



## روشی نوین برای بازآرایی اپی پلار تصاویر با هندسه خطی پوش بروم مبتنی بر مدل مراکز تصویر چندگانه

مجتبی جنتی<sup>۱</sup>، محمدجواد ولدانزوج<sup>۲\*</sup>، علی محمدزاده<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری، پژوهشکده سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۳/۲۷

### چکیده

نتیجه فرایند بازآرایی اپی پلار، تولید تصاویر شبه نرمال است که نقاط متناظر در آنها در امتداد سطرها یا ستون‌ها قرار می‌گیرند. برخلاف تصاویر نرمال حاصل از فرایند باز نمونه برداری اپی پلار، هیچ تضمینی برای تناسب پارالاکس موازی و ارتفاع نقاط متناظر در این تصاویر وجود ندارد. با این حال، تولید تصاویر شبه نرمال می‌تواند انجام طیف وسیعی از کارهای فتوگرامتری نظیر تناظریابی، مثلث بندی هوایی خودکار، تولید مدل رقومی زمین، تولید ارتوفتو، و برجسته بینی را میسر سازد. در پژوهش حاضر، روش جدیدی مبتنی بر مدل مراکز تصویر چندگانه برای بازآرایی اپی پلار تصاویر خطی پوش بروم ارائه شد و روند بازآرایی برای دو سیستم تصویر برداری Cross Track و Along Track جداگانه بررسی گردید. اساس روش پیشنهادی، تصحیح مسیر حرکت و پارامترهای وضعیت سنجنده توسعه یافته است. از مزایای این مدل می‌توان به امکان تصحیح اثر دید غیر قائم سنجنده به سبب تعبیر پذیری فیزیکی پارامترهای مدل اشاره کرد. بر مبنای نتایج حاصل از ارزیابی دقت تصاویر شبه نرمال تولید شده به روش پیشنهادی برای یک زوج تصویر استریوی Cross Track در سطح نقاط چک، متوسط پارالاکس قائم باقی مانده در سطح مدل ۰/۹۴ پیکسل به دست آمد، که می‌تواند مؤید صحت و کارایی مدل پیشنهادی باشد.

**کلیدواژه‌ها:** فتوگرامتری، بازآرایی اپی پلار، تصویر شبه نرمال، تصاویر خطی پوش بروم، مدل مراکز تصویر چندگانه، تصحیح مسیر حرکت سنجنده.

\* نویسنده مکاتبه کننده: خیابان ولی عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گروه مهندسی سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک.

تلفن: ۰۹۱۲۱۰۵۶۸۱۱

## ۱- مقدمه

محصول، بخش عمده‌ای از پروژه‌های فتوگرامتری با استفاده از دوربین‌های رقومی انجام می‌شوند (Habib et al., 2005a). دوربین‌های فریم رقومی در قیاس با تصاویر آنالوگ اسکن‌شده قدرت تفکیک مکانی و پوشش زمینی کمتری دارند (Morgan et al., 2004a) و همین مسئله موجب ظهور دوربین‌هایی با آرایه خطی به‌عنوان جایگزینی برای دوربین‌های فریم رقومی گردید. سنجنده‌های خطی پوش‌بروم<sup>۲</sup>، مؤثرترین سنجنده‌های رقومی برای دریافت تصاویر رقومی با قدرت تفکیک مکانی بالا هستند (Valadan Zoej, 1995). افزون بر این، با افزایش تعداد خطوط تصویربرداری در امتداد صفحه کانونی نیز می‌توان به پوشش زمینی وسیع‌تری دست یافت (Fritz, 1995). در این شیوه تصویربرداری در هر لحظه فقط یک سطر از صحنه که به‌لحاظ نظری بیشترین قدرت تفکیک مکانی ممکن را دارد، در راستای عمود بر حرکت سنجنده دریافت می‌شود و با حرکت سنجنده پوششی پیوسته از مناطق مختلف، یک پهنه با دریافت نوارهای باریک متوالی فراهم می‌آید (Kornus et al., 1995; Fraser & Shao, 1996). با توجه به اینکه در این شیوه تصویربرداری پارامترهای توجیه خارجی از هر سطر به سطر دیگر تغییر می‌کنند، هندسه این تصاویر بسیار پیچیده‌تر از تصاویر فریم خواهد بود (Heipke et al., 1996; Valadan Zoej, 1997; Lee et al., 2000).

فرایند نرمال‌سازی تصاویر فریم، اصول شناخته‌شده و مشخصی دارد (Cho et al., 1992)، اما با توجه به پیچیدگی‌های هندسه تصاویر خطی و تنوع مدل‌های ریاضی استفاده‌شده در تصحیح هندسی این تصاویر، تا کنون روند مشخصی برای بازنمونه‌برداری اپی‌پلار<sup>۳</sup> تصاویر خطی پوش‌بروم پذیرفته نشده است. در

ظهور تصاویر رقومی و پیشرفت پیوسته ایستگاه‌های کاری فتوگرامتری رقومی، بر نمایش سه‌بعدی تصاویر استریو تأثیر فراوانی گذاشته است (Habib et al., 2005b). تجهیزات نوری به‌کار گرفته‌شده در استریوپلاترها برای استفاده یک کاربر طراحی شده‌اند و ایجاد تغییر در آنها به‌منظور افزودن تعدادی عدسی چشمی اضافی اگر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار و پرهزینه است (Mikhail et al., 2001). ایستگاه‌های کاری فتوگرامتری رقومی با فراهم‌آوردن امکان مشاهده هم‌زمان یک مدل سه‌بعدی برای چند کاربر، مزیتی ویژه دارند. این قابلیت با پیش‌پردازش تصاویر رقومی ورودی و تولید تصاویر نرمال - که براساس هندسه اپی‌پلار بازنمونه‌برداری شده‌اند - فراهم می‌آید (Schenk, 1999; Mikhail et al., 2001). در تصاویر نرمال، از یک سو نقاط متناظر عکس در راستای یک سطر یا ستون قرار می‌گیرند و فاقد پارالاکس قائم بر باز هوایی<sup>۱</sup> هستند و از سوی دیگر، پارالاکس موازی با باز هوایی در آنها با ارتفاع نقطه متناظر زمینی متناسب است. از این‌رو، تصاویر نرمال افزون بر بهبود قابلیت برجسته‌بینی، در تولید سایر محصولات فتوگرامتری نیز سودمندند. به‌عنوان مثال، این ویژگی که نقاط متناظر فاقد پارالاکس قائم هستند، می‌تواند در کاهش فضای جست‌وجو در فرایند تناظریابی خودکار تصاویر به‌کار آید (Pollard et al., 1985; Zhang et al., 1995). کاهش فضای جست‌وجو موجب افزایش کارایی و استحکام فرایند تناظریابی می‌شود و این امر نیز به‌نوبه خود بر سایر فعالیت‌های فتوگرامتری مرتبط - نظیر مثلث‌بندی خودکار و تولید مدل رقومی ارتفاعی - تأثیر مثبت می‌گذارد (Morgan, 2004).

تصاویر رقومی را می‌توان به‌عنوان ورودی محیط‌های کاری فتوگرامتری رقومی، به دو روش مستقیم با استفاده از یک دوربین تصویربرداری رقومی، و غیرمستقیم با اسکن تصاویر آنالوگ تولید کرد. به‌منظور کاهش بازه زمانی دریافت تصویر تا تحویل

1. Air base
2. Linear Pushbroom Sensors
3. Epipolar resampling

دقت‌هایی بالاتر در مقایسه با مدل‌های غیرفیزیکی، در پژوهش حاضر این شیوه مدل‌سازی مدنظر است. بر این اساس، با مبنا قرار دادن مدل گوپتا و هارتلی<sup>۵</sup> (۱۹۹۷) و نیز با در نظر داشتن شرایط لازم برای دستیابی به خطوط اپی پلار مستقیم که از بررسی مورگان و دیگران (۲۰۰۴b) به دست آمد، روشی برای بازآرایی اپی پلار<sup>۶</sup> تصاویر خطی پوش بروم در هر دو سیستم تصویربرداری Cross Track و Along Track پیشنهاد شد.

در بخش دوم نوشتار حاضر، مبانی نظری مورد نیاز ارائه می‌شود. در بخش سوم، پس از معرفی داده‌های مورد استفاده، روش پیشنهادی مطرح می‌گردد. نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی در بخش چهارم ارائه خواهند شد. بحث و بررسی در خصوص نتایج و پیشنهادها مطرح شده در خصوص مطالعات آتی، موضوع بخش پنجم خواهد بود.

