

تولید تصاویر اپی پولار از تصاویر استریو ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا برای الگوریتم تناظریابی شبه سراسری بدون استفاده از توابع رشنال

نوراله تتر^{۱*}، محمد سعادت سرشت^۲، حسین عارفی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های

فنی - دانشگاه تهران

n.tatar@ut.ac.ir

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

msaadat@ut.ac.ir

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

hossein.arefi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۴، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۵)

چکیده

تصاویر اپی پولار تصاویر ترمیم‌شده‌ای هستند که در آن‌ها هر سطر در تصویر چپ با همان سطر در تصویر راست متناظر است؛ این باعث افزایش سرعت تناظریابی و کاهش فضای جستجو از دوبعدی به یک‌بعدی می‌شود. برای استفاده از الگوریتم‌های تناظریابی سراسری مانند تناظریابی شبه سراسری، بایستی تصاویر اپی پولار ایجاد شوند. برخلاف تصاویر با هندسه‌ی پرسپکتیو، هندسه‌ی اپی پولار در تصاویر آرایه خطی ماهواره‌ای یک خط مستقیم نیست. در این مقاله برای خطی شدن هندسه‌ی اپی پولار در تصاویر استریو ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، تصاویر اولیه به کاشی‌های کوچک تصویری تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین در هم مرجع سازی تصاویر اولیه و کاشی‌ها، برای جلوگیری از نیاز به اطلاعات زمین مرجع؛ مانند توابع رشنال و تصحیحات آن‌ها، از الگوریتم‌های بینایی کامپیوتر استفاده می‌شود. نتایج اندازه‌گیری پارالاکس عمودی (پارالاکس "y") در تصاویر اپی پولار بدست آمده از تصاویر سنجنده‌ی GeoEye-1 نشان می‌دهد، روش پیشنهادی توانایی ایجاد تصاویر اپی پولار با دقت زیر پیکسل را دارد.

واژگان کلیدی: تصاویر اپی پولار، تصاویر استریو ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، کاشی‌های کوچک تصویری، تناظریابی شبه سراسری،

توابع رشنال

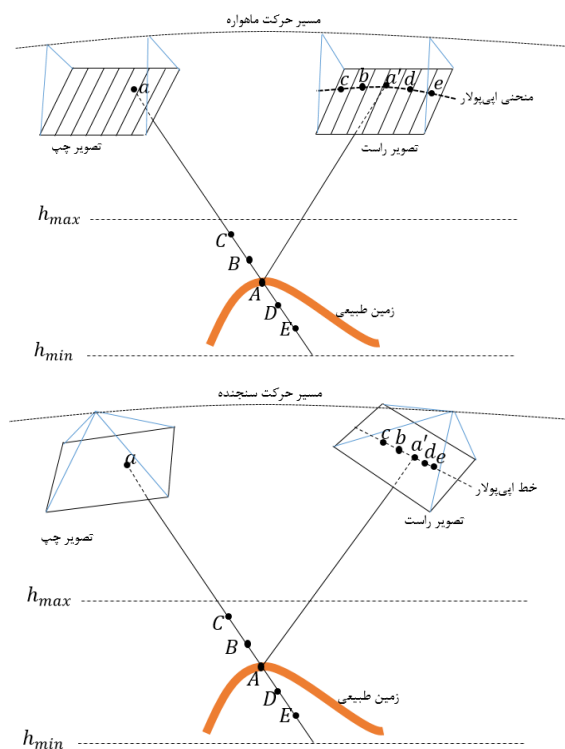
* نویسنده رابط

۱- مقدمه

استخراج DSM از تصاویر استریو ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، به دلیل کاربردهای آن در شناسایی تغییرات، مدل‌سازی سه‌بعدی شهر، بهنگام سازی نقشه‌ها، برنامه‌ریزی شهری، مدیریت بحران و پایش محیط زیست؛ یکی از مهم‌ترین دستاوردهای فتوگرامتری و سنجش‌ازدور است. در این پروسه، تناظریابی یکی از مهم‌ترین مراحل است که تأثیر مستقیمی روی نتایج و کیفیت DSM دارد. بدین منظور روش‌ها و الگوریتم‌های تناظریابی متعددی مانند تناظریابی کمترین مربعات^۱ (LSM)، برنامه‌نویسی پویا^۲ (DP) و تناظریابی شبه سراسری^۳ (SGM) توسعه داده شده‌اند، که از این میان نتایج SGM به مراتب از سایر روش‌ها بهتر بوده است [۱، ۲].

یکی از ضروری‌ترین ورودی‌های الگوریتم SGM تصاویر اپی پلار می‌باشند [۲]. تصاویر اپی پلار، تصاویر ترمیم شده‌ای هستند که در آن‌ها هر سطر در تصویر راست با هر سطر در تصویر چپ متناظر است (به عبارتی پارالاکس y برابر با صفر می‌باشد). این باعث افزایش سرعت تناظریابی و کاهش فضای جستجو از دوبعدی به یک‌بعدی می‌شود.

برخلاف تصاویر با هندسه‌ی پرسپکتیو (Frame Camera)، هندسه‌ی اپی پلار در تصاویر آرایه خطی یک خط مستقیم نیست [۳]. در تصاویر آرایه خطی ماهواره‌ای به دلیل اخذ تصاویر در زمان‌های متعدد، مراکز تصویر متعددی وجود دارد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است؛ چنانچه نقطه‌ی "a" در تصویر چپ و نقطه‌ی "a'" در تصویر راست با نقطه‌ی زمینی "A" متناظر باشند؛ با نداشت سایر نقاط زمینی "B"، "C"، "D" و "E" به نقاط عکسی "b"، "c"، "d" و "e" در تصویر راست؛ منحنی‌ای بدست می‌آید که به آن منحنی اپی پلار می‌گویند. اما در تصاویر با هندسه‌ی پرسپکتیو به دلیل وجود یک مرکز تصویر در هر عکس، تمامی نقاط زمینی "A"، "B"، "C"، "D" و "E" و متناظر عکسی‌شان در یک صفحه قرار دارند (شکل ۱ پایین)). به همین دلیل در تصاویر با هندسه‌ی پرسپکتیو به جای منحنی اپی پلار، خط اپی پلار وجود دارد.



شکل ۱- هندسه‌ی اپی پلار در تصاویر آرایه خطی (بالا) و تصاویر فریم (پایین)

مطالعات بر روی مدل مداری سنجنده‌ها نشان داده که شکل منحنی اپی پلار شبیه یک هذلولی است [۴]. ضعف این معادله منحنی این است که به اطلاعات توجیهی سنجنده نیاز دارد؛ از این رو براساس نقاط کنترل زمینی معادله‌ای مستقل از اطلاعات توجیهی سنجنده توسعه داده شده است [۵]. اما با ظهور مدل‌های ساده‌تری مثل روش-های مبتنی بر افاین دوبعدی عملاً استفاده از این معادله منحنی برای تولید تصاویر اپی پلار از بین رفت.

در تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، یک تصویر استاندارد (به‌طور مثال 12000×12000 پیکسل) در زمان خیلی کوتاهی (در حد چند ثانیه) اخذ می‌شود، همین زمان کوتاه شرایط ثابت بودن ارتفاع و سرعت سنجنده را فراهم می‌کند. از طرفی طی تحقیقات انجام شده در تصاویر ماهواره‌ای اخذ شده توسط سنجنده‌های با ارتفاع و سرعت ثابت، پس از اعمال نگاشت موازی^۴؛ تصاویر اپی پلار می‌توانند بر مبنای یک مدل افاین دوبعدی ایجاد شوند [۶-۱۱]. ازجمله معایب روش‌های مبتنی بر افاین دوبعدی این است که، برای بدست آوردن پارامترهای نگاشت موازی به نقاط کنترل زمینی و مدل ارتفاعی

^۱ Least Square Matching

^۲ Dynamic Programing

^۳ Semi-Global Matching

^۴ Parallel projection

آزمایش‌ها انجام شده ارائه می‌شود؛ و در نهایت در بخش پنجم بحث و نتیجه‌گیری پیرامون نتایج انجام می‌گیرد.

۲- الگوریتم تناظریابی شبه سراسری (SGM)

با توجه به هدف این مقاله مبنی بر تولید تصاویر اپی‌پولار برای الگوریتم SGM، ضروری است تا این الگوریتم تشریح شود. SGM یک الگوریتم تناظریابی تصاویر استریو است که در آن برای همه‌ی پیکسل‌ها فرآیند تناظریابی انجام می‌شود. در این فرآیند ممکن است پیکسلی متناظر نداشته باشد (مانند پیکسل‌های متناظر با نواحی پنهان) و یا دارای متناظر باشد که در این صورت مقدار محاسبه شده، همان مقدار پارالاکس "x" در آن نقطه است. الگوریتم SGM از چهار مرحله‌ی؛ محاسبه‌ی هزینه‌های تناظریابی^۲، ترکیب هزینه‌ها^۳، محاسبه‌ی تصویر پارالاکس و تصحیح تصویر پارالاکس تشکیل شده است؛ که در ادامه به صورت مختصر توضیح داده می‌شوند.

۲-۱- محاسبه‌ی هزینه‌های تناظریابی

هر پیکسل در تصویر اپی‌پولار چپ با توجه به کمترین و بیشترین پارالاکس ممکن، می‌تواند با یکی از پیکسل‌های تصویر اپی‌پولار راست متناظر باشد. معیار متناظر بودن، براساس تابعی انجام می‌شود که به آن تابع هزینه می‌گویند. تابع هزینه می‌تواند ضریب همبستگی^۴، مجموع قدر مطلق اختلافات^۵ (SAD)، سرشماری^۶، اطلاعات دوطرفه^۷ و یا هر تابع دیگری باشد. هرچه عملکرد تابع هزینه طوری باشد که در آن پیکسل‌های متناظر شباهت بیشتری داشته باشند، میزان موفقیت الگوریتم SGM بالا می‌رود.

در اولین مرحله از الگوریتم SGM نوع تابع هزینه و مقدار کمینه و بیشینه‌ی پارالاکس تعیین می‌شود. سپس برای هر پیکسل در تصویر چپ، با جستجو بر روی تصویر راست، برداری از مقادیر هزینه‌های تناظریابی محاسبه می‌شود. بنابراین پس از انجام فرآیند فوق برای کل پیکسل‌های تصویر چپ، مکعبی از مقادیر هزینه‌های تناظریابی ایجاد می‌شود که ابعاد افقی آن برابر با ابعاد تصویر چپ و ارتفاع آن به اندازه‌ی دامنه‌ی تغییرات پارالاکس است (شکل ۲).

منطقه نیاز است. با ظهور مدل‌های زمین مرجع ژنریک و به‌طور خاص توابع رشنال زمین مستقل (RPC)، عملاً پروسه‌ی اندازه‌گیری نقاط کنترل زمینی از بین رفت. در همین راستا؛ برای بدست آوردن پارامترهای نگاشت موازی و به‌تبع آن تولید تصاویر اپی‌پولار، با استفاده از RPCها نقاط کنترل زمینی مجازی^۱ ایجاد شده است [۱۲].

تصاویر اپی‌پولار می‌توانند در فضای شی‌ای بر روی یک صفحه با ارتفاع ثابت (ارتفاع متوسط منطقه) ایجاد شوند. برای برقراری ارتباط بین تصویر اپی‌پولار در فضای شی‌ای و تصویر اصلی از RPCها استفاده شده است [۱۳، ۱۴]. همچنین از RPCها برای تولید نقاط متناظر عکسی روی منحنی اپی‌پولار و تولید تصاویر اپی‌پولار در فضای عکسی استفاده شده است [۱۵-۱۸]. اما روش‌های مبتنی بر RPC نیازمند تصحیح پارامترهای RPC اند، چرا که طی تحقیقات بدست آمده RPCها به تصحیح خطای شیف و دریافت نیازمندند [۱۹].

هدف این مقاله ارائه روشی برای تولید تصاویر اپی‌پولار از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا برای الگوریتم SGM می‌باشد. الگوریتم SGM برای ذخیره‌ی مکعب تابع هزینه و مکعب ترکیب هزینه‌ها؛ به حافظه‌ی موقت نیاز دارد. اما محاسبات این الگوریتم به‌گونه‌ای است که در تصاویر با ابعاد بزرگ به مشکل کمبود حافظه مواجه می‌شود. راهکار پیشنهاد شده برای استفاده از الگوریتم SGM در تصاویر ماهواره‌ای (تصاویر با ابعاد بزرگ) این است که تصاویر اپی‌پولار به کاشی‌های کوچک تصویری (حدود ۳۰۰۰*۳۰۰۰ پیکسل) تقسیم شوند [۲].

در این مقاله به‌منظور استفاده از الگوریتم SGM در تصاویر استریو ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، تصاویر اولیه به کاشی‌های کوچک تصویری تقسیم‌بندی شده و سپس از کاشی‌های متناظر، تصاویر اپی‌پولار ایجاد می‌شوند. همچنین برای جلوگیری از نیاز به اطلاعات بیرونی مانند RPCها و تصحیحات آن‌ها از الگوریتم‌های بینایی کامپیوتر استفاده می‌شود. ساختار این مقاله به این صورت است که؛ پس از تشریح الگوریتم SGM؛ جزئیات مربوط به روش پیشنهادی ارائه می‌شوند. در بخش چهارم بعد از معرفی مجموعه تصاویر مورد استفاده، نتایج حاصل از

^۲ Cost function

^۳ Cost aggregation

^۴ Cross Correlation

^۵ Sum of Absolute Differences (SAD)

^۶ Census

^۷ Mutual Information (MI)

^۱ Virtuale GCP

p : موقعیت پیکسلی است که ترکیب توابع هزینه برای آن انجام می‌شود.

$C(p, d)$: مقدار هزینه‌ی پیکسل واقع در پارالاکس d .

L_r : مسیری است که به نقطه‌ی P ختم می‌شود.

r : مقدار شعاع همسایگی

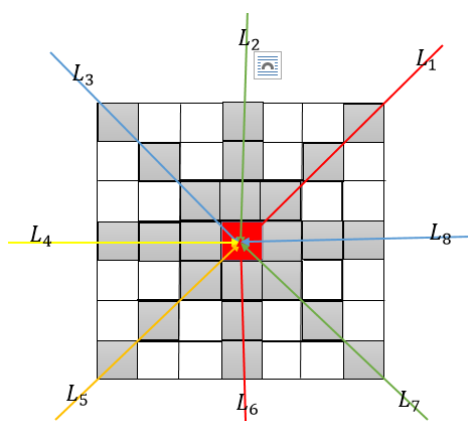
P_1 : ترم تنبیهی برای هزینه‌هایی که مقدار پارالاکس پیکسل‌شان با پارالاکس پیکسل مرکزی یک واحد اختلاف دارد.

