



سنگش از دور

GIS ایران



سنگش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

سال پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲  
Vol.15, No. 1, Spring 2023

۱۷-۳۷

مقاله پژوهشی

## اصلاح هندسی تصاویر سنجنده پوش بروم و ابرطیفی BaySpec OCI-F از طریق تخمین ارتباط هندسی میان فریم‌های ویدئویی هم‌زمان، به کمک تناظریابی کمترین مربعات

مجتبی آخوندی خضراباد<sup>۱\*</sup>، محمدجواد ولدان‌زوج<sup>۲</sup>، علیرضا صفدری‌نژاد<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. استاد گروه فتوگرامتری و سنگش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

### چکیده

ضرورت دسترسی به کاربردهای وسیع تصاویر ابرطیفی سبب توسعه سیستم‌های تصویربرداری نوآورانه و اقتصادی در ثبت این تصاویر شده است. به منظور استفاده از این تصاویر، لازم است ارتباط هندسی دقیقی میان آنها و فضای زمین برقرار شود و این فرایند نیازمند نقاط کنترلی بسیاری است. این نکته ضرورت توسعه راهکارهای اصلاح هندسی منطبق با ساختار هریک از این دوربین‌ها را بارز می‌کند. سنجنده BaySpec OCI-F (۴۰۰-۱۰۰۰ nm) یکی از سیستم‌های نوآورانه‌ای است که تصاویر ابرطیفی را با هندسه تصویربرداری پوش بروم دریافت می‌کند. این سنجنده، علاوه بر یک سنسور پوش بروم، از یک سنسور فریم نیز بهره می‌برد که هم‌زمان با سنسور پوش بروم و با رزولوشن مکانی زمانی مشابه، تصویر را دریافت می‌کند. در این مقاله، روشی برای اصلاح هندسی تصاویر پوش بروم این سنجنده بیان شده است. در بخش اول این روش، با توجه به ساختار تصویربرداری دوربین، ارتباط هندسی میان آرایه خطی و سنسور فریم در قالب پارامترهای کالیبراسیونی مشخص می‌شود. در ادامه، به کمک برآورد ارتباط هندسی میان تصاویر فریم متوالی، پیکسل‌های تصویر پوش بروم در کنار یکدیگر چیده و تصویر اصلاح شده تولید می‌شود. در این روش، ارتباط هندسی میان هر جفت فریم متوالی به‌طور مستقیم، از طریق تناظریابی کمترین مربعات، محاسبه می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که این روش، به‌طور متوسط، ۶۲/۲٪ از اعوجاجات هندسی تصویر خام را کاهش داده است. این کاهش سبب شده است متوسط دقت مدل‌های درون‌یاب عمومی ساده دویبعدی و سه‌بعدی بین فضای تصویر و زمین، به ترتیب، ۳۹/۹٪ و ۳۴/۱٪ افزایش یابد.

**کلیدواژه‌ها:** اصلاح هندسی، تصویربرداری پوش بروم، تناظریابی کمترین مربعات، دوربین BaySpec OCI-F.

## ۱- مقدمه

محدود حمل بار در پهپادها و هزینه‌های اجرایی بالا، استفاده از ابزارهای زمین‌مرجع‌سازی مستقیم دقیق میسر نیست (Habib et al., 2016a). همین مسئله منجر به استفاده از تصاویر فریم، در کنار ابزارهای زمین‌مرجع‌سازی مستقیم، به‌منظور بهبود کیفیت هندسی تصاویر پوش‌بروم شده است (Barbieux, 2018; Barbieux et al., 2016; Habib, et al., 2016a; Cariou & Chehdi, 2008; Suomalainen et al., 2014; Habib et al., 2016b). در این روش‌ها، با برقراری ارتباط میان تصویر پوش‌بروم و تصاویر فریم، تصویر پوش‌بروم اصلاح هندسی می‌شود. طبق این روند، تصویر اصلاح‌شده تصویری مجازی است که در خلال پردازش هم‌زمان تصاویر پوش‌بروم و فریم، بازنمونه‌برداری شده است.

از دیدگاه تئوری، ارتباط هندسی میان تصاویر با استفاده از مدل‌های ریاضی برقرار می‌شود. این مدل‌ها معمولاً، با استفاده از نقاط متناظر که از پیش با استفاده از روش تناظریابی اتوماتیکی همچون SIFT<sup>۵</sup> (Lowe, 2004) استخراج شده‌اند، محاسبه می‌شوند. برای نمونه، خورادو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از تصویر قائم تولیدشده از تصاویر فریم رنگی، موفق به ارائه روشی به‌منظور کاهش اعوجاجات هندسی تصاویر دریافتی از یک سنسور پوش‌بروم و ابرطیفی شدند. در این روش، ابتدا تصویر ابرطیفی به قطعات کوچک‌تر دارای هم‌پوشانی تقسیم شده است. سپس میان هریک از این قطعات و عکس نقشه‌ها، با استفاده از یک تبدیل هموگرافی، ارتباط برقرار شده است. در تعیین پارامترهای این تبدیل‌ها، تناظریابی عارضه‌مبنا به روش ORB<sup>۷</sup> به‌کار رفته است. در نهایت، قطعات تصاویر ابرطیفی کوچک که از نظر هندسی اصلاح شده‌اند، به یکدیگر موزاییک می‌شوند و تصویر قائم ابرطیفی و اصلاح‌شده را تشکیل می‌دهند.

امروزه از دوربین‌های ابرطیفی ارزان‌قیمت دارای توان تفکیک طیفی بالا و قابل نصب روی پهپادها، در کاربردهای گسترده‌ای، از جمله اکتشاف معادن، پایش محیط‌زیست و مزارع کشاورزی استفاده می‌شود. با توجه به محدودیت‌های فناوریانه در زمینه ثبت تصاویر ابرطیفی، معمولاً از هندسه پوش‌بروم در دریافت تصویر بهره گرفته می‌شود (Habib et al., 2016a). در هندسه تصویربرداری پوش‌بروم، تصویر نهایی از کنار هم قراردادن خطوط متوالی دریافت‌شده هنگام حرکت سنجنده پدید می‌آید. بدیهی است که کسب اطلاعات مورد اعتماد از داده‌های دریافتی، با استفاده این دوربین‌ها، در سایه اجرای کالیبراسیون‌های دقیق رادبومتریکی، طیفی و هندسی محقق می‌شود. با توجه به اغتشاشات حرکتی سنجنده در زمان دریافت تصاویر پوش‌بروم، اصلاح هندسی این تصاویر به‌مراتب پیچیده‌تر از دوربین‌های با هندسه تصویربرداری فریم است.

ارتباط هندسی تصاویر پوش‌بروم و زمین معمولاً از طریق مدل‌های پارامتریک، همانند مدل مراکز تصویری چندگانه (MPC)<sup>۱</sup> (Habib et al., 2005; Jannati et al., 2017; Orun & Natarajan, 1994) و یا با استفاده از مدل‌های غیرپارامتریک، همچون مدل توابع کسری (RF)<sup>۲</sup> (Barbarella et al., 2017; Jannati & Valadan Zoej, 2015; Tao & Hu, 2001) انجام می‌شود. این روش‌ها نیازمند نقاط کنترلی متعدد و با توزیع مناسب است که تهیه آنها مستلزم تأمین هزینه‌های اجرایی خواهد بود. استفاده از سکوه‌های ناپایدار همچون پهپاد، با افزایش اغتشاشات حرکتی سنجنده، سبب افزایش اعوجاجات هندسی در تصاویر پوش‌بروم می‌شود. این مسئله به افزایش نیاز به نقاط کنترلی و افزایش انعطاف‌پذیری مدل‌های مورد استفاده می‌انجامد. ابزارهای زمین‌مرجع‌سازی مستقیم، مانند GPS<sup>۳</sup> و INS<sup>۴</sup>، از جمله روش‌هایی‌اند که برای مقابله با این مسئله به‌کار رفته‌اند (Arroyo-Mora et al., 2019; Zhang et al., 2020). باوجوداین، با توجه به توانایی

1. Multiple Projection Centers
2. Rational Functions
3. Global Positioning System
4. Inertial Navigation System
5. Scale-Invariant Feature Transform
6. Jurado
7. Oriented Fast and Rotated BRIEF

پیشنهاد کردند. در این روش، از یک تصویر فریم که در باند پانکروماتیک اخذ شده است به منزله تصویر مبنا استفاده شده است. در نهایت، به کمک این تصویر و نیز نقاط کنترل زمینی و عوارض خطی ثبت شده در تصاویر مبنا و پوش‌بروم، میزان آفست لازم میان خطوط تصویر پوش‌بروم محاسبه و بر آنها اعمال می‌شود تا تصویر ابرطیفی اصلاح شده حاصل شود.

به نظر می‌رسد توسعه سامانه‌های نوین دریافت تصاویر ابرطیفی و سازوکارهای نوآورانه آنها، به منظور تأمین شرایط اصلاح هندسی این دسته از تصاویر، دریچه جدیدی را در زمینه گسترش و ارتقای راهکارهای اصلاح هندسی گشوده باشد. دریافت فریم‌های تصویری هم‌زمان با سطرهای تصاویر پوش‌بروم نمونه‌ای بارز از این سامانه‌های نوظهور تصویربرداری است که توانسته، با به کارگیری روش‌های پردازشی، بر فقدان دسترسی به سامانه‌های ناوبری فائق آید. انتظار می‌رود هم‌زمان با رشد سخت‌افزاری مبتکرانه در دریافت تصاویر طیفی، بررسی دقیق سازوکار داخلی و به تبع آن، طرح راهکارهای پردازشی مؤثر در افق پیش روی راهکارهای اصلاح هندسی قرار گیرد.

دوربین (۴۰۰-۱۰۰۰ nm) BaySpec OCI-F از دوربین‌هایی است که علاوه بر سنسور تصویربرداری پوش‌بروم، دارای سنسوری با هندسه تصویربرداری فریم است (BaySpec, 2016). در این سیستم تصویربرداری، هم‌زمان با دریافت هر خط از تصویر پوش‌بروم، یک تصویر فریم نیز اخذ می‌شود. به عبارت بهتر، با توجه به تعداد نمونه‌برداری بالا در این سنجنده (بیش از ده فریم بر ثانیه)، سنسور فریم ویدئویی از مسیر حرکت سنجنده در بازه تصویربرداری اخذ می‌کند. در این مقاله، روشی مستقل از نقاط کنترل به منظور کاهش اعوجاجات هندسی تصاویر پوش‌بروم این دوربین پیشنهاد شده است. در این راهکار، پس از هم‌مرجع‌سازی تصاویر دوربین فریم و آرایه خطی، با استفاده از تناظریابی

دقت مدل‌های ریاضی برآورد شده به کمک روش‌های تناظریابی به توزیع و دقت مکانی نقاط متناظر در دو تصویر بازمی‌گردد. روش‌های تناظریابی تصاویر به دو دسته کلی روش‌های عارضه‌مبنا و روش‌های ناحیه‌مبنا تقسیم می‌شوند. روش‌های تناظریابی عارضه‌مبنا، در مواجهه با تبدیل‌های هندسی پیچیده مانند تفاوت شدید در مقیاس و زاویه تصویربرداری، عملکرد بهتری دارند اما دقت تناظریابی در این روش‌ها کمتر از روش‌های ناحیه‌مبناست. تناظریابی کمترین مربعات (LSM)<sup>۱</sup> یکی از روش‌های تناظریابی ناحیه‌مبنایی است که در بهبود دقت مکانی تناظریابی عارضه‌مبنا کاربرد دارد (Yang et al., 2020; Sedaghat & Ebadi, 2015).

