نشریه پژوهش‌های کاربردی دورکاوی و اطلاعات مکانی

تولید خودکار مدل رقومی سطح متراکم از تصاویر ماهواره‌ای استریو با قدرت تفکیک مکانی بالا بدون استفاده از ضرایب رشنال و نقاط کنترل زمینی

۳

سال اول
بهار ۱۴۰۵

مقاله

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۸/۱۳
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۱۱/۱۵
صص: ۶۱-۴۵

حمید محمدی [۱]| محسن جعفری [۲]| عظیم حیدریان [۳]| محسن قلوبی [۴]

چکیده

امروزه مدل‌های رقومی سطح نقشی اساسی در زمینه‌های مکان‌یابی ادوات نظامی، ناوبری و تعیین موقعیت دقیق اهداف، شناسایی تغییرات، مقابله با سوانح طبیعی، مدیریت منابع طبیعی و... ایفا می‌کنند. از سوی دیگر وجود تصاویر ماهواره‌ای استریو با قدرت تفکیک مکانی بالا زمینه‌های تحقیقاتی جدیدی را در این عرصه فراهم آورده است. در این پژوهش یک روش خودکار جهت تولید مدل رقومی سطح متراکم از زوج تصویر استاندارد ماهواره IRS-P5 بدون استفاده از ضرایب رشنال و نقاط کنترل زمینی ارائه می‌شود. استفاده از ضرایب رشنال به دلیل وجود خطاهای سامانمند در تولید آن‌ها، نیازمند نقاط کنترل زمینی است. از سوی دیگر مواردی وجود دارد که اطلاعات ضرایب رشنال نیز در دسترس نباشد. در روش پیشنهادی، ابتدا یک تناظریابی استریوی متراکم به روش تناظریابی شبه سراسری (SGM) انجام می‌شود و یک تصویر عمق اولیه تولید می‌شود. در گام بعدی، جهت مطلق‌سازی مقادیر عمق، از تناظریابی بین تصویر ورودی و تصاویر لندست-۸ استفاده می‌شود. هم‌چنین اطلاعات ارتفاع نقاط متناظر استخراج‌شده از تصاویر لندست-۸ از مدل‌های رقومی جهانی SRTM اختصاص داده می‌شود. در گام بعدی، نقاط متناظر بر اساس اطلاعات شیب منطقه پالایش می‌شوند و پس‌ازآن یک مدل افاین سه‌بعدی بین زوج نقاط متناظر برازش داده می‌شود. بدین ترتیب پس از نمونه‌برداری مجدد تصویر عمق تولیدی، مدل رقومی سطح متراکم تولید خواهد شد. نتایج حاصل از ارزیابی نشان از خطای RMSE در حدود ۳ متر برای مدل رقومی سطح تولیدی در مقایسه با نقاط مبنای GPS را دارد.

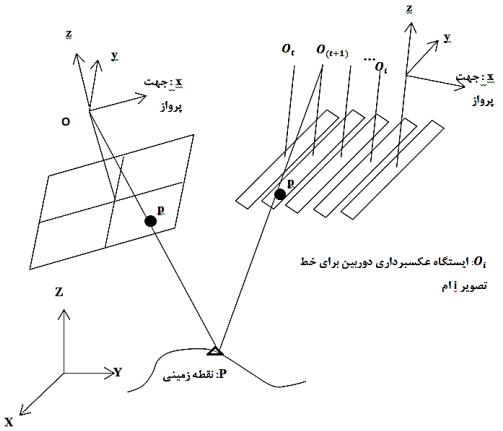
کلیدواژه‌ها: مدل رقومی سطح، زوج تصویر استاندارد IRS-P5، تصاویر لندست-۸، مدل رقومی جهانی SRTM، افاین سه‌بعدی.

۱ نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری، رشته سنجش‌ازدور، PIN.co@chmail.ir
۲ دکتری، رشته سنجش‌ازدور، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳ کارشناس ارشد، رشته سنجش‌ازدور، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
۴ کارشناس ارشد، رشته سنجش‌ازدور، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