P_2 : ترم تنبیهی برای هزینه‌هایی که مقدار پارالاکس پیکسل‌شان با پارالاکس پیکسل مرکزی بیش از یک واحد اختلاف دارد.

پس از محاسبه‌ی رابطه‌ی (۱) برای ۸ یا ۱۶ جهت، هزینه‌ی تمامی مسیرها با هم جمع شده و به عنوان هزینه‌ی ترکیبی در مکعب ترکیب هزینه‌ها ذخیره می‌شود.

$$S(p, d) = \sum_{r=1}^{8 \text{ or } 16} L_r(p, d) \quad (2)$$

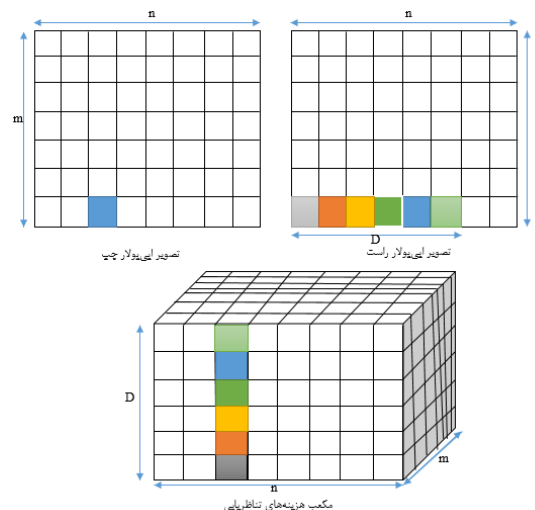
روابط (۱) و (۲) نشان می‌دهند، ترکیب هزینه‌ها به پیکسل‌هایی که هزینه‌ی بالایی دارند (با آنتروپی و شباهت پایین) کمک می‌کند، تا با استفاده از پیکسل‌هایی که هزینه‌ی کمتری دارند (شباهت بیشتر)، متناظرشان را به درستی پیدا کنند.



شکل ۳- ترکیب هزینه‌ها از ۸ جهت در الگوریتم SGM

۳-۲- محاسبه‌ی تصویر پارالاکس

پس از ترکیب هزینه‌ها، می‌توان برای هر پیکسل مقدار پارالاکسی محاسبه کرد. با توجه به مختصات پیکسل‌های متناظر؛ پارالاکس یک پیکسل، محل کمترین هزینه‌ی ترکیب شده می‌باشد. بنابراین اگر مکعب ترکیب هزینه‌ها S باشد، مقدار پارالاکس از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید. همچنین برای رسیدن به دقت زیر پیکسل، به



شکل ۲- محاسبه‌ی هزینه‌های تناظریایی و چگونگی ایجاد مکعب هزینه‌های تناظریایی در الگوریتم SGM

در شکل ۲، پیکسل خاکستری رنگ در تصویر راست، محل کمترین مقدار پارالاکس ممکن را نشان می‌دهد و در مقابل پیکسل سبز رنگ، نشان دهنده‌ی بیشترین مقدار پارالاکس ممکن است. همچنین پیکسل‌های رنگی چیده شده روی هم در مکعب هزینه‌های تناظریایی، بیانگر مقدار هزینه‌ی تناظریایی هستند.

۲-۲- ترکیب هزینه‌ها

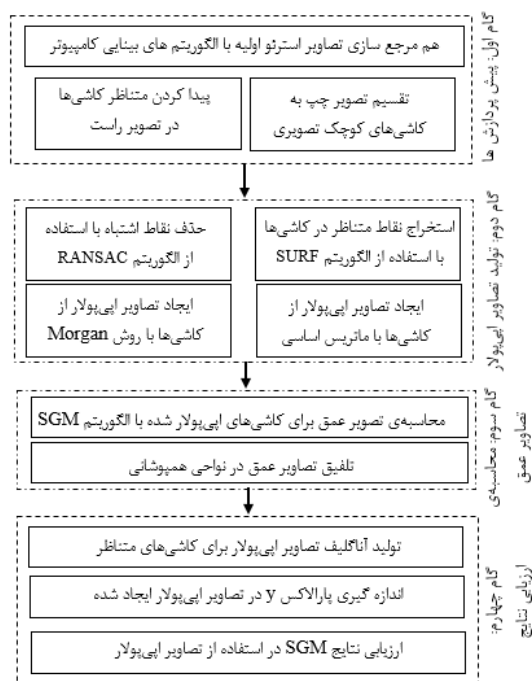
در مرحله‌ی محاسبه‌ی هزینه‌های تناظریایی، به دلیل وجود مقدار هزینه‌ی یکسان در همسایگی‌ها (به دلیل آنتروپی پایین)، وجود مناطق بدون بافت و عدم توانایی تابع به کار برده شده، امکان تناظریایی صحیح پایین می‌آید، لذا ترکیب هزینه‌ها از جهت‌های مختلف پیشنهاد شده است. در این مرحله براساس مقدار هزینه‌های تناظریایی و مقدار اختلاف پارالاکس، از ۸ یا ۱۶ جهت، هزینه‌ها ترکیب می‌شوند. برای این کار مطابق شکل ۳ و رابطه‌ی (۱) در هر جهت، ترکیبی از مقادیر هزینه‌ها محاسبه می‌شود. سپس طبق رابطه‌ی (۲)، مقادیر تمامی مسیرها با هم جمع می‌شوند. پس از محاسبه‌ی رابطه‌ی (۲) برای تمامی آرایه‌های مکعب مقادیر هزینه‌های تناظریایی، مکعب جدیدی بدست می‌آید که به آن مکعب ترکیب هزینه‌ها گفته می‌شود.

$$L_r(p, d) = C(p, d) + \min \begin{cases} L_r(p-r, d) \\ L_r(p-r, d \pm 1) + p_1 \\ \min_i L_r(p-r, i) + p_2 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن؛

۳- روش پیشنهادی

همانطور که در پیشینه‌ی تحقیق گفته شد؛ در تمامی روش‌های پیشین برای تولید تصاویر اپی‌پولار از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا به اطلاعات زمین مرجع سازی مانند RPC و تصحیحات آن‌ها نیاز است. همچنین با توجه به نیاز الگوریتم SGM به تقسیم تصاویر اپی‌پولار به کاشی‌های کوچک تصویری، راهکاری مشابه این روش پیشنهاد می‌شود. مراحل روش پیشنهادی در شکل ۴ نشان شده است.



شکل ۴- فلوجارت روش پیشنهادی جهت تولید تصاویر اپی‌پولار برای الگوریتم تناظریابی شبه سراسری (SGM)

در گام اول پیش پردازش‌ها شامل هم مرجع سازی، تقسیم تصویر چپ به کاشی‌های کوچک تصویری و پیدا کردن متناظر آن‌ها در تصویر راست انجام می‌شوند. در گام دوم از کاشی‌های کوچک تصویری، تصاویر اپی‌پولار ایجاد می‌شوند. در گام سوم با استفاده از تصاویر اپی‌پولار، برای هر کاشی تصویری، تصویر پارالاکس محاسبه و تلفیق تصاویر پارالاکس انجام می‌شود.