این روش، با استفاده از یک تبدیل هندسی و یک مدل تصحیح رادیومتریکی، تلاش می‌کند اختلاف درجات خاکستری میان دو پنجره را که حول موقعیت اولیه تناظرها در تصویر اصلی و تصویر هدف تعریف شده‌اند، کمینه کند (Tjahjadi & Handoko, 2017). به عبارت بهتر، تبدیل هندسی محاسبه شده موقعیت پیکسل‌های پنجره در تصویر اصلی را به موقعیت متناظر آنها در تصویر هدف انتقال می‌دهد. با توجه به اینکه مدل هندسی مورد اشاره با استفاده از موقعیت و محتوای رادیومتریکی تمامی پیکسل‌های واقع در پنجره تناظریابی برآورد می‌شود، انتظار می‌رود تبدیلی تعمیم‌پذیر بین دو تصویر، در محدوده این دو پنجره و پیرامون آنها باشد؛ بنابراین در صورتی که ابعاد پنجره به گونه‌ای در نظر گرفته شود که تقریباً تمامی محدوده هم‌پوشانی دو تصویر را شامل شود، می‌توان از مدل هندسی محاسبه شده در فرایند تناظریابی کمترین مربعات برای برقراری ارتباط سراسری میان دو تصویر بهره برد.

علاوه بر ابزارهای زمین‌مرجع‌سازی مستقیم، تصاویر فریم به تنهایی و یا در کنار عوارض خطی و نقاط کنترلی نیز، در اصلاح هندسی تصاویر پوش‌بروم استفاده شده‌اند (Ramirez-Paredes et al., 2016). برای نمونه، فنگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸) روشی به منظور کاهش اعوجاجات هندسی تصاویر پوش‌بروم هوابرد

1. Least Square Matching

2. Fang

دارای فاصله کانونی شانزده میلی متری و زاویه میدان دید ۲۱ درجه‌ای است و از دو آرایه خطی و صفحه‌ای تشکیل شده که از سامانه اپتیکی مشترکی، به صورت هم‌زمان داده دریافت می‌کنند (BaySpec, 2016; OCI-F Series Hyperspectral Cameras, 2016). شکل ۱ این دوربین و ساختار داخلی آن را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

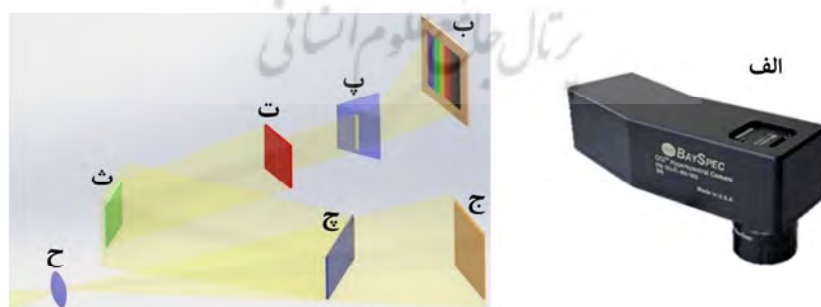
نور ورودی به دهانه این سنجنده، با استفاده از یک جداکننده، به دو سنسور خطی و صفحه‌ای تابانده و در بازه‌های زمانی یکسان و به صورت هماهنگ، نمونه‌برداری می‌شود. آرایه خطی در این دوربین از ۱۰۲۴ پیکسل تشکیل شده است که هر یک از آنها طیف نوری در بازه ۴۰۰-۱۰۰۰ نانومتر را در قالب ۱۲۸۰ باند تصویربرداری، ذخیره‌سازی می‌کند. به عبارت بهتر، تصویر ثبت شده از آرایه خطی به صورت ماتریسی با ابعاد ۱۲۸۰ × ۱۰۲۴ ذخیره می‌شود. از دیدگاه تئوری، تصویر خام پوش‌بروم از کنار هم قراردادن ستون‌های دریافتی با استفاده از آرایه خطی، در ساختاری ماتریسی پدید می‌آید. در شکل ۲، نمونه‌ای از یک تصویر خام پوش‌بروم دریافتی از طریق سنجنده OCI-F مشاهده می‌شود.

کمترین مربعات، ارتباط هندسی میان تصاویر فریم متوالی برقرار می‌شود و براساس آنها، تصویر خام پوش‌بروم بازنمونه‌برداری می‌شود. این روند با هدف کاهش اعوجاجات هندسی تصویر خام پوش‌بروم انجام شده است و در نتیجه، انتظار می‌رود تصویر بازسازی شده دارای پیچیدگی کمتری در برقراری ارتباط با فضای زمین باشد.

مقاله پیش رو از هفت بخش تشکیل شده است. در بخش دوم، دوربین OCI-F BaySpec و نحوه تشکیل تصویر در آن توضیح داده شده است. بخش سوم و چهارم، به ترتیب به معرفی داده‌های مورد استفاده و روش پیشنهادی اختصاص یافته‌اند. روند اجرا و نتایج به دست آمده در بخش پنجم مطرح شده است. بخش ششم به ارزیابی روش پیشنهادی و نتایج پرداخته است و بخش آخر به نتیجه‌گیری و طرح پیشنهادهای آتی اختصاص دارد.

## ۲- معرفی سنجنده و چالش‌های پیش‌رو

در این بخش، بررسی ساختار تشکیل تصویر یک سنجنده ابرطیفی سبک و قابل نصب در پهپادها، متعلق به کمپانی امریکایی BaySpec، در دستورکار قرار دارد. این سنجنده ابرطیفی با نام OCI-F (۴۰۰-۱۰۰۰ nm)



شکل ۱. دوربین OCI-F BaySpec و ساختار داخلی آن: قاب دوربین (Online, 2020) (الف)؛ سنسور پوش‌بروم (ب)؛ منشور (پ)؛ روزنه (ت)؛ بازتابنده نور (ث)؛ سنسور فریم (ج)؛ جداساز (چ)؛ لنز (ح)



شکل ۲. نمونه‌ای از تصویر خام دریافت‌شده از دوربین. (در تمامی تصاویر نمایش داده‌شده در این مقاله، مسیر حرکت سنجنده به صورت افقی و از سمت راست تصویر به سمت چپ است)

پیش از این اشاره شد، دوربین OCI-F طیف امواج الکترومغناطیس در بازه  $400-1000$  nm را در قالب  $1280$  باند، ثبت می‌کند. با توجه به کوچک بودن پهناي این باندها، انتظار می‌رود تأثیر نویز در مقدار ثبت‌شده از هر پیکسل، در این باندها، زیاد باشد. همچنین فاصله طیفی اندک میان دو باند متوالی ثبت‌شده (حدود  $nm$   $0/47$ ) سبب می‌شود درجه خاکستری ثبت‌شده از هر پیکسل، در چندین باند متوالی، تا حد زیادی مشابه یکدیگر باشند؛ از این رو این نرم‌افزار، هم‌زمان با اصلاح هندسی تصاویر پوش بروم و متناسب با تنظیمات مد نظر کاربر، با میانگین‌گیری روی باندهای متوالی، طیف ثبت‌شده از آرایه خطی را در تعداد باندهای کمتری بازنمونه‌برداری می‌کند تا مقدار سیگنال به نویز بهبود یابد. بدیهی است که این ادعا در زمان یکنواخت بودن رفتار بازتابی پدیده‌های تصویربرداری، در محدوده‌های میانگین‌گیری صحت دارد و در بازه‌های طیفی همراه با تغییرات شدید در بازتابندگی پدیده‌های تصویربرداری، کارایی لازم را نخواهد داشت. نتیجه اصلاح هندسی تصویر ارائه‌شده در شکل ۲ با استفاده از نرم‌افزار CubeCreator، در شکل ۳ نمایش داده شده است.

بدیهی است که ارتباط هندسی فضای تصویر و زمین در شکل ۳، در مقایسه با تصویر شکل ۲، پیچیدگی کمتری دارد و این تصویر امکان تفسیر بصری بهتری را نیز فراهم می‌آورد. با این حال همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعوجاجات هندسی در این تصویر همچنان وجود دارد و نرم‌افزار CubeCreator قادر به اصلاح کامل و دقیق آنها نبوده است. یکی از این مناطق، در شکل ۳، بزرگ‌نمایی شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اغتشاشات حرکتی در سکوه‌های سبک و مبتنی بر پهپاد باعث رخداد سطوح بالای اعوجاجات هندسی در تصویر خام پوش بروم شده است. بدیهی است که به‌کارگیری مدل‌های فیزیکی، همانند مراکز تصویری چندگانه، مستلزم استفاده از روابط ریاضی بسیار منعطف در وابسته‌کردن پارامترهای توجیه خارجی به زمان خواهد بود. نیاز به نقاط کنترلی متعدد همراه با توزیع متراکم و به‌کارگیری ملاحظات و قیود متعدد محاسباتی، به‌منظور جلوگیری از بدو وضعی دستگاه معادلات، چالش‌های استفاده از مدل‌های ریاضی منعطف در ساختار مدل مراکز تصویر چندگانه محسوب می‌شود. بر این اساس، اصلاح هندسی تصاویر خام با هدف کاهش اعوجاجات هندسی می‌تواند از پیچیدگی ارتباط هندسی فضای شیء و تصویر بکاهد و ارتباط دقیق‌تر، به‌همراه نیاز کمتر به نقاط کنترلی را فراهم آورد.

تصویر تولیدشده از طریق سنسور صفحه‌ای، در قالب ماتریسی با ابعاد مشابه آرایه خطی، ذخیره‌سازی می‌شود. این تصویر پانکروماتیک، به‌منظور کاهش تأثیرات هندسی حاصل از فقدان سخت‌افزارهای ناوبری و پایدارساز دقیق در تشکیل تصاویر ابرطیفی، دریافت می‌شود. فرایند کاهش اعوجاجات هندسی تصاویر با سازوکاری منتشرنشده در نرم‌افزار CubeCreator انجام می‌شود (BaySpec, 2016). نرم‌افزار مورد نظر در شرکت تولیدکننده و به‌همراه دوربین منتشر شده است. این نرم‌افزار، به کمک پردازش تصاویر فریم هم‌زمان، تصاویر موزاییک‌شده‌ای را تولید می‌کند که حاصل کنار هم قراردادن محتوای رادیومتریکی ثبت‌شده از آرایه خطی در بازه زمانی دریافت تصویر است. همان‌طور که



شکل ۳. تصویر اصلاح شده با استفاده از نرم افزار CubeCreator. بخشی از اعوجاجات باقی مانده در سطح تصویر اصلاح شده بزرگ نمایی شده است

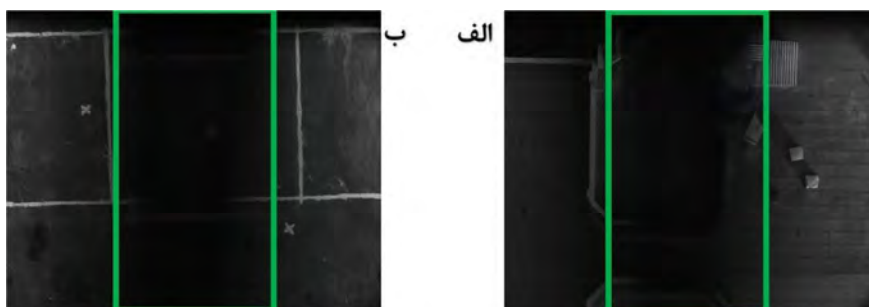
تصاویر طیفی تولید شده با استفاده از نرم افزار و انتشار نیافتن سازوکار پردازشی این نرم افزار، نویسندگان این مقاله را بر آن داشت، برای پردازش داده های خام دریافتی از سنجنده OCI-F به منظور تولید تصاویری با کیفیت هندسی بهتر، راهکاری را توسعه دهند.

