

# تولید و محاسبه مدل ریاضی سه بعدی تصاویر اپی پولار ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا با استفاده از مدل های رشنال

فرزانه دادرس جوان<sup>۱\*</sup>، آلاله فلاح<sup>۲</sup>، حمید محمدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فتوگرامتری- گروه مهندسی نقشه برداری- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

fdadrasjavan@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور- گروه مهندسی نقشه برداری- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

{alaleh.fallah, hamid.mohammadi}@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۱، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۲)

## چکیده

مدلسازی و تولید تصاویر اپی پولار با هدف تولید تصاویر نرمالی که در آنها نقاط متناظر در امتداد سطرهای یکسان قرار گرفته اند، در کاربردهایی که به تناظریابی تصاویر وابسته می باشند، نقشی کلیدی داشته و موجب افزایش کارایی، دقت و سرعت آنها می گردد. از مهمترین این کاربردها می توان به مثلث بندی هوایی، تولید تصاویر متناظر، تولید مدل رقومی و تصاویر اورتو اشاره نمود. در مورد دو مثال آخر و به ویژه تولید مدل های رقومی در سال های اخیر با مطرح شدن روش های تولید مدل های رقومی متراکم و تناظریابی متراکم تصاویر و به ویژه تولید تصاویر اپی پولار جایگاه ویژه ای خواهد داشت.

در این میان تصاویر ماهواره ای دارای ساختار آرایه ای به عنوان یکی از مهمترین منابع تولید مدل های رقومی مطرح می باشند. با توجه به پیچیدگی هندسه این تصاویر، تولید تصاویر اپی پولار آنها با مشکلاتی همراه می باشد و در حقیقت می توان گفت هندسه مطرح در این سنجنده ها به جای خط مستقیم، منحنی اپی پولار تولید می کند. در این تحقیق روشی مبتنی بر تولید منحنی های اپی پولار به صورت تکه ای<sup>۱</sup> با استفاده از ضرایب رشنال آدر تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان از بالا بودن دقت حاصل از این روش در تولید تصاویر اپی پولار دارند. هم چنین ضرایب رشنال برای تصویر تولید شده با استفاده از گرید زمینی تخمین زده شد که ارزیابی های انجام شده دقت بالای روش ارائه شده را تایید می نماید.

**واژگان کلیدی:** تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا، هندسه اپی پولار، ضرایب رشنال

\* نویسنده رابط

۱ Piecewise Epipolar resampling

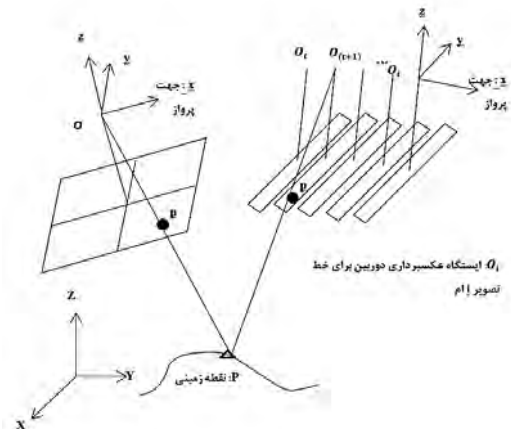
۲ Rational Polynomial coefficients

## ۱- مقدمه

تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا بدون شک یکی از منابع مهم تولید مدل رقومی زمین هستند. با توجه به قدرت تفکیک بالای این تصاویر، تولید مدل های رقومی مترامک از آنها در سال های اخیر به شدت مطرح شده و مورد استفاده و توجه جامعه فتوگرامتری قرار گرفته است.

در تولید مدل های رقومی مترامک، تناظر یابی مترامک نقاط بسیار ضروری بوده و می توان آن را از مهمترین مراحل در تولید این مدل ها دانست. از سوی دیگر تولید تصاویر اپی پولار به عنوان یکی از عمده مراحل در تناظریابی اتوماتیک و مترامک تصاویر بوده که با کاهش فضای جستجو کمک شایانی به سرعت و دقت الگوریتم های تناظریابی می نماید.

از آن جا که در اکثر ماهواره های با قدرت تفکیک بالا هندسه تصویربرداری از نوع آرایه خطی است و با هندسه تصویربرداری دوربین های هوایی که بر مبنای فریم هستند، بسیار متفاوت است، این تفاوت بر قراری هندسه اپی پولار در تصاویر ماهواره ای را با مشکل مواجه می سازد [۱]. شکل (۱) تفاوت هندسه تصاویر در دوربین های بر مبنای فریم و دوربین های آرایه خطی را نشان می دهد. بر این اساس مشاهده می شود که معادلات مورد نیاز در برقراری هندسه اپی پولار آرایه خطی ماهواره ای با روش های معمول و مرسوم در سیستم های هوایی فریم متفاوت می باشد.



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

همانطور که از شکل (۱) پیداست، در دوربین های دارای ساختار فریم هر تصویر، تنها یک مرکز تصویر دارد، در حالی که در دوربین های آرایه خطی، هر آرایه تصویر مرکز تصویر مجزا دارد.

از طرف دیگر امروزه در ارتباط با بیشتر تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا اطلاعاتی از ویژگی ها و پارامترهای هندسی این سنجنده ها موجود نبوده و در نتیجه محدودیت در مدلسازی فیزیکی آنها از دیگر عوامل مشکل ساز در مسیر ایجاد تصاویر اپی پولار از این سنجنده ها می باشد.

تولید تصاویر اپی پولار با هدف تولید تصاویر تصحیح شده که در آن ها پارالاکس  $x$  در جهت محور تصویر برداری و متناسب با ارتفاع زمینی و پارالاکس  $y$  برابر صفر است، شرایط مفیدی را در تناظریابی اتوماتیک تصاویر، تولید مدل رقومی زمین و اندازه گیری های استریو ایجاد می کند [۲]، [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]، [۸].

در سال های اخیر تحقیقات مختلفی در راستای تولید و مدلسازی تصاویر اپی پولار انجام شده است. در این میان از جمله ایده های مطرح و پیش رو استفاده از تبدیل نگاشت موازی<sup>۱</sup> است [۹]، [۱۰]، [۱۱]. همچنین مدل سازی و تولید تصاویر اپی پولار مبتنی بر تبدیل نگاشت موازی برای اپی پولار کردن همراه با تولید مدل رقومی ارتفاعی از تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک مکانی بالا در تعدادی از تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است [۷]، [۱۲]. در این روش با توجه به ساختار سیستم های خطی ماهواره و با اعمال تصحیحاتی، هندسه تصاویر را به هندسه پارالل<sup>۲</sup> منتقل کرده و به کمک روابط فیزیکی مطرح برای این سیستم ها، هندسه اپی پولار ایجاد می گردد. مشکل مطرح در ارتباط با این روش، پیچیدگی های مدلسازی هندسی و هم چنین وابستگی دقت به ارتفاع زمینی نقطه می باشد.