## ۲- مبانی نظری

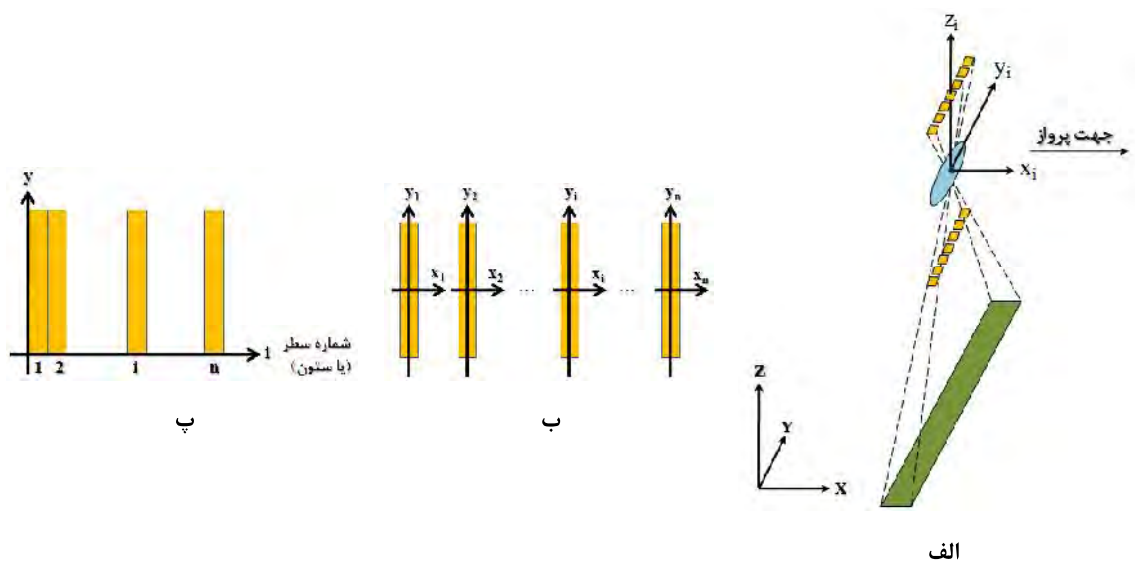
### ۲-۱- تصویربرداری خطی پوش بروم

تفاوت اساسی تصاویر فریم و تصاویر خطی پوش بروم در این است که تصاویر فریم، مرکز تصویر مشخص و ثابتی دارند، در حالی که هر سطر از تصاویر خطی دارای یک مرکز تصویر است (شکل ۱- الف). در نتیجه نمی‌توان برای این نوع تصاویر صفحه تصویر تعریف کرد (Kim, 2000). در واقع تصاویر خطی پوش بروم از چندین خط جارویی متوالی تشکیل شده‌اند (شکل ۱- ب و پ)، که مراکز تصویر و زوایای دوران از هر خط به خط دیگر متفاوت است.

طبقه‌بندی کلی، مدل‌های ریاضی استفاده شده در تصحیح هندسی تصاویر خطی در دو دسته مدل‌های فیزیکی و غیرفیزیکی قرار می‌گیرند و پیش از ورود به مرحله نرمال‌سازی لازم است در مورد گزینش مدل مناسب تصمیم‌گیری شود (McGlone, 1996). در پژوهشی، کیم<sup>۱</sup> (۲۰۰۰) با استفاده از مدل مراکز تصویر چندگانه و فرض ثابت بودن پارامترهای وضعیتی roll و pitch و مدل‌سازی پارامترهای موقعیتی و پارامتر وضعیتی yaw با استفاده از چند جمله‌ای‌های درجه دو (Orun & Natarajan, 1994)، هندسه اپی پلار تصاویر خطی را بررسی کرد. بر اساس نتایج این تحقیق، خطوط اپی پلار حاصل از چنین مدلی هندلولی شکل بود. در پژوهش دیگری، با فرض وضعیت ثابت و حرکت خطی سنجنده در بازه زمانی دریافت تصویر، مدل ساده شده‌ای برای مدل‌سازی تصاویر پوش بروم پیشنهاد شد، که شکل خطوط اپی پلار بازسازی شده آن نیز هندلولی بود (Gupta & Hartly, 1997). مورگان<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) با استفاده از مدل افاین سه بعدی به باز نمونه برداری اپی پلار تصاویر خطی پرداخت. در پژوهشی دیگر، مورگان و دیگران (۲۰۰۴b) عوامل مؤثر بر شکل منحنی‌های اپی پلار حاصل از سنجنده‌ای با وضعیت و سرعت ثابت را بررسی کردند. بر اساس نتایج تحقیق آنان، شکل عمومی منحنی‌های اپی پلار حاصل هندلولی بود. مورگان و همکارانش در آن تحقیق، شرایط مختص مورد نیاز برای دستیابی به خطوط اپی پلار مستقیم را نیز بررسی کردند. ژاو<sup>۳</sup> و دیگران (۲۰۰۸) با استفاده از مدل توابع کسری به بازیابی خطوط اپی پلار تصاویر خطی پرداختند. در نهایت، وانگ<sup>۴</sup> و دیگران (۲۰۱۱) با تصویر کردن خطوط اپی پلار بر یک صفحه مرجع در فضای شیئی، با استفاده از مدل توابع کسری به باز نمونه برداری اپی پلار تصاویر خطی پوش بروم پرداختند.

با توجه به قابلیت ذاتی مدل‌های فیزیکی در تأمین

1. Kim
2. Morgan
3. Zhao
4. Wang
5. Gupta & Hartly
6. Epipolar Re-Arrangement



شکل ۱. هندسه هر سطر از تصاویر خطی، پرسپکتیو (الف)؛ مجموعه‌ای از تصاویر یک‌بعدی (ب)؛ یک صحنه کامل (پ)

چندجمله‌ای‌های زمانی برآورد می‌گردد (Kratky, 1987; Shibasaki et al., 1988; Ganguly, 1991; Orun & Natarajan, 1994; Gupta & Hartley, 1997; Kim, 2000; Lee et al., 2000; Habib et al., 2005b). این مدل‌ها به‌طور عام مدل مراکز تصویر چندگانه خوانده می‌شوند.

## ۲-۲- مدل مراکز تصویر چندگانه

در مدل مراکز تصویر چندگانه معادلات، شرط هم‌خطی اساس مدل‌سازی است و موقعیت و وضعیت لحظه‌ای سنجنده در بازه زمانی دریافت تصویر به‌کمک چندجمله‌ای‌هایی نسبت به زمان مدل‌سازی می‌شوند (رابطه ۱) (Kratky, 1987).

رابطه (۱)

$$\begin{pmatrix} x=0 \\ y \\ -c \end{pmatrix} = \lambda \times R_3(\kappa(t)) \times R_2(\varphi(t)) \times R_1(\omega(t)) \times \begin{pmatrix} X - X_S(t) \\ Y - Y_S(t) \\ Z - Z_S(t) \end{pmatrix}$$

که در آن،  $(x, y)$  مختصات نقاط در فضای تصویر خطی پوش‌بروم؛  $c$  فاصله اصلی سیستم اپتیکی؛  $(X_S, Y_S, Z_S)$  مختصات لحظه‌ای مرکز تصویر در سیستم

با توجه به نزدیکی مکانی موقعیت مراکز تصویر در بازه زمانی ثبت سطرهای متوالی تصاویر خطی، ساختار حرکتی مشخص و قابل پیش‌بینی سکوها ماهواره‌ای، و وجود سیستم‌های حفظ وضعیت در این سکوها، نمی‌توان پارامترهای توجیه خارجی سطرهای متوالی این تصاویر را کاملاً مستقل دانست (Valadan Zoej, 1995). به همین دلیل، راهکارهای مختلفی برای مدل‌سازی زمانی پارامترهای توجیه خارجی تصاویر خطی ارائه شده است که تمامی آنها به‌نحوی سعی در تخمین مسیر حرکت سنجنده و تغییرات وضعیتی آن در بازه زمانی دریافت تصویر دارند. در برخی از این مدل‌ها، مسیر حرکت سنجنده براساس پارامترهای کپلری مدار ماهواره و پارامترهای وضعیتی با استفاده از چندجمله‌ای‌های زمانی مدل‌سازی می‌شوند (Guichard, 1983; Toutin, 1986; Salmonowicz, 1986; Gagan, 1987; Westin, 1990; Priebbenow, 1991; De Haan, 1992; Radhadevi and Ramachandran, 1994; Valadan Zoej, 1995). این مدل‌ها با نام عمومی مدل پارامترهای مداری شناخته می‌شوند. در دسته دیگری از مدل‌ها، مسیر حرکت سنجنده نیز همانند پارامترهای وضعیتی با استفاده از

تصاویر پوش بروم پیشنهاد کردند که بدون نیاز به پارامتر وضعیت  $yaw$  و فقط با استفاده از نقاط کنترل زمینی حل می‌شد. براساس بررسی‌های صورت گرفته، خطوط اپی پلار بازسازی شده براساس این مدل نیز هذلولی شکل بود (Lee et al., 2002). مورگان و دیگران (۲۰۰۴b) در پژوهشی عوامل مؤثر بر شکل منحنی‌های اپی پلار حاصل از سنجنده‌ای با وضعیت و سرعت ثابت را، مشابه فرضیات مدل گوپتا و هارتلی (۱۹۹۷) بررسی کردند. با توجه به ارتباط نتایج حاصل از پژوهش آنها و روش پیشنهادی در مقاله حاضر، در بخش بعد به اختصار به این موضوع پرداخته می‌شود.

