷/۸۱	۵۵/۷۹	۳۸/۲۴	۴۷/۲۹	۲۴/۹۱	۴۰/۵۹	۴۶/۹۷	۵۴/۷۴	۳۷/۸۹	۴۷/۱۴	۲۵/۴۴	۳۸/۰۳
۱۴	۴۷/۲۹	۵۵/۱۸	۳۷/۹۸	۴۶/۳۴	۲۴/۱۸	۳۹/۵۱	۴۶/۱۴	۵۴/۲۹	۳۶/۵۹	۴۶/۳۹	۲۴/۷۳	۳۷/۱۲
۱۶	۴۶/۹۸	۵۴/۷۷	۳۷/۴۹	۴۵/۲۳	۲۳/۵۸	۳۸/۳۹	۴۵/۶۶	۵۳/۸۳	۳۵/۴۳	۴۵/۲۲	۲۳/۵۱	۳۶/۵۰
۱۸	۴۶/۱۱	۵۴/۱۶	۳۶/۳۴	۴۴/۷۶	۲۲/۴۷	۳۷/۱۲	۴۴/۱۲	۵۲/۹۹	۳۴/۵۱	۴۴/۴۱	۲۲/۹۰	۳۶/۷۴
۲۰	۴۵/۵۶	۵۳/۸۱	۳۵/۷۱	۴۳/۵۹	۲۰/۹۴	۳۶/۷۱	۴۳/۵۹	۵۲/۳۴	۳۳/۹۴	۴۳/۵۱	۲۱/۸۴	۳۵/۵۴
۲۲	۴۴/۰۷	۵۳/۴۶	۳۴/۹۸	۴۲/۸۱	۲۰/۱۴	۳۴/۱۹	۴۲/۷۷	۵۱/۴۹	۳۲/۹۷	۴۲/۷۴	۲۰/۷۹	۳۳/۸۴
۲۴	۴۲/۷۳	۵۲/۹۷	۳۳/۱۱	۴۲/۰۰	۲۰/۱۲	۳۲/۷۵	۴۱/۵۹	۵۱/۰۸	۳۲/۰۱	۴۱/۱۹	۱۹/۹۹	۳۲/۰۹
۲۶	۴۱/۴۸	۵۲/۱۴	۳۱/۵۴	۴۰/۷۱	۲۰/۱۲	۳۱/۲۲	۴۰/۸۴	۵۰/۷۱	۳۱/۴۱	۳۹/۶۹	۱۹/۹۶	۳۱/۹۴
۲۸	۴۰/۶۲	۵۱/۹۵	۳۰/۷۷	۴۰/۵۹	۲۰/۱۱	۳۰/۸۱	۳۹/۹۹	۵۰/۲۴	۳۰/۹۲	۳۹/۶۱	۱۹/۹۶	۳۰/۷۹
۳۰	۴۰/۵۹	۵۱/۸۳	۳۰/۷۵	۴۰/۴۱	۲۰/۱۱	۳۰/۲۸	۳۹/۹۶	۵۰/۲۲	۳۰/۳۱	۳۹/۵۷	۱۹/۹۴	۳۰/۷۱

با مقایسه شرایط یکسان تصاویر A و B (مدل ارتفاعی رقومی ASTER و یا مدل ارتفاعی رقومی ACE2)، تصویر B دارای دقت بهتری در مقایسه با تصویر A است. دقت بهتر تصویر B به دلیل ابعاد این تصویر است. تعداد پیکسل‌ها در راستای برد در تصویر B دقیقاً نصف تعداد پیکسل‌ها در همین راستا در تصویر A است. در این تحقیق موردی، دقت تصاویر زمین مرجع شده با استفاده از مدل‌های ارتفاعی رقومی ASTER و SRTM قابل قبول هستند. جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل ارتفاعی رقومی ASTER دقیق‌تر از مدل ارتفاعی رقومی SRTM است.