مقدمه

در سال‌های اخیر پردازش داده‌های اپتیکی استریو و با زوایای دید مختلف، با توجه به مزیت‌های فراوانی که نسبت به سایر روش‌های برداشت سه‌بعدی فراهم آورده است، از موردعلاقه‌ترین موضوعات برای تولید مدل‌های رقومی سطح بوده است. همان‌طور که می‌دانیم درصورتی‌که بتوان از یک منطقه تصاویر با زوایای دید مختلف را فراهم آورد امکان تولید مدل سه‌بعدی فراهم خواهد شد. دو چالش اساسی در فرایند تولید مدل رقومی سطح از تصاویر اپتیک وجود دارد. نخستین چالش، امکان تولید نقاط متناظر متراکم در زوج تصویر است. با تولید این نقاط متناظر، یک تصویر عمق که نمایانگر پستی‌های و بلندی‌های منطقه تصویربرداری است تولید می‌شود و در صورت مطلق‌سازی این تصویر عمق، مدل رقومی سطح تولید خواهد شد. هم‌چنین این نقاط متناظر، می‌توانند با انجام تقاطع فضایی به کمک پارامترهای توجیه خارجی تصاویر، یک ابر نقطه ارتفاعی از منطقه تصویربرداری را تولید نمایند. هرچه تراکم نقاط متناظر استخراج‌شده بیش‌تر باشد امکان تولید مدل رقومی سطح دقیق‌تر فراهم می‌شود و درنتیجه قابلیت اعتمادپذیری و استفاده از محصول تولیدی در کاربردهای عملیاتی و به‌خصوص کاربردهای نظامی افزایش خواهد یافت. ازاین‌رو تکنیک‌های بسیاری به‌منظور انجام تناظریابی متراکم و تولید مدل رقومی سطح خودکار در مراکز تحقیقاتی موردپژوهش قرارگرفته‌اند. در این زمینه چند الگوریتم نیز در حیطه بینایی کامپیوتر ارائه‌شده‌اند که نتایج مطلوبی را ارائه کرده‌اند[۱-۳]. از آن جمله می‌توان به D'Angelo و همکاران اشاره نمود که روش تناظریابی سلسله مراتبی بر مبنای درجات خاکستری تصاویر را پیشنهاد دادند [۴]. در این روش آن‌ها مجبور بودند برای پیدا کردن پیکسل‌های متناظر، یک محدوده جستجوی از قبل تعیین‌شده را مشخص نمایند که این کار خود نیازمند پیش‌پردازش‌هایی مانند تعیین نقاط گرهی برای تصاویر مختلف پوشش‌دار است و پیچیدگی الگوریتم را بالا می‌برد. ضمن آنکه تعیین نقاط گرهی اشتباه خود سبب کاهش کارایی الگوریتم می‌شود. پیش از آن نیز از تلفیق روش تناظریابی کمترین مربعات و سایر روش‌های ناحیه مبنا استفاده‌شده بود. در استفاده ازاین‌روش‌ها نیازمند تعیین یکسری نقاط تقریبی متناظر از قبل تعیین‌شده هستیم و این کار از خودکار بودن فرآیند تولید مدل رقومی سطح می‌کاهد و قابلیت‌های

عملیاتی محصـــول تولیدی را کاهش خواهد داد. نتایج حاصـــل از ارزیابی نیز نشـــان‌دهنده وجود تناظرهای اشـــتباه زیاد در آن‌هاســـت. روشـــی که در این مقاله توصـــیه می‌شـــود اســـتفاده از روش تناظریابی شـبه سـراسـری اسـت که امکان انجام تناظریابی متراکم و خودکار را فراهم می‌آورد [۴]. حسـن این روش، انجام تناظریابی متراکم، صـحیح و دقیق و با تعداد اشـتباهات کم‌تر اسـت. نکته قابل‌ذکر در این زمینه این اســـت که تولید تصـــاویر اپی‌پولار به‌عنوان یکی از عمده مراحل در تناظریابی خودکار و متراکم تصاویر بوده که با کاهش فضای جستجو کمک شایانی به سرعت و دقت الگوریتم‌های تناظریابی می‌نماید. ازآنجاکه در اکثر ماهواره‌های با قدرت تفکیک بالا هندسه تصـویربرداری از نوع آرایه خطی اسـت و با هندسـه تصـویربرداری دوربین‌های هوایی که بر مبنای فریم هسـتند، بسـیار متفاوت اسـت، این تفاوت برقراری هندسـه اپی‌پولار در تصـاویر ماهواره‌ای را با مشـــکل مواجه می‌ســـازد [۲]. شـــکل (۱) تفاوت هندســـه تصـــاویر در دوربین‌های بر مبنای فریم و دوربین‌های آرایه خطی را نشـان می‌دهد. بر این اسـاس مشـاهده می‌شـود که معادلات موردنیاز در برقراری هندسه اپی‌پولار آرایه خطی ماهواره‌ای با روش‌های معمول و مرسوم در سامانه‌های هوایی فریم متفاوت است.



شکل (۱): هندسه تولید تصویر از عوارض زمینی برمبنای دوربین فریم (سمت چپ) در مقایسه با دوربین آرایه خطی (سمت راست)

از طرف دیگر امروزه در ارتباط با بیشـتر تصـاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا اطلاعاتی از ویژگی‌ها و پارامترهای هندسـی این سـنجنده ها موجود نبوده و درنتیجه محدودیت در مدل‌سـازی

فیزیکی آن‌ها از دیگر عوامل مشکل‌ساز در مسیر ایجاد تصاویر اپی‌پولار از این سنجنده ها است. بر این اساس بسیاری از محققان از ضرایب رشنال جهت تولید تصاویر اپی‌پولار استفاده می‌نمایند. در [۵] برای تولید منحنی اپی‌پولار از زوج تصویر از معادلات مستقیم و معکوس رشنال با تغییر ارتفاع زمینی استفاده‌شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی قابل‌قبول است اما نکته حائز اهمیت این است که با توجه به وجود محدودیت‌ها در کاربردهای نظامی، راه‌حل جایگزینی جهت تولید تصاویر اپی‌پولار در صورت عدم وجود ضرایب رشنال وجود دارد یا خیر. بر این اساس در [۵] راهکاری به‌منظور تولید تصاویر اپی‌پولار بدون استفاده از ضرایب رشنال پیشنهادشده است. روش ارائه‌شده بر مبنای ماتریس اساسی است. یک زوج انتقال دوبعدی جهت متناظر کردن خطوط اپی‌پولار به دو تصویر اعمال می‌شود. این روش بر کاربردهای فتوگرامتری برد کوتاه استفاده‌شده است و مبنای آن استخراج نقاط متناظر در دو تصویر و سپس استفاده از آن‌ها برای محاسبه ماتریس اساسی و سپس ماتریس‌های انتقال دو تصویر به فضای تصویر اپی‌پولار است. با توجه به عدم نیازاین‌روش به ضرایب رشنال که خود آن‌ها نیز نیازمند نقاط کنترل زمینی جهت تصحیح ضرایب هستند، استفاده ازاین‌روش برای تولید تصاویر اپی‌پولار می‌تواند کارایی عملیاتی روش پیشنهادی را به‌خصوص برای کاربردهای نظامی افزایش دهد.

