

# تولید اتوماتیک مدل رقومی زمین از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت

## تفکیک مکانی بالا

حمید محمدی<sup>۱\*</sup>، فرهاد صمدزادگان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

hamid.mohammadi@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

samadz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۱، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۲)

### چکیده

امروزه مدل‌های رقومی زمینی کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مقابله با سوانح طبیعی، آشکارسازی تغییرات، مدیریت منابع طبیعی، پروژه‌های مهندسی و... دارند. روش‌های سنتی تولید مدل‌های رقومی زمینی پرهزینه و زمانبر هستند. این روش‌ها عارضه‌منا بوده و روش‌های تناظریابی مورد استفاده در آن‌ها با مشکلات زیادی مواجه هستند. مدل رقومی زمینی تولیدی در این روش‌ها دارای اشتباهات بسیاری است از این رو نیاز به پالایش‌های زیادی دارد و در نتیجه در پروژه‌های بزرگ مهندسی قابل استفاده نیستند. در این تحقیق به ارائه یک روش نوین جهت تولید اتوماتیک مدل‌های رقومی زمینی از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا می‌پردازیم. ابتدا یک تناظریابی استریوی متراکم بین زوج تصویر ماهواره‌ای با استفاده از روش تناظریابی شبه سراسری (SGM) انجام می‌شود و یک تصویر عمق اولیه دقیق و با ضریب اطمینان بالا تولید می‌گردد که مبنای پردازش‌های بعدی خواهد بود. در مراحل بعدی به پالایش این تصویر عمق اولیه می‌پردازیم و پس از آن با انتقال از فضای عکسی به فضای زمینی یک ابرنقاط ارتفاعی با تراکم بسیار بالا تولید می‌شود. در نهایت این ابرنقاط ارتفاعی نامنظم تبدیل به یک گرید منظم ارتفاعی (مدل رقومی زمینی) می‌شود و نواحی خالی باقیمانده در آن به کمک روش‌های پرکردن مدل‌های رقومی زمینی مقادیر ارتفاعی به خود خواهند گرفت. داده مورد استفاده دو زوج تصویر استریوی ماهواره‌ای سنجنده Cartosat-1 از منطقه گناوه در جنوب ایران است که دارای انواع مختلف توپوگرافی می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی مدل رقومی زمینی تولیدی با استفاده از روش پیشنهادی نشانگر توانایی بالای این روش جهت تولید مدل‌های رقومی زمینی دقیق و صحیح است.

**واژگان کلیدی:** زوج تصاویر استریوی ماهواره‌ای، تناظریابی متراکم، ابرنقاط ارتفاعی، مدل رقومی زمین.

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

برای برداشت های استریو طراحی و ساخته شده اند. در تقابل با این سنجنده‌ها مجموعه سنجنده‌های با قدرت تفکیک خیلی بالا مانند Worldview-1 و Worldview-2 و GeoEye-1 نیز داده های با قدرت تفکیک مکانی نیم متر را برای کاربردهای عمرانی تهیه می کنند. این کلاس جدید از داده های استریو امکان مدل سازی ساختمان های کوچک شهری را نیز فراهم می کنند. استفاده از این تصاویر در تولید مدل های رقومی سبب ایجاد مدل رقومی سطح با قدرت تفکیک بسیار بالا و مناسب در کاربردهای شهری می شود [6].

در سال های اخیر الگوریتم های کلاسیک تولید مدل های رقومی بیش از پیش به کمک متد هایی که نخستین بار در زمینه بینایی کامپیوتری ارائه شدند توسعه یافته اند. این الگوریتم ها عمدتاً بر مبنای تصاویر اپی پولار و تناظریابی استریوی متراکم پایه ریزی شده اند. با ای وجود مدل های رقومی تولید شده با این روش ها هنوز هم دارای اشتباهات زیادی هستند. بنابراین پس از مرحله استخراج مدل رقومی توسعه راهکارهایی برای پالایش و بهبود مدل های رقومی از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. در این تحقیق از روش تناظریابی شبه سراسری برای انجام تناظریابی استریوی متراکم استفاده شده و در ادامه راهکارهایی در جهت حذف اشتباهات از تصویر عمق تولید شده ارائه شده است.

## ۲- روش پیشنهادی در تناظریابی شبه سراسری و حذف اشتباهات

در شکل ۱ مراحل مختلف تولید مدل رقومی زمین به کمک روش پیشنهادی نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می شود، روش پیشنهادی در مجموع شامل هفت مرحله می باشد که در ادامه مورد بررسی قرار داده می شود.

### ۲-۱- تناظریابی استریوی متراکم زوج تصویر ماهواره ای به کمک الگوریتم تناظریابی نیمه سراسری

نخستین مرحله از فرآیند تولید مدل رقومی زمین انجام تناظریابی استریوی متراکم میان زوج تصاویر ماهواره ای

در سال های اخیر پردازش داده های اپتیکی استریو از مورد علاقه ترین موضوعات برای بسیاری از کاربردها از جمله تولید مدل های رقومی زمینی (DEM) بوده است و تکنیک های بسیاری در انجام تناظریابی متراکم و تولید DEM اتوماتیک در مراکز تحقیقاتی توسعه یافته اند. روش های مختلف و متنوعی در دهه اخیر مورد بررسی قرار گرفته اند و چند الگوریتم های جدیدی نیز در حیطه بینایی کامپیوتر ارائه شده اند که نتایج مطلوبی را ارائه کرده اند [9], [5], [4], [2]. از آن جمله می توان به D'Angelo و همکاران اشاره نمود که روش تناظریابی سلسله مراتبی بر مبنای درجات خاکستری تصاویر را پیشنهاد دادند [13]. در این روش آن ها مجبور بودند برای پیدا کردن پیکسل های متناظر یک محدوده جستجوی از قبل تعیین شده را مشخص نمایند که این کار خود نیازمند پیش پردازش هایی مانند تعیین نقاط گرهی برای تصاویر مختلف پوشش دار است و پیچیدگی الگوریتم را بالا می برد ضمن آنکه تعیین نقاط گرهی اشتباه خود سبب کاهش کارایی الگوریتم می شود. پیش از آن نیز از تلفیق روش تناظریابی کمترین مربعات و سایر روش های ناحیه مبنا استفاده شده بود [3]. در استفاده از این روش ها نیازمند تعیین یکسری نقاط تقریبی متناظر از قبل تعیین شده هستیم و این کار از اتوماتیک بودن فرآیند تولید مدل رقومی زمینی می کاهد. نتایج حاصل از ارزیابی نیز نشان دهنده وجود تناظرهای اشتباه زیاد در آن هاست. در سال های اخیر بسیاری از موسسات تحقیقاتی از روش تناظریابی شبه سراسری استفاده می نمایند [7], [9]. حسن این روش، انجام تناظریابی متراکم صحیح و دقیق و با تعداد اشتباه های کم تر است و نیازی به انجام پیش پردازش قبل از انجام تناظریابی در آن وجود ندارد. با این وجود هنوز مجموعه ای از تناظرهای اشتباه باقی مانده که موجب بروز اشتباه در مدل رقومی تولید شده می گردد.