شکل ۱۰- نمودار دقت ارتفاعی برحسب درجه آزادی و مدل ارتفاعی

می‌توان مشاهده نمود که RMSE کلی با افزایش ابعاد پیکسل مدل ارتفاعی رقومی (کاهش قدرت تفکیک مکانی)، افزایش می‌یابد. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهند که در تصویر A، مدل ارتفاعی رقومی SRTM دارای دقت کمتری در مقایسه با مدل ارتفاعی رقومی ASTER است درحالی‌که هر دو مدل دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر هستند. این موضوع نشان‌دهنده این نکته است که در شرایط یکسان قدرت تفکیک مکانی، مدل ارتفاعی رقومی ASTER دارای دقت بهتری در مقایسه با مدل ارتفاعی رقومی SRTM است.



شکل ۱۱- نمودار دقت مسطحاتی برحسب درجه آزادی و مدل ارتفاعی

جدول ۴- نتایج دقت مسطحاتی و ارتفاعی برای مدل‌های ارتفاعی رقومی مختلف (واحد: متر)

درجه آزادی	تصویر A						تصویر B					
	ASTER GDEM		SRTM DEM		ACE2 GDEM		ASTER GDEM		SRTM DEM		ACE2 GDEM	
	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE	ارتفاعی RMSE	مسطحاتی RMSE
۰	۳۱/۸۹	۴۳/۰۴	۳۳/۴۷	۴۳/۹۷	۷۷/۱۸	۹۷/۱۵	۳۰/۲۰	۴۱/۷۳	۴۴/۵۹	۵۳/۶۸	۷۵/۲۸	۹۵/۳۲
۲	۳۰/۷۵	۴۲/۸۳	۳۲/۸۴	۴۳/۱۸	۷۵/۹۴	۹۶/۴۹	۳۰/۰۲	۴۱/۲۲	۴۴/۰۱	۵۲/۱۷	۷۳/۳۶	۹۴/۹۱
۴	۲۹/۴۷	۴۲/۰۷	۳۰/۹۶	۴۲/۲۷	۷۳/۴۹	۹۵/۷۴	۲۹/۴۵	۴۰/۹۱	۴۳/۱۳	۵۱/۰۳	۷۰/۷۱	۹۴/۱۸
۶	۲۷/۳۲	۴۱/۷۳	۲۹/۱۷	۴۱/۸۹	۷۰/۸۱	۹۵/۰۹	۲۸/۱۳	۴۰/۸۰	۴۱/۹۷	۵۰/۲۹	۶۸/۳۹	۹۲/۸۷
۸	۲۶/۱۷	۴۱/۲۹	۲۸/۳۳	۴۰/۹۴	۶۹/۰۲	۹۴/۷۹	۲۷/۰۹	۳۹/۹۴	۴۰/۸۴	۴۸/۹۴	۶۵/۵۷	۹۰/۷۵
۱۰	۲۵/۵۹	۴۱/۰۴	۲۷/۰۵	۴۰/۰۹	۶۷/۸۹	۹۳/۴۱	۲۶/۳۱	۳۹/۳۶	۳۷/۹۹	۴۷/۵۶	۶۳/۱۸	۸۹/۳۹
۱۲	۲۴/۹۱	۴۰/۵۹	۲۶/۴۸	۳۹/۷۵	۶۶/۴۳	۹۲/۹۸	۲۵/۴۴	۳۸/۰۳	۳۷/۰۸	۴۶/۲۸	۶۲/۴۹	۸۸/۳۶
۱۴	۲۴/۱۸	۳۹/۵۱	۲۴/۷۵	۳۹/۳۱	۶۵/۹۶	۹۱/۸۴	۲۴/۷۳	۳۷/۱۲	۳۵/۸۷	۴۵/۷۹	۶۱/۱۱	۸۷/۹۷
۱۶	۲۳/۵۸	۳۸/۳۹	۲۴/۰۸	۳۸/۶۸	۶۴/۸۷	۹۰/۹۶	۲۳/۵۱	۳۶/۵۰	۳۴/۵۲	۴۴/۲۹	۵۹/۹۸	۸۷/۲۵
۱۸	۲۲/۴۷	۳۷/۱۲	۲۳/۵۹	۳۸/۱۷	۶۳/۴۴	۹۰/۱۷	۲۲/۹۰	۳۶/۷۴	۳۳/۶۵	۴۳/۴۲	۵۸/۰۷	۸۶/۷۹
۲۰	۲۰/۹۴	۳۶/۷۱	۲۲/۷۲	۳۷/۹۷	۶۲/۱۳	۸۹/۹۴	۲۱/۸۴	۳۵/۵۴	۳۲/۹۱	۴۲/۹۸	۵۶/۸۳	۸۶/۲۷
۲۲	۲۰/۱۴	۳۴/۱۹	۲۱/۹۸	۳۶/۴۱	۶۱/۰۷	۸۹/۳۵	۲۰/۷۹	۳۳/۸۴	۳۲/۰۲	۴۲/۳۹	۵۶/۰۸	۸۵/۴۹
۲۴	۲۰/۱۲	۳۲/۷۵	۲۱/۴۸	۳۵/۲۳	۵۹/۶۴	۸۸/۸۲	۱۹/۹۹	۳۲/۰۹	۳۱/۴۷	۴۱/۷۵	۵۵/۳۲	۸۴/۱۲
۲۶	۲۰/۱۲	۳۱/۲۲	۲۱/۰۰	۳۴/۵۶	۵۸/۴۷	۸۸/۲۱	۱۹/۹۶	۳۱/۹۴	۳۰/۸۴	۴۰/۹۸	۵۴/۹۵	۸۳/۹۹
۲۸	۲۰/۱۱	۳۰/۸۱	۲۰/۸۷	۳۳/۸۲	۵۷/۷۹	۸۸/۰۸	۱۹/۹۶	۳۰/۷۹	۳۰/۴۲	۴۰/۷۰	۵۴/۷۳	۸۳/۵۲
۳۰	۲۰/۱۱	۳۰/۲۸	۲۰/۸۳	۳۳/۷۱	۵۷/۷۵	۸۸/۰۳	۱۹/۹۴	۳۰/۷۱	۳۰/۳۷	۴۰/۵۹	۵۴/۶۹	۸۳/۴۷