## ۲-۳- هندسه اپی پلار صحنه دریافت شده از طریق

### سنجنده‌ای با سرعت و وضعیت ثابت

در یک زوج تصویر فریم استریو، صفحه گذرنده از مراکز دو تصویر و هر نقطه در فضای شیئی، صفحه اپی پلار نامیده می‌شود (Schenk, 1990) و فصل مشترک صفحه اپی پلار با صفحات تصویر، خطوط اپی پلار نام دارد (Cho et al., 1992). در فرایند بازنمونه برداری اپی پلار این تصاویر، با محاسبه پارامترهای وضعیت جدید، دو تصویر به گونه‌ای تصحیح می‌شوند که صفحات دربرگیرنده آنها با باز هوایی موازی شوند (شکل ۲-الف) (Cho et al., 1995; Zhang et al., 1992). اما در مورد تصاویر خطی پوش بروم، با توجه به تعدد مراکز تصویر (بخش ۲-۲) و به تبع آن تعدد صفحات اپی پلار، نمی‌توان به راحتی خطوط اپی پلار را براساس فصل مشترک صفحات تصویر و صفحه اپی پلار تعریف کرد. در نتیجه معمولاً تعریف دیگری در خصوص این تصاویر به کار می‌رود. بر این اساس، خطوط یا منحنی‌های اپی پلار به صورت مکان هندسی تمام نقاط متناظر ممکن برای یک نقطه عکسی در عکس دیگر، به ازای تغییر ارتفاع در فضای شیئی تعریف می‌شوند (شکل ۲-ب و پ).

مختصات زمینی؛  $(X, Y, Z)$  مختصات زمینی نقاط؛  $\lambda$  ضریب مقیاس؛  $R_1, R_2$  و  $R_3$  به ترتیب ماتریس‌های دوران سه بعدی حول سه محور اول، دوم و سوم؛  $\omega, \varphi$  و  $K$  زوایای دوران لحظه‌ای سنجنده، و  $t$  پارامتر زمان است که عموماً هم‌ارز با شماره سطر تصویر در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، پویایی پارامترهای توجیه خارجی با استفاده از چندجمله‌ای‌های زمانی مدل‌سازی می‌شود (رابطه ۲).

$$X_S = X_o + X_1t + X_2t^2 + \dots$$

$$Y_S = Y_o + Y_1t + Y_2t^2 + \dots$$

$$Z_S = Z_o + Z_1t + Z_2t^2 + \dots$$

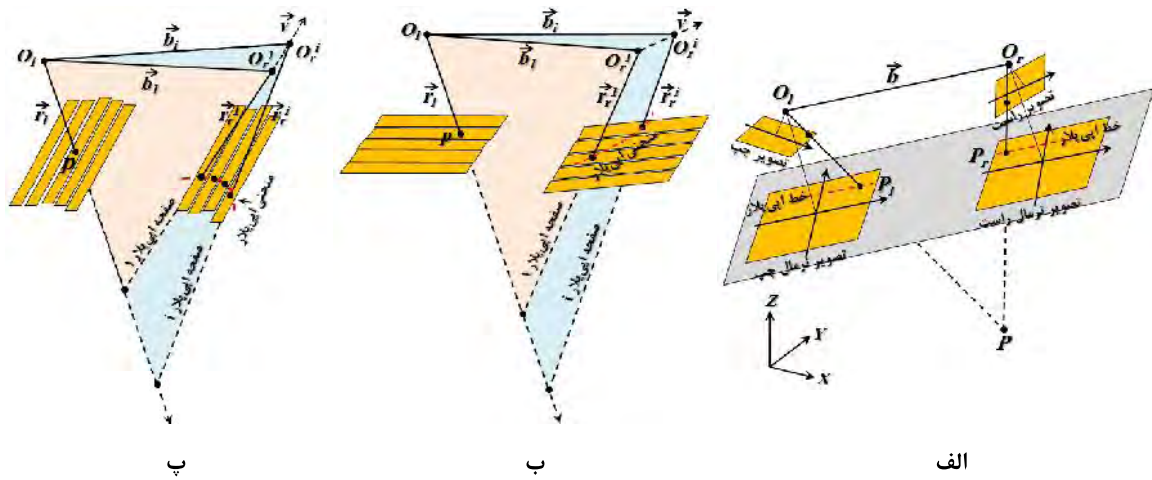
$$\omega = \omega_o + \omega_1t + \omega_2t^2 + \dots$$

$$\varphi = \varphi_o + \varphi_1t + \varphi_2t^2 + \dots$$

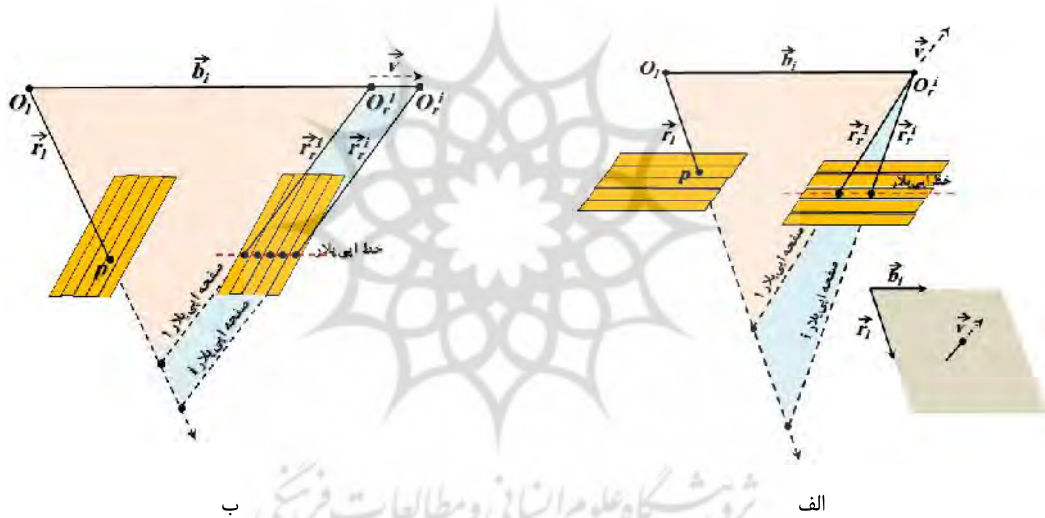
$$K = K_o + K_1t + K_2t^2 + \dots$$

درجه مناسب چندجمله‌ای‌های به کاررفته، به عواملی نظیر طول مسیر حرکت ماهواره، پایداری و نرخ تغییرات وضعیت ماهواره و سنجنده، دقت لازم، تعداد نقاط کنترل، و امکانات محاسباتی در دسترس بستگی دارد (Valadan Zoej, 1995). در پژوهشی، ارون و ناتاراجان<sup>۱</sup> (۱۹۹۴) با استفاده از مدل مراکز تصویر چندگانه و فرض ثابت بودن پارامترهای وضعیت  $roll$  و  $pitch$  و مدل‌سازی پارامترهای موقعیتی و پارامتر وضعیت  $yaw$  با استفاده از چندجمله‌ای‌های درجه دو مدل کاهش یافته‌ای را برای تصحیح هندسی تصاویر خطی پوش بروم پیشنهاد کردند، که برای حل آن افزون بر نقاط کنترل زمینی به داده‌های افریز<sup>۲</sup> سنجنده نیز نیاز است. در پژوهش دیگری، کیم (۲۰۰۰) با استفاده از این مدل به بررسی هندسه اپی پلار تصاویر خطی پرداخت. براساس نتایج تحقیق وی، خطوط اپی پلار حاصل از چنین مدلی هذلولی شکل خواهد بود. در پژوهش دیگری، گوپتا و هارتلی (۱۹۹۷) با فرض وضعیت ثابت و حرکت خطی سنجنده در بازه زمانی دریافت تصویر، مدل ساده شده‌ای را برای مدل‌سازی

1. Orun and Natarajan  
2. Ephemeris



شکل ۲. هندسه ایی پلار در تصاویر فریم (الف)، و تصاویر خطی با سیستم تصویربرداری Cross Track (ب)، و Along Track (پ)



شکل ۳. شرایط لازم برای دریافت تصاویر خطی ایی پلار در سیستم تصویربرداری Cross Track (الف)، و Along Track (ب)

دستیابی به چنین شرایطی در مورد تصاویر Cross Track و Along Track، به ترتیب به معنای برقراری روابط (۳) و (۴) به ازای تمام نقاط متناظر از تصاویر استریو است.

$$(\vec{r}_i^j \otimes \vec{b}_i) \otimes \vec{v} = 0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$(\vec{r}_i^j \otimes \vec{b}_i) \circ \vec{v} = 0 \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این دو رابطه، بردار موقعیت نقطه عکسی چپ در سیستم مختصات فتوگرامتری سطر زام،  $\vec{b}_i$  باز

در تصاویر خطی پوش بروم حتی با فرض وضعیت ثابت و حرکت خطی سنجنده، باز هم هیچ تضمینی برای رسیدن به خطوط ایی پلار مستقیم وجود ندارد و در حالت کلی، منحنی های ایی پلار حاصل از چنین مدلی منحنی های هذلولی شکل خواهد بود (Morgan et al., 2004b). شرایط لازم برای دستیابی به خطوط ایی پلار مستقیم با استفاده از این مدل، هم صفحه بودن تمام صفحات ایی پلار ممکن یک نقطه عکسی مانند  $p$ ، به ازای تغییر ارتفاع در فضای شیئی است (شکل ۳).