روش فوق برای تناظریابی تصاویر سنجنده های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله سیستم های استریوی along track از ماهواره IRSP5 و ALOS-PRISM که هردوی این سیستم ها دارای قدرت تفکیک مکانی تقریبی ۲,۵ متر (GSD) می باشند و به طور خاص

$$P_a = \frac{B \cdot f}{(H - h_a)} \quad (1)$$

$$\Delta P_{ab} = P_a - P_b \quad (2)$$

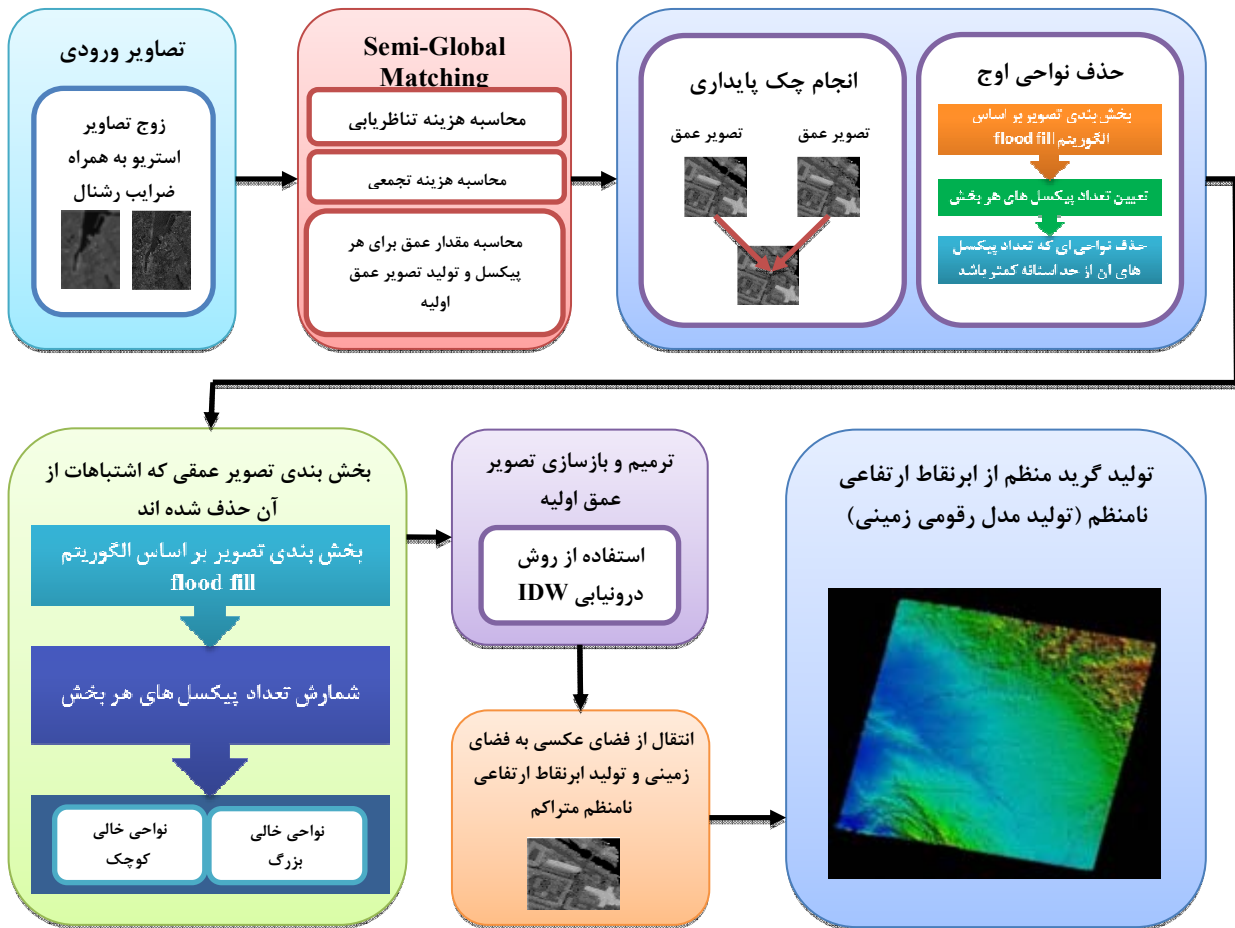
$$P_a - P_b = \frac{f \cdot B(h_a - h_b)}{(H - h_a)(H - h_b)} \quad (3)$$

$$h_a - h_b = \frac{\Delta P_{ab}(H - h_b)}{P_a} \quad (4)$$

$$\text{if } h_b = 0 \rightarrow h_a = \frac{\Delta P \cdot H}{b} \quad (5)$$

است. به عبارتی باید برای هر پیکسل از تصویر سمت چپ، پیکسل متناظر از تصویر راست شناسایی شود. با این کار می‌توان براساس اختلاف در موقعیت مکانی پیکسل‌ها مقدار پارالاکس میان آنها را محاسبه نمود. از آنجاکه پارالاکس هر نقطه ارتباط مستقیم با ارتفاع آن نقطه دارد می‌توان با انجام تناظریابی زوج تصاویر، تصویر عمق اولیه را تولید کرد. این تصویر مبنای تولید مدل رقومی زمینی خواهد بود.

در روابط (۱) تا (۵) معادلات مطرح در تعیین پارالاکس پیکسل‌های تصویری و همچنین برآورد ارتفاع و تولید تصویر عمق بر اساس آنها بیان شده است.



شکل ۱- مراحل مختلف تولید مدل رقومی زمینی در روش پیشنهادی

است که SGM روشی پایدار در مقابل تغییرات رادیومتریکی است که به دلایل مختلف در تصویر ایجاد شده‌اند [9].

یکی از کارآمدترین روش‌هایی که در سال‌های اخیر برای انجام تناظریابی استریوی متراکم ارائه شده است روش تناظریابی شبه سراسری (Semi Global Matching) است. ارزیابی‌های انجام شده بر روی این روش نشان داده

که به تغییرات نورپردازی و ثبت درجات خاکستری حساس نیستند، محاسبه شود.

### ۲-۱-۳- هزینه تجمعی

محاسبه هزینه پیکسلی در حالت کلی دارای ابهاماتی است [14], [9] و وجود تناظرهای اشتباه، به آسانی منجر به یک مقدار هزینه کمتر از مقدار واقعی می‌شود. بنابراین برای حل این مشکل قید دیگری که نرمی را از طریق جبران تغییرات پارالاکس‌های مجاور حمایت می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. هزینه پیکسلی و قیدهای نرمی از طریق تعریف انرژی  $E(D)$  که به تصویر پارالاکس ( $D$ ) وابسته است بر اساس رابطه (۶) بیان می‌شوند.

$$E(D) = \sum_p (C(p, D_p)) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \quad (6)$$

در این رابطه ترم اول مجموع هزینه تناظری تمامی پیکسل‌ها، برای تصویر پارالاکس ( $D$ ) را نمایش می‌دهد. ترم دوم پارامتر ثابتی است که  $P_1$  را به همه پیکسل‌های  $q$  در همسایگی  $N_p$  پیکسل  $p$  اضافه می‌کند. برای حالتی که تغییرات پارالاکس خیلی کم و در حد یک پیکسل است، ترم سوم ثابتی بزرگتر برای جبران  $P_2$  اضافه می‌کند.

مشکل تناظریابی استریو اکنون می‌تواند تحت عنوان پیدا کردن تصویر پارالاکس ( $D$ ) به صورتیکه که انرژی را کمینه کند، مطرح شود. متأسفانه همانند کمینه سازی سراسری در حالت دو بعدی، یک NP Complete برای بسیاری از ناپیوستگی‌هایی که انرژی‌ها را ذخیره می‌کنند، داریم به عبارتی برای تعیین مقدار یک مجهول رابطه مورد استفاده، ترکیبی از مجهولات دیگر است که هریک از این مجهولات نیز باید بر اساس مقادیر مجهولات دیگری تعیین شوند.