و در گام چهارم برای ارزیابی نتایج، پس از تولید آنالگراف تصاویر اپی‌پولار؛ بین مقدار پارالاکس "y" تصاویر اپی‌پولار، مقایسه‌ای انجام می‌گیرد. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم SGM بر روی تصاویر اپی‌پولار ایجاد شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

هزینه‌های بالاتر و پایین‌تر از محل کمترین هزینه، یک سهمی برازش داده می‌شود.

$$D = \min_d S(p, d) \quad (3)$$

پس از محاسبه‌ی مقدار پارالاکس برای تمامی پیکسل‌ها، تصویری بدست می‌آید که به آن تصویر پارالاکس می‌گویند. در این تصویر برای حذف نویز یک فیلتر میانه 3×3 اعمال می‌شود. برای پیدا کردن محل نواحی پنهان و حذف مقدار پارالاکس محاسبه شده برای این نواحی، یک بار بر مبنای تصویر چپ و یک بار بر مبنای تصویر راست، تصویر پارالاکس محاسبه می‌شود. سپس آن دسته از پیکسل‌هایی که اختلاف مقدار پارالاکس‌شان در دو تصویر پارالاکس، بیش از یک پیکسل است به عنوان پیکسل‌های نواحی پنهان در نظر گرفته شده و مقدار پارالاکس‌شان از تصویر نهایی پارالاکس حذف می‌شود.

۲-۴- تصحیح تصویر پارالاکس

با اینکه مرحله‌ی ترکیب توابع و فیلترگذاری تا حدود زیادی نتیجه‌ی تناظریابی را بهبود می‌بخشد، ولی هنوز در نواحی بدون بافت نتیجه‌ی صحیحی ارائه نمی‌دهد. در بعضی جاها مقادیر پارالاکس به صورت میخ شدگی و در بعضی دیگر پارالاکسی محاسبه نمی‌شود. برای حل این مشکلات، قطعه بندی تصویر مبنا و تصویر پارالاکس با الگوریتم قطعه بندی شیفت میانگین^۱ پیشنهاد شده است [۲]. پس از قطعه‌بندی، به قطعات تصویر پارالاکس یک صفحه برازش داده شده تا برای پیکسل‌های بدون پارالاکس، براساس درونیایی مقدار پارالاکس محاسبه شود.

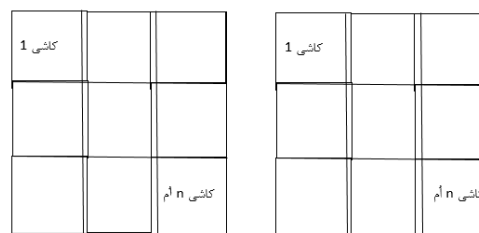
با توجه به مراحل محاسبه‌ی هزینه‌ی تناظریابی و ترکیب هزینه‌های تناظریابی؛ چنانچه یک تصویر ماهواره‌ی ۱۱ بیتی با ابعاد 12000×12000 پیکسل، حجمی معادل ۲۵۰ مگابایت داشته باشد. برای ذخیره مکعب هزینه‌های تناظریابی و مکعب هزینه‌های ترکیب شده با مقدار تغییرات پارالاکس ۵۱۲ پیکسل، به کامپیوتری با حافظه‌ی موقت بیش از ۲۰۰ گیگا بایت نیاز دارد. این در حالی است که در دنیای واقعی چنین کامپیوتری برای همه کاربران غیر قابل دسترس است. از این رو راهکار پیشنهادی در استفاده از این الگوریتم برای تصاویر با ابعاد بزرگ، کاشی کردن تصاویر اپی‌پولار بوده است.

^۱ Mean Shift

۳-۱- پیش پردازش‌ها

در پردازش تصاویر استریو قبل از هر کاری بایستی رابطه و مدل ریاضیاتی بین دو تصویر مشخص شود. همانطور که در مقدمه گفته شد، برای سنجنده‌های با ارتفاع و سرعت ثابت (تمام سنجنده‌های با توان تفکیک بالا)، رابطه‌ی بین دو تصویر استریو می‌تواند یک مدل افاین باشد. از این رو با استفاده از اپراتور SURF [۲۰]، یکسری نقاط متناظر استخراج کرده، سپس با به کارگیری الگوریتم RANSAC [۲۱] نقاط اشتباه حذف شده و پارامترهای مدل افاین بین تصاویر، تعیین می‌شوند.

پس از هم مرجع سازی، تصویر چپ (تصویر تقریباً ارتو) به کاشی‌های تصویری با ابعاد 3000×3000 پیکسل تقسیم می‌شود (شکل ۵). در این مرحله ضروری‌ست تا مقدار همپوشانی کاشی‌ها مشخص شود. مقدار همپوشانی کاشی‌ها در راستای محور "x" و "y" به ماکزیمم خطای مدل افاین و شعاع همسایگی مرحله‌ی ترکیب هزینه‌ها (از مراحل SGM) بستگی دارد.



شکل ۵- نحوه‌ی تقسیم اولیه به کاشی‌های کوچک تصویری

پس از تعیین محدوده و مقدار همپوشانی کاشی‌ها در تصویر چپ؛ با به کارگیری مدل افاین، این محدوده‌ها به تصویر راست انتقال داده می‌شوند تا کاشی‌های متناظر مشخص گردند (شکل ۵).

۳-۲- تولید تصاویر اپی پولار

از آنجا که هندسه‌ی اپی پولار در کاشی‌های کوچک تصویری بصورت یک خط مستقیم است؛ پس از استخراج نقاط عکسی متناظر، با استفاده از ماتریس بنیادی^۱ [۲۲] و روش ارائه شده در پایان نامه Morgan [۱۱]، تصاویر اپی پولار می‌توانند ایجاد شوند. لذا برای بررسی هرچه بیشتر قابلیت‌های کاشی کردن؛ تصاویر اپی پولار با هر دو روش ماتریس بنیادی و معادله خط اپی پولار ایجاد می‌شوند.

برای برآورد المان‌های ماتریس بنیادی و یا پارامترهای معادله خط اپی پولار به نقاط متناظر عکسی نیاز است. از آنجا که در مرحله هم مرجع سازی تصاویر اولیه، برای بالا بردن سرعت پردازش فقط در نواحی گروبر^۲ نقاط عکسی استخراج شده؛ لذا ضروری است تا در هر کاشی نیز نقاط متناظر عکسی استخراج شوند. مشابه گام اول در این مرحله نیز نقاط اشتباه با الگوریتم RANSAC شناسایی می‌شوند.

۳-۲-۱- تولید تصاویر اپی پولار با روش Morgan

در روش ارائه شده در پایان‌نامه Morgan [۱۱]، چنانچه هندسه‌ی تصویربرداری یک هندسه‌ی موازی باشد؛ معادله‌ی خطوط اپی پولار می‌تواند براساس یک مدل افاین نوشته شوند. با توجه به پارامترهای کالیبراسیون دوربین در تصاویر ماهواره‌ای، نسبت ابعاد تصویر (3000×3000 پیکسل) به فاصله‌ی کانونی (بیش از ۱ متر) به گونه‌ای است که می‌توان هندسه‌ی تصویربرداری را موازی در نظر گرفت. بنابراین با نمونه‌برداری در راستای خط اپی پولار، تصاویر اپی پولار بوجود می‌آیند. برای استفاده از روش Morgan بایستی ضرایب معادله‌ی زیر برآورد شوند.