دومین چالش اساسی در فرایند تولید مدل رقومی سطح به کمک تصاویر اپتیک، فرایند برقراری ارتباط بین فضای تصویر و فضای زمینی است. همان‌طور که می‌دانیم، پس از تولید نقاط متناظر عکسی، نیاز است تا رابطه بین فضای تصویر و فضای زمینی برقرار شود تا بتوان مدل رقومی سطح را از تقاطع فضایی نقاط متناظر و یا مطلق‌سازی تصویر عمق اولیه تولید نمود. در این راستا، استفاده از ضرایب رشنال، به‌عنوان یکی از راهکارهای شناخته‌شده بسیار مرسوم است. تولید ضرایب رشنال توسط سازمان‌های تهیه‌کننده تصاویر انجام می‌شود و در صورت درخواست کاربر در اختیار آن قرار می‌گیرد. نکته مهم در استفاده از ضرایب رشنال این است که به دلیل فرایند محاسبه و تولید آن‌ها، همواره خطای سامانمند در آن‌ها وجود دارد. این خطای سامانمند سبب به وجود آمدن خطاهای مسطحاتی و ارتفاعی در مدل رقومی سطح تولیدشده خواهد شد و بنابراین دقت و صحت محصول مورد تأیید نخواهد بود.

راهکاری که جهت تصحیح این خطای سامانمند پیشنهاد می‌شود استفاده از نقاط کنترل زمینی است. با توجه به اینکه دسترسی به نقاط کنترل زمینی دقیق با محدودیت‌های فراوانی همراه است (مانند عدم دسترسی در نواحی مرزی، صعب‌العبور و خارج از مرز، هزینه‌بر بودن فرایند جمع‌آوری، زمان‌بر بودن، عدم امکان شناسایی موقعیت دقیق آن‌ها در تصاویر به‌خصوص زمانی که فاصله زمانی بین فرایند تولید نقاط کنترل زمینی و اخذ تصویر وجود داشته باشد و...) باید راه‌حلی جایگزین بدین منظور طراحی‌شده و مورداستفاده قرار گیرد.

راه‌حلی که در این بخش می‌توان مورداستفاده قرار داد، استفاده از اطلاعات داده‌های تصویری و ارتفاعی رایگان موجود است. تحقیقات پژوهشگران در حوزه جایگزینی نقاط کنترل زمینی با داده‌های رایگان را می‌توان در چند نمونه مورداشاره قرار داد. در [۶] ضرایب رشنال به کمک نقشه‌های بزرگ‌مقیاس موجود از منطقه تصحیح می‌شوند. در روش پیشنهادی آن‌ها، نقشه موجود از منطقه به کمک ضرایب رشنال به فضای تصویر انتقال داده می‌شوند. در گام بعدی از طریق تناظریابی بین تصویر و نقشه انتقال داده‌شده به فضای تصویر، پارامترهای تصحیح محاسبه و به ضرایب رشنال اعمال می‌گردد. در [۷] از تصاویر ارتوی موجود جهت تصحیح ضرایب رشنال استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی آن‌ها، تصاویر ارتو به کمک ضرایب رشنال به فضای تصویر انتقال داده می‌شوند. با توجه به عدم وجود خطاهای جابجایی ناشی از ارتفاع و تیلت در تصویر ارتو شده، پس از انتقال به فضای تصویر، اختلاف با تصویر اصلی نشان‌دهنده میزان خطای سامانمند ضرایب رشنال است. به‌این‌ترتیب امکان تصحیح ضرایب رشنال برای کاربر فراهم می‌شود. در [۸] از داده‌های لیزر اسکنر هوایی برای تناظریابی مدل رقومی سطح نسبی به‌دست‌آمده از تناظریابی بین زوج تصویر استفاده‌شده است. با توجه به مشکلات موجود در تهیه داده‌های لیزر اسکنر هوایی مانند هزینه‌بر بودن و در دسترس نبودن، کارایی روش پیشنهادی برای کاربردهای عملیاتی و نظامی پایین است.

راهکارهای پیشنهادی تا بدین جا به‌صورت عمده، از ضرایب رشنال در فرایند تولید مدل رقومی سطح استفاده می‌نمایند. در این مقاله سعی بر آن بوده است تا یک راهکار خودکار، عملیاتی و کاربردی جهت تولید مدل رقومی سطح از تصاویر استریو ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالای IRS-P5 ارائه شود. با توجه به اینکه در کاربردهای نظامی ضرورت تولید محصول

در شـرایط عدم وجود اطلاعات کافی امری ضـروری اسـت، در این مقاله راهکاری به‌منظور تولید مدل رقومی سطح با دقت بالا و بدون استفاده از ضرایب رشنال و نقاط کنترل زمینی و با استفاده از داده‌های رایگان تصویری و ارتفاعی جهانی پیشنهادشده است. تصاویر موجود از ماهواره لندست-۸ با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر برای باند پانکروماتیک و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ برای باندهای چند طیفی به‌صورت رایگان در سطح بین‌المللی در دسترس هستند. هم‌چنین این داده‌ها، به‌صورت تصاویر ارتو (حذف خطای جابجایی ناشی از ارتفاع و حذف خطای جابجایی ناشی از تیلت سنجنده) در اختیار کاربران قرار دارند و بنابراین این اطمینان وجود دارد که مختصات زمینی پیکسل‌های آن در حد دقت سنجنده صحت دارد. از سوی دیگر مدل‌های رقومی زمینی جهانی رایگان مانند مدل رقومی زمینی SRTM با قدرت تفکیک مکانی مسطحاتی ۳۰ و دقت ارتفاعی حدود ۲۰ متر، به‌صورت رایگان در دسترس هستند. با توجه به ارتو بودن تصاویر لندست-۸، مشخص است که این داده ها ازنظر مسطحاتی با داده‌های SRTM رجیستر هستند و به‌این‌ترتیب، امکان استخراج مختصات زمینی سه‌بعدی به کمک آن‌ها فراهم است. در ادامه، جزییات روش پیشنهادی جهت تولید خودکار مدل رقومی سطح متراکم به‌طور مفصل آورده خواهد شد.