ایده جدید مطرح شده در محاسبه هزینه‌های تناظریابی تجمعی در یک بعد را می‌توان به این صورت بیان کرد که هزینه تجمعی  $s(p, d)$  برای یک پیکسل  $p$  و

در این روش تناظریابی تصاویر در مقیاس پیکسل با صحت خوبی به وسیله بهینه سازی مسیر بر مبنای تابع هزینه سراسری انجام می‌شود. همچنین در این روش می‌توان از چند طول بازه استفاده نمود و اطلاعات مربوط به تصاویر ابر نقطه یک منطقه را با یکدیگر ترکیب نموده و یک تصویر ابر نقطه با کیفیت بهتر و دقت بیشتر تهیه نمود [14], [9]. زمان اجرای این روش نسبت به سایر روش‌ها پایین‌تر بوده و از این نظر برای کاربردهای آبی مناسب است. همه مزایای مطرح شده سبب می‌شود SGM به عنوان نخستین گزینه حل مرحله تناظریابی انتخاب شود. در ادامه به معرفی بیشتر این الگوریتم پرداخته شده است.

### ۲-۱-۱- روش تناظریابی شبه سراسری

SGM روشی مبتنی بر تناظریابی پیکسلی اطلاعات دوسویه و تخمین یک قید نرمی دو بعدی به کمک ترکیبی از قیود یک بعدی است [14], [9]. SGM از روشی پیکسل مینا برای ارزش گذاری میزان تناظر نقاط بر مبنای اطلاعات دوسویه، به منظور جبران اختلافات رادیومتریکی تصاویر ورودی، استفاده می‌کند. پیدا کردن نقاط متناظر به وسیله قید نرمی که معمولاً به عنوان تابع محاسبه هزینه سراسری مطرح می‌شود، صورت می‌گیرد. SGM تخمینی سریع، از طریق بهینه سازی مسیر مینا از همه جهات انجام می‌دهد. مراحل پردازشی این الگوریتم شامل چهار مرحله است که برخی از آنها انتخابی و وابسته به کاربرد می‌باشند.

### ۲-۱-۲- محاسبه هزینه تناظریابی پیکسلی

هزینه تناظریابی برای پیکسل تصویری  $p$  از شدت روشنایی خود پیکسل ( $I_{bp}$ ) و شدت روشنایی متناظر آن یعنی  $I_{mq}$  که در آن  $q = e_{bm}(p, d)$  است، محاسبه می‌شود. عبارت  $e_{bm}(p, d)$  به معنای خط اپی پولار در تصویر متناظر، برای پیکسل موقعیت  $p$  و مقدار پارالاکس  $d$  است. برای تصاویر ترمیم شده ای که تصویر متناظر در سمت راست تصویر مینا اخذ شده است معادله خط اپی پولار به صورت  $e_{bm} = [p_x - d, p_y]^T$  می‌باشد. هزینه  $C_{BT}(p, d)$  به عنوان کمترین اختلاف شدت‌های روشنایی در  $p$  و  $q = e_{bm}(p, d)$  در محدوده نیم پیکسل در همه جهات در سراسر خط اپی پولار محاسبه می‌شود. از سوی دیگر هزینه تناظریابی می‌تواند بر مبنای اطلاعات دوسویه

در بخش (۱-۱-۳)، به صورت  $S \leq 16$  برای مسیرهای ۱۶ تایی تعیین می شود.

#### ۲-۱-۴- محاسبه و تولید تصویر ابر نقطه

تصویر پارالاکس  $D_b$  که متناظر با تصویر پایه  $I_b$  تعیین شده اس، همانند روش استریو موضعی، از طریق انتخاب هر پیکسل  $p$  و پارالاکس  $D$  که متناظر با کمترین مقدار هزینه است، تعیین می شود. برای برآورد تخمینی با دقت زیر پیکسل، منحنی quadratic از طریق هزینه های مجاور برازش داده می شود. استفاده از منحنی quadratic تنها برای همبستگی هایی که از مجموع مربعات اختلافات استفاده می کنند، توجیه شده است. اگرچه به عنوان تقریبی که محاسبات را سریعتر می کند نیز استفاده می شود.

تصویر پارالاکس  $D_m$  که متناظر با تصویر  $I_m$  است، از همان هزینه ها، این بار با پیمودن خطوط اپی پولار متناظر با پیکسل  $q$  در تصویر متناظر قابل تعیین است. در نهایت پارالاکس  $d$  به گونه ای انتخاب می شود که متناظر با کمینه هزینه باشد. نتایج بهتری با انجام تناظریابی پیکسلی این بار با در نظر گرفتن  $I_m$  به عنوان تصویر پایه و  $I_b$  به عنوان تصویر متناظر قابل دستیابی است. اشتباهات نیز در تصاویر  $D_b$  و  $D_m$  با اعمال یک فیلتر میانه با ابعاد پنجره کوچک (مثلا  $3 \times 3$ ) قابل حذف می باشند.

تصویر ابرنقطه تولیدی به کمک روش تناظریابی متراکم SGM دارای اشتباهات و نواحی پنهانی خواهد بود که باید تا حد امکان پالایش شوند. چرا که وجود این اشتباهات و نواحی پنهان در مرحله انتقال مختصات از فضای عکسی به فضای زمینی و تولید ابرنقاط ارتفاعی نامنظم سبب بروز اشتباهات و نواحی خالی خواهد شد که شناسایی و حذف آن ها در این فضای نامنظم کاری به مراتب دشوارتر و زمانبرتر بوده و نیازمند الگوریتم های پیچیده تر است. در نتیجه بهینه بودن فرآیند تولید مدل رقومی زمینی را با چالش مواجه خواهد کرد. البته در خصوص نواحی پنهان باید این نکته را مدنظر قرار داد که وجود اینگونه نواحی در تصاویر استریو امری طبیعی بوده و تنها می توان به کمک اطلاعات سایر تصاویر پوشش دار آن ها را ترمیم و بازسازی نمود. در این تحقیق به منظور شناسایی دقیق و صحیح این نواحی اشتباه و پس از آن

پارالاکس های  $d$ ، از طریق جمع همه مسیرهای با هزینه کمینه یک بعدی، که به پیکسل  $p$  با پارالاکس  $d$  ختم می شوند، محاسبه می شود. این مسیرها از طریق فضای پارالاکس به صورت خطوط مستقیم درون تصویر پایه، تصویر می شوند. در مقابل خطوط غیر مستقیم، درون تصویر متناظر، مطابق با تغییرات پارالاکس در طول مسیرها، تصویر می شوند. نکته قابل توجه این است که در این مرحله تنها هزینه مسیر مورد نیاز است و نه خود مسیر.