### ۳- داده های مورد استفاده

در این تحقیق، برای دریافت داده از یک پهپاد مالتی روتور (DJI-M600)، مجهز به گیمبال با دقت یک درجه، استفاده شده است. با استفاده از این تجهیزات، دو تصویر بر فراز دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، واقع در شرق تهران، دریافت شد. ارتفاع پرواز از سطح متوسط منطقه، در تصویر اول، ۶۰ متر و در تصویر دوم، ۳۵ متر بوده است. در هر دو داده، مجموعه ای از نقاط کنترل، از طریق نقشه برداری زمینی و با دقت ۱ سانتی متر تعیین موقعیت شده اند. سایر اطلاعات این دو مجموعه داده در جدول ۱ آمده است.

علاوه بر پیچیدگی های مربوط به دریافت داده در این سامانه تصویربرداری ابرطیفی، تصاویر دریافتی از طریق دوربین فریم این سنجنده دارای نقصی سیستمی اند که به نمایش سایه بخش جداساز نور در تصاویر فریم منجر شده است. این مسئله سبب مخدوش شدن محتوای رادیومتریکی بخش مرکزی تصاویر فریم می شود. شکل ۴ نمونه هایی از تصاویر فریم دریافتی از این دوربین را نمایش می دهد. در این شکل، محدوده تاریک تصویر مشخص شده است و طبق آن، سایه جداساز سبب شده بخش میانی این تصویر تیره تر از گوشه های آن ثبت شود.

چالش هایی که این نقص به همراه خواهد داشت رؤیت ناپذیری محتوای رادیومتریکی متناظر با آرایه های خطی در تصویر فریم را شامل می شود که علت آن قرار گرفتن در محل سایه و ناممکن بودن استفاده از روش های تناظریابی در مناطق مخدوش، به منظور اتصال هندسی فریم های متوالی است. این چالش ها و نیز دلایل دیگری، همچون بروز اعوجاجات هندسی در



شکل ۴. نمونه هایی از تصاویر فریم با نقص سیستمی ناشی از سایه جداساز

جدول ۱. اطلاعات در زمینه داده‌های مورد استفاده

داده	تعداد خطوط	ابعاد پیکسل (cm)		سرعت حرکت سکو (m/s)
		AT <sup>۱</sup>	CT <sup>۲</sup>	
اول	۱۴۰۰	۵	۲	۱/۳۳
دوم	۷۰۰	۵	۱/۲	۰/۷۵

۱. در امتداد مسیر حرکت سکو  
۲. عمود بر مسیر حرکت سکو



شکل ۵. تصاویر خام اول (الف) و دوم (ب). در این دو تصویر، نقاط کنترلی با مثلث‌های سفید مشخص شده‌اند

#### ۴-۱- تعیین موقعیت آرایه خطی در فضای تصاویر

##### فریم هم‌زمان

مطابق با الگوی هندسی ارائه‌شده در شکل ۱، مرکز تصویر آرایه‌های خطی و تصویر فریم سنجنده OCI-F بر هم منطبق است. این اتفاق به هم‌مکانی محل دریافت تصویر فریم و آرایه خطی هم‌زمان با آن منجر می‌شود. به عبارت بهتر، از نظر هندسی برای یک فریم و آرایه خطی هم‌زمان با آن، سیستم مختصات تصویری یکسانی وجود دارد و یک تبدیل هموگرافی می‌تواند به‌منزله مدل ارتباطی دقیق میان این دو تصویر به‌کار رود (Pöntinen, 1999). نظر به اینکه چیدمان آرایه‌های خطی منطبق بر مکان هندسی یک خط است و در تبدیل هموگرافی هندسه خط مخدوش نمی‌شود (Guerrero & Sagues, 2001)، در این بخش، به‌منظور یافتن معادله خط متناظر با آرایه‌های خطی در فضای تصویر فریم هم‌زمان، بیان راهکاری در دستورکار قرار دارد. در نگاه نخست، تناظریابی رادیومتریکی میان محتوای ثبت‌شده در آرایه‌های خطی با تصاویر فریم می‌تواند به جانمایی و هم‌مرجع‌سازی آنها بینجامد. چالش‌هایی، همچون وجود دوران و اختلاف مقیاس بین

شکل ۵. تصویر خام پوش بروم، مربوط به دو داده مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این شکل، نقاط کنترلی با استفاده از مثلث‌های سفید مشخص شده‌اند.

#### ۴- روش شناسی

در این تحقیق، راهکار پیشنهادی شامل سه گام متوالی است. در گام نخست، موقعیت متناظر با آرایه‌های خطی در فضای تصویر فریم هم‌زمان، شناسایی می‌شود. این اقدام فرایندی کالیبراسیونی است و در گام‌های بعدی، در روند اصلاح هندسی تصاویر کاربرد دارد. در گام دوم، یک فریم از ویدئوی فریم‌های دریافتی، در بازه زمانی اخذ تصویر، مبنا قرار می‌گیرد تا پارامترهای ارتباط هندسی سایر فریم‌ها با فریم مبنا، به‌کمک فرایندی متوالی مبتنی بر تناظریابی سراسری کمترین مربعات، برآورد شود. در گام سوم، با مشخص‌بودن موقعیت آرایه‌های خطی در فضای تصاویر فریم، درجات خاکستری ثبت‌شده در آرایه‌های خطی بازنمونه‌برداری می‌شود. در ادامه، مراحل روش پیشنهادی مبنا قرار می‌گیرد و هر گام از آن، به‌تفکیک، در زیربخش‌های ۴-۱ تا ۴-۳ تشریح می‌شود.

سری زمانی فریم‌های دریافتی جدا می‌شوند. این فریم‌ها، در ادامه، «فریم‌های کنترلی» نام‌گذاری شده‌اند. در صورت نبود هم‌پوشانی کافی میان فریم‌های کنترلی، تصاویر فریم بیشتری در حد فاصل فریم‌های کنترلی انتخاب می‌شود تا اجرای مثلث‌بندی دسته‌اشعه امکان‌پذیر باشد. پس از مثلث‌بندی دسته‌اشعه میان فریم‌های کنترلی (و فریم‌های میانی احتمالی)، موقعیت تصویری متناظر با هر نقطه کنترلی در فریم کنترلی متناظر با آن، برآورد می‌شود. شکل ۶ نحوه تعیین فریم‌های کنترلی را توضیح می‌دهد.

با برآورد موقعیت تصویری تمامی نقاط کنترلی در فریم‌های کنترلی، فهرستی از نقاط تصویری متناظر با آرایه‌های خطی حاصل می‌شود. هر نقطه کنترلی، در صورت رؤیت‌شدن در فضای تصویر، می‌تواند یک موقعیت پیکسلی در آرایه خطی (شماره سطر در تصویر خام پوش‌بروم) و مختصات رقومی متناظر در تصویر فریم را برآورد کند. با مشاهده بیش از یک نقطه کنترلی، امکان برآورد رابطه تبدیل درایه‌های آرایه خطی به مختصات رقومی متناظر در فضای تصویر فریم هم‌زمان، از طریق رابطه (۱)، فراهم می‌آید.

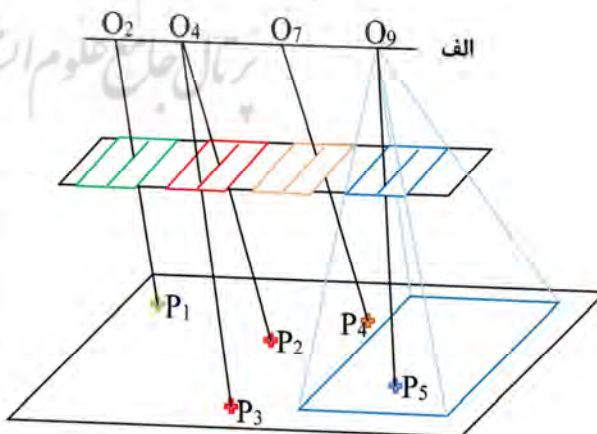
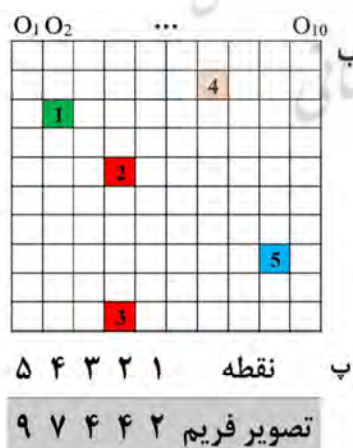
$$l_f = a_0 + a_1 l_p$$

$$s_f = b_0 + b_1 l_p$$

رابطه (۱)

آرایه‌های خطی و تصاویر فریم و همچنین تناظریابی ناحیه‌مبنای یک‌بعدی، پیچیدگی این فرایند را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، به دلیل وجود نقص سیستمی در ثبت تصاویر فریم در این سنجنده، محتوای رادیومتریکی قابل اطمینان، در موقعیت‌های متناظر با چیدمان آرایه‌های خطی، ثبت نشده است و از این‌رو امکان به‌کارگیری روش‌های تناظریابی درمورد این سنجنده، به‌طور کلی منتفی خواهد بود؛ به همین دلیل در روش پیشنهادی، به کمک نقاط کنترل زمینی، فرایند شناسایی و جانمایی آرایه‌های خطی در فضای تصاویر فریم هم‌زمان انجام شده است.

در این فرایند، ابتدا تصویر خام پوش‌بروم از مناطق تصویربرداری شده تولید می‌شود. در ادامه و با تفسیر بصری تصویر خام، موقعیت نقاط کنترلی قابل رؤیت، شناسایی و اندازه‌گیری می‌شوند. منظور از نقاط کنترلی، نقاطی است که مختصات تصویری آنها توسط اپراتور انسانی قابل اندازه‌گیری است، و نیازی به مختصات زمینی این نقاط وجود ندارد. با مشخص‌بودن زمان دریافت ستون‌های مربوط به ثبت نقاط کنترلی، تصاویر فریم هم‌زمان درمورد هر نقطه کنترل شناسایی می‌شود. با این اقدام، تمامی تصاویر فریم هم‌زمان با دریافت نقاط کنترلی در تصویر پوش‌بروم شناسایی و از



شکل ۶. انتخاب فریم‌های کنترلی برای نقاط: در فرایند دریافت تصویر از طریق دوربین (الف)، تصویر هر نقطه کنترل در ستونی خاص از تصویر پوش‌بروم (ب) ثبت شده است. شماره این ستون شماره فریم کنترلی نظیر آن نقطه (پ) را مشخص می‌کند



هنگام تصویربرداری سنجنده BaySpec OCI-F، تصاویر فریم با نرخ بالای زمانی دریافت می‌شوند. بدیهی است که در صورت حرکت سکو در بازه زمانی اخذ تصویر، اختلاف منظر در تصاویر فریم متوالی به وجود آید. باین حال در یک ویدئو از تصاویر فریم، کمترین اختلاف منظر در جفت فریم‌های متوالی اتفاق می‌افتد. بر این اساس، ارتباط هندسی فریم‌های متوالی دارای پیچیدگی کمتری است و با مدل‌های ساده هندسی، همچون تبدیل افاین دوبعدی یا پروژکتیو دوبعدی، می‌توان ارتباط نسبتاً دقیقی بین آنها برقرار کرد. بدیهی است که افزایش سرعت سکوی تصویربرداری و به تبع آن، افزایش بازعکسی در فریم‌های متوالی، در صورت هم‌زمانی با تغییرات ارتفاعی بالا در صحنه تصویربرداری، می‌تواند دقت این ارتباط را مخدوش کند. با این اوصاف، مشخص است که با افزایش اختلاف منظر میان فریم  $\Delta m$  و فریم مبنا، استفاده از یک تبدیل ساده هندسی ( $T_i^b$ ) دچار کاهش دقت شود. به همین دلیل، در روش پیشنهادی،  $T_i^b$  از طریق اعمال متوالی تبدیلات هندسی در فریم‌های متوالی برآورد می‌شود. به عبارت بهتر، در صورتی که اختلاف فریم  $\Delta m$  و فریم مبنا بیش از یک فریم باشد، رابطه (۳) ساختار تبدیل  $T_i^b$  را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} (x_b, y_b) &= T_i^b(x_i, y_i) \\ &= T_{b+1}^b(T_{b+2}^b(\dots(T_{i-1}^{i-2}(T_i^{i-1}(x_i, y_i)))) \dots)) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این معادله،  $T_i^j$  تبدیل هندسی بین فریم  $\Delta m$  و  $\Delta m$  است. طبق این رابطه، موقعیت مکانی پیکسل‌های تصویر فریم  $\Delta m$ ، طی اعمال متوالی تبدیلات هندسی میان فریم‌های متوالی، به موقعیت متناظر در فضای تصویر فریم مبنا انتقال می‌یابد. با این اقدام، انتظار می‌رود پیچیدگی ارتباط هندسی فریم‌های همراه با بازعکسی بلند، از طریق اعمال چندین تبدیل متوالی ساده، مدل‌سازی شود.

