

# بهینه‌سازی مدل ریاضی فوریه به کمک الگوریتم ژنتیک جهت مدل سازی رفتار خطای هندسی در دوربین‌های رقومی هوایی

## مطالعه موردی: دوربین رقومی UltraCam

مهدی مختارزاده<sup>۲</sup>  
مهدی مدیری<sup>۴</sup>

هادی باباپور<sup>۱</sup>  
محمد جواد ولدان زوج<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۸/۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۵/۵

\*\*\*\*\*

### چکیده

اهمیت و جایگاه اطلاعات مکان مرجع در کلیه امور عمرانی و تحقیقاتی بر کسی پوشیده نیست. از میان روش‌های تهیه و تولید اطلاعات مکانی، روش فتوگرامتری بواسطه سرعت، صرفه اقتصادی و از همه مهم‌تر، عدم نیاز به حضور مستقیم عوامل انسانی در محل، از جایگاه منحصر به فردی برخوردار می‌باشد.

در روش فتوگرامتری، دوربین‌های مستقر بر سکوها هوایی، بعنوان ابزار اصلی تأمین داده‌های ورودی و اولین حلقه عملیاتی نقشی کلیدی در میزان موفقیت و دستاوردهای سایر مراحل ایفا می‌کنند. امروزه پیشرفت تکنولوژیک منجر به ارائه دوربین‌های رقومی با کیفیت بسیار بالایی شده است که این دوربین‌ها نویدبخش تهیه اطلاعات مکانی مورد نیاز به روش فتوگرامتری با دقت، سرعت و بهره‌وری بالا می‌باشند.

با توجه به ظهور دوربین‌های رقومی جدید و تنوع در ساخت و تکنولوژی بکار رفته در این نوع از دوربین‌ها ضرورت کالیبراسیون آنها به عنوان یک نیاز اولیه شناخته می‌شود. با توجه به هزینه‌های بالا و مشکلات اجرایی در انجام کالیبراسیون آزمایشگاهی، استفاده از معادلات خودکالیبراسیون به عنوان یکی از راه‌حل‌های مفید در این زمینه شناخته می‌شود. برای این منظور در مقاله حاضر، استفاده از معادلات فوریه با ترم‌های بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده و بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی و مقایسه با مدل‌های پیشین قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل، این مدل قادر است تا اعوجاجات چندگانه را با حداقل وابستگی مدلسازی نماید. دقت ارائه شده برای مدلسازی اعوجاجات چندگانه در تصاویر شبیه‌سازی شده دوربین رقومی Ultra Cam در مقایسه با سایر پارامترهای اضافه بهبود در دقت مدلسازی در حدود ۳۰ درصد و با کمترین وابستگی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: فتوگرامتری، سلف کالیبراسیون، معادلات فوریه، الگوریتم ژنتیک

\*\*\*\*\*

۱- دانشجوی دکترای فتوگرامتری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Hbabapour@mail.kntu.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، M\_Mokhtarzade@kntu.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Valadanzouj@kntu.ac.ir

۴- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، mmodiri@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

اهمیت و جایگاه اطلاعات مکان مرجع در کلیه امور عمرانی و تحقیقاتی بر کسی پوشیده نیست. از میان روش‌های تهیه و تولید اطلاعات مکانی، روش فتوگرامتری بواسطه سرعت، صرفه اقتصادی و از همه مهم‌تر، عدم نیاز به حضور مستقیم عوامل انسانی در محل، از جایگاه منحصر به فردی برخوردار می‌باشد.

در روش فتوگرامتری، دوربین‌های مستقر بر سکوهایی هوایی، بعنوان ابزار اصلی تأمین داده‌های ورودی و اولین حلقه عملیاتی نقشی کلیدی در میزان موفقیت و دستاوردهای سایر مراحل ایفا می‌کنند. امروزه پیشرفت تکنولوژیک منجر به ارائه دوربین‌های رقومی با کیفیت بسیار بالایی شده است که این دوربین‌ها نویدبخش تهیه اطلاعات مکانی مورد نیاز به روش فتوگرامتری با دقت، سرعت و بهره‌وری بالا می‌باشند. با توجه به مطالب فوق مبنی بر جایگاه کلیدی دوربین‌های هوایی رقومی در فتوگرامتری نوین، اطمینان از صحت عملکرد این دوربین‌ها بعنوان پیش شرط حصول اطمینان از داده‌های مکانی حاصل خواهد بود. بعبارت دیگر هرگونه ضعف فنی دوربین‌های رقومی هوایی مورد استفاده، منجر به تهیه اطلاعات مکانی غیردقیق و غیرقابل اعتماد شده که ممکن است مبنای اتخاذ تصمیمات اشتباه از طرف بهره‌برداران این اطلاعات گردد.