۵- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین پردازش‌ها روی تصاویر خام SAR، تصحیحات هندسی و زمین مرجع کردن این تصاویر است. اعوجاجات هندسی عموماً ناشی از عدم ثبات سکو و سنجنده، خطا در تعیین ارتفاع نسبی اهداف و جابجایی ناشی از توپوگرافی و همچنین پردازش‌های سیگنال است. این اعوجاجات خطاهایی را هم در راستای مسیر سنجنده (آزیموت) و هم عمود بر مسیر حرکت سنجنده (برد) ایجاد می‌نمایند. اما مهم‌ترین خطاهایی که وجود آن‌ها به دلیل هندسه خاص تصویربرداری SAR است و ناشی از تغییر ارتفاع عوارض موجود بر روی سطح زمین بوده، خطاهای کوتاه‌شدگی و همپوشانی نام دارند. برای تصحیح هندسی این خطاها، یک منبع مستقل اطلاعات نیاز است که به‌طور معمول این منبع مستقل، تصویربرداری از یک زاویه دید دیگر از منطقه، نقشه‌های توپوگرافی یا یک مدل ارتفاعی رقومی از منطقه است.

در این مقاله، برای زمین مرجع کردن تصویر و حذف خطاهای ناشی از توپوگرافی، از مدل ارتفاعی رقومی منطقه به‌عنوان منبع مستقل اطلاعات استفاده شد. برای

انجام این فرآیند، پارامترهای مداری با دقت بسیار زیادی نیاز است به‌گونه‌ای که در این تحقیق به ازای هر ۸ متر حرکت سنجنده در مدار خود، موقعیت ماهواره به‌وسیله یک درون‌یابی خطی محاسبه گردید. در این فرآیند با استفاده از مدل ارتفاعی منطقه و همچنین پارامترهای دقیق مداری سنجنده که موقعیت دقیق ماهواره را در هنگام تصویربرداری مشخص می‌کند، تصویری از DEM در راستای برد و آزیموت ایجاد شد که عاری از هرگونه خطا بود. سپس تصویر اصلی SAR که خود دارای خطا است را بر روی تصویر DEM منتقل شده که بدون خطا است، منطبق کردیم. مزیت اصلی استفاده از این روش عدم نیاز به نقاط کنترل جهت زمین مرجع کردن است.