$$G_1x + G_2y + G_3x' + G_4y' + 1 = 0 \quad (4)$$

با داشتن حداقل چهار نقطه‌ی متناظر عکسی، ضرایب معادله‌ی (۴) بدست می‌آیند. پس از برآورد این ضرایب، رابطه‌ی بین تصاویر اپی پولار با تصویر اولیه برابرست با:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{Epipolar} = \frac{1}{S} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{original} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\Delta y}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}_{Epipolar} = S \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \sin(\theta') \\ -\sin(\theta') & \cos(\theta') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}_{original} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Delta y}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن

$$\theta = \arctan\left(-\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (7)$$

$$\theta' = \arctan\left(-\frac{G_3}{G_4}\right) \quad (8)$$

$$S = \sqrt{-\frac{G_4 \cos(\theta)}{G_2 \cos(\theta')}} \quad (9)$$

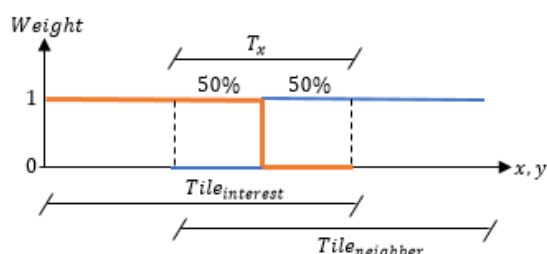
$$\Delta y = -\frac{S \times \cos(\theta')}{G_4} \quad (10)$$

^۲ Gruber

^۱ Fundamental Matrix

است. پارامتر دامنه‌ی تغییرات پارالاکس در مرحله‌ی ساخت مکعب توابع هزینه و پارامترهای P1 و P2 در مرحله‌ی ترکیب هزینه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچه دامنه‌ی تغییرات بالا باشد حجم محاسبات بیشتر و احتمال رخداد خطای مربوط به عوارض تکراری نیز بالا می‌رود. از این رو تعیین بهینه‌ی این پارامتر یک امر ضروری است.

پس از محاسبه‌ی تصاویر پارالاکس با توجه به مقدار همپوشانی در نظر گرفته شده، تصاویر پارالاکس باهم تلفیق می‌شوند. در مرحله‌ی تعیین مقدار همپوشانی، این مقدار دوبرابر حد مورد نیاز، انتخاب می‌شود. زیرا استراتژی تلفیق تصاویر پارالاکس بر این استوار است که نصف محدوده مقدار همپوشانی دور ریخته شود (شکل ۷).



شکل ۷- نحوه تلفیق تصاویر پارالاکس با توجه به محدوده‌ی همپوشانی کاشی‌ها

۴-۳- ارزیابی نتایج

از آنجا که هدف از تولید تصاویر اپی‌پولار، ایجاد تصاویر با مقدار پارالاکس عمودی صفر می‌باشد؛ لذا ارزیابی نتایج با اندازه‌گیری پارالاکس "y" انجام می‌گیرد. همچنین با توجه به هدف این مقاله مبنی بر تولید تصاویر اپی‌پولار برای الگوریتم SGM، نتایج حاصل از این الگوریتم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

در این بخش پس از معرفی مجموعه داده‌ی مورد استفاده، نتایج حاصل از اجرای روش پیشنهادی، ارائه داده خواهد شد.

۴-۱- داده‌های ورودی

در این تحقیق از یک جفت تصویر استریو ماهواره‌ای GeoEye1 با پیکسل سایز زمینی ۰٫۵ متر استفاده شده

۳-۲-۲- تولید تصاویر اپی‌پولار از ماتریس اساسی

ماتریس اساسی، ماتریسی است که رابطه‌ی بین دو نقطه‌ی متناظر تصویری را برقرار می‌کند. در استفاده از این ماتریس، نیازی به داشتن پارامترهای توجیه داخلی و نسبی نیست. در تصاویری که هندسه‌ی اپی‌پولار خطی است، رابطه‌ی بین مختصات دو نقطه‌ی عکسی متناظر با ماتریس اساسی برابر است با:

$$\begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \\ F_4 & F_5 & F_6 \\ F_7 & F_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

از ماتریس بنیادی می‌توان دو ماتریس هموگرافی H و H' استخراج کرد که رابطه‌ی بین تصاویر اولیه و تصاویر اپی‌پولارشان را برقرار کنند [۲۲].

$$X^T H^T i_x H' X' = 0 \Rightarrow F = H^T [i]_x H' \quad (12)$$

که در آن؛

$$[i]_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

و رابطه‌ی بین مختصات اپی‌پولار با تصویر اولیه برابر است با:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}_{Epipolar} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_{Original} \Rightarrow X_{epip} = H X_{orig} \quad (14)$$

پس از برآورد ماتریس بنیادی، ماتریس‌های H و H' محاسبه می‌شوند. سپس با اعمال این ماتریس‌ها به تصاویر اولیه، تصاویر اپی‌پولار ایجاد می‌شوند. مزیت استفاده از ماتریس بنیادی در این است که رابطه‌ی ۱۴ یک رابطه‌ی بازگشتی بوده و با آن می‌توان از تصاویر اپی‌پولار به تصاویر اولیه بازگشت.

$$X_{orig} = H^{-1} X_{epip} \quad (15)$$

۳-۳- تولید تصاویر پارالاکس

برای محاسبه‌ی تصاویر پارالاکس پس از تولید تصاویر اپی‌پولار، الگوریتم SGM به کار گرفته می‌شود. در استفاده از الگوریتم SGM تنظیم و تعیین سه پارامتر P1، P2 و دامنه‌ی تغییرات پارالاکس "x" از اهمیت بالایی برخوردار

است. این تصاویر در محدوده‌ی طیفی باند پانکروماتیک، دارای بافت شهری می‌باشند (مشخصات این تصاویر در جدول ۱ نشان داده شده است).

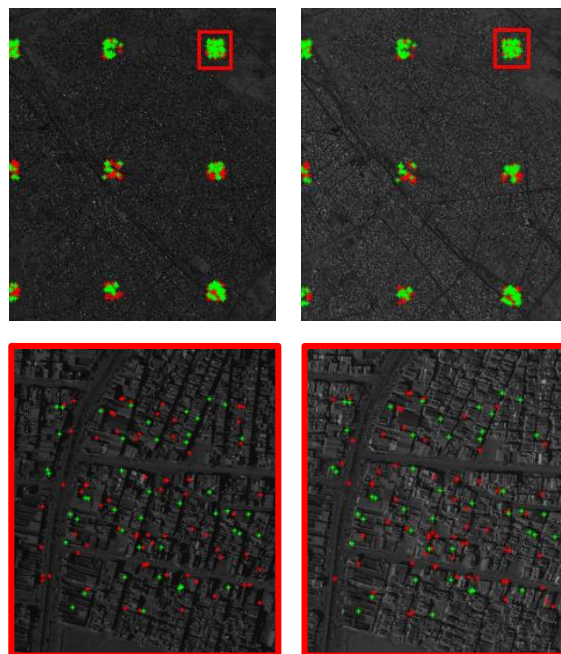
جدول ۱- مشخصات داده‌های ورودی

سنجنده	موقعیت	سال اخذ (میلادی)	ابعاد تصویر (پیکسل)
GeoEye1	شهر قم	۲۰۱۴	۱۷۰۰۰*۱۴۱۰۰

۲-۴- پیش پردازش ها

همانطور که پیشتر اشاره شد برای هم‌مرجع‌سازی ابتدا با استفاده از اپراتور SURF نقاطی استخراج و تناظرابی می‌شوند. برای حذف نقاط اشتباه الگوریتم RANSAC به کارگرفته می‌شود. سپس براساس نقاط متناظر صحیح، پارامترهای یک مدل افاین برآورد می‌شوند.