در تحقیق پیش رو روشی در مدلسازی اپی پولار تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا بر اساس استفاده از ضرایب رشنال مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از ضرایب رشنال برای این موضوع بر این اساس است که این ضرایب در عین حال که محدودیت وابستگی به اطلاعات

<sup>۱</sup> Parallel Projection Trajectory

<sup>۲</sup> Parallel Geometry

$$u = \begin{bmatrix} 1 & V & U & W & VU & VW & UW & V^2 \\ U^2W^2 & UVW & V^3 & VU^2 & VW^2 & & & \\ V^2U & U^3UW^2V^2W & U^2W & W^3 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$a = [a_1 a_2 \dots a_{20}] \quad (4)$$

$$b = [1 \ b_2 \dots b_{20}] \quad (5)$$

$$c = [c_1 c_2 \dots c_{20}] \quad (6)$$

$$d = [1 \ d_2 \dots d_{20}] \quad (7)$$

که در آنها:

$X, Y$ : مختصات عکسی نرمال شده

$U, V, W$ : مختصات نرمال شده نقطه زمینی

$\varphi, \lambda, h$ : عرض جغرافیایی،  $\lambda$  طول جغرافیایی و  $h$  ارتفاع

از بیضوی مربوط به نقطه زمینی

$l, s$ : مختصات سطر تصویر وستون تصویر

$\varphi_0, \lambda_0, h_0, L_0, S_0$ : شیفت عرض جغرافیایی، طول

جغرافیایی، ارتفاع، سطر تصویر وستون تصویر

$\varphi_s, \lambda_s, h_s, L_s, S_s$ : مقیاس عرض جغرافیایی، طول

جغرافیایی، ارتفاع، سطر تصویر وستون تصویر [۱۳]

## ۲-۲- معادلات معکوس رشنال

این فرم معادلات انتقال از فضای تصویری ( $l, s$ ) به فضای زمین با ارتفاع مشخص ( $h$ ) را بیان می کند. با توجه به فرم غیر خطی معادلات رشنال برای حل این معادلات باید از روش های خطی سازی مانند بسط معادلات به سری تیلور استفاده نمود. همچنین برای برآورد مقادیر اولیه مختصات مسطحاتی زمینی می توان از ترم های درجه یک با در نظر نگرفتن ترم های با درجه بالاتر در معادلات رشنال استفاده نمود (روابط ۸ و ۹) [۱۳].

$$\begin{cases} Y = \frac{a_1 + a_2 V^0 + a_3 U^0 + a_4 W}{b_1 + b_2 V^0 + b_3 U^0 + b_4 W} \\ X = \frac{c_1 + c_2 V^0 + c_3 U^0 + c_4 W}{d_1 + d_2 V^0 + d_3 U^0 + d_4 W} \end{cases} \quad (8)$$

سنجنده ماهواره را ندارند، در محدوده ارتفاعی معین، تفاوت ناچیزی میان مدل های فیزیکی<sup>۱</sup> و مدل توابع رشنال<sup>۲</sup> وجود دارد و می توانند جایگزین دقیقی برای این مدل ها باشند. در عین حال اکثر سنجنده ها امروزه همراه با ضرایب رشنال ارائه شده و مورد استفاده قرار می گیرند.

## ۲- معادلات چند جمله ای رشنال

استفاده از معادلات رشنال سه بعدی در مدلسازی تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا از چند دهه اخیر مطرح شده و مورد استقبال شدید قرار گرفته است. به طوریکه امروزه کمتر تصویر ماهواره ای با اطلاعات ریگورس سنجنده ارائه شده و اغلب تصاویر به همراه فایل ضرایب رشنال در اختیار مصرف کنندگان قرار داده می شود. علت این امر را می توان در سادگی استفاده از این مدل ها و در عین حال کمک به حفظ اطلاعات فیزیکی سنجنده ها دانست که برای تولیدکنندگان بسیار حائز اهمیت می باشد. با توجه به آنکه در روند پیشنهاد شده برای تولید تصاویر اپی پولار فرض بر در اختیار داشتن و استفاده از ضرایب رشنال می باشد، در ادامه به مرور مختصری از این مدلها و نحوه مدلسازی تصاویر به کمک آنها اشاره شده است.

## ۲-۱- معادلات مستقیم رشنال

فرم مستقیم معادلات رشنال که انتقال از فضای زمینی به تصویر را بیان می کند به صورت رابطه (۱) می باشد.

$$Y = \frac{a^T u}{b^T u}, X = \frac{c^T u}{d^T u} \quad (1)$$

اجزای این معادله طبق روابط (۲) تا (۷) تعیین می-شوند.

$$\begin{cases} U = \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_s}, V = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_s}, W = \frac{h - h_0}{h_s} \\ Y = \frac{l - L_0}{L_s}, X = \frac{s - S_0}{S_s} \end{cases} \quad (2)$$

<sup>۱</sup> rigorous

<sup>۲</sup> Rational Functional Model

بوده و بر این اساس نمی توان فرم واضحی برای منحنی اپی پولار تولید شده برای آن ها در نظر گرفت. در ادامه نگاه مختصری به تفاوت موجود میان هندسه اپی پولار تصاویر فریم و خطی داشته و روشی پیشنهادی در تولید آن ها مطرح می گردد.

### ۳-۱- منحنی های اپی پولار در تصاویر آرایه خطی در قیاس با تصاویر فریم

برای تولید منحنی اپی پولار از یک زوج تصویر می توان از معادلات مستقیم<sup>۱</sup> و معکوس<sup>۲</sup> رشنال با تغییر ارتفاع زمینی استفاده نمود. چنانکه در شکل (۲) نشان داده شده است، نقطه p در تصویر چپ با معادلات معکوس رشنال به نقطه زمینی با ارتفاعی مشخص منتقل می شود. سپس نقطه زمینی حاصل با استفاده از معادلات مستقیم رشنال به تصویر راست انتقال می یابد. با تغییر ارتفاع زمینی و تکرار پروسه قبل نقاط عکسی متفاوتی حاصل می شود. نقاط حاصل میان  $q_1$  و  $q_2$  در تصویر راست، منحنی اپی پولار را برای نقطه تصویری p تشکیل می دهند. به صورت مشابه نقاط تصویری چپ میان  $p'$  و  $p''$  از نقطه  $q_1$  در تصویر راست تعیین شده اند و نقاط میان  $p$  و  $p''$  از نقطه  $q_2$  در تصویر راست ایجاد شده اند.