هزینه  $L'_r(p, d)$  در طول مسیری که در جهت  $r$  از پیکسل  $p$  در پارالاکس های  $d$  پیموده شده است، به صورت بازگشتی مطابق رابطه (۷) تعریف می شود:

$$L'_r(p, d) = C(p, d) + \min(L'_r(p-r, d), L'_r(p-r, d-1) + P_1, L'_r(p-r, d+1) + P_1, \min_i L'_r(p-r, i) + P_2) \quad (7)$$

مقادیر  $L'$  به صورت ثابت در طول مسیر افزایش می یابد و در نتیجه سبب ایجاد مقادیر خیلی بزرگ می شود. رابطه (۷) می تواند با تفریق هزینه مسیر کمینه پیکسل قبلی، از کل ترم، بهینه شود.

$$L_r(p, d) = C(p, d) + \min(L_r(p-r, d), L_r(p-r, d-1) + P_1, L_r(p-r, d+1) + P_1, \min_i L_r(p-r, i) + P_2) - \min_k L_r(p-r, k) \quad (8)$$

این بهینه سازی، مسیر واقعی در فضای پارالاکس را تغییر نمی دهد زیرا مقدار کم شده برای همه پارالاکس های یک پیکسل  $p$  ثابت است و بنابراین موقعیت کمینه تغییر نمی کند، گرچه حد بالایی می تواند به صورت  $L \leq C_{max} + P_2$  در نظر گرفته شود.

هزینه های  $L_r$  در امتداد مسیرها، در تمامی جهت های  $r$  با یکدیگر جمع می شوند. تعداد این مسیرها حداقل برابر ۸ است و بهتر است برای فراهم آوردن یک پوشش مناسب تصویر دو بعدی، برابر ۱۶ مسیر در نظر گرفته شود. در نهایت مسیرهایی که افقی، عمودی و یا قطری نیستند با گذر از یک مرحله افقی یا عمودی و سپس یک مرحله قطری پیاده سازی می شوند. حد بالایی برای  $s$  (بیان شده

ترمیم و بازسازی آنها مراحل مختلف انجام کنترل پایداری، شناسایی و حذف نواحی اوج و پس از آن تعیین نواحی قابل ترمیم و در نهایت ترمیم این نواحی و تعیین مقدار عمق برای آن‌ها پیشنهاد می‌شود که در مراحل بعدی به توضیح نحوه انجام هریک از این مراحل می‌پردازیم.

## ۲-۲- انجام کنترل پایداری

کنترل پایداری به معنای بررسی صحت مقدار عمق محاسبه شده است. به عبارتی اگر یک زوج تصویر استریو در دست باشد و یک تصویر عمق با در نظر گرفتن تصویر راست به عنوان master و تصویر چپ به عنوان slave تولید شود و پس از آن یک تصویر عمق دیگر اینبار با در نظر گرفتن تصویر چپ به عنوان master و تصویر راست به عنوان slave تولید گردد، مقادیر عمق به دست آمده در این دو تصویر در موقعیت‌های یکسان، باید دارای مقادیر یکسان باشند و در صورت برابر نبودن، مقدار عمق محاسبه شده به عنوان اشتباه قلمداد شده و از تصویر master حذف می‌گردد. بیان این مفهوم در قالب رابطه (۹) امکان پذیر است:

$$\begin{aligned} \text{if } D_L(p) \neq D_R(p - (D_L(p), 0)) \\ \rightarrow D_L(p) \text{ is not valid} \end{aligned} \quad (9)$$

## ۲-۳- شناسایی و حذف نواحی اوج

نواحی اوج در تصویر عمق اولیه در مناطقی با انعکاسات شدید رادیومتریکی و یا در مرز نواحی پنهان و همچنین در مناطقی که دارای بافت ضعیف و یا نویز بالا هستند، رخ می‌دهند. برای این نواحی مقادیر عمق محاسبه شده به طور ناگهانی نسبت به مقادیر عمق پیکسل‌های همسایه افزایش پیدا می‌کند. این نواحی اغلب به صورت نواحی ریز و دارای تعداد پیکسل کم هستند که می‌توان با استفاده از روش‌های بخش بندی تصاویر آنها را شناسایی و از تصویر ابرنقطه تولید شده حذف نمود. برای بخش بندی تصویر از الگوریتم flood fill که از سرعت مناسبی نیز برخوردار می‌باشد استفاده می‌شود به نحوی که پیکسل‌هایی که دارای مقادیر عمق مشابه با یک انحراف معیار مشخص هستند در یک کلاس قرار خواهند گرفت. سپس تعداد پیکسل‌های هر کلاس شمارش شده

و اگر تعداد آن‌ها از یک حد آستانه مشخص کمتر باشد به عنوان نواحی اوج قلمداد می‌شود و از تصویر عمق اولیه حذف خواهند شد. نکته قابل توجه در این مرحله تعیین مناسب مقدار این حدآستانه است. چرا که اگر مقدار آن کوچک در نظر گرفته شود برخی از نواحی اشتباه همچنان در تصویر باقی خواهند ماند و اگر مقدار آن بزرگ اختیار شود، سبب نرم شدن مدل رقومی زمینی به خصوص در مناطق و نواحی شهری خواهد شد. به طور کلی می‌توان گفت مقدار این حدآستانه برای نواحی شهری باید کوچکتر از مقدار آن در نواحی غیرشهری اختیار شود تا سبب از دست رفتن اطلاعات در مدل رقومی زمین نگردد.

## ۲-۴- تعیین نواحی که امکان بازسازی و ترمیم آنها وجود دارد

جهت تعیین نواحی که امکان بازسازی و ترمیم مقادیر عمق برای آن‌ها وجود دارد، ابتدا مناطقی از تصویر عمق اولیه که خالی شده‌اند، مشخص و سپس تعداد پیکسل‌های هریک از نواحی شمارش می‌شود. با توجه به اطلاعات موجود در تصویر مقدار حدآستانه بهینه برای مشخص کردن نواحی که می‌توان آن‌ها را بازسازی کرد، تعیین می‌شود به گونه‌ای که اگر تعداد پیکسل‌های ناحیه مربوطه از مقدار حدآستانه کمتر باشد، با استفاده از مقادیر عمق محاسبه شده برای همسایه‌های این نواحی به هریک از پیکسل‌های ناحیه خالی یک مقدار عمق نسبت داده خواهد شد. نکته قابل توجه در این بخش همانند مرحله قبل، تعیین مقدار مناسب حدآستانه است. به گونه‌ای که می‌توان گفت نواحی از تصویر عمق اولیه که در این بخش کنار گذاشته می‌شوند، جزء نواحی پنهان تلقی خواهند شد و یا باید در مراحل بعدی با استفاده از تلفیق اطلاعات زوج تصاویر پوشش دار دیگر پر شوند. به عبارت دیگر این مناطق باید در مرحله پرکردن مدل رقومی زمینی تولید شده با استفاده از مدل‌های رقومی مرجع بازیابی شوند و مقدار ارتفاع برای آن‌ها تعیین گردد.

## ۲-۵- ترمیم و بازسازی نواحی به کمک اطلاعات موجود در تصویر عمق اولیه

پس از تعیین نواحی قابل بازسازی به پیکسل های هریک از نواحی خالی، مقدار عمق با توجه به فاصله آن از پیکسل همسایه که دارای مقدار عمق غیر از صفر است، نسبت داده می شود. بدیهی است که هر قدر فاصله پیکسل همسایه از پیکسل خالی بیشتر باشد، وزن مربوط به استفاده از مقدار عمق آن نیز کمتر خواهد بود. رابطه مورد استفاده در این بخش همان رابطه روش درونیایی معکوس فاصله است که به صورت رابطه (۱۰) قابل بیان است.

$$D(q_0) = \frac{\sum_{i=1}^n D(q_i) \cdot d_{ij}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-p}} \quad (10)$$

نکته مهم در این بخش تعیین مقدار مناسب  $n$  (رابطه ۱۰) یعنی تعیین تعداد پیکسل های همسایه برای انجام درونیایی خواهد بود که باید با توجه به نوع اطلاعات موجود در تصویر مقدار مناسب برای آن تعیین شود. بدیهی است برای مناطق شهری مقدار  $n$  بسیار کمتر از نواحی کوهستانی و دشت می باشد و باید با دقت بیشتری تعیین شود.