پارامترهای ارتباطی معمولاً پس از شناسایی نقاط متناظر در دو تصویر برآورد می‌شوند. الگوریتم‌های

در رابطه (۱)،  $l_p$  مختصات رقومی یک پیکسل از آرایه خطی  $l_f$  و  $s_f$  به ترتیب، موقعیت سطر و ستون در تصویر فریم است. ضرایب  $a_0, a_1, b_0, b_1$  نیز ارتباط درایه‌های آرایه خطی را با مختصات رقومی متناظر در فضای تصویر فریم برقرار می‌کنند. این ضرایب، در صورت وجود بیش از دو نقطه کنترلی، به کمک روش تخمین کمترین مربعات برآورد می‌شوند. نتایج برآورد این ضرایب، در مورد سنجنده OCI-F در بخش ۵ بیان شده است.

## ۲-۴- برآورد مدل ارتباط هندسی میان تصاویر فریم هم‌زمان

همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، به‌ازای دریافت هر خط از تصویر پوش بروم، یک تصویر فریم هم‌زمان اخذ می‌شود. با مشخص بودن جانمایی آرایه‌های خطی در فضای تصویر فریم هم‌زمان (بخش ۴-۱)، از طریق هم‌مرجع‌سازی تصاویر فریم می‌توان خطوط متوالی تصاویر خام پوش بروم را بازآرایی کرد. بر این اساس، ایده اصلی در روش پیشنهادی، یافتن ارتباط هندسی تمامی فریم‌های سری زمانی نسبت به یک فریم مبنا، با هدف جانمایی موقعیت‌های متناظر با آرایه‌های خطی در سیستم مختصات تصویری فریم مبناست. در این روند، پس از انتخاب تصویر فریم مبنا ( $f_b(x, y)$ )، ارتباط هندسی همه فریم‌های دریافتی در بازه زمانی اخذ تصویر ( $f_i(x, y), i = 1, 2, \dots, n$ ) با فریم مبنا برآورد می‌شود (رابطه (۲)).

$$(x_b, y_b) = T_i^b(x_i, y_i), \quad i \neq b \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این معادله،  $(x_i, y_i)$  مختصات رقومی پیکسل‌های تصویر فریم  $\Delta m$ ،  $(x_b, y_b)$  مختصات متناظر در سیستم مختصات رقومی فریم مبنا و  $T_i^b, (i = 1, 2, \dots, n)$  تبدیل هندسی میان فریم  $\Delta m$  و فریم مبناست. با معلوم‌بودن مکان‌های متناظر با درایه‌های آرایه خطی در تصویر فریم (رابطه (۱)) و در اختیار داشتن تبدیل  $T_i^b$  می‌توان جانمایی هر خط دریافت‌شده از تصویر پوش بروم را در سیستم مختصات رقومی تصویر مبنا شناسایی کرد.

به‌منزله تصویر هدف  $f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$  و تصویر دیگر  $(i)$  را به‌منزله تصویر اصلی  $f_i(x_i, y_i)$  انتخاب می‌کند. مدل‌های هندسی و رادیومتریکی بسیار و متفاوتی، در تناظریابی کمترین مربعات، به‌کار رفته است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، با توجه به اختلاف منظر اندک بین دو تصویر متوالی، تبدیل افاین دوبعدی که در رابطه (۴) بیان شده است، دقت مناسبی در برقراری ارتباط هندسی میان تصاویر فریم متوالی دارد. در بسیاری از تحقیقات انجام‌شده در زمینه تناظریابی کمترین مربعات نیز، از مدل افاین دوبعدی برای برقراری ارتباط بین دو تصویر استفاده شده است (Sedaghat & Ebadi, 2015; Tjahjadi & Handoko, 2017). این موضوع دقت کافی این مدل را برای تناظریابی کمترین مربعات، بازگو می‌کند؛ در نتیجه، در این تحقیق نیز از این تبدیل هندسی استفاده شده است.

$$\begin{aligned} x_{i-1} &= c_1 x_i + c_2 y_i + c_3 \\ y_{i-1} &= c_4 x_i + c_5 y_i + c_6 \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه،  $c_1, \dots, c_6$  پارامترهای تبدیل افاین،  $x_{i-1}$  و  $y_{i-1}$  مختصات نقاط پنجره در تصویر هدف و  $x_i$  و  $y_i$  مختصات نقاط پنجره در تصویر اصلی‌اند. تصحیح رادیومتریکی مورد استفاده نیز از دو ترم اختلاف کانتراست میان دو تصویر ( $R_1$ ) و اختلاف روشنایی دو تصویر ( $R_2$ ) تشکیل شده است. رابطه (۵) ارتباط رادیومتریکی میان دو پنجره را نمایش می‌دهد.

$$f_i(x_i, y_i) = R_1 \times f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}) + R_2 \quad \text{رابطه (۵)}$$

بنابراین تابع بیان‌شده ( $F$ ) در رابطه (۶) اختلاف درجات خاکستری میان دو پنجره تصویر اصلی و تصویر هدف را پس از اعمال مدل‌های هندسی و رادیومتریکی، بیان می‌کند. مجموع مربعات مقادیر تابع  $F$  به‌ازای تمامی موقعیت‌های پنجره تناظریابی به‌منزله تابع هدف در روند تناظریابی مبتنی بر کمترین مربعات محسوب می‌شود و یافتن پارامترهای آن، با هدف کمینه‌سازی، در دستور کار قرار دارد.

تناظریابی خودکار، مانند SIFT، دچار چالش‌هایی همچون احتمال شناسایی نقاط متناظر نادرست و عدم قطعیت در شناسایی مکان دقیق نقاط متناظرند (Safdarinezhad et al., 2019). با توجه به ماهیت به‌هم‌پیوسته و متوالی روش پیشنهادی، چه بسا وجود چالش‌های اشاره‌شده در ایجاد انحراف یا تشدید انباشت خطای سیستماتیک مؤثر باشد.

تناظریابی مبتنی بر برآورد کمترین مربعات یکی از ابزارهایی است که به‌منظور بهبود دقت مکانی نقاط متناظر در تصاویر همراه با اختلاف منظر کاربرد دارد. این فرایند، با استفاده از تبدیل‌های هندسی و رادیومتریکی، شکل و درجات خاکستری پنجره تصویر اصلی را به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که اختلاف درجات خاکستری میان پنجره تبدیل‌یافته و پنجره تصویر هدف، کمینه شود (Tjahjadi & Handoko, 2017). معمولاً تبدیل هندسی محاسبه‌شده در این فرایند دارای اعتبار کافی در محدوده پنجره‌های تناظریابی و اطراف آنهاست. بر این اساس، تبدیل مورد استفاده در صورتی توانایی برقراری ارتباط تعمیم‌پذیر و سراسری بین دو تصویر فریم متوالی را دارد که پنجره‌های تعریف‌شده تقریباً تمامی محدوده هم‌پوشانی دو تصویر را دربر گیرد. با توجه به میزان زیاد نمونه‌برداری در دریافت تصاویر فریم (بیش از ده فریم بر ثانیه) و سرعت محدود پهنادهای مالتی روتور، پوشش تصاویر فریم متوالی در این دوربین اغلب بیش از ۹۵٪ است. این نکته امکان تعیین پنجره با ابعاد بسیار بزرگ در تصاویر را فراهم می‌آورد؛ در نتیجه، انتظار می‌رود تأثیر نویز تصویری در این روش، بسیار اندک باشد و تناظریابی انجام‌شده و به‌تبع آن، مدل هندسی محاسبه‌شده دقت مطلوبی داشته باشد. از این‌رو تبدیل‌های به‌کاررفته در این روش به‌کمک تناظریابی کمترین مربعات میان تصاویر فریم متوالی محاسبه شده‌اند. بدیهی است که روش پیشنهادی، به‌منظور تعیین تبدیل هندسی بین دو تصویر فریم متوالی  $i-1$  و  $i$ ، تصویری را که به فریم مبنا نزدیک‌تر است ( $i-1$ )،

پس از انتخاب مقادیر اولیه، ماتریس ضرایب مجهولات و بردار اختلاف درجات خاکستری میان دو پنجره، با استفاده از مقادیر اولیه ایجاد می‌شوند. چگونگی تشکیل این ماتریس‌ها در رابطه‌های (۸) و (۹) بیان شده است.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial c_1} & \frac{\partial F}{\partial c_2} & \frac{\partial F}{\partial c_3} & \frac{\partial F}{\partial c_4} & \frac{\partial F}{\partial c_5} & \frac{\partial F}{\partial c_6} & \frac{\partial F}{\partial R_1} & \frac{\partial F}{\partial R_2} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial F}{\partial c_1} = R_1 \frac{\partial f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})}{\partial x_{i-1}} \times \frac{\partial x_{i-1}}{\partial c_1} = R_1 f_{x_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}) x_i$$

$$\frac{\partial F}{\partial c_2} = R_1 \frac{\partial f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})}{\partial x_{i-1}} \times \frac{\partial x_{i-1}}{\partial c_2} = R_1 f_{x_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}) y_i$$

$$\frac{\partial F}{\partial c_3} = R_1 \frac{\partial f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})}{\partial x_{i-1}} \times \frac{\partial x_{i-1}}{\partial c_3} = R_1 f_{x_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1})$$

$$\frac{\partial F}{\partial c_4} = R_1 \frac{\partial f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})}{\partial y_{i-1}} \times \frac{\partial y_{i-1}}{\partial c_4} = R_1 f_{y_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}) x_i$$

$$\frac{\partial F}{\partial c_5} = R_1 \frac{\partial f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})}{\partial y_{i-1}} \times \frac{\partial y_{i-1}}{\partial c_5} = R_1 f_{y_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1}) y_i$$

$$\frac{\partial F}{\partial c_6} = R_1 \frac{\partial f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})}{\partial y_{i-1}} \times \frac{\partial y_{i-1}}{\partial c_6} = R_1 f_{y_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1})$$

$$\frac{\partial F}{\partial R_1} = f_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$$

$$\frac{\partial F}{\partial R_2} = 1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$W = F \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه (۸)،  $f_{x_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1})$  و  $f_{y_{i-1}}(x_{i-1}, y_{i-1})$  به ترتیب، مشتق تصویر هدف در راستای  $x_{i-1}$  و  $y_{i-1}$  هستند که با استفاده از کرنل‌های مشتق‌گیری مرسوم می‌توان آنها را محاسبه کرد. پس از محاسبه  $B$  و  $W$  بردار تصحیحات مجهولات ( $\delta$ ) با استفاده از رابطه (۱۰) به دست می‌آید و سپس به مقادیر اولیه مجهولات افزوده می‌شود. این فرایند تا زمانی ادامه خواهد یافت که اندازه بردار تصحیحات کمتر از خطای مورد قبول در سرشکنی شود.

$$\delta = (B^T B)^{-1} B^T W \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

شکل ۷ فلوجارت مربوط به محاسبه یک تبدیل هندسی، با استفاده از تناظریابی کمترین مربعات را نمایش می‌دهد.

$$F = f_i(x_i, y_i) - (R_1 \times f_{i-1}(c_1 x_i + c_2 y_i + c_3, c_4 x_i + c_5 y_i + c_6) + R_2) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این فرایند،  $f_i(x_i, y_i)$  بردار مشاهدات و هشت پارامتر مدل‌های هندسی و رادیومتریکی به‌منزله مجهولات در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه این تابع نسبت به پارامترهای مجهول غیرخطی است، مجهولات در فرایندی تکراری محاسبه می‌شوند و به مقادیر اولیه برای آنها نیاز است. در هر تکرار از این فرایند، برای هر یک از مجهولات، مقدار تصحیح لازم محاسبه و به مقادیر اولیه افزوده می‌شود. مدل ریاضی مورد استفاده در فرایند کمترین مربعات در رابطه (۷) نمایش داده شده است.