در مورد تصاویر آرایه خطی بر خلاف تصاویر دوربین های بر مبنای فریم، خطوط اپی پولار مستقیم نیستند و ممکن است برای کل تصویر موجود نباشند. در حقیقت می توان گفت برای این تصاویر به جای خط با منحنی های اپی پولار مواجه هستیم.

$$\begin{bmatrix} V^0 \\ U^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Yb_2 - a_2 & Yb_3 - a_3 \\ Xd_2 - c_2 & Xd_3 - c_3 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} a_1 + (a_4 - Yb_4)W - Yb_1 \\ c_1 + (c_4 - Xd_4)W - Xd_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

در نهایت و با محاسبه مقادیر اولیه مختصات مسطحاتی زمینی، خطی سازی معادلات رشنال با در نظر گرفتن مختصات زمینی نرمال شده  $(V, U)$  طبق معادلات رابطه (۱۰) امکان پذیر است [۱۳].

$$\begin{cases} Y = Y^0 + \frac{\partial Y}{\partial V} |^0 dV + \frac{\partial Y}{\partial U} |^0 dU \\ X = X^0 + \frac{\partial X}{\partial V} |^0 dV + \frac{\partial X}{\partial U} |^0 dU \end{cases} \quad (10)$$

که در آن داریم:

$$Y^0 = \frac{a^T u^0}{b^T u^0}, X^0 = \frac{c^T u^0}{d^T u^0} \quad (11)$$

$$u^0 = [1 \quad V^0 U^0 \quad W \quad V^0 U^0 \quad V^0 W \quad U^0 W \quad (V^0)^2 (U^0)^2 \quad W^2 U^0 V^0 W \quad (V^0)^3 \quad V^0 (U^0)^2 V^0 W^2 \quad (V^0)^2 W \quad (U^0)^2 W \quad W^3]^T \quad (12)$$

برای بیان ضرایب در معادله (۱۰) از قوانین مشتقات زنجیره ای استفاده می شود. سپس مختصات زمینی برای هر نقطه از طریق معادله (۱۳) محاسبه می شود [۱۳].

$$\begin{bmatrix} dV \\ dU \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y}{\partial V} |_{V=V^0} & \frac{\partial Y}{\partial U} |_{U=U^0} \\ \frac{\partial X}{\partial V} |_{V=V^0} & \frac{\partial X}{\partial U} |_{U=U^0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y - Y^0 \\ X - X^0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

و در پایان و طی فرآیندی تکراری مختصات نهایی زمینی برای نقطه مورد نظر محاسبه می شود [۱۳].

$$\begin{bmatrix} V \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V^0 \\ U^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dV \\ dU \end{bmatrix} \quad (14)$$

### ۳- تولید منحنی های اپی پولار تصاویر ماهواره ای با استفاده از ضرایب رشنال

همانطور که پیشتر اشاره شد، تصاویر آرایه خطی بر خلاف تصاویر دارای ساختار فریم دارای هندسه داینامیک

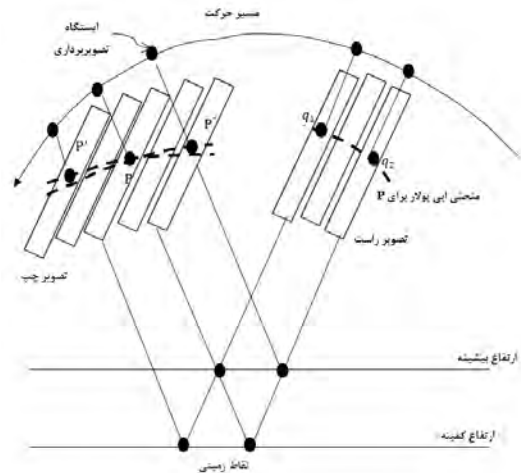
<sup>۱</sup> Forward Equations

<sup>۲</sup> Inverse Equation

خط مستقیم گذرنده از نقاط  $q_1$  و  $q_2$  و ... در تصویر حاصل می شود. همچنین خطوط مستقیم همانندی از انتقال نقاط  $q_1$  و  $q_2$  و ... به تصویر چپ ایجاد می شود. این دو خط مستقیم روی هر دو تصویر یک زوج خط اپی پولاتر را تشکیل می دهند. این در حالیست که شکل (۳-ب) نشان می دهد که این ساختار برای سنجنده آرایه خطی برقرار نمی باشد. از انتقال نقطه  $p_1$  در تصویر چپ، به روش مشابه، یک منحنی در تصویر راست ایجاد می شود (نه یک خط مستقیم) و همچنین نقاط  $q_1$  و  $q_2$  و ... در تصویر راست در امتداد منحنی، منحنی دیگری را در تصویر چپ تولید می نماید که معادل منحنی قبل نمی باشد. در حقیقت می توان گفت در این حالت زوج خط اپی پولاتر وجود ندارد.

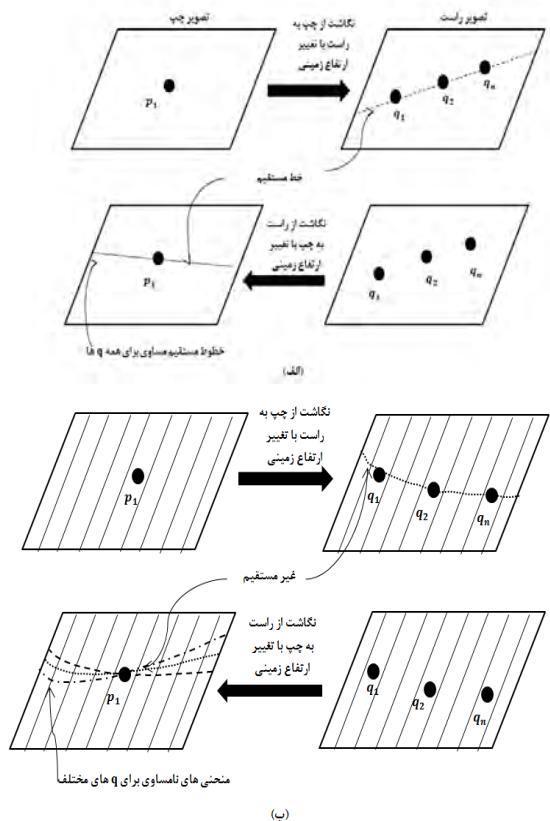
از سوی دیگر منحنی های اپی پولاتر محلی که در محدوده ارتفاعی معینی (کمتر از حد آستانه مشخص) تعیین شده اند را می توان با خطوط مستقیم تقریب زد. در این حالت می توان وجود زوج های اپی پولاتر برای نواحی محلی متصور شد. باید توجه داشت که منحنی های اپی پولاتر به شرطی می توانند برای کل تصویر وجود داشته باشند که به صورت تکه ای<sup>۱</sup> و یا محلی تولید شده باشند. شکل (۴) روش تولید منحنی اپی پولاتر به صورت تکه ای و سپس تولید تصاویر اپی پولاتر بر این اساس را نمایش می دهد.