روش پیشنهادی

در شکل (۲) فلوچارت روش پیشنهادی نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل (۲) قابل‌مشاهده است، روش پیشنهادی از بخش‌های متنوعی تشکیل‌شده است. در ادامه جزییات هریک از آن‌ها شرح داده خواهد شد.

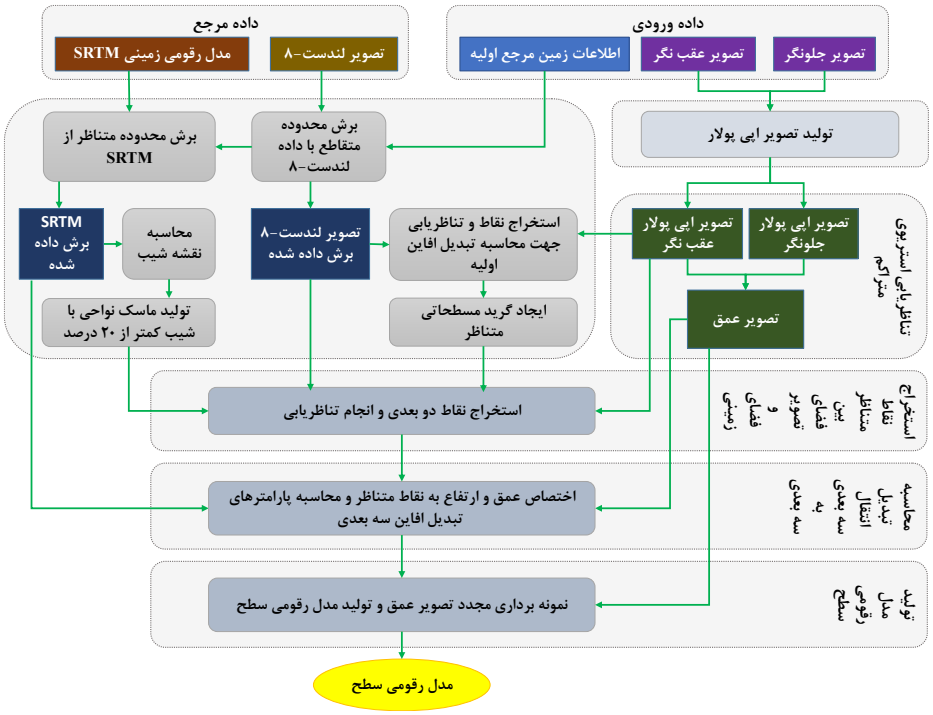
داده‌های ورودی

همانطور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، داده ورودی شامل زوج تصویر استاندارد استریوی ماهواره IRS-P5 خریداری شده از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح با قدرت تفکیک مکانی ۲.۵ متر است. پوشش تصویربرداری به‌گونه‌ای است که تصویر عقب نگر به صورت تقریبا کامل با تصویر جلونگر محاط می شود و بنابراین می توان برای بخش قابل توجهی از تصویر، عملیات

تناظریابی را انجام داد. اطلاعات موقعیت زمینی تقریبی تصاویر نیز به‌صورت فراداده در دسترس است. داده‌های مرجع مورداستفاده در این پردازش، تصویر پانکروماتیک ماهواره لندست-۸ با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر و مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت تفکیک ۳۰ متر است که هردوی آن‌ها به‌صورت رایگان در دسترس کاربران قرار دارند. به‌منظور برابرسازی قدرت تفکیک مکانی تصویر لندست-۸ و مدل ارتفاعی رقومی SRTM، داده ارتفاعی به قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر و به روش نمونه‌برداری خطی باز نمونه‌برداری می‌شود.

تولید تصاویر اپی‌پولار

همانطور که در شکل (۲) قابل مشاده است، نخستین گام در فرایند پردازش زوج تصویر استریوی ورودی تولید تصاویر اپی‌پولار است. یکی از راهکارهای ارائه‌شده در حل مؤثرتر مسئله تناظریابی استریو، انتقال تصاویر به‌گونه‌ای است که خطوط اپی‌پولار آن‌ها در امتداد خطوط افقی مستقیم قرار گیرند. در چنین حالتی مسئله تناظریابی استریو می‌تواند به‌سادگی از قید اپی‌پولار جهت کاهش فضای جستجو به یک بعد (یعنی سطرهای متناظر در تصاویر اپی‌پولار) بهره گیرد [۹].



شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی جهت تولید خودکار مدل رقومی سطح متراکم

فرض کنید x_0 مبدأ باشد و نقطه اپی پول $e = (f, 0,1)^T$ روی محور x ها قرار می‌گیرد. حال اگر تبدیل G در رابطه (۱) را در نظر بگیریم، این تبدیل نقطه اپی پول $(f, 0,1)^T$ را به نقطه $(f, 0,0)^T$ در بی‌نهایت انتقال می‌دهد.