برای ارزیابی اثربخشی مدل توسعه یافته برد - داپلر، دو آزمون در حالات مختلف انجام شد. در آزمون اول، اثر سه نوع معادلات تبدیل بر روی زمین مرجع کردن تصاویر SAR توسط نقاط گرهی مشخص، مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی دقت تصاویر زمین مرجع شده، ۲۵ نقطه گرهی در نقاط مختلف تصویر انتخاب شد. با مقایسه مختصات بدست آمده در تصاویر زمین مرجع شده و مختصات مرجع در نرم‌افزار Google Earth، مقدار RMSE

متر بود، در نتیجه دقت مسطحاتی به دست آمده در این تصویر قابل قبول است. در آزمون دیگر، خطای موقعیتی تصاویر زمین مرجع شده SAR توسط سه نوع مدل ارتفاعی رقومی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمون نشان داد که بهترین تصویر DEM منتقل شده که دارای بیشترین دقت است، از مدل ارتفاعی رقومی ASTER به دست آمده است.

برای این نقاط محاسبه شد. در بهترین شرایط، دقت مسطحاتی برای تصویر A، ۲۰/۱۱ متر و برای تصویر B، ۱۹/۹۴ متر بدست آمد و دقت ارتفاعی نیز برای تصویر A، ۳۰/۲۸ متر و برای تصویر B، ۳۰/۷۱ متر بدست آمد. از آنجاییکه قدرت تفکیک در راستای برد زمینی تصویر مورد استفاده که به صورت چند منظره درآمده بود در حدود ۳۰

مراجع

- [1] C. C. Schmullius and D. L. Evans (1997), "Review article Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography: a tabular status quo after SIR-C/X-SAR," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 13, pp. 2713-2722.
- [2] John C. Curlander and Robert N. McDonough (1992). "Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing", Wiley-Interscience,
- [3] OLIVER C., and Quegan S (2004), "Understanding synthatic aperture radar images", Scitech Pub.
- [4] Rauste, Yrjö, Anne Lönnqvist, Matthieu Molinier, Jean-Baptiste Henry, and Tuomas Hame (2007). "Ortho-rectification and terrain correction of polarimetric SAR data applied in the ALOS/Palsar context." In *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007. IGARSS 2007. IEEE International, pp. 1618-1621. IEEE.
- [5] Lu Zhang, Xueyan He, Timo Balz, Xiaohong Wei and Mingsheng Liao (2011). "Rational function modeling for spaceborne SAR datasets". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol 66, pp. 133-145.
- [6] Lu Zhang, Timo Balz and Mingsheng Liao (2012). "Satellite SAR geocoding with refined RPC model". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol 69, April 2012, pp. 37-49.
- [7] Xiao Zhou, Qiming Zeng, Jian Jiao, Qing Wang and Sheng GAO. (2012) "Geometric calibration and geolocation of airborne SAR images". *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International. 22-27 July 2012, Munich, pp. 4513-4516.
- [8] European Space Agency (2007), "information on ALOS PALSAR product for Aden users". www.earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-3rd-party-missions/alos/palsar/products-and-algorithms.
- [9] Choo, L., Y. K. Chan, and V. C. Koo (2012). "Geometric Correction on SAR Imagery." *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, KL, MALAYSIA.
- [10] Berry, P.A.M., Smith, R.G., Benveniste, J., 2010. ACE2: the new global digital elevation model. *Gravity, Geoid and Earth Observation: International Association of Geodesy Symposia* 135 (3), pp. 231-237.
- [11] Amini, J (2010), "Analytical photogrammetry", Tehran University Press, (in Persian).
- [12] Amini, J (2013), "Course notes of remote sensing", faculty of surveying and geospatial engineering, Tehran University, (in Persian).