برای افزایش سرعت الگوریتم SURF در تصاویر بزرگ، ابتدا هرم تصاویر ساخته می‌شود. سپس در بالاترین لایه‌ی هرم تناظرابی انجام می‌گیرد. براساس نقاط متناظر شده در بالاترین لایه‌ی هرم، نواحی گروبر تصاویر شناسایی و در این نواحی نقاطی در سطح اولیه تناظرابی می‌شوند (شکل ۸).



شکل ۸- هم‌مرجع‌سازی تصاویر استریو سنجده‌ی GeoEye1 (تصویر سمت راست) تصویر با زاویه دید مایل؛ سمت چپ) تصویر با زاویه دید تقریباً ارتو)؛ استخراج نقاط متناظر با الگوریتم SURF در نواحی گروبر و شناسایی اشتباهات با الگوریتم RANSAC؛ نقاط قرمز رنگ: نقاط متناظر اشتباه؛ نقاط سبز رنگ: نقاط متناظر صحیح

پس از هم‌مرجع‌سازی، تصاویر به کاشی‌های ۳۰۰۰*۳۰۰۰ پیکسلی تقسیم‌بندی می‌شوند. سپس با استفاده از مدل افاین دوبعدی برآورد شده، کاشی‌های متناظر در تصویر راست شناسایی می‌شوند. برای محاسبه‌ی مقدار همپوشانی، اگر شعاع همسایگی مرحله‌ی ترکیب توابع هزینه ۱۵ پیکسل و ماکزیمم خطای مجاز مدل افاین ۱۰ پیکسل در نظر گرفته شود، همپوشانی ۵۰ پیکسل کافی است.

۳-۴- تولید تصاویر اپی‌پولار و محاسبه‌ی تصویر

پارالاکس

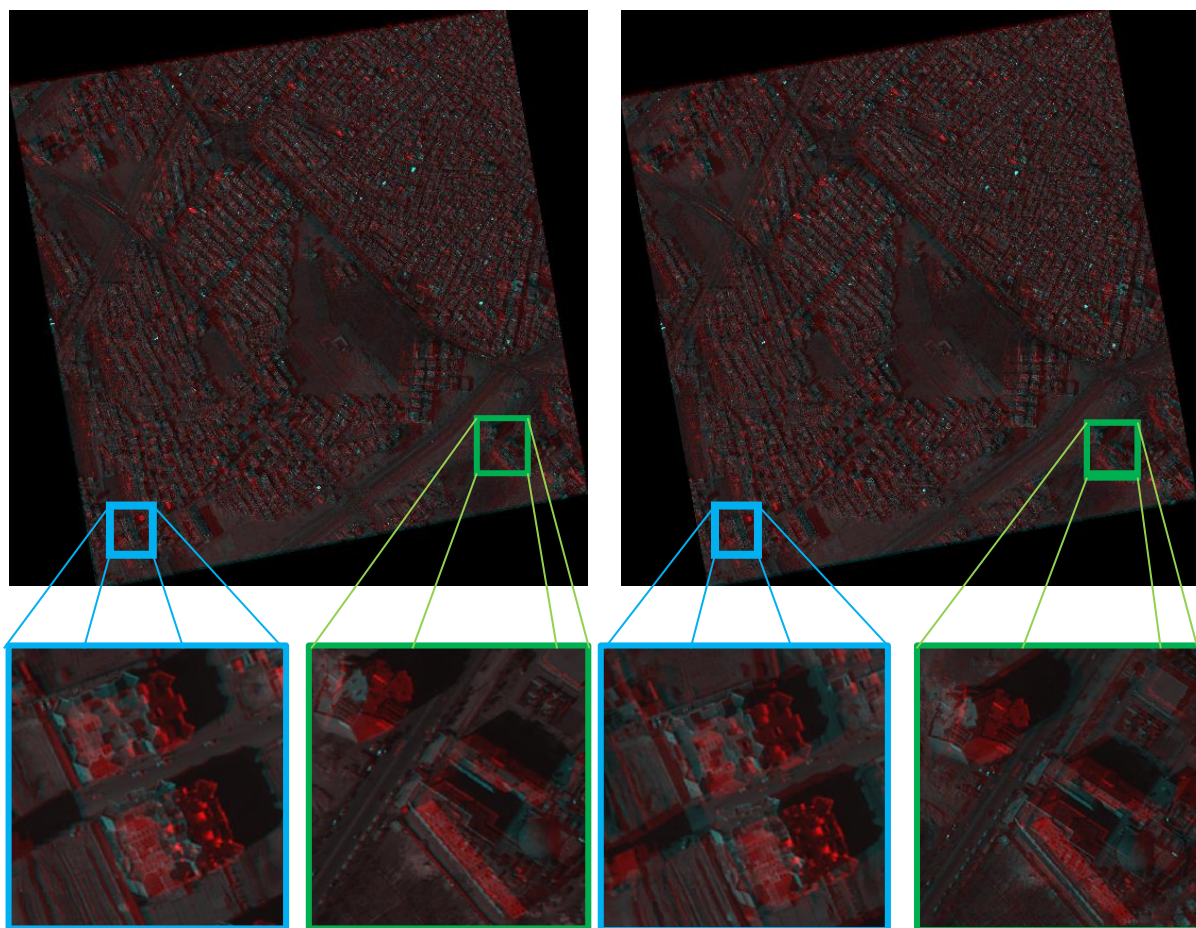
مشابه آنچه در هم‌مرجع‌سازی تصاویر اولیه گفته شد، برای هر کاشی نقاط عکسی متناظر استخراج می‌شود؛ با این تفاوت که دقت نقاط متناظر صحیح زیر یک پیکسل بوده و تناظرابی در کل کاشی تصویری انجام می‌شود. پس از استخراج نقاط متناظر صحیح، با استفاده از ماتریس اساسی و روش Morgan برای هر کاشی تصاویر اپی‌پولار ایجاد می‌شوند. شکل ۹ تصاویر اپی‌پولار ایجاد شده از کاشی‌های متناظر را نشان می‌دهند.

پس از تولید تصاویر اپی‌پولار برای کاشی‌های متناظر، با به کارگیری الگوریتم SGM، تصاویر پارالاکس محاسبه می‌شوند. برای استفاده از الگوریتم SGM بایستی پارامتر مقدار تغییرات پارالاکس تعیین شود. با توجه به تغییرات ارتفاعی متفاوت در هر کاشی، مقدار تغییرات پارالاکس تغییر می‌کند. از این رو مقادیر این پارامتر، بسته به نوع منطقه تحت پوشش و موقعیت کاشی‌ها، تعیین می‌شوند (جدول ۲). در این تحقیق از تابع هزینه‌ی SAD با ابعاد پنجره‌ی ۱۵*۱۵ پیکسل استفاده شده است (شکل ۱۰).