## ۲-۶- انتقال از فضای عکسی به فضای زمینی و تولید ابرنقاط ارتفاعی نامنظم

پس از بازسازی، ترمیم و پالایش تصویر عمق نوبت به انتقال از فضای عکس به فضای زمینی و تولید ابرنقاط ارتفاعی می رسد. بدین منظور برای هر پیکسل در تصویر ابرنقطه پالایش شده که در واقع موقعیت در تصویر چپ را مشخص می کند، موقعیت پیکسل متناظر در تصویر راست با توجه به مقدار عمق محاسبه شده برای آن تعیین شده و سپس عملیات تقاطع فضایی برای این زوج نقطه متناظر با استفاده از ضرایب و معادلات رشنال انجام شده و موقعیت زمینی  $(x, y, z)$  برای آن محاسبه می شود. این فرآیند برای تمام پیکسل های تصویر چپ انجام خواهد شد و در نتیجه آن یک مجموعه ابرنقاط ارتفاعی نامنظم بسیار مترکم در فضای زمینی تولید خواهد شد. دقت مختصات ابرنقاط ارتفاعی تولیدی به دقت تناظریایی و دقت تعیین

مقدار عمق برای هر پیکسل وابسته است و بدیهی است وجود تناظرهای اشتباه و در نتیجه آن مقادیر عمق محاسبه شده اشتباه سبب به وجود آمدن مختصات زمینی نادرست خواهد شد. برای انتقال از فضای عکسی به زمینی بر اساس روابط ارائه شده توسط ( ) استفاده شده است. نقطه قابل توجه وجود زوج تصاویر ماهواره ای پوشش دار مختلف از یک محدوده زمینی می باشد. این ویژگی قابلیت تولید ابرنقاط ارتفاعی مختلف را فراهم خواهد کرد که در نتیجه آن امکان بازسازی و ترمیم نواحی پنهان و نواحی خالی باقیمانده فراهم خواهد شد.

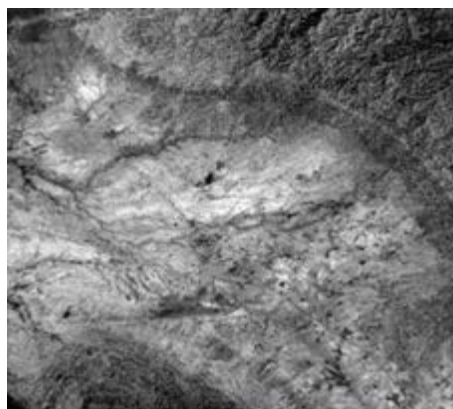
## ۲-۷- تولید شبکه منظم از ابرنقاط ارتفاعی نامنظم (تولید مدل رقومی سطح)

پس از تولید ابرنقاط ارتفاعی مختلف این نقاط نامنظم وارد مرحله تولید شبکه منظم از نقاط ارتفاعی نامنظم خواهند شد. روش ها و رویکردهای مختلفی برای منظور و تحت عنوان درونیایی ارائه شده اند. نتایج حاصل از پیاده سازی نشان می دهد که بکاربردن الگوریتم Nearest Neighbor Interpolation برای تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین تر مانند Spot و IRS P5 مناسب بوده و دقت و کیفیت لازم را در عین سرعت اجرای بالاتر به دست خواهد داد. زیرا در این نوع تصاویر ما با ساختارهای ترانشه ای پیچیده مانند نواحی ساختمانی با قدرت تفکیک مکانی بالا روبرو نیستیم.

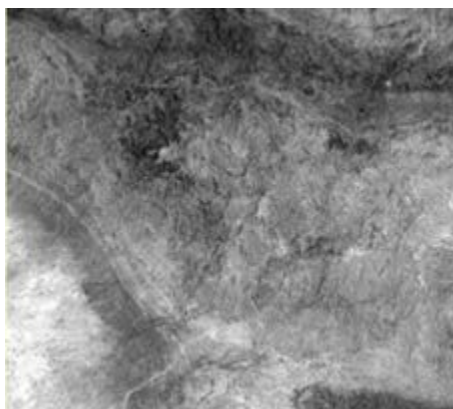
## ۳- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

به منظور پیاده سازی روش پیشنهادی دو زوج تصویر ماهواره ای سنجنده Cartosat-1 با قدرت تفکیک مکانی ۲,۵ متری از منطقه گناوه در جنوب ایران انتخاب گردید و مراحل تولید مدل رقومی زمینی بر روی آن ها اجرا شد و در نهایت مدل رقومی زمینی تلفیقی آن دو تولید شد. این دو زوج تصویر ماهواره ای اخذ شده هم دارای توپوگرافی دشت و هم توپوگرافی تپه ماهور و کوهستانی هستند و از این رو برای بررسی روش پیشنهادی مناسب می باشند. از آنجاییکه پوشش این زوج تصاویر تقریباً ۹۰ درصد است مدل رقومی زمینی تولید شده از آن ها نیز تقریباً به اندازه پوشش زمینی زوج تصاویر خواهد بود و بنابراین می توان گفت برای یک محدوده نسبتاً بزرگی از

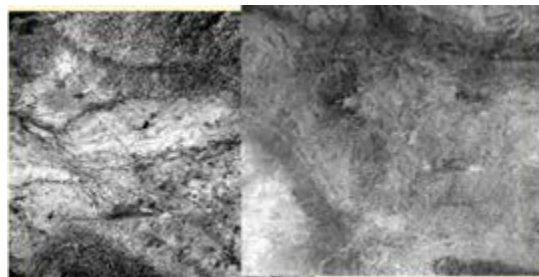
زمین مدل رقومی با دقت و کیفیت مناسب و بالا تولید خواهد شد که می‌تواند برای بسیاری از کاربردها مناسب و کافی باشد. با تلفیق اطلاعات زوج تصاویر پوشش دار می‌توان یک مدل رقومی زمینی با پوشش زمینی بزرگتر و دقت و کیفیت بالاتر تولید کرد. در شکل ۲-الف، ب و ۲-پ تصویر سمت چپ زوج تصاویر و پوشش این دو زوج تصویر نشان داده شده است:



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۲-الف: تصویر چپ از زوج تصویر اول، ب: تصویر چپ از زوج تصویر دوم، پ: نحوه پوشش زوج تصاویر

نتایج حاصل از مراحل مختلف پیاده سازی به صورت زیر می‌باشد. در شکل ۳-الف و ۳-ب تصویر اختلافی اولیه حاصل از مرحله انجام تناظریابی استریوی متراکم به روش SGM، برای زوج تصویر اول و دوم آورده شده است:



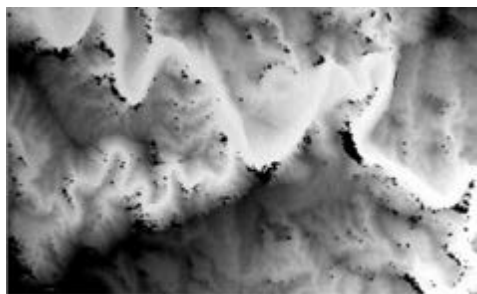
(الف)



(ب)

شکل ۳-الف: تصویر اختلافی اولیه حاصل از زوج تصویر اول، ب: تصویر اختلافی اولیه حاصل از زوج تصویر دوم