### ۳-۲- روش پیشنهادی

همان‌طور که در بخش ۲-۱ اشاره شد، در تصویربرداری خطی پوش بروم با فرض ثابت بودن وضعیت و سرعت سنجنده در بازه زمانی دریافت تصویر، شرط لازم و کافی برای دستیابی به خطوط ایپی پلار مستقیم، هم‌صفحه بودن تمام صفحات ایپی پلار ممکن یک نقطه عکسی مانند  $p$  به‌ازای تغییر ارتفاع در فضای شیئی است (شکل ۳). به این ترتیب، اگر صفحه دربرگیرنده این صفحات را صفحه ایپی پلار ایده‌آل نام‌گذاری کنیم، با فرض وضعیت ثابت سنجنده در بازه زمانی دریافت تصویر، خط ایپی پلار ایده‌آل نیز - مشابه با تصاویر فریم-به‌صورت فصل مشترک صفحه دربرگیرنده تصویر و صفحه ایپی پلار ایده‌آل تعریف می‌شود. شرایط لازم برای تشکیل صفحه ایپی پلار ایده‌آل در دو سیستم تصویربرداری Cross Track و Along Track به‌ترتیب با استفاده از روابط (۳) و (۴) شرح داده می‌شود. براساس رابطه (۳)، شرط لازم و کافی برای تشکیل صفحه ایپی پلار ایده‌آل در سیستم تصویربرداری Cross Track، موازی بودن بردار سرعت و تساوی مؤلفه‌های  $pitch$  و  $yaw$  وضعیت سنجنده برای دو تصویر استریو است. در این حالت، خطوط ایپی پلار ایده‌آل متناظر در امتداد سطرهای دو تصویر تشکیل خواهد شد (شکل ۳-الف). در تحلیلی مشابه و با استناد به رابطه (۴)، شرط لازم و کافی برای تشکیل صفحه ایپی پلار ایده‌آل در سیستم تصویربرداری Along Track، هم‌صفحه بودن بردار سرعت و تساوی مؤلفه‌های وضعیتی  $roll$  و  $yaw$  سنجنده برای دو تصویر استریو است. به این ترتیب، خطوط ایپی پلار ایده‌آل متناظر در امتداد ستون‌های دو تصویر تشکیل خواهد شد (شکل ۳-ب). از این رو، به‌نظر می‌رسد بتوان با برآورد پارامترهای مسیر و وضعیت ایده‌آل سنجنده، بازآرایی ایپی پلار تصاویر خطی را انجام داد (شکل ۵).

هوایی حاصل از اتصال مرکز تصویر سطر مربوط به نقطه عکسی چپ و مرکز تصویر سطر مربوط به نقاط عکسی متناظر ممکن در صحنه راست به‌ازای تغییر ارتفاع در فضای شیئی و  $\dot{v}$  بردار سرعت سنجنده در حین ثبت صحنه راست است. علائم  $\otimes$  و  $\circ$  نیز به‌ترتیب معرف ضرب خارجی و ضرب داخلی دو بردار است.

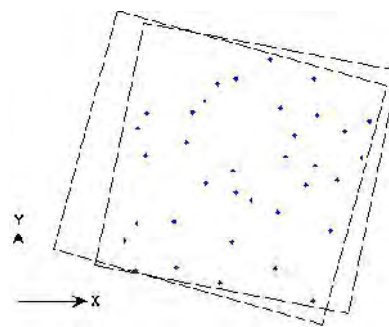
### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- داده‌های به‌کار گرفته‌شده

تصاویر استریوی به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش، تصاویر خام سطح 1A منطقه اصفهان است که با سنجنده HRV ماهواره SPOT-1 دریافت شده است. اطلاعات هندسی این تصاویر و تعداد نقاط کنترلی موجود در جدول ۱ آمده است. توزیع نقاط کنترلی در فضای تصاویر و نحوه پوشش تصاویر استریو در شکل ۴ نشان داده شده است.

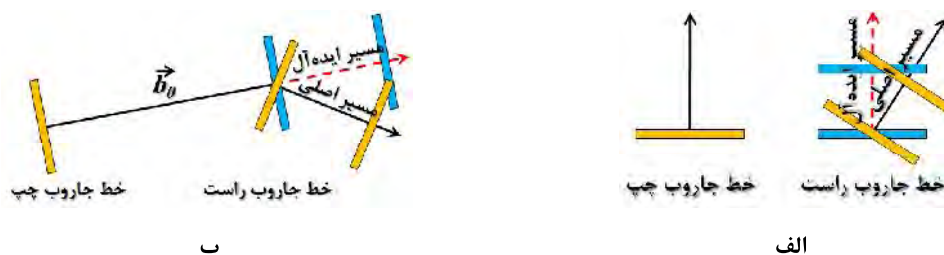
جدول ۱. مشخصات مجموعه تصاویر استریو

مجموعه داده		اصفهان
سکو		SPOT-1
سنجنده		HRV
تاریخ دریافت	Aug 1987	Jun 1987
زاویه دید (درجه)	24.7° W	20.84° E
قدرت تفکیک مکانی در نادیر	10 m	
نسبت باز به ارتفاع	0.974	
تعداد نقاط کنترل	35	



شکل ۴. توزیع نقاط کنترل در سطح تصاویر استریو





شکل ۵. مسیر ایده‌آل سنجنده برای بازآرایی اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم Cross Track (الف)، و Along Track (ب)

مسیر حرکت سنجنده برای دو تصویر است. از این‌رو می‌توان نقطه‌ی میانی پاره‌خط مسیر سنجنده در بازه‌ی زمانی تشکیل تصویر (مرکز ثقل مسیر حرکت سنجنده) را برای دو تصویر بر هم منطبق کرد و با سه دوران متوالی به‌اندازه‌ی نیمی از اختلاف زاویه‌ی دو مسیر در صفحات مختصات XOY، XOZ و YOZ، بردار سرعت آنها را موازی ساخت (شکل ۶). نتیجه‌ی این فرایند، معادل میانگین‌گیری از بردار سرعت مربوط به دو صحنه است.

به‌منظور یکسان‌سازی پارامترهای وضعیتی pitch و yaw می‌توان از میانگین این پارامترها در تصاویر چپ و راست استفاده کرد. تا این مرحله تمامی شرایط لازم برای رسیدن به تصاویر نرمال در سیستم تصویربرداری Cross Track فراهم آمده است، اما به‌دلیل متغیربودن مقیاس و اثر دید غیرقائم سنجنده، تصاویر نرمال تولیدشده هنوز برای مقاصد برجسته‌بینی مناسب نیستند. به‌منظور فائق‌آمدن بر این مسائل می‌توان با صفرکردن پارامترهای وضعیتی roll و pitch، اثر دید غیرقائم سنجنده را برطرف کرد و با میانگین‌گیری از پارامتر  $Z_0$  دو تصویر و صفرکردن پارامتر  $Z_1$  آنها، مقیاس سراسر دو صحنه را یکسان کرد. خلاصه‌ای از فرایند برآورد پارامترهای توجیه خارجی ایده‌آل با استفاده از پارامترهای توجیه خارجی دو تصویر برای سیستم تصویربرداری Cross Track در جدول ۲ آمده است. با استدلال‌هایی مشابه، نحوه‌ی برآورد پارامترهای توجیه خارجی ایده‌آل برای سیستم تصویربرداری Along Track در جدول ۳ درج شده است.

به‌منظور بازآرایی اپی‌پلار تصاویر استریو، آگاهی از پارامترهای توجیه خارجی یا دست‌کم پارامترهای توجیه نسبی تصاویر ضروری است. با توجه به پیچیدگی هندسه‌ی تصویربرداری خطی، توجیه نسبی این تصاویر به‌سادگی میسر نخواهد بود. از این‌رو در مرحله‌ی نخست، لازم است پارامترهای توجیه خارجی تصاویر با استفاده از نقاط کنترل زمینی و طی فرایند ترفیع فضایی برآورد شوند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مدل ریاضی به‌کاررفته در روش پیشنهادی مدل مراکز تصویر چندگانه (رابطه ۱)، با فرض سرعت و وضعیت ثابت، سنجنده‌ی مدل گوپتا و هارتلی است (رابطه ۵).