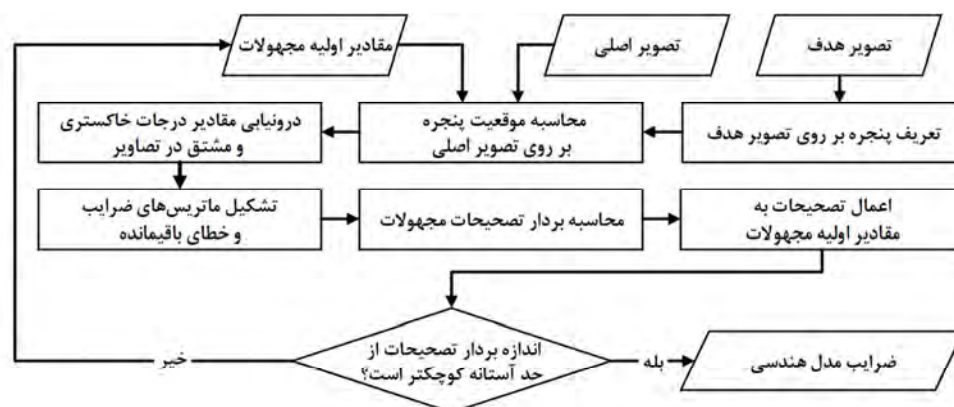
$$W_{n \times 1} = B_{n \times 8} \delta_{8 \times 1} + v_{n \times 1} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\delta_{8 \times 1} = [dc_1 \ dc_2 \ dc_3 \ dc_4 \ dc_5 \ dc_6 \ dR_1 \ dR_2]^T$$

در این معادله،  $B_{n \times 8}$  ماتریس ضرایب مجهولات،  $\delta_{8 \times 1}$  بردار تصحیحات مجهولات،  $v_{n \times 1}$  خطای باقی‌مانده و  $W_{n \times 1}$  بردار اختلاف درجات خاکستری میان دو پنجره است. مقادیر  $dc_1, \dots, dR_2$  نیز، به ترتیب، میزان تصحیحات پارامترهای  $c_1, \dots, R_2$  است. با توجه به اینکه فاصله زمانی میان دریافت دو تصویر فریم متوالی بسیار اندک (کمتر از ۰/۱ ثانیه) است و نسبت بازه‌هایی میان دو تصویر متوالی به ارتفاع پرواز از سطح متوسط منطقه نیز کوچک و پوشش تصاویر بیش از ۹۵٪ است، مقادیر اولیه مجهولات به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در تکرار اول، تغییری در درجات خاکستری و موقعیت پیکسل‌های پنجره اصلی ایجاد نگردد. مقادیر انتخابی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. مقادیر اولیه در تناظریابی کمترین مربعات

$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$R_1$	$R_2$
۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰

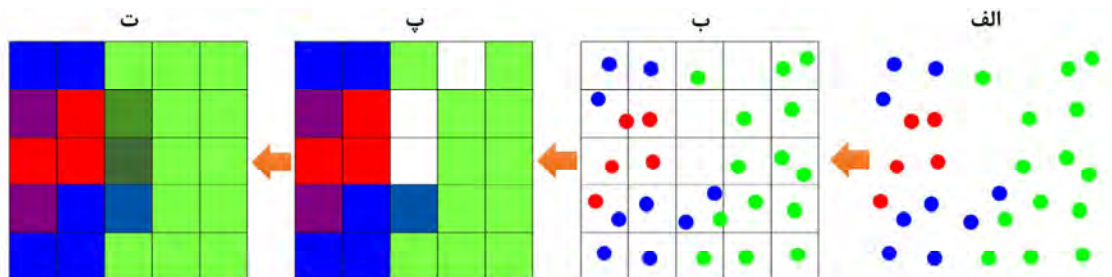


شکل ۷. فلوجارت روش محاسبه یک تبدیل هندسی بین دو فریم متوالی

### ۳-۴- بازنمونه برداری تصویر خام پوش بروم

از لحاظ تئوری، فرایند بازنمونه برداری با دو رویکرد محاسباتی متفاوت انجام پذیر است. اگر تصویر بازنمونه برداری شده با  $I_t(x_t, y_t)$  و تصویر اولیه با  $I_0(x_0, y_0)$  نام گذاری شوند، در رویکرد نخست، پس از ساخت یک شبکه رستری خالی متناسب با ابعاد تصویر  $I_t$  برای هر پیکسل از آن یک درجه خاکستری از تصویر  $I_0$  شناسایی می شود. این روند نیازمند در دسترس بودن مدل ارتباط هندسی  $(x_0, y_0) = F(x_t, y_t)$  است. در رویکرد دوم، به ازای هر موقعیت از  $I_0$  مکان منازطری در  $I_t$  برآورد می شود و سپس مقادیر درجات خاکستری به آن موقعیت الصاق می شوند. در این رویکرد، مدل ارتباط هندسی به صورت  $(x_t, y_t) = G(x_0, y_0)$  در دسترس است. در هر رویکرد، روال اجرایی تفاوت دارد و هر یک دارای محدودیت هایی است. احتمال تولید درجات خاکستری تکراری و نیز استفاده نشدن از برخی درجات خاکستری  $I_0$  جزء محدودیت های رویکرد نخست محسوب می شود. از سوی دیگر، برآورد موقعیت های مکانی نامنظم و احتمال رخداد مناطق گپ در فضای  $I_t$  از چالش های به کارگیری رویکرد دوم است. مهم ترین عامل تعیین کننده، در انتخاب رویکرد بازنمونه برداری، دسترسی به مدل های ارتباط هندسی است. مدل ارتباط هندسی، در مقاله حاضر،  $(x_t, y_t) = G(x_0, y_0)$  است و به همین دلیل، رویکرد

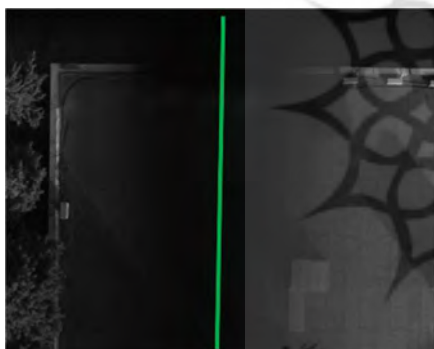
دوم بازنمونه برداری به کار رفته است. به عبارت بهتر، پس از یافتن تبدیل  $T_i^b, (i = 1, 2, \dots, n)$  برای همه فریم های سری زمانی (بخش ۴-۲)، موقعیت های پیکسلی متناظر با آرایه های خطی در تصویر فریم (بخش ۴-۱) به سیستم مختصات رقومی فریم مبنا منتقل می شود. بدیهی است که بر اثر ماهیت پیوسته تبدیلات هندسی و پیچیدگی حرکتی سنجنده در بازه زمانی دریافت تصویر، موقعیت های برآورد شده در شبکه ای منظم برآورد نشوند. بر این اساس، رویکرد پیشنهادی به تولید نقاط نامنظمی در سیستم مختصات تصویر مبنا می انجامد. بعد از انتقال موقعیت پیکسلی متناظر با آرایه های خطی در تمامی تصاویر فریم به فریم مبنا، روند بازنمونه برداری از طریق رسترسازی نقاط نامنظم پی گرفته می شود. در این فرایند با تولید شبکه ای منظم در پهنه گسترش یافته با نقاط نامنظم، درجه خاکستری هر سلول از شبکه، از طریق درجات خاکستری نقاط واقع در آن سلول به دست می آید. در صورت وجود بیش از یک نقطه در هر سلول، مقدار میانگین جاگذاری می شود و در سلول های فاقد نقطه نامنظم، درون یابی وزن دار مبتنی بر معکوس فاصله از سلول های مجاور حاوی مقدار، انجام می شود. بدین ترتیب مناطق گپ در روند بازنمونه برداری، از طریق درون یابی، مقاداردهی خواهند شد. شکل ۸ روند رسترسازی شبکه نقاط نامنظم را نمایش می دهد.



شکل ۸. رستسازی شبکه نقاط نامنظم: شبکه نقاط نامنظم (الف)؛ تعریف شبکه‌ای منظم روی شبکه نقاط نامنظم (ب)؛ اختصاص درجات خاکستری به نقاطی از شبکه منظم که دست کم یک نقطه از شبکه نامنظم را شامل شده‌اند (پ)؛ پرکردن گپ‌های باقی مانده به کمک پیکسل‌های مجاور که در قسمت (پ) مقداره‌ی شدند (ت)

## ۵- پیاده‌سازی

فضای تصویر فریم را نمایش می‌دهد. این موقعیت در محدوده میانی تصویر قرار دارد که دارای محتوای رادیومتریکی مناسبی نیست.



شکل ۹. موقعیت محاسبه شده برای آرایه خطی در فضای تصویر فریم

طبق آنچه در بخش ۴ بیان شد، نخستین مرحله روش پیشنهادی به محاسبه موقعیت آرایه‌های خطی روی تصویر فریم اختصاص دارد. با توجه به دراختیاربودن دو مجموعه داده، پارامترهای خط مربوط به این موقعیت از طریق هریک از داده‌ها به‌طور مستقل محاسبه شده است. جدول ۳ تعداد نقاط کنترل و چک مستقل به‌کاررفته در این مرحله و دقت برازش خط به هریک از داده‌ها را نشان می‌دهد. خطای بیان شده در این جدول برابر با میانگین مربعات خطای عمود بر خطوط برازش یافته در نقاط چک مستقل است.