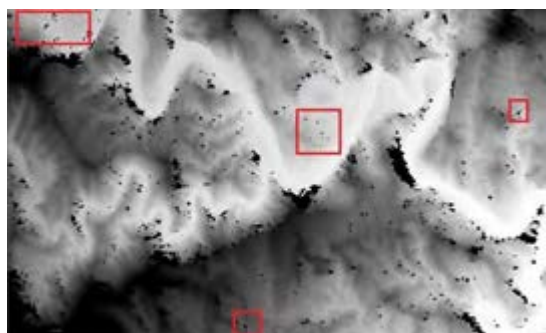


شکل ۵- انجام کنترل پایداری و حذف مقادیر عمق اشتباه در تصویر اختلافی اولیه



شکل ۶- بخش بندی تصویر عمق به روش flood fill و شناسایی نواحی اوج

در تصویر فوق نواحی کوچکی که به رنگی غیر از سیاه هستند نواحی اوج می باشند و از تصویر عمق حذف شده اند که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- حذف نواحی اوج در تصویر اختلافی

با مقایسه شکل ۷ با شکل ۶ در نواحی مشخص شده می توان نواحی اوج حذف شده از تصویر عمق را مشاهده نمود.

پس از حذف اشتباهات مرحله تعیین نواحی قابل بازسازی انجام می شود. راهکار مورد استفاده در این قسمت بخش بندی نواحی خالی مشخص شده در تصویر عمق و شمارش تعداد پیکسل های هریک از آنهاست به گونه ای که مناطق خالی که تعداد پیکسل های آنها از

از آنجایی که مراحل پردازشی بعدی برای این دو تصویر عمق اولیه تولید شده یکسان هستند در اشکالی که از این به بعد خواهند آمد تنها نتایج انجام پیاده سازی بر روی تصویر عمق حاصل از زوج تصویر اول را نشان خواهیم داد.

در شکل های ۴-الف و ۴-ب نماهایی بزرگتر از تصویر عمق اولیه تولید شده نشان داده شده اند.



(الف)



(ب)

شکل ۴-الف: بخشی از تصویر اختلافی اولیه در محدوده کوهستانی منطقه، ب: بخشی از تصویر اختلافی اولیه تولید شده و تناظرهای اشتباه ایجاد شده در آن

همانطور که در شکل ۴-ب مشخص شده است تصویر اختلافی اولیه دارای اشتباهاتی است که این اشتباهات به صورت لکه های کوچک کاملاً سیاه با کاملاً سفید در تصویر ظاهر شده اند. برای شناسایی و حذف این اشتباهات ابتدا یک کنترل پایداری به صورت زیر (شکل ۵) انجام می شود.

پس از انجام کنترل پایداری نواحی اوج نیز از این تصویر به عنوان اشتباه حذف می شوند. برای انجام این مرحله از بخش بندی تصویر به کمک الگوریتم flood fill استفاده نمودیم که تصویر بخش بندی شده در شکل ۶ نشان داده شده است.

شده در این تصویر و با استفاده از انجام تقاطع فضایی به کمک معادلات رشنال ذکر شده هریک از پیکسل‌های تصویر اختلافی را به زمین منتقل می‌کنیم و یک ابرنقاط ارتفاعی نامنظم در فضای زمینی که در شکل ۱۰ نشان داده شده است تولید می‌شود.

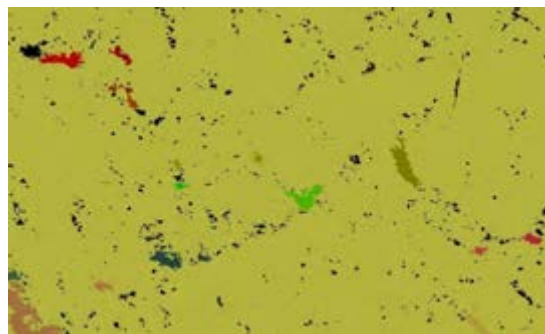


شکل ۱۰- ابرنقاط ارتفاعی نامنظم تولید شده، (به دلیل محدودیت سیستم‌ها برای نمایش تنها بخشی از ابرنقاط برای زوج تصویر نشان داده شده است)

مراحل فوق برای زوج تصویر شماره دوم نیز به همین ترتیب اجرا شد و ابرنقاط ارتفاعی برای این زوج تصویر نیز تولید شد.

با تولید ابرنقاط ارتفاعی مرحله تولید گرید منظم از این ابرنقاط به کمک روش انتریپولاسیون Nearest Neighbor انجام شد و مدل رقومی زمینی تولید گردید. در شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-ث مدل رقومی زمینی تولید شده برای زوج تصویر اول، مدل رقومی زمینی تلفیقی شده برای زوج تصویر دوم و مدل رقومی زمینی تلفیقی این زوج تصاویر نشان داده شده‌اند.

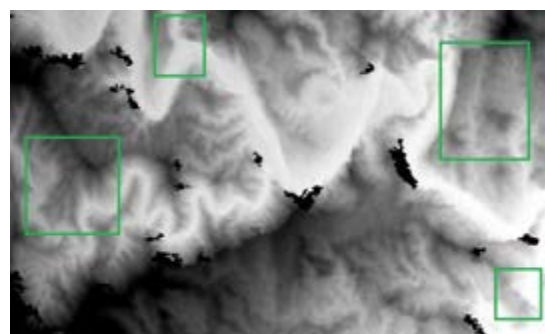
تعداد مشخصی کمتر باشند جهت بازسازی و تعیین مقدار عمق برای آن‌ها وارد مرحله بعد خواهند شد. در شکل ۸ تمام پیکسل‌هایی که به رنگی غیر از زمینه هستند نواحی خالی یا اشتباه می‌باشند که شناسایی و حذف شده‌اند و پیکسل‌هایی که به رنگ مشکی ثبت شده‌اند در مراحل بعدی بازسازی و ترمیم شده و مقدار عمق برای آن‌ها تعیین خواهد شد و پیکسل‌های با رنگ‌های دیگر نواحی خالی هستند که قادر به بازسازی و ترمیم آنها نیستیم.



شکل ۸- نواحی قابل بازسازی و غیر قابل بازسازی در تصویر اختلافی اولیه تولید شده

با انجام این مرحله و تعیین نواحی قابل بازسازی، در مرحله بعد به بازسازی و ترمیم تصویر اختلافی بر اساس روش درون‌یابی معکوس فاصله که پیشتر در بخش ۱-۵ به آن اشاره شد می‌پردازیم. خروجی این مرحله در شکل شماره ۹ نشان داده شده است.

با مقایسه شکل‌های ۷ و ۹ به خصوص در بخش‌هایی که با رنگ سبز مشخص شده‌اند می‌توان نواحی خالی که مقدار عمق برای آنها تعیین شده است را مشاهده نمود.