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1/f & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

نقطه‌ای با مختصات $(x, y, 1)^T$ تحت تبدیل G به نقطه $(\hat{x}, \hat{y}, 1)^T = (x, y, 1 - x/f)^T$ تبدیل می‌شود. اگر $\left|x/f\right| < 1$ آنگاه (۲) را خواهیم داشت.

$$(\hat{x},\hat{y},1)^T = \left(x,y,1-{}^{x}/_{f}\right)^T = \left(x\left(1+{}^{x}/_{f}+\cdots\right),y\left(1+{}^{x}/_{f}+\cdots\right),1\right)^T \quad (۲)$$

و ماتریس ژاکوبین از رابطه (۳) به دست خواهد آمد.

$$\frac{\partial(\hat{x},\hat{y})}{\partial(x,y)} = \begin{bmatrix} 1+{}^{2x}/_{f} & 0 \\ {}^{y}/_{f} & 1+{}^{x}/_{f} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

حال اگر $x = y = 0$ باشد، ماتریس همانی خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر، G در مبدأ با نگاشت همانی تخمین زده می‌شود. برای نقطه دلخواه x_0 و نقطه اپی پول e نگاشت H مناسب از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$H = GRT \quad (۴)$$

در رابطه (۴) T تبدیلی است که نقطه x_0 را به مبدأ انتقال می‌دهد. R دورانی است حول مبدأ که نقطه اپی پول e' را به نقطه $(f,0,1)^T$ روی محور x ها می‌برد و G نگاشتی است که فقط انتقال نقطه $(f,0,1)^T$ به بی‌نهایت را موردتوجه قرار می‌دهد. این نگاشت مرکب، تبدیل سخت مرتبه اول در همسایگی x_0 است.

مرحله دوم در اپی‌پولار کردن تصاویر تناظریابی تبدیلات است. در مرحله قبلی دیدیم که چطور نقطه اپی‌پول در یک تصویر می‌تواند به نقطه‌ای در بی‌نهایت نگاشته شود. در گام بعدی یک نگاشت به سایر نقاط تصاویر اعمال می‌شود به‌گونه‌ای که خطوط اپی‌پولار متناظر شوند. دو تصویر J و J' را در نظر می‌گیریم. هدف نمونه‌برداری مجدد این دو تصویر به‌گونه‌ای است که تبدیل H به تصویر J و تبدیل H' به تصویر J' اعمال شود و باز نمونه‌برداری باید به‌گونه‌ای انجام شود که یک خط اپی‌پولار در J با خط اپی‌پولار نظیرش در تصویر J' متناظر شود. درواقع اگر l و l' یک زوج از خطوط اپی‌پولار متناظر در دو تصویر باشند، آنگاه معادله (۵) را خواهیم داشت.

$$H^{-T}l = H'^{-T}l' \quad (۵)$$

هر زوج تبدیلی (H, H') که در رابطه (۵) صدق کند، یک زوج متناظر تبدیل نامیده می‌شود. روش مورداستفاده در انتخاب زوج متناظر تبدیل، بدین‌صورت است که H' همان تبدیلی در نظر

گرفته می‌شـود که نقطه اپی پول e' را به بی‌نهایت تبدیل می‌کند. سـپس تبدیل H به‌گونه‌ای پیدا می‌شود که حاصل جمع مربعات فاصله‌ها را مینیمم کند. (رابطه ۶).

$$\sum_i d(Hx_i, H'x'_i)^2 \qquad (۶)$$

اگر ماتریس اساسی تصاویر J و J' به‌صورت $F = [e']_\times M$ باشد که در آن M یک ماتریس غیر سـینگولارو $[e']_\times$ ماتریس پادمتقارن نقطه اپی پول e اسـت، و اگر فرض کنیم H' تبدیل پروجکتیو تصـویر J' باشـد. تبدیل پروجکتیو H برای تصـویر J متناظر با تبدیل H' می‌شـود اگر و فقط اگر رابطه (۷) برای هر بردار دلخواه a برقرار باشد .

$$H = (I + H'e'a^T)H'M \qquad (۷)$$

پس از محاسـبه H و H' تصـویر J با تبدیل پروجکتیو H و تصـویر J' با تبدیل پروجکتیو H' باز نمونه‌برداری می‌شوند و تصاویر اپی‌پولار تشکیل می‌شوند.

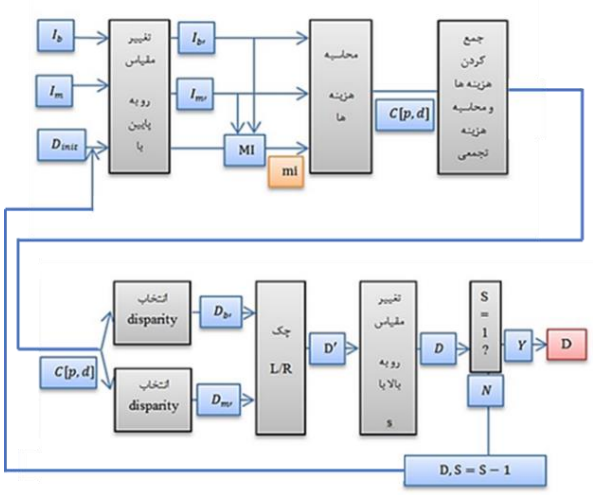
تناظریابی استریوی متراکم

با انتخاب زوج تصـویر، یک تصـویر به‌عنوان تصـویر master و تصـویر دیگر به‌عنوان تصـویر slave در نظر گرفته خواهد شـد. در مرحله انجام تناظریابی باید برای هر پیکسـل از تصـویر master، پیکسـل متناظر از تصـویر slave شناسایی شود. با این کار می‌توان بر اساس اختلاف در موقعیت مکانی پیکسـل‌ها، مقدار پارالاکس میان آن‌ها را محاسـبه نمود. ازآنجاکه پارالاکس هر نقطه ارتباط مسـتقیم با ارتفاع آن نقطه دارد می‌توان با انجام تناظریابی زوج تصـویر، تصـویر عمق اولیه‌ای را تولید کرد. این تصویر مبنای تولید مدل رقومی سطح در مراحل بعدی خواهد بود.