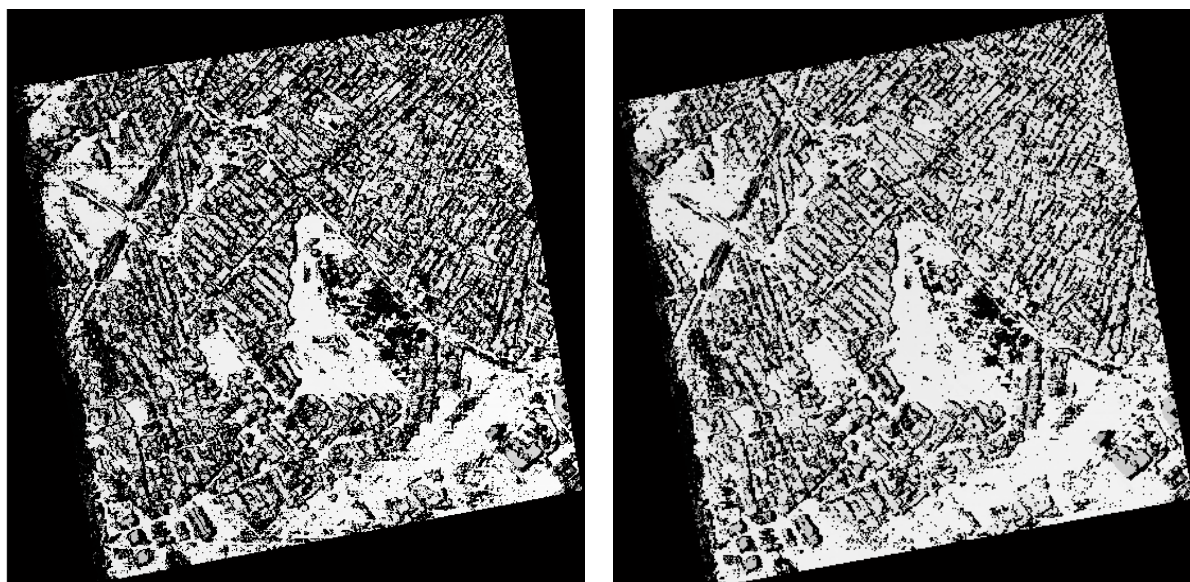
جدول ۲- تنظیم پارامتر تغییرات مقدار پارالاکس

شماره کاشی*	محدوده‌ی تغییرات مقدار پارالاکس
۱۹، ۲۵، ۲۹، ۳۰	[۰ ۶۴]
۵، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۲۸	[۰ ۱۹۸]
دیگر کاشی‌ها	[۰ ۱۲۸]

*شماره گذاری براساس شکل ۵



شکل ۹- ایجاد تصاویر اپی پولار از کاشی‌های متناظر؛ سمت راست) استریو-آناگلیف تصاویر اپی پولار ایجاد شده با روش Morgan؛ سمت چپ) استریو-آناگلیف تصاویر اپی پولار ایجاد شده با ماتریس اساسی



شکل ۱۰- تصویر پارالاکس محاسبه شده با الگوریتم SGM؛ راست) تصویر پارالاکس مربوط به تصاویر اپی پولار ایجاد شده با روش Morgan؛ چپ) تصویر پارالاکس مربوط به تصاویر اپی پولار ایجاد شده با ماتریس اساسی

تصاویر اپی پولار، مطابق استراتژی بخش ۳-۳، پیکسل‌هایی که در محدوده‌ی همپوشانی واقع شده‌اند، با هم ادغام می‌شوند.

پس از محاسبه‌ی تصاویر پارالاکس کاشی‌ها، بایستی در محدوده‌ی همپوشانی، تصاویر پارالاکس ادغام شوند. برای این کار پس از شناسایی محدوده همپوشانی در

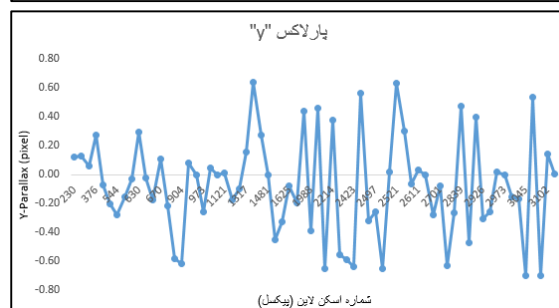
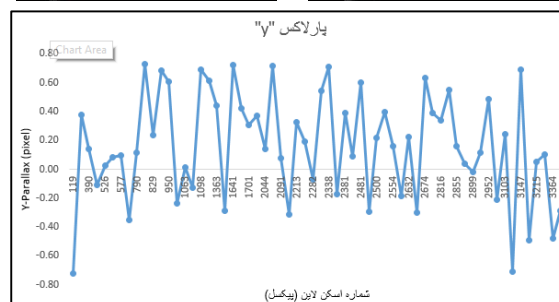
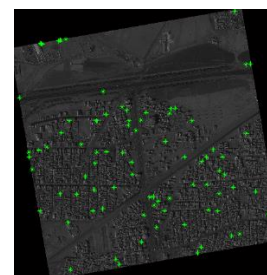
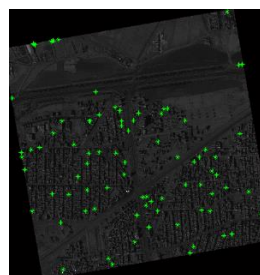
۴-۵- ارزیابی نتایج

ارزیابی تصاویر اپی پولار می‌تواند با اندازه‌گیری مقدار پارالاکس "y" انجام شود. بدین منظور پس از تولید تصاویر اپی پولار، با استفاده از اپراتور SURF یکسری نقاط عکسی متناظر استخراج می‌شوند. پس از شناسایی نقاط صحیح، مقدار پارالاکس "y" اندازه‌گیری می‌شود. نتایج حاصل از این ارزیابی در شکل ۱۱ ارائه شده است. همچنین نتایج عددی حاصل از این ارزیابی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج عددی مقدار پارالاکس "y" در تصاویر اپی پولار ایجاد

شده (برحسب پیکسل)

انحراف معیار	میانگین	بیشترین	روش تولید
P_y	P_y	$ P_y $	تصاویر اپی پولار
۰,۳۷	۰,۱۶	۰,۷۲	روش Morgan
۰,۳۴	-۰,۰۸	۰,۷	ماتریس اساسی



شکل ۱۱- نتایج حاصل از استخراج نقاط عکسی پس از ایجاد تصاویر اپی پولار؛ بالا) محل نقاط استخراج شده‌ی متناظر صحیح در تصاویر اپی پولار؛ وسط) نمودار مقدار پارالاکس "y" در تصاویر اپی پولار ایجاد شده با روش Morgan؛ پایین) نمودار مقدار پارالاکس "y" در تصاویر اپی پولار ایجاد شده با ماتریس بنیادی

همچنین برای ارزیابی نتایج به کارگیری الگوریتم SGM در تصاویر اپی پولار؛ مقدار پارالاکس "x" تعداد ۸۰ نقطه اندازه‌گیری شده است. سپس این مقدار پارالاکس ها با مقدار پارالاکسی که از الگوریتم SGM در همان موقعیت بدست آمده، مقایسه شده اند.

جدول ۴- نتایج به کارگیری الگوریتم SGM در تصاویر اپی پولار ایجاد شده (برحسب پیکسل)

انحراف معیار	میانگین	روش تولید تصاویر
$P_x - d$	$P_x - d$	اپی پولار
۰,۴۴	۰,۰۱۸	روش Morgan
۰,۵۳۷	۰,۰۸۸	ماتریس بنیادی

P_x : مقدار پارالاکس اندازه‌گیری شده در راستای x

d: مقدار پارالاکس بدست آمده از الگوریتم تناظریابی شبه سراسری

۵- بحث

در این تحقیق هدف ایجاد تصاویر اپی پولار از تصاویر استریو ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا برای مقاصد تناظریابی بود؛ که نتایج نشان داد تصاویر اپی پولار با دقت زیر پیکسل ایجاد شده‌اند (جدول ۳).

وجود عوارض مختلف در تصاویر اخذ شده از مناطق شهری باعث می‌شود تا استخراج نقاط عکسی با استفاده از اپراتورهای استخراج نقطه، راحت‌تر انجام بگیرد. در این نواحی تراکم بالا و دقت زیر پیکسلی نقاط متناظر صحیح، شرایط را برای موفقیت این روش فراهم می‌کند. به همین دلیل به کارگیری الگوریتم‌های SURF و RANSAC در هم مرجع سازی تصاویر با موفقیت همراه بود.