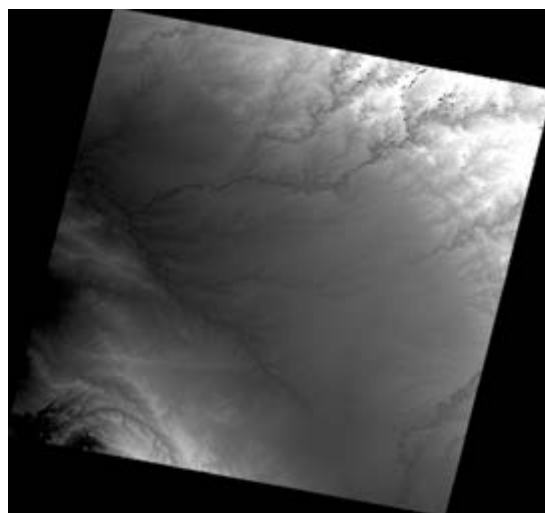
شکل ۹- ترمیم نواحی تعیین شده در تصویر اختلافی با استفاده از روش معکوس فاصله (نواحی مشکی باقیمانده نواحی خالی هستند)

پس از انجام مرحله ترمیم و بازسازی تصویر عمق تولید شده، در مرحله بعد به کمک مقادیر عمق محاسبه

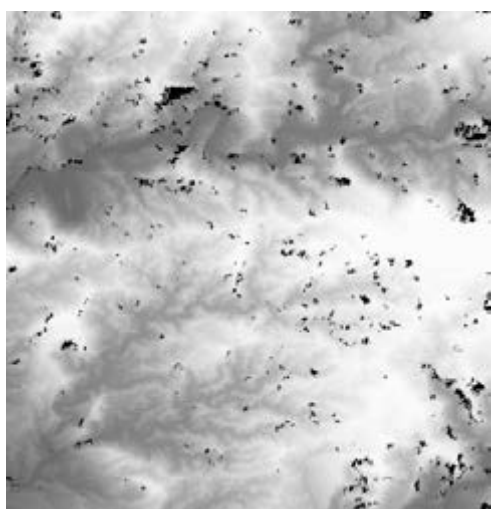
نواحی خالی مربوط به هرکدام از زوج تصاویر به کمک اطلاعات زوج تصویر دیگر پوشش داده شده است و به این ترتیب یکسری از نواحی پنهان در مدل رقومی زمینی به کمک اطلاعات تکمیلی از تصاویر مختلف قابل بازسازی خواهد بود.

همانطور که از شکل ۱۲ پیداست به دلیل افزونگی اطلاعات در محدوده مشترک، دقت و صحت مدل رقومی زمینی تولید شده نیز در این محدوده، بیشتر از نواحی دیگر مدل رقومی زمینی خواهد بود.

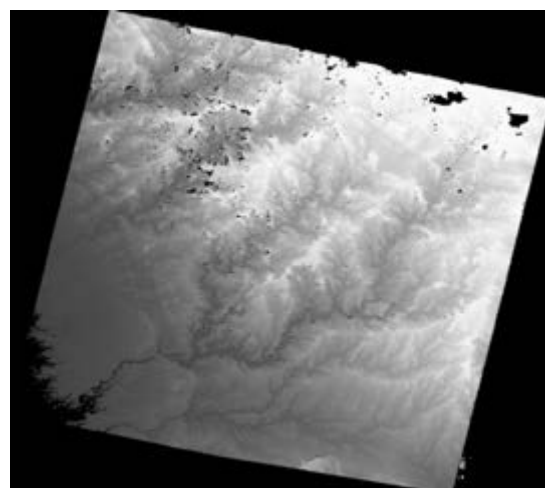
اشکال ۱۳-الف تا ۱۳-ت نیز بخش های مختلفی از مدل رقومی زمینی تولید شده را نشان می دهند.



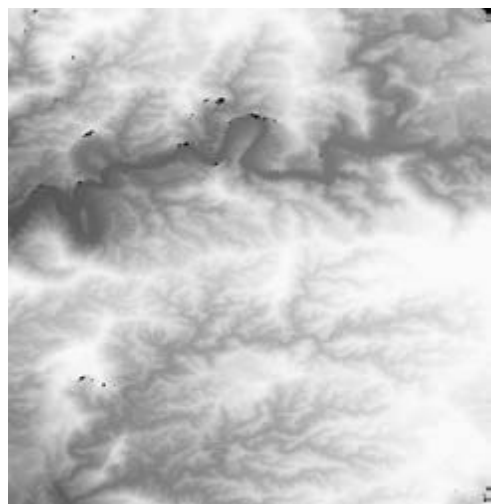
(الف)



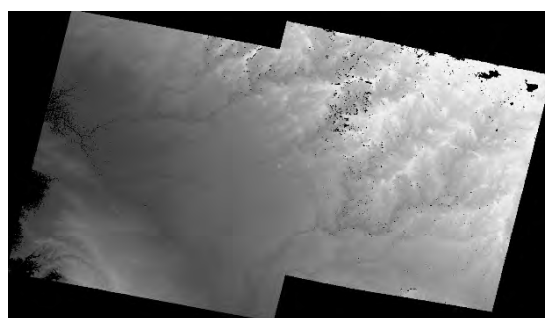
(الف)



(ب)



(ب)



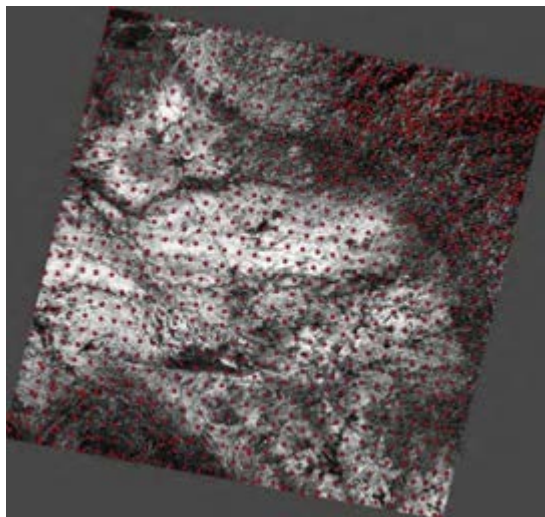
(ث)

شکل ۱۱-الف: مدل رقومی زمینی تولید شده پس از مرحله تولید گرید منظم برای زوج تصویر اول، ب: مدل رقومی زمینی تولید شده پس از مرحله تولید گرید منظم برای زوج تصویر دوم، ث: مدل رقومی زمینی تلفیقی تولید شده برای زوج تصاویر اول و دوم

شکل ۱۲-الف: بخشی از مدل رقومی زمینی تولیدی به همراه یکسری مناطق خالی، ب: ترمیم مدل رقومی زمینی با تلفیق اطلاعات زوج تصاویر اول و دوم در منطق مشترک آن ها

همانطور که در شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب مشاهده می شود در محدوده مشترک بین دو زوج تصاویر، یکسری از

به منظور بررسی دقت مدل رقومی زمینی تولید شده حدود ۱۲۰۰ نقطه کنترل زمینی در محدوده پوشش زمینی تصویر اولیه با دقت بالا و به صورت استریو از نقشه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ قرائت گردید (شکل ۱۴) و برای هر نقطه کنترل مقدار ارتفاع قرائت شده در آن نقطه با ارتفاع مدل رقومی زمینی تولیدی مقایسه گردید که نتایج حاصل در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۴- نقاط کنترل زمینی قرائت شده برای بررسی دقت مدل رقومی زمینی تولیدی