یکی از کارآمدترین روش‌هایی که در سـال‌های اخیر برای انجام تناظریابی اسـتریوی متراکم ارائه‌شده است روش تناظریابی شبه سراسری (**S**emi-**G**lobal **M**atching) است. ارزیابی‌های انجام‌شـده بر روی این روش نشـان داده اسـت که SGM روشـی پایدار در مقابل تغییرات رادیومتریکی است [۲]. SGM روشی مبتنی بر تناظریابی پیکسلی اطلاعات دوسویه و تخمین یک قید نرمی دوبعدی به کمک ترکیبی از قیود یک‌بعدی اسـت [۳-۲]. SGM از روشـی پیکسـل مبنا برای ارزش‌گذاری میزان تنـاظر نقـاط بر مبنـای اطلاعـات دوسـویـه، بـه‌منظور جبران اختلافات

رادیومتریکی تصاویر ورودی، استفاده می‌کند. پیدا کردن نقاط متناظر به‌وسیله قید نرمی که معمولاً به‌عنوان تابع محاسبه هزینه سراسری مطرح می‌شود، صورت می‌گیرد. SGM تخمینی سریع، از طریق بهینه‌سازی مسیر مبنا از همه جهات را انجام می‌دهد.

مراحل پردازشی این الگوریتم شامل سه مرحله اساسی محاسبه هزینه تناظریابی پیکسلی، محاسبه هزینه تجمعی و محاسبه و برآورد تصویر عمق است که در شکل (۳) به‌صورت شماتیک نشان داده‌شده است.



شکل (۳): مراحل پردازشی الگوریتم تناظریابی استریوی متراکم SGM

در شکل (۳)، I_b به معنای مقدار روشنایی پیکسل b در یک تصویر و I_m به معنای مقدار روشنایی پیکسل متناظر آن یعنی m در تصویر دیگر است. D_{init} نیز تصویر عمق اولیه است که در مرحله نخست به‌صورت تقریبی محاسبه می‌شود و در مراحل بعدی به‌روز خواهد شد و به‌عنوان خروجی الگوریتم در نظر گرفته خواهد شد.

آماده‌سازی داده‌های مرجع

در گام بعدی، داده‌های مرجع جهت انجام پردازش‌های مطلق‌سازی تصویر عمق تولیدی، آماده‌سازی می‌شوند. بر این اساس ابتدا با توجه به موقعیت اولیه زمین مرجع زوج تصویر استریوی ورودی، محدوده متناظر از تصویر لندست-۸ برش داده می‌شود. این محدوده از مدل ارتفاعی رقومی مرجع SRTM نیز برش داده خواهد شد. با توجه به اینکه تصویر عمق تولیدی در فضای اپی‌پولار تولید شده است، باید یک تبدیل اولیه بین تصویر اپی‌پولار عقب نگر و تصویر لندست-۸ برش داده محاسبه شود تا امکان تناظریابی دقیق و مطلق‌سازی تصویر عمق تولیدی فراهم شود. پس از استخراج نقاط و تناظریابی بین این دو داده، با محاسبه یک تابع تبدیل افاین، امکان ایجاد یک گرید مسطحاتی منظم متناظر بین دو داده تصویری فراهم می‌شود.

هم‌چنین بررسی‌های انجام‌شده بر روی داده SRTM نشان می‌دهد که دقت اطلاعات ارتفاعی این داده در شیب‌های بالا صحت سنجی نشده است. ازاین‌رو، در گام بعدی ابتدا یک نقشه شیب از داده SRTM تولید می‌شود و سپس نواحی با شیب کمتر از ۲۰ درصد جهت ایجاد یک ماسک استخراج نقاط در فرایند مطلق‌سازی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

استخراج نقاط متناظر بین فضای تصویر و فضای زمینی

پس از آماده‌سازی داده‌های مرجع، جهت مطلق‌سازی اطلاعات تصویر عمق و تولید مدل رقومی سطح، به روش SIFT نقاط کلیدی بین تصویر اپی‌پولار عقب نگر و تصویر لندست-۸ متناظر استخراج می‌شوند و پس‌ازآن یک تناظریابی دوبعدی به دوبعدی بین آن دو انجام می‌شود. گرید مسطحاتی متناظر در این مرحله، این اجبار را به وجود می‌آورد تا از تمام سطح تصاویر، نقاط متناظر استخراج گردند. در مرحله بعد، جهت افزایش قابلیت اعتمادپذیری، نقاط متناظری که در ماسک شیب کمتر از ۲۰ درصد واقع نشده باشند، از مجموعه نقاط متناظر حذف می‌گردند. وجود شیب کم تر از ۲۰ درصد هم برای اطمینان به ارتفاع نقاط استخراج شده و هم به منظور برآورد صحیح مقیاس ارتفاعی در تابع تبدیل افاین سه بعدی که در گام های بعدی محاسبه می شود امری ضروری و واجب است.