بطور سنتی، انجام فعالیت‌های کالیبراسیون دوربین‌های فتوگرامتری در آزمایشگاه‌های مجهز و در برخی از مراکز محدود در دنیا صورت می‌پذیرد. لیکن با ظهور دوربین‌های جدید رقومی و تنوع طراحی و ساخت آنها، انجام فعالیت‌های کالیبراسیون آنها نیز از حالت متمرکز خارج شده و دارندگان سنجنده، معمولاً بطور داخلی فعالیت‌های کالیبراسیون دوره‌ای را در برنامه کار قرار می‌دهند تا علاوه بر حفظ منابع مالی، از تأخیر اجرایی نیز جلوگیری شود. از اینرو کالیبراسیون دوربین‌های رقومی هوایی می‌تواند یکی از نیازهای اصلی فعالیت‌های فتوگرامتری در جهت تولید اطلاعات مکان مرجع را پوشش دهد.

لذا لازم است تا بررسی‌های دقیق در مورد روش‌های قابل اجرا از نقطه نظر کالیبراسیون هندسی دوربین‌های هوایی با فرمت بزرگ، صورت گیرد. در ادامه ضمن مروری بر تاریخچه و آخرین دستاوردهای حاصل در زمینه کالیبراسیون دوربین‌های رقومی هوایی، مدلی بهبود داده شده بر مبنای معادلات فوریه پیشنهاد شده و بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- بررسی تاریخچه و آخرین روش‌های ارائه شده جهت مدلسازی خطاهای هندسی در دوربین‌های رقومی

از نقطه نظر تئوری و هندسی، یک دوربین از یک صفحه‌ی تصویر و یک عدسی تشکیل شده که فرآیند تبدیل میان مختصات سه‌بعدی نقاط در فضای شی را به مختصات دو بعدی در فضای تصویر فراهم می‌آورد. این اتفاق در واقعیت به کمک یک تبدیل پرسپکتیو صلب بطور دقیق برقرار نشده و اعوجاجات سیستم اپتیکی موجب ایجاد عدم تطابق کامل رفتار هندسی یک دوربین از یک مدل پرسپکتیو می‌شود. تصحیح و کاهش اعوجاجات تصویر در دوربین‌ها بعنوان یک موضوع پر اهمیت برای کاربرانی است که تمایل به استخراج اطلاعات دقیق مکانی دارند.

جنگ جهانی دوم موجب افزایش شدید استفاده از عکسبرداری هوایی برای شناسایی اهداف و تهیه نقشه شد. نقشه‌برداری برای اهداف نظامی، نیروی محرکه‌ی توسعه در زمینه‌ی کالیبراسیون هندسی بشمار می‌رود؛ بطوری که بعد از مباحث و گفتگوهای صورت پذیرفته در کنگره ISPRS در سال ۱۹۴۸، برگزاری یک دوره مذاکرات بین متخصصان کالیبراسیون دوربین از کشورهای مختلف اروپایی در اواخر سال ۱۹۵۰ در پاریس در دستور کار این انجمن قرار گرفت. در هفتمین کنگره بین‌المللی فتوگرامتری در سال ۱۹۵۲، قطعنامه کمیسیون کالیبراسیون دوربین‌های عکاسی مبنی بر ترجیح پذیر بودن روش‌های کالیبراسیون مبتنی بر عکسبرداری بجای روش‌های تعیین پارامترهای کالیبراسیون به کمک

در سال ۱۹۷۶، یک کارگروه در زمینه سلف کالیبراسیون تشکیل شد که تا سال ۱۹۸۰، اعضای این کارگروه طیف وسیعی از پارامترهای قابل بکارگیری در فرایند سلف کالیبراسیون را طراحی و توسعه دادند. این پارامترها از آن پس بعنوان پارامترهای اضافی در محافل فنی فتوگرامتری شناخته می شدند.

Brown در سال ۱۹۸۹ شرایط لازم جهت انجام سلف کالیبراسیون را در موادی همچون:

- ۱- اخذ حداقل ۳ عکس با همپوشانی بالا از میدان آزمون
- ۲- حفظ ثبات هندسه داخلی دوربین در زمان اخذ مجموعه تصاویر و بدون تغییر ماندن نقاط در فضای شی در بازه زمانی مربوط به جمع آوری داده ها
- ۳- وجود یک هندسه مستحکم فتوگرامتری برای شرایط اخذ تصویر و تامین زوایای تقارب بزرگ در پرتوهای بازسازی کننده نقاط سه بعدی در فضای شی
- ۴- وجود حداقل یک تصویر با زاویه ی رول کاملاً متمایز با باقی تصاویر
- ۵- تعداد نسبتاً زیاد نقاط متناظر با توزیع مناسب در سراسر فضای تصویر، معرفی نمود.