جدول ۳. تعداد نقاط کنترل و چک مستقل و خطای برازش خطوط در هریک از مجموعه داده‌ها

داده	تعداد نقاط کنترل	تعداد نقاط چک مستقل	
		خطا (پیکسل)	چک مستقل
اول	۱۸	۱/۸۰	۲۴
دوم	۱۱	۳/۲۱	۱۰

مطابق با الگوی ارائه شده در روش پیشنهادی، انتخاب یک فریم به‌منزله فریم مبنا دومین گام اجرای روش خواهد بود. با توجه به ماهیت انباشت‌شونده خطاهای هم‌مرجع‌سازی در روش پیشنهادی، فریم مرکزی از ویدئو به‌منزله فریم مبنا انتخاب شده است. با این اقدام، برای برقراری ارتباط دورترین فریم‌های زمانی با فریم مبنا به کمترین تعداد تبدیل هندسی نیاز است. پس از انتخاب فریم مرکزی به‌منزله فریم مبنا، موقعیت هریک از خطوط تصویر پوشش بروم با استفاده از رابطه (۳) در سیستم مختصات تصویر مرکزی محاسبه می‌شود. به‌عبارت دیگر، ارتباط میان هریک از فریم‌ها و فریم

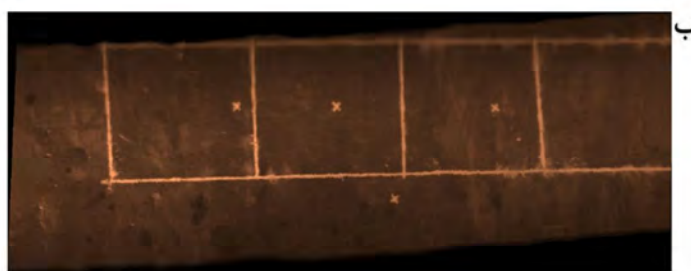
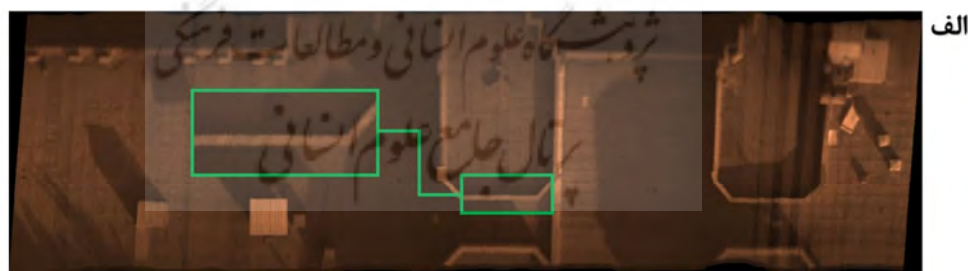
عواملی همچون همبستگی پارامترهای توجیه خارجی و داخلی و اختلاف تعداد نقاط مورد استفاده در دو مجموعه داده سبب شده‌اند مقادیر محاسبه شده از داده اول و دوم اختلاف اندکی با یکدیگر داشته باشند؛ در نتیجه، متوسط مقادیر محاسبه شده از داده اول و دوم به‌منزله پارامترهای موقعیت آرایه خطی در نظر گرفته شده است. شکل ۹ موقعیت محاسبه شده در

اگرچه ممکن است در نگاه اول، استفاده از تمامی محدوده هم‌پوشانی دو تصویر به منزله پنجره تناظریایی، حالتی بهینه برای تعیین مدل هندسی باشد، مشکلاتی مانند تأثیرات ناشی از اعوجاجات عدسی یا جابه‌جایی‌های ارتفاعی، به‌ویژه در گوشه‌های تصویر، می‌تواند دقت تناظریایی را کاهش دهد. همچنین، با توجه به اینکه تصاویر فریم متوالی پوشش طولی کامل ندارند، در تناظریایی نمی‌توان از ستون‌های ابتدایی و انتهایی تصویر استفاده کرد؛ در نتیجه، ابعاد پنجره به‌گونه‌ای تعریف شده که از هر چهار طرف تصویر، ۵۰ پیکسل فاصله داشته باشد (این مقدار به‌صورت تجربی و براساس پوشش طولی تصاویر و ابعاد فریم تصویر انتخاب شده است). برای کاهش حجم محاسباتی، میزان نمونه‌برداری در محدوده پنجره تناظریایی با فاصله‌های سه‌پیکسلی اجرا شده است.

شکل ۱۰ تصاویر اصلاح‌شده در دو مجموعه داده را نشان می‌دهد. مقایسه این تصاویر با تصاویر خام (شکل ۵) بیانگر موفقیت روش پیشنهادی در اصلاح تأثیرات هندسی ناشی از اغتشاشات حرکتی سنجنده، در بازه زمانی دریافت تصویر است.

مرکزی از طریق تنها مسیر میان آن دو فریم برقرار شده که صرفاً از فریم‌های متوالی تشکیل شده است. ارتباط میان فریم‌های متوالی نیز، به کمک تناظریایی ناحیه‌مبنای کمترین مربعات، به‌صورت سراسری برآورد می‌شود.

کیفیت تناظریایی ناحیه‌مبنای مبتنی بر تخمین کمترین مربعات تحت تأثیر پنج پارامتر قرار دارد: بافت و محتوای تصویری، سطح اعوجاجات هندسی، تابع فعال‌سازی (تبدیل هندسی و رادیومتریکی)، مقادیر اولیه مجهولات، ابعاد پنجره تناظریایی (Tjahjadi & Handoko, 2017). در این بین، کنترل چندانی در مورد بافت و اعوجاجات هندسی وجود ندارد زیرا تابعی از محتوای تصویری و هندسه حرکتی سکوی تصویربرداری است. پارامترهای قابل کنترل به تبدیل هندسی و رادیومتری محدودند که متناسب با پیش‌فرض‌های حرکتی و شرایط نوری انتخاب می‌شوند. به‌علت هندسه حرکتی سکوی پهپاد و تعداد زیاد دریافت تصاویر فریم متوالی، در این تحقیق از تبدیل افاین دوبعدی و رابطه خطی اصلاح رادیومتری استفاده شده است.



شکل ۱۰. تصاویر اصلاح‌شده با روش پیشنهادی

## ۶- بحث و ارزیابی

در این بخش، عملکرد روش پیشنهادی در دو سطح ارزیابی شده است. در سطح اول، به‌منظور سنجش میزان کاهش اعوجاجات هندسی در سطح تصویر، از عوارض خطی استفاده شده است. در این مرحله، تصاویر خام و تصاویر تولیدشده به‌کمک نرم‌افزار CubeCreator و روش پیشنهادی مقایسه شده‌اند. در سطح دوم، میزان پیچیدگی ارتباط هندسی تصویر اصلاح‌شده با فضای زمین، در قیاس با تصویر خام ارزیابی شده است.

### ۱-۶- ارزیابی تصاویر اصلاح شده در کاهش اعوجاجات هندسی

اغتشاشات حرکتی سکو، در زمان دریافت تصاویر پوش‌بروم، سبب تخریب هندسه ثبت‌شده از عوارض می‌شود. انتظار می‌رود یک روش اصلاح هندسی موفق تأثیرات ناشی از این اغتشاشات را به‌گونه‌ای کاهش دهد که هندسه ثبت‌شده و قابل نمایش از عوارض به هندسه مورد انتظار نزدیک‌تر شود. به‌عبارت بهتر، می‌توان تفاوت میان هندسه ثبت‌شده از عارضه‌ای در تصویر اصلاح‌شده و هندسه مورد انتظار را به‌منزله معیار عملکرد یک روش اصلاح هندسی در نظر گرفت.

تخریب در هندسه نمایش‌یافته از عوارض خطی یکی از نموده‌های اعوجاج هندسی در تصاویر خام پوش‌بروم است. انتظار می‌رود وقتی مسیر حرکت یک سنجنده پوش‌بروم، حین تصویربرداری، به‌صورت خطی مستقیم و عاری از هرگونه اغتشاش است، تصویر پوش‌بروم دریافتی از عارضه‌ای خطی به‌صورت خطی مستقیم در تصویر خام پوش‌بروم تشکیل شود. همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده، اغتشاشات حرکتی سکو به تخریب هندسه این عوارض در سطح تصاویر خام منجر شده است. اگرچه تصاویر اصلاح‌شده با استفاده از CubeCreator و روش معرفی شده به‌خوبی توانسته‌اند هندسه این عوارض را بازیابی کنند، هنوز سطح ناچیزی از اعوجاجات، در سطح هر دو محصول، باقی مانده است. میزان اعوجاجات باقی‌مانده قابل

مشاهده، در تصویر تولیدشده با روش پیشنهادی در برخی از مناطق، بسیار کمتر از نرم‌افزار CubeCreator است. این نکته موفقیت بیشتر این روش را از نظر بصری بیان می‌کند. یکی از این مناطق در شکل‌های ۳ و ۱۰، با بزرگ‌نمایی، نشان داده شده است.

ابعاد پیکسلی آرایه خطی ثابت است اما سرعت حرکت سکو و نرخ نمونه‌برداری زمانی در هر تصویربرداری، به‌منزله پارامترهایی متغیر شناخته می‌شوند. بر این اساس و در نتیجه این رخداد، انتظار می‌رود کشیدگی تصاویر خام و اصلاح‌شده پوش‌بروم، در راستای حرکت سنجنده و چیدمان آرایه‌های خطی، متمایز باشد. به همین دلیل، مقایسه کمی میزان موفقیت روند اصلاح هندسی درمورد عوارض خطی، برای تصاویر متفاوت، مستلزم به‌کارگیری روشی مستقل از اختلاف مقیاس تصاویر خواهد بود. به‌عبارت بهتر، امکان مقایسه میزان انحراف عوارض خطی از مکان هندسی یک خط در فضای تصویر رقومی، هنگام وجود اختلاف مقیاس میان تصاویر، وجود ندارد؛ به همین علت، پس از تولید تصاویر اصلاح‌شده هندسی و به‌کمک شناسایی نقاط متناظر بین تصویر خام و تصاویر اصلاح‌شده (روش پیشنهادی و CubeCreator)، پارامترهای یک تبدیل افاین دوبعدی بین تصاویر برآورد می‌شود. در ادامه، عوارض خطی مشترک در تصویر خام و تصاویر اصلاح‌شده شناسایی و در راستای هر عارضه خطی، چند نقطه در هر تصویر اندازه‌گیری می‌شود. این نقاط، در موقعیت‌های مشابه و تا حد امکان، در محل شکست‌های احتمالی عارضه خطی انتخاب می‌شوند. سپس به‌کمک تبدیل افاین دوبعدی، نقاط اندازه‌گیری‌شده در تصاویر اصلاحی به سیستم مختصات رقومی تصویر خام انتقال می‌یابند. بدین ترتیب تأثیرات ناشی از اختلاف مقیاس تصاویر تا حد زیادی کاهش می‌یابد و به نقاط انتقال‌یافته از هر تصویر، برای هر عارضه خطی، یک خط برازش می‌یابد. شکل ۱۱ موقعیت خطوط مورد استفاده برای ارزیابی این بخش در فضای تصویر خام را نمایش می‌دهد.

به ترتیب، ۶/۶۴٪ و ۷/۵۸٪ در قیاس با تصویر خام و ۷/۸٪ و ۴/۱۷٪ در قیاس با تصویر CubeCreator کاهش دهد.

## ۲-۶- ارزیابی میزان پیچیدگی ارتباط هندسی تصاویر اصلاح شده با فضای زمین

مدل‌های ریاضی فتوگرامتری وظیفه برقراری ارتباط میان تصویر و زمین را برعهده دارند. مدل‌های پارامتریک این وظیفه را با توجه به هندسه تصویربرداری انجام می‌دهند. این در حالی است که چه بسا فرایند اصلاح هندسی تصاویر سبب شود تصویر اصلاح شده از هندسه تصویربرداری پیروی نکند. به عبارت بهتر، استفاده از مدل‌های پارامتریک برای برقراری ارتباط تصاویر اصلاح شده و زمین مناسب نیست؛ از این رو کاربرد مدل‌های مبتنی بر درون‌یابی

روش مطرح شده، در تمامی خطوط، عملکردی بهتر از تصویر خام ارائه داده است. همچنین این روش، در ۳/۷۳٪ از خطوط، توانسته عملکردی مناسب‌تر از نرم‌افزار CubeCreator داشته باشد. در جدول ۴، دقت تصویر خام و تصاویر اصلاح شده هندسی (نرم‌افزار CubeCreator و روش پیشنهادی)، در قالب شاخص مستقل از مقیاس، گزارش شده است. منظور از شاخص مستقل از مقیاس، مجذور میانگین مربعات خطای عمود بر خطوط برازش یافته در نقاط، پس از انتقال به تصویر خام است. در این جدول علاوه بر شاخص‌های مستقل از مقیاس، شاخص‌های آماری میانگین، میانه و انحراف استاندارد آنها نیز آمده است.