محاسبه تبدیل انتقال سه‌بعدی به سه‌بعدی

پس از استخراج نقاط متناظر بین تصویر اپی‌پولار عقب نگر و تصویر لندست-۸، با توجه به اینکه تصویر عمق با تصویر اپی‌پولار مدنظر رجیستر است و مدل ارتفاعی رقومی SRTM نیز با داده لندست-۸ متناظر است، به نقاط متناظر دوبعدی استخراج‌شده، مقادیر عمق و ارتفاع نسبت داده می‌شود. به‌این‌ترتیب، دو مجموعه از نقاط سه‌بعدی متناظر در فضای تصویر و فضای زمینی تشکیل می‌شود که نقش نقاط کنترل زمینی را ایفا خواهند نمود. بر این اساس یک تابع انتقال افاین سه‌بعدی بین این دو مجموعه از نقاط به روش سرشکنی کمترین مربعات محاسبه می شود تا ارتباط بین تصویر عمق در فضای تصویر و مدل رقومی سطح در فضای زمینی برقرار شود.

تولید مدل رقومی سطح

با محاسبه تابع افاین سه‌بعدی بین دو فضا، امکان نمونه‌برداری مجدد تصویر عمق تولیدی به کمک این تابع انتقال فراهم می‌شود. محصول تولیدی پس از نمونه‌برداری مجدد، یک مدل رقومی سطح متراکم است که امکان استخراج اطلاعات ارتفاعی دقیق از آن فراهم است. این مدل رقومی سطح متراکم و با دقت بالا می‌تواند جهت کاربردهای بعدی نظامی مورداستفاده قرارگیرد.

نتایج و بحث

مطابق با فرآیند ذکرشده در بخش‌های قبل و همچنین داده مورداستفاده از ماهواره IRS-P5 در منطقه خمین، آزمایشی برای ارزیابی نتایج انجام شد. شکل (۴) نمایش سه‌بعدی محصول مدل ارتفاعی رقومی همراه با تصویر ارتو را نشان می‌دهد.

جهت ارزیابی دقت، در آزمایش اول، اختلاف مدل رقومی محاسباتی با مدل ارتفاعی SRTM مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۱) نتایج حاصل از این ارزیابی را نشان می‌دهد. سطرهای این جدول نشان‌دهنده دقت در سطوح ارتفاعی مختلف است. این سطوح با فاصله ۱۰۰ متر تنظیم شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، دقت ارتفاعی درمجموع و در کل تصویر در معیار ارزیابی

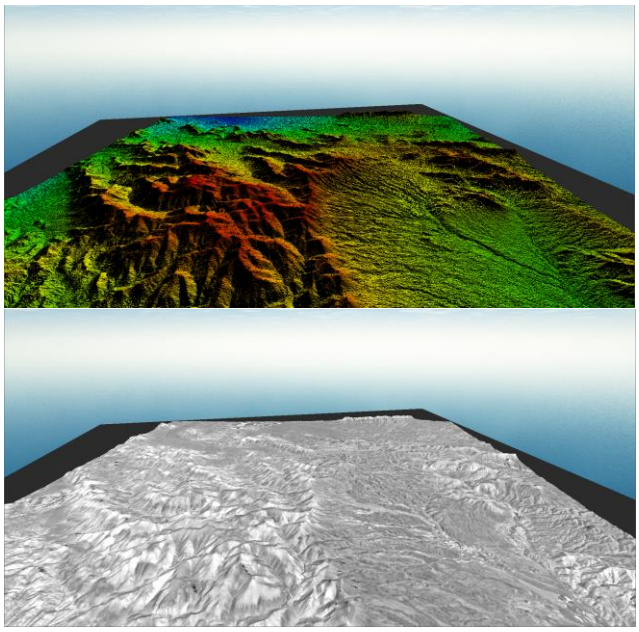
RMSD (مجذور مربعات اختلاف‌ها) ۷/۲۲ متر است. بخشی از این اختلاف ناشی از عدم وجود جزئیات کافی در رفرنس ارتفاعی SRTM است. بخش دیگری از این اختلاف هم ناشی از عدم صحت کافی در شیب‌های بالا در مدل ارتفاعی SRTM است. در سطوح ارتفاعی پایین به دلیل شیب کم‌تر دقت بالاتر است و برعکس در ارتفاعات بالاتر دقت مدل محاسباتی به دلیل شیب بیش‌تر، کم‌تر است. معیار ارزیابی میانگین اختلاف‌ها، میزان نزدیکی توزیع پخش خطاها به توزیع نرمال را نشان می‌دهد. هرچه این اختلاف به صفر نزدیک‌تر باشد توزیع نرمال در میانگین صفر است و این یعنی بایاس در نتایج وجود ندارد. در کل تصویر این مقدار دقیقاً صفر است و این تصدیقی بر حذف اثر بایاس در مدل محاسباتی است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم حدود ۸۶ درصد کل تصویر دقتی بهتر از ۱۰ متر، ۶۰ درصد بهتر از ۵ متر و ۲۸ درصد بهتر از ۲ متر را دارند.

در ارزیاب دقیق‌تر دیگری، مدل رقومی سطح تولیدشده با نقاط مبنای به‌دست‌آمده از GPS و مدل ارتفاعی رقومی WorldDEM که جزئیات و دقت بهتری از SRTM را دارند مورد ارزیابی قرار گرفت. دو سطر پایانی جدول (۱) نتایج حاصل از آزمایش دوم را نشان می‌دهد. دقت حدود ۳ متر در این ارزیابی، نشان‌دهنده دقت ارتفاعی مناسب مدل رقومی سطح تولیدشده را دارد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، حدود ۵۰ سانتی‌متر بایاس در اختلاف‌های ارتفاعی محاسبه‌شده مشاهده می‌شود. با توجه به دقت مناسب اطلاعات ارتفاعی به‌دست‌آمده از GPS، می‌توان ابراز کرد که ۶۳ درصد مدل رقومی سطح متراکم تولیدی دقتی بهتر از ۲ متر، ۹۳ درصد دقتی بهتر از ۵ متر و بیش از ۹۹ درصد داده، دقتی بهتر از ۱۰ متر را داراست.

نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای تولید خودکار مدل رقومی سطح متراکم از زوج تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 بدون استفاده از ضرایب رشنال و نقاط کنترل زمینی ارائه شد. روش پیشنهادی با استفاده از رفرنس ارتفاعی SRTM و تصاویر اپتیکی لندست-۸ نیاز به نقطه کنترل زمینی را برطرف کرده است. مدل افاین سه‌بعدی استفاده‌شده در این مقاله جایگزین معادلات رشنال شد و به‌خوبی با تراکم نقاط کنترل بالا توانست نتایج خوبی ارائه دهد. برای ارزیابی روش پیشنهادی در

منطقه خمین مدل ارتفاعی حاصل از پردازش با مدل‌های ارتفاعی رقومی SRTM، WorldDEM و نقاط مبنای GPS مقایسه گردید و به ترتیب مجذور مربعات اختلاف در این سه رفرنس حدود ۷/۲۲، ۳/۳ و ۲/۷۵ متر حاصل شد. نتایج در ارتفاعات کم‌تر دقت بیش‌تری نسبت به ارتفاعات بیش‌تر دارند. اختلاف نسبتاً زیاد با SRTM عمدتا ناشی از اختلاف در جزئیات و همچنین عدم صحت و دقت کافی SRTM در ارتفاعات با شیب بالاست. به‌طورکلی آزمایش‌ها نشان دادند روش پیشنهادی پتانسیل بالایی برای جبران نبود ضرایب رشنال و همچنین نقاط کنترل زمینی دارد و کارایی عملیاتی آن در کاربردهای نظامی قابل‌ملاحظه است.



شکل (۴): نمایش سه بعدی مدل ارتفاعی رقومی (شکل بالا) به همراه تصویر ارتو (شکل پائین)

جدول (۱): ارزیابی اختلاف مدل ارتفاعی محاسباتی با مدل ارتفاعی SRTM

سطوح ارتفاعی	درصد سطح ارتفاعی از کل تصویر	مجذور مربعات اختلاف‌ها	میانگین اختلاف‌ها	درصد تصویر اختلاف کمتر از ۲ متر	درصد تصویر اختلاف کمتر از ۵ متر	درصد تصویر اختلاف کمتر از ۱۰ متر
1667~1766	2.72	4.41	1.29	41.15	79.01	96.91
1766~1866	5.11	4.8	0.14	36.77	74.81	95.77
1866 ~1966	8.55	5.19	-0.7	35.34	72.89	94.63
1966 ~2066	20.93	5.74	-0.58	34.34	70.91	93.14
2066 ~2165	17.94	6.72	-0.55	30.52	65.46	90.49
2165 ~2265	12.72	8.34	-1.15	24.42	55.13	83.88
2265 ~2365	11.23	8.42	-0.3	22.83	52.28	81.88
2365 ~2465	7.96	9.12	0.72	20.38	47.52	77.68
2465 ~2565	4.93	10.24	1.52	17.41	41.65	71.8
2565 ~2664	3.55	10.57	2.75	16.66	39.91	69.35
2664 ~2764	2.38	10.54	3.73	16.03	38.73	67.99
2764 ~2864	1.63	9.94	4.93	18.18	42.43	71.13
2864 ~2964	0.35	9.91	6.22	18.22	43	72.03
اختلاف با SRTM	100	7.22	0	28.17	60.69	86.43
اختلاف با WorldDEM	100	3.3	-.55	41.87	87.87	98.66
اختلاف با GPS	100	2.75	0.45	63.52	93.90	99.45

منابع

[1] G. Buyuksalih, I. Baz, M. Alkan, and K. Jacobsen, "DEM generation with WorldView-2 images," in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences:[XXII ISPRS Congress, Technical Commission I] 39 (2012), Nr. B1*, 2012, vol. 39, no. B1, pp. 203-207: Göttingen: Copernicus GmbH.

[2] H. Hirschmuller, "Stereo processing by semiglobal matching and mutual information," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence,* vol. 30, no. 2, pp. 328-341, 2008.

[3] H. Hirschmuller, "Stereo vision in structured environments by consistent semi-global matching," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*, 2006, vol. 2, pp. 2386-2393: IEEE.

[4] K. Zhu, P. d'Angelo, and M. Butenuth, "Evaluation of stereo matching costs on close range, aerial and satellite images," 2012.

[5] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.

[6] J. Oh and C. Lee, "Automated bias-compensation of rational polynomial coefficients of high resolution satellite imagery based on topographic maps," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* vol. 100, pp. 14-22, 2015.

[7] J. Oh, C. Lee, and D. C. Seo, "Automated HRSI georegistration using orthoimage and SRTM: Focusing KOMPSAT-2 imagery," *Computers & geosciences,* vol. 52, pp. 77-84, 2013.

[8] T.-A. Teo and S.-H. Huang, "Automatic co-registration of optical satellite images and airborne LiDAR data using relative and absolute orientations," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,* vol. 6, no. 5, pp. 2229-2237, 2013.

[9] M. Pollefeys, R. Koch, and L. Van Gool, "A simple and efficient rectification method for general motion," in *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*, 1999, vol. 1, pp. 496-501: IEEE.