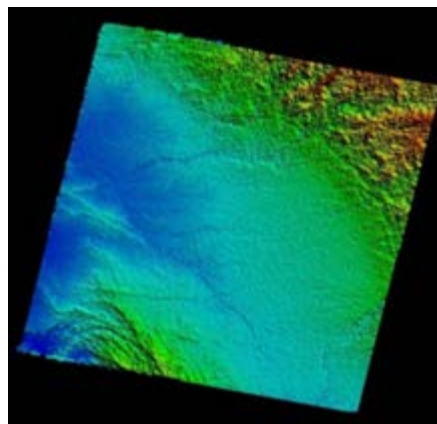
جدول ۱- نتایج حاصل از ارزیابی دقت مدل رقومی زمینی تولیدی (مقایسه ارتفاع نقاط کنترل قرائت شده و ارتفاع پیکسل متناظر در مدل رقومی زمینی تولیدی)

| بیشترین مقدار اختلاف ارتفاعات (m) | کمترین مقدار اختلاف ارتفاعات (m) | انحراف معیار اختلاف ارتفاعات | میانگین اختلاف ارتفاعات (m) |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| ۵,۷۹                              | -۴,۹۰                            | ۱,۸۳                         | ۰,۸۶                        |

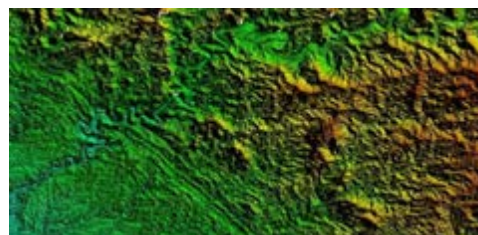
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی به منظور تولید اتوماتیک مدل رقومی زمینی از زوج تصاویر ماهواره‌ای بر پایه انجام تناظریابی استریوی متراکم بین زوج تصاویر با استفاده از الگوریتم SGM و سپس بازسازی و ترمیم تصویر عمق تولیدی ارائه شد.

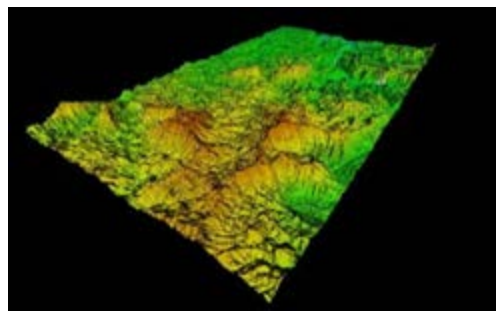
نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی نشان دهنده دقت بسیار بالا و صحت مناسب روش فوق در تولید مدل‌های رقومی زمینی است به گونه‌ای که می‌توان



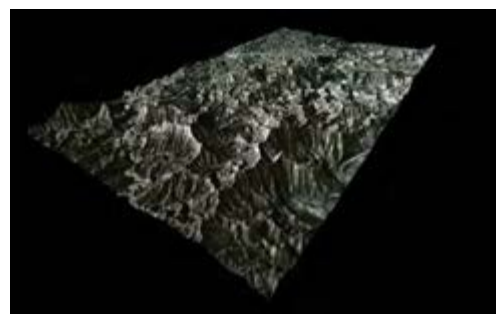
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۱۳- الف: مدل رقومی زمینی تولید شده برای زوج تصویر اول، ب: بخشی از مدل رقومی زمینی تولید شده در محدوده کوهستانی منطقه، پ: بخشی از مدل رقومی زمینی تولید شده در محدوده کوهستانی منطقه در ۳ بعد، ت: بخشی از مدل رقومی زمینی تولید شده در محدوده کوهستانی منطقه در ۳ بعد که مقادیر خاکستری تصویر اولیه روی آن قرار گرفته‌اند.



آورد ضمن اینکه اعتماد پذیری به نتایج حاصله بیشتر شده و اشتباهات احتمالی نیز از مدل رقومی زمینی تولیدی حذف خواهند شد. بنابراین در صورت استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با زوایای دید مختلف به کمک روش پیشنهادی می‌توان هم میزان نواحی خالی باقیمانده در مدل رقومی زمینی تولیدی را کاهش داد و هم امکان حذف اتوماتیک اشتباهات فراهم می‌شود و هم میزان اعتماد پذیری به نتایج حاصل از پیاده سازی بیشتر خواهد شد.

گفت این روش جدید را می‌توان جایگزین تکنیک‌های جدید تولید مدل‌های رقومی زمینی مانند لایدار نمود. سرعت بالای پردازش و زمانبر نبودن آن و دقت و کیفیت بالای مدل رقومی زمینی تولید شده از مزایای عمده روش پیشنهادی می‌باشند به گونه‌ای که می‌توان گفت این روش می‌تواند در پروژه‌های بزرگ تولید مدل رقومی زمینی در مقیاس وسیع مورد استفاده فراوان قرار گیرد. همچنین با تلفیق اطلاعات زوج تصاویر پوشش دار دیگر در این روش می‌توان دقت و کیفیت بالاتری را به دست

## مراجع

- [1] Paola Capaldo, Mattia Crespi, Francesca Fratarcangeli, Andrea Nascetti and Francesca Pieralice (2012) DSM generation from high resolution imagery. DICEA - Area di Geodesia e Geomatica, Università di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana 18 00184 - Rome, Italy.
- [2] e Zhu , Matthias Butenuth & Pablo d'Angelo<sup>2</sup> (2012) Efficient dense stereo matching using CUDA, The Remote Sensing Technology Institute, German Aerospace Center, DLR, Germany.
- [3] G. Büyüksaliha, I. Baza, M. Alkanb, K. Jacobsenc (2012), DEM GENERATION WITH WORLDVIEW-2 IMAGES, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- [4] Ke Zhu, Pablo d'Angelo and Matthias Butenuth (2012), Evaluation of Stereo Matching Costs on Close Range, Aerial and Satellite Images, The Remote Sensing Technology Institute, German Aerospace Center, Germany.
- [5] Xing Mei, Xun Sun, Mingcai Zhou, Shaohui Jiao, Haitao Wang, Xiaopeng Zhang (2011), On Building an Accurate Stereo Matching System on Graphics Hardware, Samsung Advanced Institute of Technology, China Lab.
- [6] Kaveh Deilami (2011), Very High Resolution Optical Satellites for DEM Generation: A Review, European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.49 No.4 (2011), pp. 542-554.
- [7] Peter REINARTZ, Pablo D'ANGELO, Thomas KRAUSS, and Houda CHAABOUNI-CHOUAYAKH (2010), DSM Generation and Filtering from High Resolution Optical Stereo Satellite Data, EARSeL, 2010.
- [8] Joachim Höhle (2009), DEM Generation Using a Digital Large Format Frame Camera, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 75, No. 1, January 2009, pp. 87–93.
- [9] Heiko Hirschmuller (2007), Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, April 16, 2007.
- [10] B. Gopala Krishna, Amitabh, T P Srinivasan, P K Srivastava (2008), DEM GENERATION FROM HIGH RESOLUTION MULTI-VIEW DATA PRODUCT, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008.
- [11] Pablo d'Angelo, Manfred Lehner, Thomas Krauss, Danielle Hoja and Peter Reinartz (2008), TOWARDS AUTOMATED DEM GENERATION FROM HIGH RESOLUTION STEREO SATELLITE IMAGES, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing 2008.

- [12] Taejung Kim, Sooahm Rhee, DEM GENERATION FROM HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES THROUGH A NEW 3D LEAST SQUARES MATCHING ALGORITHM, Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-Dong, Namgu, Incheon Korea.
- [13] Pablo d'Angelo, Peter Schwind, Thomas Krauss, Frithjof Barner and Peter Reinartz, 2009, AUTOMATED DSM BASED GEOREFERENCING OF CARTOSAT-1 STEREO SCENES.
- [14] Heiko Hirschmuller, 2006, Stereo Vision in Structured Environments by Consistent Semi-Global Matching, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), New York, NY , USA, June 17-22, 2006.