از آن جا که در روش تکه ای آرایه ای از نقاط تصویری در امتداد منحنی اپی پولاتر برای کل تصویر تولید می شود، نقاط حاصله برای برقراری شرایط تصویر اپی پولاتر و یافتن تبدیل بین تصویر اصلی و تصویر اپی پولاتر دوباره مرتب و بازسازی می شوند. در ادامه هر یک از مراحل بیان شده در تولید تصاویر اپی پولاتر توضیح داده خواهد شد.



شکل ۲- تولید منحنی اپی پولاتر در تصویر راست از یک نقطه در تصویر چپ برای سنجنده آرایه خطی

شکل (۳) دو ویژگی خطی بودن و وجود داشتن زوج اپی پولاتر را برای دوربین بر مبنای فریم و دوربین آرایه خطی با یکدیگر مقایسه می کند.

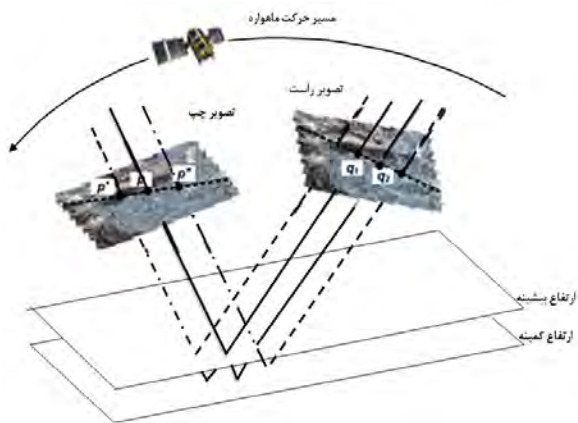


شکل ۳- مقایسه ویژگی های مهم اپی پولاتر در حالت الف) دوربین بر مبنای فریم و ب) دوربین آرایه خطی

شکل (۳-الف) ایجاد خطوط اپی پولاتر در دوربین های فریم را نمایش می دهد. از تقاطع دادن نقطه  $p_1$  در تصویر چپ با ارتفاعات مختلف و انتقال آنها به تصویر راست،

<sup>۱</sup> piecewise

زوج منحنی اپی پولار باشد. سپس این دو نقطه زمینی برای تعیین نقاط متناظر  $q_1$  و  $q_2$  با استفاده از معادلات مستقیم به تصویر راست منتقل می‌شوند. خط اپی پولار میان دو نقطه تصویری  $q_1$  و  $q_2$  با یک خط مستقیم تخمین زده می‌شود. حال با شروع از  $q_1$  و  $q_2$  در تصویر راست دو نقطه متناظر  $p'$  و  $p''$  در تصویر چپ با همان روش گفته شده ایجاد می‌شوند. بنابراین منحنی اپی پولار میان  $p'$  و  $p''$  و منحنی اپی پولار میان  $q_1$  و  $q_2$  می‌توانند نماینده ای از زوج منحنی اپی پولار در تصویر باشند. با ادامه این فرآیند آرایه ای از نقاط تصویری بر روی منحنی اپی پولار در تصویر راست و چپ ایجاد می‌شود. این نقاط زوج منحنی اپی پولار که جهت سنجنده را نشان می‌دهد، تشکیل می‌دهند. برای هر نقطه دیگری در یک تصویر، منحنی اپی پولار می‌تواند با روشی مشابه به دست آید.



شکل ۵- تولید زوج منحنی اپی پولار به روش تکه ای با استفاده از ضرایب رشنال (برای تک نقطه تصویری  $p$ )

### ۳-۳- نمونه برداری و بازسازی تصاویر اپی پولار

بر اساس ایده اشاره شده در قسمت قبل، تولید تصاویر اپی پولار را می‌توان شامل سه مرحله دانست:

- ۱) تولید نقاط منحنی اپی پولار روی کل تصویر
- ۲) مرتب کردن نقاط منحنی برای برقراری شرایط تصویر اپی پولار
- ۳) بازسازی تصاویر اپی پولار

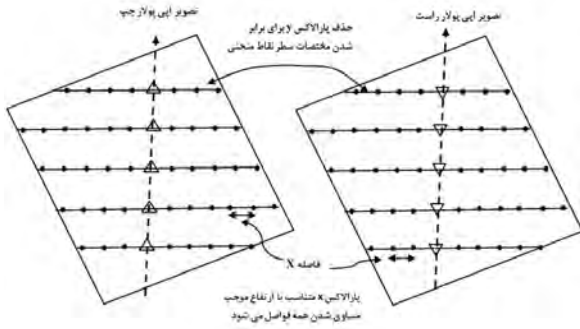
روشی که به عنوان روش تکه‌ای در تولید منحنی اپی-پولار ارائه شد، باید برای تولید منحنی اپی پولار در سراسر تصویر مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور ابتدا منحنی اپی پولار مرکز تصویر چپ با در نظر گرفتن نقطه مرکز تصویر چپ به عنوان نقطه شروع، تولید و سپس در



شکل ۴- تولید منحنی اپی پولار به روش تکه ای و تولید تصاویر اپی پولار با استفاده از ضرایب رشنال

### ۳-۲- تولید منحنی اپی پولار در تصاویر آرایه خطی

همانطور که بیان شد، زوج منحنی های اپی پولار برای نواحی محلی تعریف شده به وسیله محدوده ارتفاعی زمینی معینی وجود دارد، روشی بر مبنای تولید منحنی اپی پولار به صورت تکه ای مطابق شکل (۵) ارائه شده است. با شروع از نقطه  $p$  در تصویر چپ، برای مثال نقطه مرکزی، معادلات معکوس با در نظر گرفتن ماکزیمم و می نیمم ارتفاع روی زمین برای تعیین دو نقطه زمینی که متناظر با محل تقاطع خط مشکی پررنگ با دو صفحه زمینی در شکل (۵) است، حاصل می‌شوند. این محدوده ارتفاعات زمینی باید حداقل مساوی یا بزرگتر از محدوده ارتفاعی واقعی و به اندازه کافی کوچک برای تضمین وجود



شکل ۷- روش پیشنهادی برای ایپس پولاتر کردن تصاویر با استفاده از نقاط منحنی های ایپس پولاتر