استفاده از الگوریتم‌های بینایی کامپیوتر مانند SURF و RANSAC در هم مرجع سازی تصاویر اولیه و کاشی‌های کوچک تصویری، باعث عدم نیاز به اطلاعات زمین مرجع مانند RPCها و تصحیحات آن‌ها می‌شود. بنابراین برای تصاویری که اطلاعات زمین مرجع ندارند، این روش امکان تولید تصاویر اپی پولار را فراهم می‌کند.

تقسیم تصاویر اولیه به کاشی‌های کوچک تصویری باعث می‌شود، در تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا، هندسه‌ی اپی پولار از منحنی به خط مستقیم تغییر کند. به همین دلیل به کارگیری ماتریس بنیادی و روش Morgan برای ایجاد تصاویر اپی پولار از کاشی‌های تصویر با موفقیت همراه بود. لذا تقسیم تصاویر اولیه به کاشی‌های

است. بنابراین پس از تناظریابی با الگوریتم SGM، تبدیل مختصات نقاط متناظر شده به سیستم مختصات اولیه به راحتی امکان پذیر است. این در حالی است که در بسیاری از روش های پیشین، بایستی برای تصاویر اپی پولار زمین مرجع سازی دوباره انجام می گرفت.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور به کارگیری الگوریتم SGM بر روی تصاویر استریو ماهواره ای با توان تفکیک بالا، تصاویر اپی پولار با دقت زیر پیکسل ایجاد شدند. نتایج نشان داد تقسیم تصاویر اولیه به کاشی های کوچک تصویری باعث خطی شدن هندسه ای اپی پولار می شود. استفاده از الگوریتم های بینایی کامپیوتر در هم مرجع سازی تصاویر استریو ماهواره ای و کاشی های کوچک تصویری باعث شد، به اطلاعات زمین مرجع مانند RPC ها و تصحیحات RPC ها نیازی نباشد.

کوچک تصویری باعث سادگی و تسهیل در تولید تصاویر اپی پولار از تصاویر ماهواره ای می شود.

یکی دیگر از مزیت های تقسیم تصویر اولیه به کاشی های کوچک تصویری این است که برای هر کاشی می توان پارامتر مقدار تغییرات پارالاکس را جداگانه تعیین کرد (جدول ۲). بهینه کردن مقدار تغییرات پارالاکس باعث افزایش سرعت تناظریابی و کاهش اشتباهات تناظریابی ناشی از عوارض تکراری (در مناطق شهری) می شود.

چنانچه تصاویر اپی پولار در حد چند پیکسل (کمتر از نصف ابعاد پنجره جستجو) خطای پارالاکس "y" داشته باشند؛ باز هم الگوریتم SGM می تواند برای آن ها تصویر پارالاکس ایجاد کند. اما هرچه دقت ایجاد تصاویر اپی پولار بالاتر باشد، تعداد پیکسل های متناظر بیشتری شناسایی می شوند. از آنجاکه تصاویر اپی پولار با دقت زیر پیکسل ایجاد شده اند؛ تراکم نقاط بیشتری در تصویر پارالاکس دیده می شود.

یکی دیگر از مزایای روش پیشنهادی این است که رابطه ای بین تصاویر اولیه و تصاویر اپی پولار برگشت پذیر

مراجع

- [1] Alobeid, A. (2011). "Assessment of matching algorithms for urban DSM generation from very high resolution satellite stereo images". Ph.D, Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz- Univ., Honnover, Germany.
- [2] Hirschmüller, H. (2008). "Stereo processing by semiglobal matching and mutual information". Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on.vol. 30, pp. 328-341.
- [3] Gupta, R. and Hartley, R. (1997). "Linear pushbroom cameras". Pattern Analysis and Machine Intelligence ,IEEE Transactions on.vol. 19, pp. 963-975.
- [4] Kim, T. (2000). "A study on the epipolarity of linear pushbroom images". Photogrammetric engineering and remote sensing.vol. 66, pp. 961-966.
- [5] Lee, H.-Y. and Park, W. (2002) "A New Epipolarity Model Based on the Simplified Push-Broom Sensor Model". in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Ottawa. Canada, pp. 631-636.
- [6] Habib, A. F., Morgan, M. F., Jeong, S., and Kim, K.-O. (2005). "Epipolar geometry of line cameras moving with constant velocity and attitude". Electronics and Telecommunications Research Institute Journal.vol. 27, pp. 172-180.
- [7] Morgan, M., Kim, K., Jeong, S., and Habib, A. (2004) "Indirect epipolar resampling of scenes using parallel projection modeling of linear array scanners". in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp. 52-57.
- [8] Morgan, M., Kim, K., Jeong, S., and Habib, A. (2004) "Epipolar geometry of linear array scanners moving with constant velocity and constant attitude". in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, pp. 52-57.
- [9] Ono, T. (1999) "Epipolar resampling of high resolution satellite imagery". in Sensors and Mapping from Space, Hannover, Germany.
- [10] Morgan, M., Kim, K.-O., Jeong, S., and Habib, A. (2006). "Epipolar resampling of space-borne linear array scanner scenes using parallel projection". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.vol. 72, pp. 1255-1263.

- [11] Morgan, M. F. (2004). "Epipolar resampling of linear array scanner scenes". Ph.D., University of Calgary, Canada.
- [12] Oh, J.-H., Shin, S.-W., and Kim, K.-O. (2006). "Direct epipolar image generation from IKONOS stereo imagery based on RPC and parallel projection model". Korean Journal of Remote Sensing.vol. 22, pp. 451-456.
- [13] Hu, F., Wang, M., and Li, D. (2008) "A novel epipolarity model of satellite stereo-imagery based on virtual horizontal plane of object-space". in International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis, pp. 72851D-72851D-8.
- [14] Wang, M., Hu, F., and Li, J. (2011). "Epipolar resampling of linear pushbroom satellite imagery by a new epipolarity model". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.vol. 66, pp. 347-355.
- [15] Oh, J. (2011). "Novel Approach to Epipolar Resampling of HRSI and Satellite Stereo Imagery-based Georeferencing of Aerial Images". Ph.D, The Ohio State University, The Ohio State, USA.
- [16] Zhao, D ,Yuan, X., and Liu, X. (2008) "Epipolar line generation from IKONOS imagery based on rational function model". in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp. 1293-1297.
- [17] Wang, M., Hu, F., and Li ,J. (2010). "Epipolar arrangement of satellite imagery by projection trajectory simplification". The Photogrammetric Record.vol. 25, pp. 422-436.
- [18] Javan, F. D., Fallah, A., and Mohammadi, H. (2013). "Epipolar Resampling of High Resolution Satellite Images Using Rational Polynomial Coefficients". journal of Geomatics Science and Technology.vol. 3, p. 11.
- [19] Fraser, C. S. and Hanley, H. B. (2003). "Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.vol. 69, pp. 53-57.
- [20] Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2008). "Speeded-up robust features (SURF)". Computer vision and image understanding.vol. 110, pp. 346-359.
- [21] Fischler, M. A. and Bolles, R. C. (1981). "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography". Communications of the ACM.vol. 24, pp. 381-395.
- [22] Loop, C. and Zhang, Z. (1999) "Computing rectifying homographies for stereo vision". in Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on, Fort Collins, CO, USA.