مقایسه نتایج این مرحله نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانسته است، به‌طور میانگین، خطای ثبت شده روی هر یک از خطوط در داده اول و دوم را



شکل ۱۱. خطوط مورد استفاده در ارزیابی هندسی سطح اول در داده اول (الف) و دوم (ب)

جدول ۴- الف. میزان خطا در خطوط برازش داده شده در داده اول (پیکسل)

شماره خط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	میانگین	میان	انحراف معیار
تصویر خام	۹/۵۷	۰/۷۹	۲/۲۸	۰/۹۵	۰/۳۹	۷/۸۰	۵/۹۴	۲/۹۵	۳/۰۶	۳/۷۵	۲/۹۵	۳/۲۸
CubeCreator	۵/۵۱	۰/۱۳	۲/۴۶	۰/۵۰	۰/۴۶	۲/۲۰	۱/۹۲	۴/۲۹	۰/۸۴	۲/۰۳	۱/۹۲	۱/۸۵
روش پیشنهادی	۲/۵۷	۰/۵۳	۱/۰۴	۰/۵۵	۰/۱۴	۱/۳۰	۱/۱۸	۱/۱۰	۰/۳۷	۰/۹۸	۱/۰۴	۰/۷۲

جدول ۴- ب. میزان خطا در خطوط برازش داده شده در داده دوم (پیکسل)

شماره خط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	میانگین	میان	انحراف استاندارد
تصویر خام	۱۰/۶۶	۹/۸۵	۰/۶۱	۰/۴۰	۰/۳۹	۰/۱۴	۳/۶۸	۰/۵۱	۵/۱۰
CubeCreator	۱/۴۹	۲/۲۸	۰/۴۰	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۸۲	۰/۳۴	۰/۸۷
روش پیشنهادی	۱/۷۷	۱/۷۸	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۱۹	۰/۱۰	۰/۷۱	۰/۲۳	۰/۸۲



این مدل‌ها کمترین میزان انعطاف را در برقراری ارتباط هندسی فضای زمین و تصویر دارند و انتظار می‌رود افزایش دقت برازش آنها نشان‌دهنده میزان کاهش اعوجاجات هندسی میان فضای تصویر و زمین باشد. تبدیل افاین دوبعدی، چندجمله‌ای مرتبه دوم و تبدیل پروژکتیو با مخرج‌های مشابه و متفاوت که به ترتیب، از هشت و ده پارامتر تشکیل شده‌اند، به منزله مدل‌های دوبعدی در این ارزیابی به کار رفته‌اند. تبدیلات سه‌بعدی مورد استفاده نیز افاین سه‌بعدی فتوگرامتری و  $DLT^1$  با مخرج‌های مشابه (بازده پارامتر) و مخرج‌های متفاوت (چهارده پارامتر) است. به دلیل تمایز مقیاس تصاویر اصلاح‌شده و خام با یکدیگر، تمامی مدل‌های ارتباطی به گونه‌ای برآورد می‌شوند که موقعیت‌های تصویری را به فضای زمین انتقال دهند. به عبارت دیگر، این مدل‌ها با آگاهی از مختصات تصویری و ارتفاع نقاط، مختصات مسطحاتی را در سیستم مختصات زمین محاسبه می‌کنند. برای اجرای این ارزیابی از نقاط زمینی استفاده شده است. جدول ۵ دقت برقراری ارتباط میان تصویر خام و تصویر اصلاح‌شده با زمین را با استفاده از معیار  $RMSE^2$  که روی نقاط چک مستقل محاسبه شده است، مقایسه می‌کند.

(مانند چندجمله‌ای‌ها و توابع کسری)، در ارزیابی تصاویر اصلاح‌شده، از اقبال بیشتری برخوردار است. این مدل‌ها با نام درون‌یاب یا عمومی شناخته می‌شوند و برآورد مطمئن آنها نیازمند نقاط کنترلی متعدد و با توزیع مناسب است. حرکت سنجنده، حین دریافت تصویر پوش‌بروم، سبب ایجاد اعوجاجاتی در سطح تصویر می‌شود که لحاظ‌شدن این اعوجاجات، در مدل ارتباطی، به نقاط کنترلی بیشتر و مدل‌های منعطف‌تر نیازمند است. هزینه اجرایی تأمین نقاط کنترلی متعدد و احتمال بروز رفتارهای نوسانی مدل‌های منعطف چالش‌های اصلی در این شرایط است. هدف این مقاله به‌کارگیری فرایندهای اصلاح و پالایش تصویری است تا، بدون نیاز به نقاط کنترل زمینی، از اعوجاجات هندسی تصویر کاسته شود. بدیهی است که دستاورد آنها می‌تواند در کاهش نیاز به نقاط کنترل زمینی و ساده‌ترشدن ارتباط هندسی فضای تصویر و زمین نمایان شود. بر این اساس، در دومین سطح ارزیابی روش پیشنهادی، موفقیت این شیوه در کاهش پیچیدگی ارتباط هندسی فضای تصویر و زمین در دستورکار قرار دارد. بدین‌منظور دو دسته مدل درون‌یاب یا عمومی دوبعدی و سه‌بعدی استفاده شده است.

جدول ۵- الف. معیار  $RMSE$  محاسبه‌شده روی نقاط چک مستقل در داده اول. در این ارزیابی، از ۱۸ نقطه کنترل و ۲۴ نقطه چک مستقل استفاده شده است

تصویر	افاین دوبعدی	چند جمله‌ای	پروژکتیو (هشت پارامتر)	پروژکتیو (ده پارامتر)	افاین سه‌بعدی	DLT (بازده پارامتر)	DLT (چهارده پارامتر)
تصویر خام (cm)	۲۸/۲	۳۰/۰	۲۸/۱	۲۸/۳	۲۷/۶	۲۸/۰	۲۹/۷
روش پیشنهادی (cm)	۳۵/۲	۱۸/۵	۲۱/۳	۱۸/۷	۳۶/۳	۲۲/۰	۱۸/۱
بهبود دقت (%)	-۲۵/۱	۳۸/۵	۲۴/۱	۳۳/۸	-۳۱/۶	۲۱/۷	۳۸/۹

جدول ۵- ب. معیار  $RMSE$  محاسبه‌شده روی نقاط چک مستقل در داده دوم. در این ارزیابی، از یازده نقطه کنترل و ده نقطه چک مستقل استفاده شده است

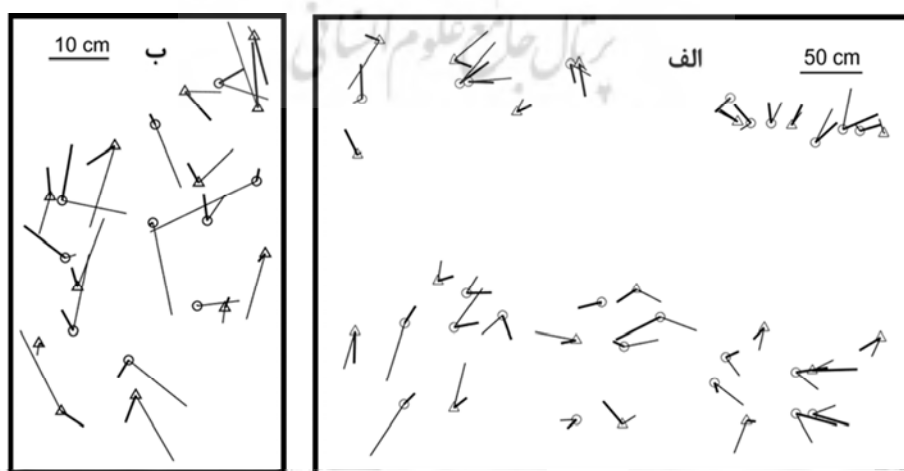
تصویر	افاین دوبعدی	چند جمله‌ای	پروژکتیو (هشت پارامتر)	پروژکتیو (ده پارامتر)	افاین سه‌بعدی	DLT (بازده پارامتر)	DLT (چهارده پارامتر)
تصویر خام (cm)	۲۰/۷	۱۳/۸	۱۳/۶	۱۲/۷	۱۶/۸	۱۲/۳	۱۳/۶
روش پیشنهادی (cm)	۷/۲	۵/۵	۵/۲	۵/۰	۶/۸	۵/۲	۵/۶
بهبود دقت (%)	۶۵/۱	۶۰/۰	۶۲/۰	۶۱/۰	۵۹/۳	۵۷/۴	۵۹/۰

1. Direct Linear Transformation
2. Root Mean Square Error

دوبعدی، بدون توجه به این پارامتر، به برقراری ارتباط و ارزیابی خطا در سطح تصویر می‌پردازند. به همین علت، بردارهای خطای محاسبه‌شده با استفاده از این مدل‌ها، به‌ویژه در مناطق دارای تغییرات ارتفاعی شدید به نسبت سطح متوسط منطقه، تحت تأثیر جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع قرار می‌گیرند و نمی‌توان آنها را معیار دقیقی برای توزیع خطا در سطح تصویر شمرد؛ در نتیجه، در این بخش صرفاً بردارهای خطای یکی از مدل‌های سه‌بعدی ارزیابی شده است. شکل ۱۲ بردارهای خطای به‌دست‌آمده از مدل DLT با مخرج‌های مشابه (یازده پارامتر) را نمایش داده است. با استناد به جدول ۵، در بین مدل‌های سه‌بعدی، این مدل بهترین عملکرد را در زمینه تصاویر خام داشته است. مطابق شکل ۱۲، روش پیشنهادی توانسته است اعوجاجات هندسی را در تمامی سطح تصویر، به‌خوبی کاهش دهد. اندازه کوتاه‌تر بردارهای خطای روش پیشنهادی، در قیاس با تصویر خام، بیانگر این نکته است. علاوه بر آن بردارهای خطا در تصویر خام، در برخی نقاط، بسیار بزرگ‌تر از روش پیشنهادی است. به‌نظر می‌رسد این نقاط در مناطقی واقع شده‌اند که اغتشاشات شدیدی در مسیر حرکت سنجنده رخ داده و اصلاح هندسی سبب کاهش تأثیرات این اغتشاشات در این مناطق شده است.

مطابق جدول ۵، روش پیشنهادی توانسته است، در داده اول، میزان خطای مدل‌های هندسی دوبعدی و سه‌بعدی را به‌طور متوسط، به‌ترتیب،  $17/8\%$  و  $9/7\%$  کاهش دهد. این روش در داده دوم عملکرد بهتری داشته و دقت مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی را به‌طور متوسط،  $62/0\%$  و  $58/6\%$  افزایش داده است. اما روش پیشنهادی، در مدل‌های افاین دوبعدی و سه‌بعدی اعمال‌شده روی داده اول، عملکرد ضعیفی داشته است. با توجه به اینکه این خطا در مدل‌های با پارامتر بیشتر کاهش داشته است، ماهیتی سیستماتیک دارد؛ از این‌رو در دستورکار نویسندگان، توسعه روش‌های پردازشی قرار دارد که از بروز چنین خطایی جلوگیری کنند.