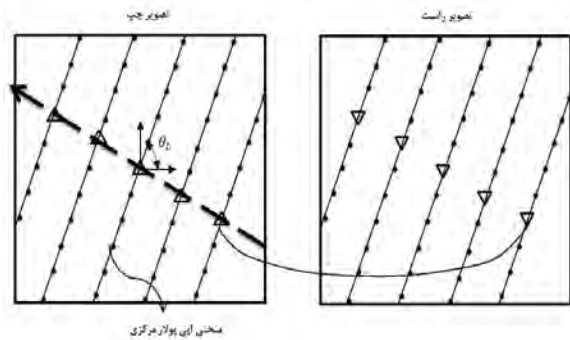
نقاطی که بر اساس شرایط ایپس پولاتر مرتب شده‌اند و نقاط قبل از مرتب سازی می‌توانند نقاط متناظر میان تصویر ایپس پولاتر شده و تصویر اولیه را تشکیل دهند. از آنجا که این نقاط به صورت یک گرید منظم در کل تصویر توزیع شده‌اند، به خوبی می‌توانند برای یافتن معادله تبدیل بین تصویر اصلی و تصویر ایپس پولاتر شده مورد استفاده قرار گیرند. برای تبدیل منحنی ایپس پولاتر در تصویر اصلی به خط ایپس پولاتر مستقیم در تصویر بازسازی شده از پلی نومیال های با مرتبه بالا (پلی نومیال مرتبه ۲ یا مرتبه ۳) استفاده می‌شود چرا که مدل های ساده مانند افاین نمی‌توانند برای تبدیل منحنی و خط مستقیم مورد استفاده قرار گیرند. ارتباط میان دو مجموعه نقطه با پلی نومیال درجه دو در رابطه (۱۵) و پلی نومیال درجه سه رابطه (۱۶) بیان شده است.

$$\begin{cases} x' = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \\ y' = b_1 + b_2x + b_3y + b_4x^2 + b_5xy + b_6y^2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} x' = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3 \\ y' = b_1 + b_2x + b_3y + b_4x^2 + b_5xy + b_6y^2 + b_7x^3 + b_8x^2y + b_9xy^2 + b_{10}y^3 \end{cases} \quad (16)$$

جهت عمود بر این منحنی نقطه شروع بعدی با انتخاب فاصله‌ای معین تعیین می‌شود و زوج منحنی های ایپس-پولاتر برای هر کدام از این نقاط شروع، به روشی که پیشتر توضیح داده شد، محاسبه می‌شوند. چیزی که این روش را ساده می‌کند آن است که مجموعه نقاط شروع روی خط عمود بر مسیر سنجنده قرار دارند و می‌توانند به عنوان محور  $y$  در نظر گرفته شوند. شکل (۶) نحوه انتخاب نقاط شروع در تصویر چپ و نقاط متناظر در تصویر راست را نمایش می‌دهد.

پس از تولید منحنی‌های ایپس پولاتر، تصاویر جهت برقراری شرط و هندسه ایپس پولاتر مدلسازی می‌شوند. برای این منظور ابتدا کلیه نقاط شروع در تصویر چپ و نقاط متناظر آن‌ها در تصویر راست در امتداد محور  $y$  قرار داده می‌شوند (شکل ۷). باید توجه داشت که منحنی های ایپس پولاتر کاملاً مستقیم نبوده و بنابراین پارالاکس  $\lambda$  کمی همچنان وجود خواهد داشت. حذف پارالاکس  $\lambda$  می‌تواند با تخصیص یک مختصات سطری (line) ثابت به هر زوج منحنی ایپس پولاتر در دو تصویر صورت گیرد. این مقدار ثابت، می‌تواند مختصات سطر نقطه مرکزی تصویر چپ در هر منحنی ایپس پولاتر باشد. برای برقراری ارتباط خطی میان پارالاکس  $x$  و ارتفاع زمینی می‌توان فاصله بین نقاط همسایه در منحنی‌های ایپس پولاتر را در هر دو تصویر ثابت و برابر میانگین کل فواصل نقاط همسایه در منحنی های ایپس پولاتر تصاویر چپ و راست در نظر گرفت.



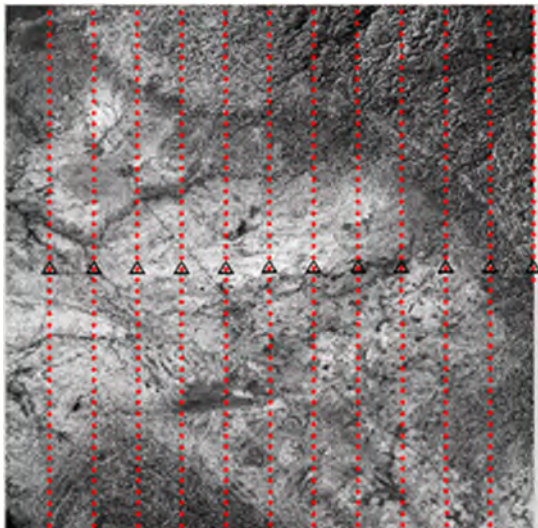
شکل ۶- تولید نقاط منحنی ایپس پولاتر به روش تکه ای در کل تصویر

#### ۴- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

تصاویر سنجنده IRSP5 در منطقه گناوه ایران برای ارزیابی روش پیشنهادی در تولید تصاویر اپی پولار انتخاب شده است. در این حالت بر اساس روش تکه ای برای زوج تصاویر این مجموعه داده تصاویر اپی پولار تولید شده‌اند.

در شکل (۹) مجموعه نقاط حاصل بر اساس روش بیان شده و بر روی منحنی های اپی پولار برای تصویر چپ و در شکل (۱۰) این نقاط بر روی تصویر راست نمایش داده شده اند. در این دو شکل نقاط حاصل بر روی منحنی های اپی پولار با رنگ قرمز و نقاط شروع این منحنی ها در تصویر چپ با مثلث های رو به بالا و در تصویر راست این نقاط شروع با مثلث های رو به پایین نمایش داده شده اند.

پس از تولید نقاط و برای برقراری شرایط هندسه اپی-پولار مشابه آنچه که در قسمت ۳-۳ اشاره شد، نقاط روی منحنی های اپی پولار در تصویر چپ در شکل (۱۱) و نقاط تصویر راست در شکل (۱۲) نمایش داده شده اند. در هر دو شکل (۱۱) و (۱۲) نقاط قرمز نقاط روی منحنی های اپی پولار هستند که به صورت خطوط مستقیم افقی با فاصله ثابت میان نقاط همسایه در هر خط مرتب شده اند.