رابطه (۵)

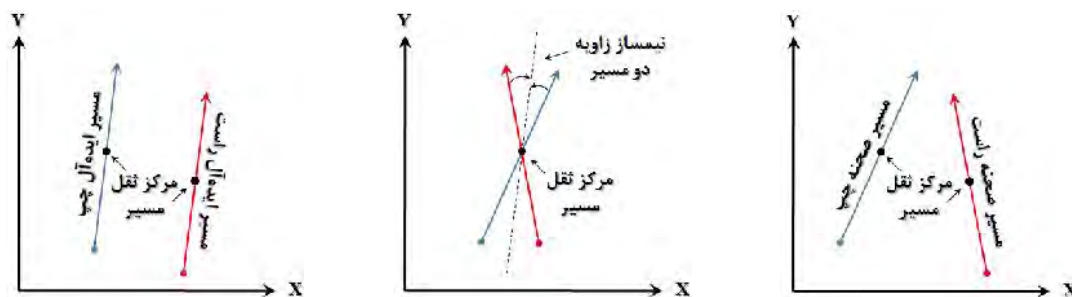
$$\begin{aligned} X_S &= X_o + X_1 \cdot i & \omega &= \omega_o \\ Y_S &= Y_o + Y_1 \cdot i & \varphi &= \varphi_o \\ Z_S &= Z_o + Z_1 \cdot i & \kappa &= \kappa_o \end{aligned}$$

در رابطه (۵) درواقع ۹ پارامتر مجهول وجود دارد:  $[X_o, Y_o, Z_o]^T$  موقعیت مرکز تصویر سطر اول صحنه،  $[X_1, Y_1, Z_1]^T$  بردار سرعت سنجنده، و  $(\omega_o, \varphi_o, \kappa_o)$  زوایای توجیه صفحه‌ی دربرگیرنده‌ی سطرهای تصویر. پارامتر  $i$  هم‌شماره‌ی سطر است، که به‌عنوان پارامتر زمان استفاده شده است.

در مورد تصاویر خطی پوش‌بروم Cross Track، پارامترهای توجیه خارجی دو تصویر باید به‌گونه‌ای ویرایش شوند که بردار سرعت آنها موازی و مؤلفه‌های وضعیتی pitch و yaw تصاویر مساوی شوند. موازی‌بودن بردار سرعت تصاویر به‌معنای موازی‌بودن



روشی نوین برای بازآرایی ایپی پلار تصاویر با هندسه خطی پوش بروم مبتنی بر مدل مراکز تصویر چندگانه



شکل ۶. نمایش تصویری مراحل موازی سازی مسیر صحنه های چپ و راست در صفحه XOY

جدول ۲. محاسبه پارامترهای توجیه خارجی ایده آل برای سیستم تصویربرداری خطی پوش بروم Cross Track<sup>†</sup>

پارامترهای ایده آل صحنه چپ	پارامترهای ایده آل صحنه راست
$X_0^n = X_0^l$	$X_0^n = X_0^r$
$Y_0^n = 0.5(Y_0^l + Y_0^r)$	$Y_0^n = 0.5(Y_0^l + Y_0^r)$
$Z_0^n = 0.5(Z_0^l + Z_0^r)$	$Z_0^n = 0.5(Z_0^l + Z_0^r)$
$X_1^n = 0.5(X_1^l + X_1^r)$	$X_1^n = 0.5(X_1^l + X_1^r)$
$Y_1^n = 0.5(Y_1^l + Y_1^r)$	$Y_1^n = 0.5(Y_1^l + Y_1^r)$
$Z_1^n = 0$	$Z_1^n = 0$
$\omega^n = 0$	$\omega^n = 0$
$\phi^n = 0$	$\phi^n = 0$
$\kappa^n = 0.5(\kappa^l + \kappa^r)$	$\kappa^n = 0.5(\kappa^l + \kappa^r)$

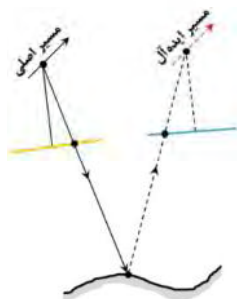
<sup>†</sup> اندیس l برای صحنه چپ، اندیس r برای صحنه راست، و اندیس n برای پارامترهای ایده آل به کار رفته است.

جدول ۳. محاسبه پارامترهای توجیه خارجی ایده آل برای سیستم تصویربرداری خطی پوش بروم Along Track<sup>†</sup>

پارامترهای ایده آل صحنه چپ	پارامترهای ایده آل صحنه راست
$X_0^n = 0.5(X_0^l + X_0^r)$	$X_0^n = 0.5(X_0^l + X_0^r)$
$Y_0^n = Y_0^l$	$Y_0^n = Y_0^r$
$Z_0^n = 0.5(Z_0^l + Z_0^r)$	$Z_0^n = 0.5(Z_0^l + Z_0^r)$
$X_1^n = 0.5(X_1^l + X_1^r)$	$X_1^n = 0.5(X_1^l + X_1^r)$
$Y_1^n = 0.5(Y_1^l + Y_1^r)$	$Y_1^n = 0.5(Y_1^l + Y_1^r)$
$Z_1^n = 0$	$Z_1^n = 0$
$\omega^n = 0$	$\omega^n = 0$
$\phi^n = 0$	$\phi^n = 0$
$\kappa^n = 0.5(\kappa^l + \kappa^r)$	$\kappa^n = 0.5(\kappa^l + \kappa^r)$

<sup>†</sup> اندیس l برای صحنه چپ، اندیس r برای صحنه راست، و اندیس n برای پارامترهای ایده آل به کار رفته است.

در رابطه (۶)،  $(r', c')$  مختصات نقاط در تصویر خام،  $(r, c)$  مختصات نقاط در تصویر نرمال، و  $a_{ij}$  و  $b_{ij}$  ضرایب مجهول تبدیل دوبعدی مرتبط کننده دو فضا هستند. به این ترتیب، رابطه‌ای کلی برای ارتباط نقاط دو فضا تعریف می‌شود که مستقل از شماره سطر نقاط در فضای تصویر اصلی است. با توجه به تعداد و توزیع مناسب نقاط، انتظار می‌رود برازش سراسری این مدل مناسب باشد. مشکل دوم از آنجا ناشی می‌شود که برای انتقال مختصات نقاط از فضای تصویر اصلی به فضای تصویر خروجی، لازم است ابتدا با استفاده از پارامترهای توجیه خارجی تصویر اصلی و ارتفاع نقاط، مختصات نقاط به فضای شیئی منتقل شوند و سپس به کمک پارامترهای توجیه خارجی تصویر خروجی، به این فضا انتقال یابند. از آنجا که مختصات ارتفاعی نقاط در دسترس نیست، به‌ناچار باید از ارتفاع متوسط منطقه استفاده کرد. هنگام بازنمونه‌برداری اپی‌پلار تصاویر فریم نیز این مسئله وجود دارد؛ اما چون در این فرایند مرکز تصویر آنها دستخوش تغییر نمی‌شود، تغییر ارتفاع در فضای شیئی تأثیری بر فرایند بازنمونه‌برداری نخواهد داشت (شکل ۷-الف). این در حالی است که برای تصاویر خطی، با مقایسه پارامترهای توجیه خارجی تصویر اصلی و پارامترهای توجیه خارجی ایده‌آل به راحتی می‌توان دریافت که مراکز تصویر آنها تغییر می‌کند (شکل ۵). بدین ترتیب با تغییر ارتفاع در فضای شیئی، موقعیت ثبت نقاط در فرایند بازنمونه‌برداری تغییر خواهد کرد (شکل ۷-ب).



ب

پس از محاسبه پارامترهای توجیه خارجی ایده‌آل دو تصویر، نوبت به بازنمونه‌برداری آنها می‌رسد. به‌پرهیز از دو پدیده فراموش‌برداری و فرونمونه‌برداری، معمولاً از روش بازنمونه‌برداری غیرمستقیم استفاده می‌شود. در این روش، پس از مشخص کردن محدوده تصویر ورودی در فضای تبدیل یافته و تعیین فاصله نمونه‌برداری براساس نسبت ابعاد محدوده مورد نظر در دو فضا، مختصات هر نقطه از فضای تصویر تبدیل یافته با استفاده از روابط ارتباطی معکوس به فضای تصویر اصلی بازگردانده می‌شود و درجه خاکستری مربوط به آن نقطه، به نقطه متناظر در تصویر خروجی تخصیص داده می‌شود. اما پیاده‌سازی این روش برای تصاویر خطی با دو مشکل جدی مواجه است. نخست آنکه به دلیل پویایی پارامترهای توجیه خارجی تصاویر خطی، برای استفاده از روابط معکوس لازم است شماره سطر متناظر با نقطه مورد نظر در فضای تصویر اصلی به‌ازای تمام نقاط فضای تصویر تبدیل یافته معلوم باشد؛ که در عمل این‌گونه نیست. یکی از راه‌های حل این مشکل، انتقال مختصات شبکه منظمی از نقاط (مثلاً به فاصله ۴۰ پیکسل) از فضای تصویر اصلی به فضای تصویر خروجی، و سپس برازش یک مدل عمومی - نظیر چندجمله‌ای‌های دوبعدی- به این دو سری مختصات است (رابطه ۶).