افزون بر معیار RMSE، توزیع خطا در سطح تصویر نیز یکی از روش‌های ارزیابی دقت برقراری ارتباط زمین و تصویر در نظر گرفته می‌شود. از بردارهای خطا برای نمایش توزیع خطا در این فرایند استفاده می‌شود. انتظار می‌رود، در مدلی هندسی که به‌خوبی ارتباط تصویر و زمین را برقرار کرده است، جهت‌گیری و اندازه بردارهای خطا در سطح یک تصویر دارای توزیعی با ماهیت تصادفی باشد. با توجه به اینکه در زمان تصویربرداری با هندسه پرسپکتیو، تصویری از فضای سه‌بعدی زمین در فضای دوبعدی تصویر ثبت می‌شود، تأثیر بعد سوم در سطح تصویر به‌صورت جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع ثبت می‌شود. با این حال مدل‌های



شکل ۱۲. بردارهای خطای داده اول (الف) و داده دوم (ب) در مدل DLT با یازده پارامتر

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای بازنمونه‌برداری و کاهش اعوجاجات هندسی تصاویر ابرطیفی دریافتی از دوربین ابرطیفی و پوش‌بروم (۴۰۰-۱۰۰۰ nm) BaySpec OCI-F معرفی شده است. این دوربین از جمله دوربین‌هایی است که یک سنسور فریم را به‌منظور اصلاح هندسی تصاویر پوش‌بروم، استفاده می‌کند. در این روش، با تکیه بر مشترک‌بودن مرکز نوری در دو سنسور، در فرایندی بازگشتی و به‌کمک ارتباط هندسی میان تصاویر فریم، پیکسل‌های تصویر پوش‌بروم در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و تصویر نهایی تولید می‌شود. شایان ذکر است که ارتباط هندسی میان تصاویر فریم با استفاده از روش تناظریابی کمترین مربعات تعیین شده است. روش پیشنهادی در دو سطح با تصویر خام مقایسه شده است. در سطح اول، هندسه ثبت‌شده از عوارض خطی برای ارزیابی به‌کار رفته است. در این سطح، علاوه‌بر روش پیشنهادی و تصویر خام، تصویر اصلاح‌شده در نرم‌افزار دوربین نیز بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهادی توانسته است میانگین اعوجاجات هندسی رخ‌داده در طول عوارض خطی را در تصاویر پوش‌بروم خام و اصلاح‌شده، از طریق نرم‌افزار دوربین، به‌ترتیب ۷۶/۶٪ و ۴۳/۷٪ کاهش دهد. سپس در سطح دوم، به‌کمک مدل‌های درون‌یاب ساده، کیفیت ارتباط هندسی بین تصاویر و زمین ارزیابی شد. طبق این ارزیابی، روش پیشنهادی توانسته است دقت مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی را به‌ترتیب، به‌طور متوسط، ۴۰/۸٪ و ۳۴/۱٪ افزایش دهد. باوجود این احتمال دارد ماهیت بازگشتی روش پیشنهادشده به کاهش کیفیت هندسی تصویر بینجامد؛ در نتیجه، معرفی راهکاری به‌منظور مقابله با این احتمال، در دستور کار نویسندگان قرار دارد. شایان ذکر است که تصویر تولیدشده، با استفاده از نرم‌افزار، تصویری مجازی است که از هندسه پوش‌بروم تبعیت نمی‌کند؛ از این‌رو امکان اجرای روش معرفی‌شده، به‌منظور اصلاح هندسی خروجی نرم‌افزار، میسر نیست. درعین حال انتظار می‌رود اصلاح هندسی این تصویر به‌کمک تصویر ارتو

تولیدشده از تصاویر فریم، نقاط کنترل یا عوارض خطی به نتایجی بهتر از روش پیشنهادی بینجامد. این موضوع نیازمند بررسی‌های بیشتر است.

## ۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از پژوهشگاه فضایی ایران، به‌دلیل در اختیار قراردادن سنجنده، کمال تقدیر و تشکر را دارند.

## ۹- منابع

- Arroyo-Mora, J.P., Kalacska, M., Inamdar, D., Soffer, R., Lucanus, O., Gorman, J., Naprstek, T., Schaaf, E.S., Ifimov, G. & Elmer, K., 2019, **Implementation of a UAV-Hyperspectral Pushbroom Imager for Ecological Monitoring**, Drones, 3(1), P. 12, <https://doi.org/10.3390/drones3010012>.
- Barbarella, M., Fiani, M. & Zollo, C., 2017, **Assessment of DEM Derived from very High-Resolution Stereo Satellite Imagery for Geomorphometric Analysis**, European Journal of Remote Sensing, 50(1), PP. 534-549, <https://doi.org/10.1.1372084.2017.22797254/080>.
- Barbieux, K., 2018, **Pushbroom Hyperspectral Data Orientation by Combining Feature-Based and area-Based Co-Registration Techniques**, Remote Sensing, 10(4), P. 645.
- Barbieux, K., Constantin, D. & Merminod, B., 2016, **Correction of Airborne Pushbroom Images Orientation Using Bundle Adjustment of Frame Images**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B3-813-2016>.
- BaySpec, 2016, **OCI-F Ultra-Compact Hyperspectral Imager User Manual**, <https://geomatching.com/uploads/default/m/i/migrationuajxbx.pdf>.
- Cariou, C. & Chehdi, K., 2008, **Automatic Georeferencing of Airborne Pushbroom Scanner Images with Missing Ancillary Data Using Mutual Information**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(5), PP. 1290-1300.

- Fang, H., Hu, B., Yu, Z., Xu, H., He, C., Li, A. & Liu, Y., 2018, **Semi-Automatic Geometric Correction of Airborne Hyperspectral Push-Broom Images Using Ground Control Points and Linear Features**, International journal of remote sensing, 39(12), PP. 4115-4129, <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1455237>.
- Guerrero, J. & Sagues, C., 2001, **From Lines to Homographies between Uncalibrated Images**, IX Symposium on Pattern Recognition and Image Analysis, PP. 233-240.
- Habib, A.F., Morgan, M.F., Jeong, S. & Kim, K.O., 2005, **Epipolar Geometry of Line Cameras Moving with Constant Velocity and Attitude**, ETRI Journal, 27(2), PP. 172-180, <https://doi.org/10.4218/etrij.05.0104.0086>.
- Habib, A., Han, Y., Xiong, W., He, F., Zhang, Z. & Crawford, M., 2016a, **Automated ortho-Rectification of UAV-Based Hyperspectral Data over an Agricultural Field Using Frame RGB Imagery**, Remote Sensing, 8(10), P. 796, <https://doi.org/10.3390/rs8100796>.
- Habib, A., Xiong, W., He, F., Yang, H.L. & Crawford, M., 2016b, **Improving Orthorectification of UAV-Based Push-Broom Scanner Imagery Using Derived Orthophotos from Frame Cameras**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10(1), PP. 262-276, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2520929>.
- Jannati, M. & Valadan Zoej, M.J., 2015, **Introducing Genetic Modification Concept to Optimize Rational Function Models (RFMs) for Georeferencing of Satellite Imagery**, GIScience & Remote Sensing, 52(4), PP. 510-525, <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1052634>.
- Jannati, M., Valadan Zoej, M.J. & Mokhtarzade, M., 2017, **Epipolar Resampling of Cross-Track Pushbroom Satellite Imagery Using the Rigorous Sensor Model**, Sensors, 17(1), P. 129.
- Jurado, J.M. Padua, L., Hruska, J., Feito, F.R. & Sousa, J.J., 2021, **An Efficient Method for Generating UAV-based Hyperspectral Mosaics Using Push-Broom Sensors**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3088945>.
- Lowe, D.G., 2004, **Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints**, International Journal of Computer Vision, 60(2), PP. 91-110, <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.
- OCI-F Series Hyperspectral Cameras**, 2016, <https://www.optonlaser.com/produit/cameras-hyper-spectrales/OCI-F-Cam%C3%A9ra-Hyperspectrale-VIS-NIR-SWIR.pdf>.
- Online, P., 2020, **Hyperspectral Imager OCItm-F Series (400-1000nm)**, <https://www.photonicsonline.com/doc/hyperspectral-imagers-oci-f-series-0001>.
- 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. 1431-1438, [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1994journal/dec/1994\\_dec\\_1431-1437.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1994journal/dec/1994_dec_1431-1437.pdf).
- Pöntinen, P., 1999, **On the Creation of Panoramic Images from Image Sequences**, Photogrammetric Journal of Finland, 16(2), PP. 43-67, <https://research.aalto.fi/en/publications/on-the-creation-of-panoramic-images-from-image-sequences>.
- Ramirez-Paredes, J.P., Lary, D.J. & Gans, N.R., 2016, **Low-Altitude Terrestrial Spectroscopy from a Pushbroom Sensor**, Journal of Field Robotics, 33(6), PP. 837-852, <https://doi.org/10.1002/rob.21624>.
- Safdarinezhad, A., Mokhtarzade, M. & Valadan Zoej, M.J., 2019, **An Automatic Method for Precise 3D Registration of High Resolution Satellite Images and Airborne LiDAR Data**, International Journal of Remote Sensing, 40(24), PP. 9460-9483,

- <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1633698>.
- Sedaghat, A. & Ebadi, H., 2015, **Accurate Affine Invariant Image Matching Using Oriented Least Square**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 81(9), PP. 733-743, <https://doi.org/10.14358/PERS.81.9.733>.
- Suomalainen, J., Anders, N., Iqbal, S., Roerink, G., Franke, J., Wenting, P., Hünninger, D., Bartholomeus, H., Becker, R. & Kooistra, L., 2014, **A Lightweight Hyperspectral Mapping System and Photogrammetric Processing Chain for Unmanned Aerial Vehicles**, Remote Sensing, 6(11), P. 11013-11030, <https://doi.org/10.3390/rs6111013>.
- Tao, C.V. & Hu, Y., 2001, **A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67(12), PP. 1347-1358, [https://www.researchgate.net/publication/228902962\\_A\\_Comprehensive\\_study\\_of\\_the\\_rational\\_function\\_model\\_for\\_photogrammetric\\_processing](https://www.researchgate.net/publication/228902962_A_Comprehensive_study_of_the_rational_function_model_for_photogrammetric_processing).
- Tjahjadi, M.E. & Handoko, F., 2017, **Precise Wide Baseline Stereo Image Matching for Compact Digital Cameras**, 2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI).
- Yang, N., Zhang, Y. & Li, J., 2020, **A Least Square Matching Optimization Method of Low Altitude Remote Sensing Images Based on Self-Adaptive Patch**, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Zhang, H., Zhang, B., Wei, Z., Wang, C. & Huang, Q., 2020, **Lightweight Integrated Solution for a UAV-Borne Hyperspectral Imaging System**, Remote Sensing, 12(4), P. 657, <https://doi.org/10.3390/rs12040657>.



سنجش از دور  
و  
GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

سال پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲  
Vol.15, No. 1, Spring 2023

17-37

## Geometric Correction of BaySpec OCI-F Pushbroom Hyperspectral Images via the Sequential Geometric Mappings among Simultaneous Video Frames Estimated by Least Square Matching

Akhoundi Khezrabad M.\*<sup>1</sup>, Valadan Zoj M.J.<sup>2</sup>, Safdarinezhad A.R.<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student in Photogrammetry, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran
2. Full Prof. in Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran
3. Assistant Prof. in Photogrammetry and Remote Sensing, Dep. of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh

### Abstract

Due to the wide applications of hyperspectral images, economical and innovative imaging systems are developed to acquire such images. In order to use hyperspectral images, it is necessary to establish an accurate relation between the ground space and the image space, which needs numerous Ground Control Points (GCPs). This fact highlights the need for developing geometric corrections methods for any camera design. BaySpec OCI-F (400-1000 nm) is one of the innovative cameras that acquires pushbroom hyperspectral images. In addition to the pushbroom sensor, the camera uses a frame sensor that acquires images at the same time as the pushbroom sensor and with the same temporal rate. In this article, a geometric correction method for pushbroom images of OCI-F camera is proposed. Based on the camera's imaging design, the first step of the method determines a set of calibration parameters which geometrically relates the pushbroom and the frame sensors. Then using this relation and the geometric relations among consecutive frames, the pixels of the pushbroom scene are rearranged and form the corrected image. The proposed method determines the relation among the consecutive images via Least Square Matching (LSM) method. The results show that the correction method has decreased the geometric distortions of the raw pushbroom scene by 62.2% on average. Such a reduction causes the average accuracies of two-dimensional and three-dimensional generic models which relate image space and ground space together, to increase by 34.1% and 39.9% respectively.

**Keywords:** BaySpec OCI-F, Geometric correction, Least square matching, Pushbroom images.

\* Correspondence Address: Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., K.N. Toosi University of Technology, No. 1346, Valiasr Street, Mirdamad Cross, Tehran, Post Code: 15433-19967. Tel: 09190054956  
Email: mojtabaakhoundi@email.kntu.ac.ir