شکل ۹- مجموعه نقاط حاصل بر روی منحنی های اپی پولار (نقاط قرمز) و نقاط شروع منحنی ها (مثلث های رو به بالا) برای تصویر چپ

در معادلات (۱۵) و (۱۶) پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند:

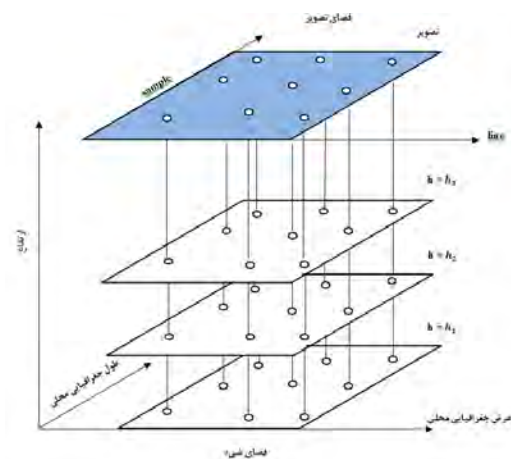
$x, y$ : مختصات نقاط متناظر در تصویر اصلی

$x', y'$ : مختصات نقاط متناظر در تصویر اپی پولار

$a, b$ : ضرایب تبدیل پلی نومیال

#### ۴-۳- مدل سازی هندسی تصاویر اپی پولار و تولید ضرایب رشنال

برای مدل سازی هندسی تصاویر اپی پولار شده جدید می بایست ضرایب رشنال آن ها برآورد شود. برای تعیین ضرایب رشنال مکعب زمینی شبکه بندی شده ای در منطقه پوشش تصاویر در نظر گرفته می شود. نقاط این گرید زمینی با استفاده از ضرایب خام رشنال به تصویر انتقال می یابند و نقاط تصویری با ضرایب پلی نومیال محاسبه شده بین تصویر اصلی و تصویر اپی پولار شده به فضای تصویر اپی پولار انتقال می یابند و بین نقاط مکعب زمینی و نقاط تصویر اپی پولار ضرایب رشنال محاسبه می شوند. در شکل (۸) نقاط کنترل زمینی در یک گرید زمینی و نقاط متناظر آن ها در فضای تصویر نشان داده شده است.



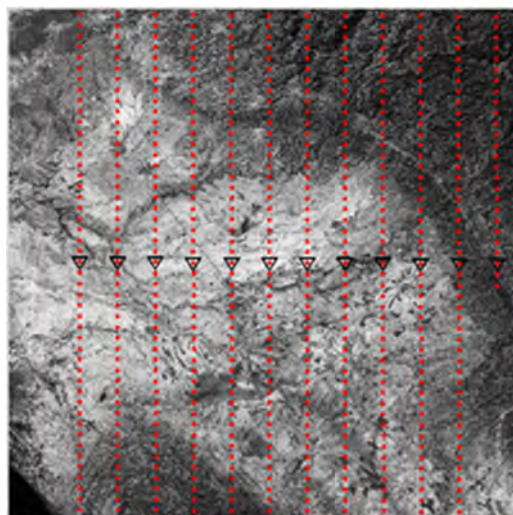
شکل ۸- نقاط کنترل زمینی در یک گرید زمینی و نقاط متناظر آن ها در فضای تصویر

برای محاسبه ضرایب رشنال و ترفیع آن ها باید از نقاط کنترلی که به خوبی توزیع شده اند، استفاده شود و ضرایب طی یک فرآیند تکراری محاسبه می شوند [۱۳].

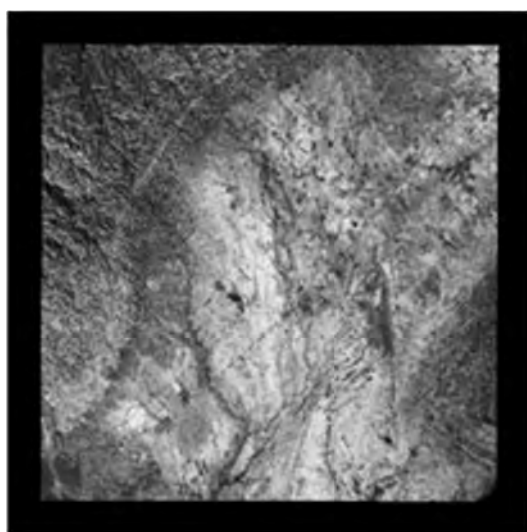


با برقراری ارتباط میان مجموعه نقاط حاصل بر روی منحنی های اپی پولار قبل از مرتب سازی و مجموعه نقاط روی خطوط اپی پولار پس از مرتب سازی با استفاده از پلی نومیال های درجه ۳ می توان تمامی پیکسل های تصویر را به تصویر اپی پولار منتقل و تصاویر اپی پولار شده نهایی را تولید نمود. شکل های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب تصاویر اپی پولار شده چپ و راست را نمایش می دهند.

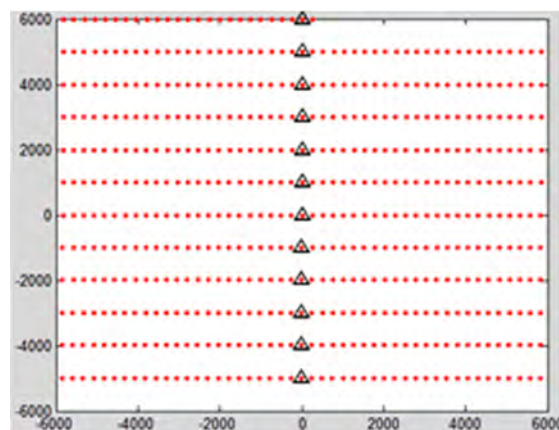
جهت نمایش بهتر و ارزیابی تصویر اپی پولار تولید شده شکل (۱۵) صفر بودن مقدار پارالاکس لارا در تصاویر اپی پولار شده به صورت آنالگراف نمایش می دهد.



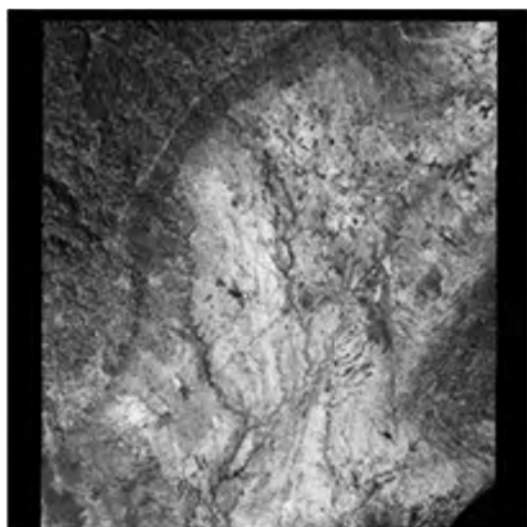
شکل ۱۰- مجموعه نقاط حاصل بر روی منحنی های اپی پولار (نقاط قرمز) و نقاط شروع منحنی ها متناظر با نقاط شروع منحنی های تصویر چپ (مثلث های رو به پایین) برای تصویر راست



شکل ۱۳- تصویر اپی پولار چپ



شکل ۱۱- نقاط حاصل در تصویر چپ و مرتب شده بر اساس شرایط اپی پولار



شکل ۱۴- تصویر اپی پولار راست



شکل ۱۲- نقاط حاصل در تصویر راست و مرتب شده بر اساس شرایط اپی پولار

	deltax	deltay
جدول ۱- میانگین خطاها در فضای دو تصویر در آزمایش اول		
تصویر راست	4.29642E-12 pixel	1.24398E-12 pixel
تصویر چپ	1.57447E-8 pixel	-1.415762E-8 pixel