رابطه (۶)

$$r' = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} r^i c^j = a_0 + a_1 r + a_2 c + a_3 r c + a_4 r^2 + a_5 c^2 + \dots$$

$$c' = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} r^i c^j = b_0 + b_1 r + b_2 c + b_3 r c + b_4 r^2 + b_5 c^2 + \dots$$



الف

شکل ۷. تأثیر عدم تغییر (الف)، و تغییر (ب) مرکز تصویر در بازنمونه‌برداری تصویر به‌ازای تغییر ارتفاع در فضای شیئی

فرایند تقاطع فضایی، ارتفاع دقیق نقاط را در فضای شیئی محاسبه کرد.

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای سیستم تصویربرداری Cross Track روی یک زوج تصویر استریو SPOT-1A از منطقه اصفهان ارائه می‌شود. مشخصات مجموعه داده‌های استفاده شده در جدول ۱ آمده است. در مرحله نخست، با انتخاب ترکیب‌های عددی متنوعی از مجموع ۳۵ نقطه زمینی معلوم و ترفیع فضایی تصاویر، پارامترهای توجیه خارجی دو صحنه برآورد شدند. در هر مرحله، باقی‌مانده نقاط زمینی معلوم نیز به‌عنوان نقاط کنترل مستقل در ارزیابی دقت ترفیع فضایی تصاویر به‌کار گرفته شدند (جدول‌های ۴ و ۵).

روشن است که این تغییر موقعیت در راستای خطوط ایپی پلار رخ خواهد داد (شکل ۷)، در نتیجه نقاط متناظر در تصاویر بازنمونه‌برداری شده چپ و راست، همچنان در امتداد سطرها (یا ستون‌های) تصاویر قرار خواهند گرفت. اما به‌هرحال، رابطه مستقیم پارالاکس موازی و ارتفاع نقاط برهم‌خورده و تصاویر بازنمونه‌برداری شده، اندکی از مفهوم تصاویر نرمال فاصله می‌گیرند. از این‌رو، روش پیشنهادی به‌عنوان روشی برای بازآرایی ایپی پلار تصاویر خطی ارائه شده و خروجی آن تصاویر شبه‌نرمالی است که می‌تواند در فرایند تناظر یابی خودکار و برجسته‌بینی (البته با کمی اعوجاج) به‌کار گرفته شوند. پس از انجام تناظر یابی خودکار، به دلیل وجود روابط صریح میان فضای تصویر بازنمونه‌برداری شده و تصاویر اصلی می‌توان مختصات نقاط متناظر را به فضای تصاویر اصلی بازگرداند و طی

جدول ۴. دقت ترفیع فضایی تصویر چپ با استفاده از مدل گوپتا و هارتلی به‌ازای تعداد متفاوت نقاط کنترل

# GCPs	# CHKs	$\sigma_r$ (pix)	$\sigma_c$ (pix)	$\sigma_t$ (pix)
کمتر از ۷	---	---	---	---
۷	۲۸	۰/۵۶	۱/۳۸	۱/۴۹
۱۰	۲۵	۰/۵۱	۰/۸۹	۱/۰۳
۱۵	۲۰	۰/۴۷	۰/۸۳	۰/۹۵
۲۰	۱۵	۰/۵۰	۰/۷۹	۰/۹۴

جدول ۵. دقت ترفیع فضایی تصویر راست با استفاده از مدل گوپتا و هارتلی به‌ازای تعداد متفاوت نقاط کنترل

# GCPs	# CHKs	$\sigma_r$ (pix)	$\sigma_c$ (pix)	$\sigma_t$ (pix)
کمتر از ۸	---	---	---	---
۸	۲۷	۱/۱۵	۱/۱۲	۱/۶۱
۱۰	۲۵	۱/۲۱	۱/۰۴	۱/۵۹
۱۵	۲۰	۱/۰۹	۰/۹۳	۱/۴۳
۲۰	۱۵	۱/۰۷	۰/۸۶	۱/۳۷

ناتاراجان (۱۹۹۴)، دقیق ترین پیکربندی برشمرده شده است (Kim, 2000; Lee et al., 2002; Morgan, 2004). به منظور ارزیابی دقیق تر مدل ارائه شده، دقت ترفیع فضایی تصاویر مورد مطالعه به ازای تعداد متفاوت نقاط کنترل با استفاده از این مدل نیز در جدول های ۶ و ۷ ارائه گردید.

مقایسه دقت های به دست آمده از این مدل و دقت های حاصل از مدل گوپتا و هارتلی (جدول های ۴ و ۵)، به وضوح نشان می دهد که تفاوت چندانی میان آنها وجود ندارد و حتی هنگام استفاده از تعداد کم نقاط کنترل، مدل گوپتا و هارتلی دقت های بالاتری را تأمین می کند. این تفاوت با توجه به تعداد بیشتر مجهولات مدل آرون و ناتاراجان و کاهش درجه آزادی دستگاه معادلات تفسیر می شود. از این رو، استفاده از مدل گوپتا و هارتلی (۱۹۹۷) در روش پیشنهادی منطقی به نظر می رسد.

با توجه به اینکه در مدل ریاضی استفاده شده (رابطه ۵) فقط ۹ پارامتر مجهول وجود دارد، به لحاظ نظری این مدل باید با استفاده از حداقل ۵ نقطه کنترل زمینی و یک درجه آزادی امکان حل داشته باشد. اما همان طور که از نتایج برمی آید (جدول های ۴ و ۵)، روند سرشکنی دستگاه معادلات مربوط به تصاویر چپ و راست به ترتیب با کمتر از ۷ و ۸ نقطه کنترل زمینی منجر به همگرایی نشد و به نظر می رسد علت آن شرایط نامناسب مقادیر اولیه برآورد شده برای مجهولات مدل با استفاده از نقاط کنترل باشد. در این صورت، انتظار می رود این مشکل با استفاده از داده های افریز سنجنده حل شدنی باشد و بتوان با استفاده از نقاط کنترلی کمتر نیز به دقت های مناسبی برای ترفیع تصاویر دست یافت.

در میان پیکربندی های مختلف استفاده شده در مدل مراکز تصویر چندگانه، پیکربندی آرون و

جدول ۶. دقت ترفیع فضایی تصویر چپ با استفاده از مدل آرون و ناتاراجان به ازای تعداد متفاوت نقاط کنترل

# GCPs	# CHKs	$\sigma_r$ (pix)	$\sigma_c$ (pix)	$\sigma_t$ (pix)
کمتر از ۱۱	---	---	---	---
۱۱	۲۵	۰/۷۱	۰/۸۳	۱/۰۹
۱۲	۲۳	۰/۶۷	۰/۸۵	۱/۰۸
۱۵	۲۰	۰/۶۳	۰/۸۷	۱/۰۷
۲۰	۱۵	۰/۵۶	۰/۹۳	۱/۰۹

جدول ۷. دقت ترفیع فضایی تصویر راست با استفاده از مدل آرون و ناتاراجان به ازای تعداد متفاوت نقاط کنترل

# GCPs	# CHKs	$\sigma_r$ (pix)	$\sigma_c$ (pix)	$\sigma_t$ (pix)
کمتر از ۸	---	---	---	---
۸	۲۷	۱/۸۹	۱/۱۵	۲/۲۱
۱۰	۲۵	۱/۵۲	۰/۹۱	۱/۷۷
۱۵	۲۰	۱/۱۷	۰/۸۸	۱/۴۶
۲۰	۱۵	۱/۰۶	۰/۹۴	۱/۴۱

مختصات عکسی) به منظور برقراری ارتباط دو فضا استفاده شد. در این فرایند، شبکه منظم  $60 \times 60$  از نقاط کنترلی میان دو فضا به دست آمد که نیمی از نقاط آن (یک در میان) در حل مدل چندجمله‌ای ارتباطی و نیم دیگر در ارزیابی دقت برآزش آن به کار گرفته شد. به این ترتیب، دقت مدل مربوط به تصاویر چپ و راست به ترتیب  $0/21$  و  $0/15$  پیکسل برآورد شد. انتظار می‌رود در فرایند بازآرایی اپی پلار تصاویر، پارالاکس قائم نقاط متناظر حذف شود و پارالاکس موازی آنها نیز اختلاف ارتفاع نقاط را نشان دهد. بدیهی است که در این حالت، میانگین پارالاکس قائم نقاط متناظر در تصاویر شبه‌نرمال، مشخص‌کننده شیفت سیستماتیک دو صحنه نسبت به یکدیگر است، و انحراف معیار پارالاکس قائم این نقاط هم، معیاری از دقت فرایند بازآرایی اپی پلار تصاویر خواهد بود (Morgan, 2004). از این رو به منظور ارزیابی دقت مدل پیشنهادی، پس از پیاده‌سازی مدل و تولید تصاویر شبه‌نرمال (شکل ۸)، پارالاکس قائم باقی‌مانده (پس از حذف شیفت سیستماتیک دو صحنه) در ۱۰۰ جفت نقطه متناظر با توزیع مناسب در سطح تصاویر شبه‌نرمال اندازه‌گیری شد. بر این اساس، دقت روش پیشنهادی  $0/94$  پیکسل به دست آمد. بیشترین پارالاکس قائم باقی‌مانده در سطح نقاط چک،  $5/2$  پیکسل مشاهده شد.

بر اساس نتایج جدول‌های ۴ و ۵، از ۱۵ نقطه کنترل برای ترفیع فضایی تصاویر استفاده شد و دقت ترفیع تصاویر چپ و راست به ترتیب  $0/95$  و  $1/43$  پیکسل در فضای تصویر به دست آمد. دقت تصویر چپ مناسب به نظر می‌رسد، اما دقت تصویر راست حتی با افزایش تعداد نقاط و انتخاب ترکیب‌های گوناگون مکانی نقاط هم بهبود چندانی نیافت. دلیل این امر می‌تواند دقت محدود مختصات عکسی نقاط کنترل در دسترس باشد. از طرفی باید توجه داشت که تعداد محدود پارامترهای موجود در مدل ریاضی به کار گرفته شده و به‌ویژه ثابت بودن پارامترهای وضعیتی سنجنده در کل صحنه و نبود سازوکاری برای کاهش خطاهای ناشی از اغتشاشات وضعیتی سنجنده نیز به نوبه خود می‌تواند موجب بروز خطاهای سیستماتیک در مدل‌سازی شود.

پس از برآورد پارامترهای توجیه خارجی تصاویر استریو، نوبت به محاسبه پارامترهای وضعیتی و مسیر ایده‌آل سنجنده می‌رسد (جدول‌های ۸ و ۹)، که با استفاده از روابط ارائه شده در جدول ۳ به‌سادگی انجام پذیر است. در نهایت، با در دست بودن پارامترهای توجیه خارجی اصلی و ایده‌آل دو تصویر، مختصات عکسی مجموعه‌ای از نقاط (یکی از هر ۱۰۰ پیکسل) تصویر خام به فضای تصویر شبه‌اپی پلار انتقال یافت و از چندجمله‌ای دوبعدی درجه ۴ (با ۱۵ ترم برای هریک از دو مؤلفه

جدول ۸. پارامترهای توجیه خارجی اصلی و ایده‌آل تصویر چپ

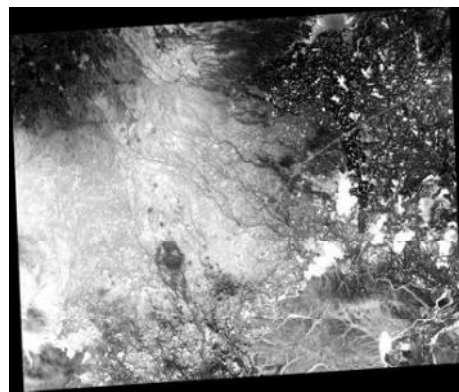
EOP	$X_0(m)$	$X_1(m/line)$	$Y_0(m)$	$Y_1(m/line)$	$Z_0(m)$	$Z_1(m/line)$	$\omega(deg)$	$\phi(deg)$	$\kappa(deg)$
اصلی	$-1/2200 \times 10^6$	-2/9582	$3/7074 \times 10^6$	-9/5869	$0/7933 \times 10^6$	0/0368	-8/2821	-28/5025	-105/9141
ایده‌آل	$-1/2200 \times 10^6$	-2/6189	$3/6034 \times 10^6$	-9/6609	$0/7924 \times 10^6$	.	.	.	-103/1453

جدول ۹. پارامترهای توجیه خارجی اصلی و ایده‌آل تصویر راست

EOP	$X_0(m)$	$X_1(m/line)$	$Y_0(m)$	$Y_1(m/line)$	$Z_0(m)$	$Z_1(m/line)$	$\omega(deg)$	$\phi(deg)$	$\kappa(deg)$
اصلی	$0/6919 \times 10^6$	-2/2796	$3/5022 \times 10^6$	-9/7350	$0/7914 \times 10^6$	-0/1076	6/2918	25/0992	-100/3766
ایده‌آل	$0/6919 \times 10^6$	-2/6189	$3/6034 \times 10^6$	-9/6609	$0/7924 \times 10^6$	.	.	.	-103/1453

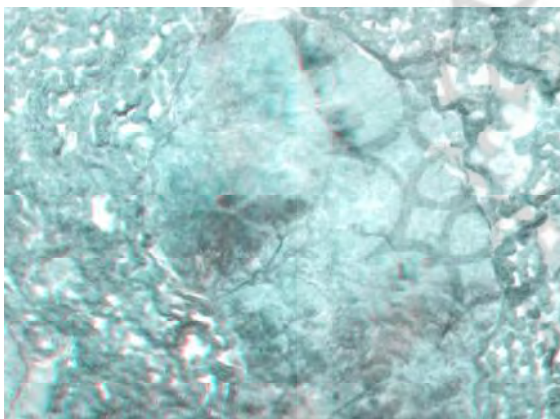


ب

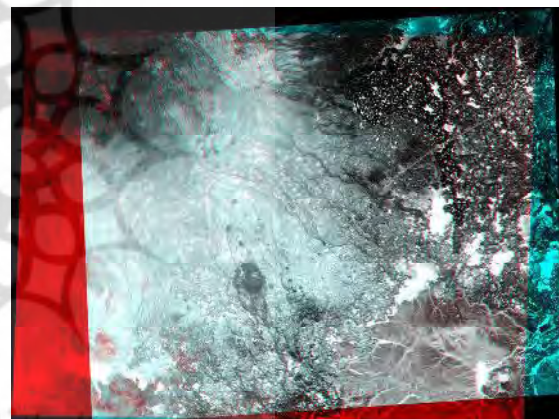


الف

شکل ۸. نمایش شماتیک تصاویر شبه‌نرمال راست (الف)، و چپ (ب) تولیدشده با استفاده از مدل پیشنهادی



شکل ۱۰. بخشی از تصویر آناکلیف تولیدشده به روش پیشنهادی با بزرگنمایی بیشتر



شکل ۹. تصویر آناکلیف تولیدشده به روش پیشنهادی

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در پژوهش حاضر، روشی جدید برای بازآرایی اپی‌پلار تصاویر خطی پوش‌بروم مطرح شد. در روش پیشنهادی، با مبنا قراردادن مدل مراکز تصویر چندگانه، مسیر حرکت و پارامترهای وضعیتی سنجنده ایده‌آل به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که افزون‌بر نزدیکی به پارامترهای واقعی تصاویر استریو، شرایط لازم را نیز برای دریافت تصاویر اپی‌پلار داشته باشند. یکی از مزایای این روش در قیاس با روش‌های

مبنتی بر استفاده از مدل‌های غیرفیزیکی - نظیر مدل افاین سه‌بعدی و مدل توابع کسری- انتظار برآزش سراسری بهتر مدل و تا حدی امکان استفاده از داده‌های ناوبری ثبت‌شده به‌وسیله سنجنده با استفاده از مدل مراکز تصویر چندگانه است. به‌دلیل تفسیرپذیری فیزیکی پارامترهای این مدل، می‌توان زوایای دید سنجنده را برحسب نیاز تصحیح کرد. این امر، موجب تسهیل در برجسته‌بینی، اندازه‌گیری و تفسیر مدل سه‌بعدی به‌دست‌آمده می‌شود. به‌دلیل

ترم‌های مناسب نیز می‌توان به دقت‌های مناسبی دست یافت. اما به‌کارگیری هر یک از دو راهکار اخیر موجب برهم‌خوردن شرایط مفروض در مدل پیشنهادی خواهد شد. جست‌وجوی راه‌حلی برای این چالش می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی در این زمینه باشد.