#### ۴-۲- آزمایش دوم

مراحل انجام آزمایش دوم به صورت زیر است:

*a.* تولید ضرایب رشنال برای تصویر اپی پولار مورد نظر (چپ یا راست)

*b.* تعیین مکعبی از مختصات زمینی و انتقال آن به تصویر اپی پولار مورد نظر با استفاده از ضرایب رشنال محاسبه شده برای تصویر اپی پولار

*c.* انتقال تصویر اپی پولار به تصویر اصلی با استفاده از ضرایب معکوس پلی نومیال

*d.* انتقال مکعب زمینی به تصویر مورد نظر با استفاده از ضرایب رشنال تصویر

*e.* مقایسه مقادیر مرحله *d* و مرحله *c* (محاسبه اختلاف مقادیر حاصل در این دو مرحله)

میانگین خطای حاصل در این آزمایش در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول ۲- میانگین خطاها در فضای دو تصویر در آزمایش دوم

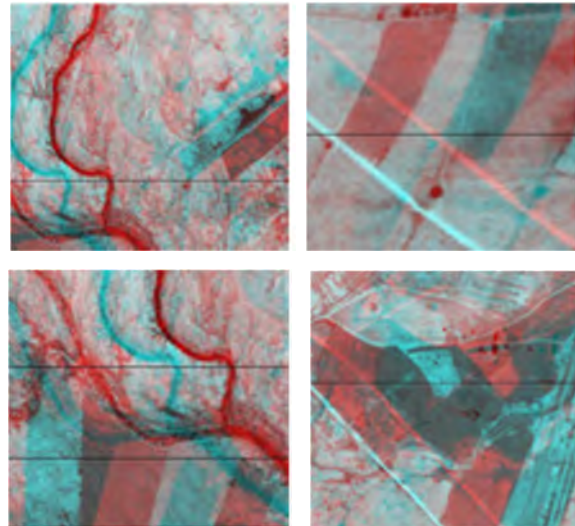
	deltax	deltay
تصویر راست	-1.27368E-5 pixel	-2.0608E-5 pixel
تصویر چپ	1.45617E-5 pixel	7.24046E-6 pixel

#### ۴-۳- آزمایش سوم

در انجام این آزمایش از هر دو تصویر چپ و راست استفاده شده و دقت مختصات زمینی محاسبه شده با استفاده از ضرایب رشنال اپی پولار مورد بررسی قرار گرفته است. مراحل این آزمایش به شرح زیر است:

*a.* تعیین مکعب زمینی مشترک بین تصاویر چپ و راست و انتقال این مختصات با ضرایب رشنال محاسبه شده برای تصاویر اپی پولار به فضای اپی پولار چپ و راست

*b.* تقاطع میان نقاط متناظر در تصاویر اپی پولار و رسیدن به مختصات زمینی مکعب با استفاده از ضرایب رشنال محاسبه شده برای تصاویر اپی پولار



شکل ۱۵- حذف پارالاکس  $\gamma$  برای نقاط تصاویر اپی پولار شده چپ و راست

پس از تولید تصاویر اپی پولار همانطور که اشاره شد، ضرایب رشنال برای این تصاویر محاسبه می شود. برای ارزیابی نتایج حاصل و بررسی دقت ضرایب رشنال در تعیین مختصات زمینی و تصویری پنج مجموعه آزمایش پیاده سازی شده که در ادامه بیان می شود.

#### ۴-۱- آزمایش اول

مراحل انجام این تست عبارتند از:

*a.* تولید ضرایب رشنال برای تصویر اپی پولار مورد نظر (چپ یا راست)

*b.* تعیین مکعبی از مختصات زمینی در محدوده پوشش تصویر و زمین و انتقال آن به تصویر مورد نظر با استفاده از ضرایب رشنال اولیه

*c.* انتقال تصویر اصلی به تصویر اپی پولار با استفاده از ضرایب مستقیم حاصل در پلی نومیال

*d.* انتقال مکعب زمینی به تصویر اپی پولار مورد نظر با استفاده از ضرایب رشنال محاسبه شده برای تصویر اپی پولار

*e.* مقایسه مقادیر مرحله *d* و مرحله *c* (محاسبه اختلاف مقادیر در این دو مرحله)

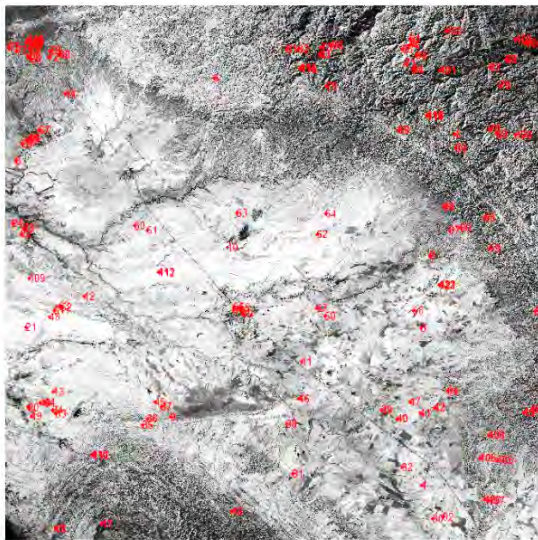
میانگین خطای حاصل از انجام این آزمایش در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۵- حداکثر اختلاف مختصات محاسبه شده برای نقاط گرید زمینی و مختصات اصلی نقاط گرید زمینی در آزمایش چهارم

	Degree	Meter
<b>deltaLambda</b>	4.95529E-6	0.483842
<b>deltaPhi</b>	1.19394E-6	0.12820
<b>deltaZ</b>	-	0.261714

#### ۴-۵- آزمایش پنجم

در این آزمایش مقایسه ای بر روی مختصات زمینی محاسبه شده از زوج نقاط متناظر در تصاویر خام و با کمک ضرایب رشنال محاسبه شده برای آنها و مختصات محاسبه شده از زوج نقاط متناظر در تصاویر اپی پولار و ضرایب رشنال برآورد شده متناظر آنها انجام شده است. شکل (۱۶) پراکندگی ۱۲۲ نقطه انتخاب شده برای این آزمون در تصویر چپ را نشان می دهد و شکل (۱۷) میزان اختلاف میان مختصات محاسبه شده از ضرایب رشنال خام و مختصات محاسبه شده از ضرایب رشنال برآورد شده برای تصاویر اپی پولار را با ضریب اغراق نشان می دهد.