با تأمل دوباره در شرایط لازم برای تشکیل صفحه اپی پلار ایده‌آل می‌توان دریافت که پارامترهای وضعیتی ایده‌آل سنجنده به‌معنای موازی‌بودن سطر به‌سطر تصاویر استریو، و مسیر ایده‌آل سنجنده به‌معنای ثابت‌بودن باز‌هوایی آنها و توازی ستون‌به‌ستون دو تصویر (در صورت تصحیح جابه‌جایی ناشی از ارتفاع) است. در این حالت انتظار می‌رود که پوشش زمینی تصاویر نیز سطر به‌سطر و ستون‌به‌ستون موازی باشند. در نتیجه، به‌نظر می‌رسد با موازی‌ساختن تصویر سطرها و ستون‌های تصاویر استریو روی صفحه‌ای در فضای شیئی نیز بتوان به بازآرایی اپی پلار تصاویر خطی پوش بروم پرداخت. در این صورت قید استفاده از مدل گوپتا و هارتلی (۱۹۹۷) نیز برطرف می‌شود و افزون بر پیکربندی‌های متنوع مدل مراکز تصویر چندگانه می‌توان از مدل‌های مختلف استفاده‌شده در تصحیح هندسی تصاویر خطی نیز برای تولید تصاویر شبه‌نرمال استفاده کرد.

#### ۶- منابع

Cho, W., Schenk, T. & Madani, M., 1992, **Resampling Digital Imagery to Epipolar Geometry**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29(B3), PP. 404-408.

De Haan, A., 1992, **An Analysis of the Precision of a DEM Obtained from SPOT Data**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29(B4), PP. 440-447.

وجود روابط صریح میان فضای تصاویر شبه‌نرمال تولیدشده و تصاویر اصلی، می‌توان مختصات نقاط متناظر را به فضای تصاویر اصلی بازگرداند و طی فرایند تقاطع فضایی، ارتفاع دقیق نقاط را در فضای شیئی محاسبه کرد. به این ترتیب امکان استفاده از مدل پیشنهادی در تولید مدل رقومی زمین و تولید ارتوفتو نیز فراهم می‌آید.

روش پیشنهادی برای بازنمونه‌برداری تصاویر خطی پوش بروم و فائق‌آمدن بر مشکل مربوط به پویایی پارامترهای توجیه خارجی این تصاویر نیز می‌تواند از دستاوردهای این پژوهش قلمداد شود.

نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی روش پیشنهادی روی تصاویر استریو SPOT، کارایی این روش را برای سیستم تصویربرداری Cross Track اثبات کردند. البته برای تصاویر خطی Along Track نیز نتایج مشابهی انتظار می‌رود، که می‌تواند در پژوهش دیگری آزمون شود.

یکی از مسائل پیش‌رو در این آزمون، دسترسی‌نداشتن به داده‌های افم‌ریز سنجنده و وابستگی تمامی نتایج به‌دست‌آمده (از مرحله محاسبه مقادیر اولیه مدل مراکز تصویر چندگانه در ترفیع فضایی تصاویر استریو تا دقت نهایی تصاویر شبه‌نرمال حاصل) به تعداد، توزیع و دقت نقاط کنترل زمینی استفاده‌شده است. با توجه به تعداد و نوع پارامترهای موجود در مدل ریاضی به‌کار گرفته‌شده، امکان باقی‌ماندن خطای سیستماتیک در مرحله مدل‌سازی هندسی تصاویر وجود دارد. در این صورت با توجه به ضعف ساختاری مدل، با افزایش نقاط کنترل زمینی هم انتظار نمی‌رود دقت مدل‌سازی بهبود یابد. راهکاری که در این شرایط به‌نظر می‌رسد، تقسیم‌بندی صحنه به چند تصویر کوچک‌تر و استفاده از یک مدل ریاضی مستقل برای هر بخش از صحنه است. با افزایش تعداد پارامترهای مدل مراکز تصویر چندگانه و افزودن



- Fraser, C.S. & Shao, J., 1996, **Exterior Orientation Determination of MOMS-02 Three-line Imagery: experiences with the Australian test field data**, International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, 31(B3), PP. 207-214.
- Fritz, L.W., 1995, **Recent Developments for Optical Earth Observation in the United States**, Photogrammetric Week 95, Wichmann, Heidelberg, 350 pages, PP. 75-84.
- Ganguly, P.K., 1991, **Mathematical Modeling for Mapping from SPOT**, M.Sc. Thesis, ITC, Netherlands.
- Gugan, D.J., 1987, **Topographic Mapping from SPOT Imagery**, Ph.D. Thesis, University College London.
- Guichard, H., 1983, **Etude Theorique de la Precision dans l'Exploitation Cartographique d'une Satellite a Defilement: Application a SPOT**, Bulletin de la Societe Francaise de Photogrammetrie et de Teledetection, 90, PP. 15-26.
- Gupta, R. & Hartly, R.I., 1997, **Linear Pushbroom Cameras**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19(9), PP. 963-975.
- Habib, A.F., Morgan, M., Jeong, S. & Kim, K.O., 2005a, **Analysis of Epipolar Geometry in Linear Array Scanner Scenes**, The Photogrammetric Record, 20 (109), PP. 27-47.
- Habib, A.F., Morgan, M., Jeong, S. & Kim, K.O., 2005b, **Epipolar Geometry of Line Cameras Moving with Constant Velocity and Attitude**, ETRI Journal, (27).
- Heipke, C., Kornus, W. & Pfannenstein, A., 1996, **The Evaluation of MEOSS Airborne Three-line Scanner Imagery: processing chain and results**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62(3), PP. 293-299.
- Kim, T., 2000, **A Study on the Epipolarity of Linear Pushbroom Images**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66(8), PP. 961-966.
- Kornus, W., Ebner, H. & C. Heipke, 1995, **Photogrammetric Point Determination Using MOMS-02/D2 Imagery**, Proc. of MOMS Symposium, Cologne, Germany, July 5-7.
- Kratky, V., 1987, **Rigorous Stereophotogrammetric Treatment of SPOT Images**, SPOT 1-Utilisation des Images, Bilan, Resultats, CNES, Paris, PP. 1195-1204.
- Lee, C., Theiss, H.J., Bethel, J.S. & Mikhail, E.M., 2000, **Rigorous Mathematical Modeling of Airborne Pushbroom Imaging Systems**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66(4), PP. 385-392.
- McGlone, C., 1996, **Sensor Modeling in Image Registration, Digital Photogrammetry: An Addendum (C.W. Greve, editor)**, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, PP. 115-123.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S. & McGlone, J.C., 2001, **Introduction to Modern Photogrammetry**, Wiley, New York.

- Morgan, M., 2004, **Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes**, Ph.D. Dissertation, University of Calgary, Canada.
- 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(B3), PP. 508–513.
- 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(B3), PP. 52–57.
- Orun, A.B. & Natarajan, K., 1994, **A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 60(12), PP. 1431-1437.
- Pollard, S.B., Mayhew, J.E.W. & Frisby, J.P., 1985, **PMF: a stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit**, Perception, 14(4), PP. 449–470.
- Priebbenow, R.J., 1991, **Triangulation of SPOT Imagery at the Department of Lands, Queensland**, OEEPE Publication, OEEPE Test of Triangulation of SPOT Data, (26), PP. 109-128.
- Radhadevi, P.V. & Ramachandran, R., 1994, **Orbital Attitude Modeling of SPOT Imagery with a Single Ground Control Point**, Photogrammetric Record, 14(84), PP. 973-982.
- Salmonowicz, P.H., 1986, **Satellite Orientation and Position for Geometric Correction of Scanner Imagery**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 31(B4), PP. 742-747.
- Schenk, T., 1999, **Digital Photogrammetry**, Volume I, TerraScience, Laurelville, Ohio.
- Shibasaki, R., Murai, S. & Okuda, T., 1988, **SPOT Imagery Orientation with Auxiliary Satellite Position and Attitude Data**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 27(B9), PP. 125-132.
- Toutin, T., 1986, **Etude Mathematique pour la Rectification d'Images SPOT**, 18e Congres de la Federation Internationale des Geometres, Canada, PP. 379-395.
- Valadan Zoej, M.J., 1995, **Developments of Linear Arraytechnology for Photogrammetric Mapping**, NCC Scientific and Technical Quaterly Journal, PP. 5-16.
- Valadan Zoej, M.J., 1997, **Mathematical Modelling and Geometric Accuracy Testing of MOMS-02 Imagery**, 4thConference on Geographic Information systems.
- Wang, M., Hub, F. & Li, J., 2011, **Epipolar Resampling of Linear Pushbroom Satellite Imagery by a New Epipolarity Model**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, PP. 347–355.

- Westin, T., 1990, **Precision Rectification of SPOT Imagery**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56(2), PP. 247-253.
- Zhang, Z., Deriche, R., Faugeras, O., Luong, Q.T., 1995, **A Robust Technique for Matching two Uncalibrated Images through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry**, Artificial Intelligence, 78(1995), PP. 87-119.
- Zhao, D., Yuan, X.X. & Liu, X., 2008, **Epipolar Line Generation from IKONOS Imagery based on Rational Function Model**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B4), PP. 1293-1297.