شکل ۱۶- محل نقاط چک بر روی تصویر چپ

میانگین خطای حاصل در مختصات زمینی محاسبه شده (اختلاف مختصات محاسبه شده برای نقاط گرید زمینی و مختصات اصلی نقاط گرید زمینی) در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۳- اختلاف مختصات محاسبه شده برای نقاط گرید زمینی و مختصات اصلی نقاط گرید زمینی در آزمایش سوم

deltaLambda	deltaPhi	deltaZ
-0- m	-0- m	-2.68378E-13m

#### ۴-۴- آزمایش چهارم

در این آزمایش نیز همانند آزمایش شماره سه از هر دو تصویر چپ و راست استفاده شده و دقت مختصات زمینی محاسبه شده با استفاده از ضرایب رشنال اپی پولار مورد بررسی قرار گرفته است. مراحل این آزمایش عبارتند از:

- a. تولید ضرایب رشنال برای تصاویر اپی پولار راست و چپ
  - b. تعیین مکعب زمینی مشترک میان تصاویر چپ و راست و انتقال این مختصات با ضرایب رشنال تصحیح تصاویر به فضای تصاویر چپ و راست
  - c. انتقال مختصات تصویر به فضای تصویر اپی پولار با استفاده از ضرایب پلی نومیال حاصل در مرحله تولید تصویر اپی پولار
  - d. تقاطع بین نقاط متناظر در تصاویر اپی پولار و رسیدن به مختصات زمینی مکعب با استفاده از ضرایب رشنال محاسبه شده برای تصاویر اپی پولار
- میانگین خطای حاصل روی مختصات زمینی محاسبه شده (اختلاف مختصات محاسبه شده برای نقاط گرید زمینی و مختصات اصلی نقاط گرید زمینی) در این آزمایش مطابق جدول (۴) می باشد.

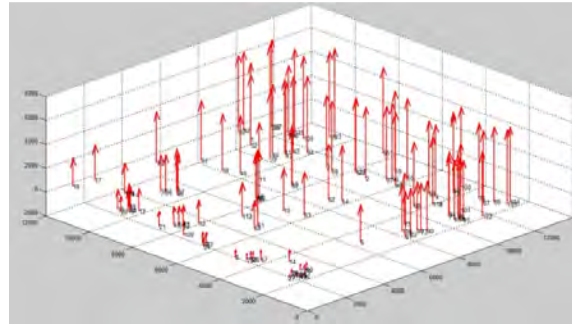
جدول ۴- میانگین اختلاف مختصات محاسبه شده برای نقاط گرید زمینی و مختصات اصلی نقاط گرید زمینی در آزمایش چهارم

	Degree	Meter
<b>deltaLambda</b>	3.24904E-7	0.032
<b>deltaPhi</b>	8.18952E-8	0.10
<b>deltaZ</b>	-	0.00817909

همچنین حداکثر خطای روی مختصات زمینی محاسبه شده مطابق مقادیر جدول (۵) است.

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق روشی برای اپی پولار کردن تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا ارائه شد که به روش تکه ای موسوم بوده و در آن زوج منحنی های اپی پولار در بخش های کوچکی از تصویر ایجاد می شوند. همانگونه که آزمون های عملی نشان دادند، این روش در اپی پولار کردن تصاویر ماهواره ای بسیار موفق عمل کرده و تصاویر اپی پولار با دقت زیر پیکسل تولید می شوند. همچنین برای تصاویر اپی پولار ضرایب رشنال جدید محاسبه شدند که آزمون ها نشان از دقت این ضرایب در حد زیر متر در محاسبه مختصات زمینی بر اساس مختصات زوج تصویر اپی پولار دارند.



شکل ۱۷- نمایش بردار خطاها با (اغراق) برای نقاط چک

در جدول (۶) میانگین و حد اکثر میزان اختلافات در سه راستای  $\Lambda$ ،  $\Phi$  و  $H$  برای این نقاط چک نشان داده شده است.

جدول ۶- میانگین و حداکثر اختلاف در مختصات زمینی در آزمون پنجم

	میانگین اختلاف	حد اکثر اختلاف
<b>Lambda</b>	0.4828m	0.5344 m
<b>Phi</b>	0.2465 m	0.2512 m
<b>H</b>	0.5487 m	1.0259 m

## مراجع

- [1] Jaehong Oh, M.S., B.S., 2011, Novel Approach to Epipolar Resampling of HRSI and Satellite Stereo Imagery-based Georeferencing of Aerial Images, The Ohio State University
- [2] Cochran, S.D., 1995. Adaptive vergence for the stereo matching of oblique imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 50(4), 21-28
- [3] Ono, T., Honmachi, Y., Ku, S., 1999. Epipolar resampling of high resolution satellite imagery. In: Proc. Joint Workshop of ISPRS WG I/1, I/3 and IV/4 Sensors and Mapping from Space, Hannover, Germany, 27-30 September. 7p (onCDROM).
- [4] Hashimoto, T., 2000. DEM generation from stereo AVNIR images. Advances in Space Research 25(5), 931-936.
- [5] Bang, K.I., Jeong, J.S., Kim, K., Cho, W., 2003. Automatic DEM generation using IKONOS stereo imagery. In: Proc. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03, Toulouse, France, 21-25 July, vol. 7, pp. 4289-4291.
- [6] Lee, H.Y., Kim, T., Park, W., Lee, H.K., 2003. Extraction of digital elevation models from satellite stereo images through stereo matching based on epipolarity and scene geometry. Image and Vision Computing 21(9), 789-796.
- [7] Morgan, M., 2004. Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes. Ph.D. Dissertation, University of Calgary, Canada, 187p.
- [8] Kornus, W., Alamús, R., Ruiz, A., Talaya, J., 2006. DEM generation from SPOT-5 3-fold along track stereoscopic imagery using autocalibration. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60(3), 147-159.

- [9] Morgan, M., Kim, K., Jeong, S., Habib, A., 2004a. Indirect epipolar resampling of scenes using parallel projection modeling of linear array scanners. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*35,(PartB3),508–513.
- [10] Morgan,M.,Kim,K.,Jeong,S.,Habib,A.,2004b. Epipolar geometry of linear array scanners moving with constant velocity and constant attitude. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*35,(PartB3),52–57.
- [11] Morgan, M., Kim, K., Jeong, S., Habib, A., 2006. Epipolar resampling of space-borne linear array scanner scenes using parallel projection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(11),1255–1263
- [12] Habib, A.F., Kim, E.M., Morgan, M., Couloigner, I., 2004. DEM generation from high resolution satellite imagery using parallel projection model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*35,(PartB1),393–398
- [13] Dial, G., and J. Grodecki (2002): Block adjustment with rational polynomial camera models, *Proceedings of the ACSM-ASPRS 2002 Annual Conference*, 22-26 April, Washington DC (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland), unpaginated CD-ROM.