بطور کلی می توان راهکارهای نیل به  $RMSE^2$  کمتر در فرایند کالیبراسیون هندسی را در مواردی همچون (Brown, ۱۹۸۹):

- بهبود ساختار طراحی مدل های مربوط به پارامترهای اضافی اعوجاجات دوربین
- بهبود کیفیت، توزیع و دقت نقاط کنترلی در میدان های آزمون
- بهبود تکنیک های پردازش تصویری بمنظور افزایش صحت و دقت استخراج موقعیت نقاط تصویری
- افزایش انطباق فیزیکی مدل های ریاضی توسعه یافته با واقعیات فیزیکی مربوط به هندسه داخلی سنجنده و تکنولوژی ساخت آن، خلاصه نمود؛
- و بعنوان راهکارهای بهبود و توسعه ی تکنیک های

مشاهدات توسط دستگاه های کالیبراسیون (کلیماتورها، گونیومترها و ...) به تصویب رسید. Karman و Brown از شورای تحقیقات ملی کانادا در سال ۱۹۵۶ تفاوت هایی بین مقادیر بدست آمده برای پارامترهای توجیه داخلی که از روش های کالیبراسیون مبتنی بر عکسبرداری بدست آمده بودند و مقادیر بدست آمده توسط روش های اندازه گیری بصری که عمدتاً بوسیله ی تولیدکنندگان سیستم های اپتیکی انجام می شد، گزارش کردند. در سال ۱۹۶۵، Brown برخی از نتایج اولین آزمایشات خود را در مجمع سالیانه ی انجمن فتوگرامتری امریکا ارائه کرد؛ که این نتایج در مقاله ای تحت عنوان «اعوجاجات ناشی از خروج از مرکزیت عدسی ها» در سال ۱۹۶۶ منتشر شد.

در روش های کالیبراسیون میدانی، از طریق ساخت و تعیین موقعیت دقیق مجموعه ای از عوارض و تارگت های زمینی و اخذ تصویر توسط دوربین از این مجموعه ی نقاط، فرایند کالیبراسیون دوربین دنبال می شود. از مزایای این روش می توان به مواردی همچون: ۱- امکان تأمین دقت های بالا در تعیین موقعیت نقاط کنترل زمینی از طریق انجام فرایندهای نقشه برداری زمینی و ۲- امکان کالیبراسیون دوربین در شرایط محیطی نزدیک به واقعیت اجرایی، اشاره کرد.

با توسعه و بکارگیری سرشکنی دسته اشعه توسط Brown در سال ۱۹۶۵، زمینه های تئوریک و عملیاتی تعیین همزمان پارامترهای کالیبراسیون لنز به همراه پارامترهای توجیه خارجی هر تصویر و همچنین مختصات سه بعدی نقاط تارگت گذاری شده فراهم آمد. این روش که بعنوان روش خود کالیبراسیون<sup>۱</sup> مطرح شد، روشی کارآمد بمنظور مشارکت تمامی اندازه گیری های تصویری نقاط تارگت گذاری شده در تمامی تصاویر اخذ شده از منطقه ی مشترک تصویربرداری، به منظور برآورد پارامترهای مجهول سرشکنی بشمار می رفت.

مقالات مرتبط با خود کالیبراسیون عکس های هوایی از حدود سال ۱۹۷۲ شروع به انتشار یافت. در کنگره ی ISPRS

فیلم و صرفاً با توجه به نحوه رفتار تغییر شکل‌ها ارائه شده است. این نوع از پارامترهای اضافی به دلیل استفاده از خصوصیات چند جمله‌ای‌های متعامد، فاقد وابستگی بین پارامترها است.

- Ebner (1976) and Grün (1978) (بر اساس پلی نومیال جبری درجه دو و چهار)

این معادلات از نوع چند جمله‌ای‌های متعامد بوده و به دلیل استفاده از تعداد ضرائب مجهول بالا (۱۲ و ۴۴ پارامتر) قابلیت مدل کردن بردارهای خطا با دقت بالا را دارند.

- معادلات لژاندر (Legendre (1978)

پارامترهای خانواده‌ی لژاندر انعطاف بسیار بیشتری را برای کالیبره کردن اعوجاج تصاویر پیچیده به خصوص در زمانی که درجه‌ی بالایی مد نظر است نشان می‌دهند. ترم‌های اضافه لژاندر برای تصاویر با قاب مستطیل شکل مناسب می‌باشند.

د- پارامترهای اضافه بر پایه و بنیان سری فوریه

با توجه به مقاله ارائه شده توسط (Cramer & Tang, 2012) بهترین پارامترهای اضافه استفاده شده در بحث سلف کالیبراسیون دوربین‌های رقومی هوایی با فرمت بزرگ بر اساس معادلات فوریه عنوان گردیده است. در این تحقیق پس از بررسی مدل‌های ریاضی و فیزیکی گذشته و مقایسه آنها با معادلات فوریه، پارامترهای اضافه براساس معادلات فوریه به عنوان بهترین تقریب جهت انجام سلف کالیبراسیون معرفی گردیده است.

با توجه به مطالعات انجام شده مدل‌های فیزیکی Moniwa با توجه به وابستگی بالا بین پارامترهای خود قابلیت مدل کردن تصاویر رقومی که حاصل از چند عدسی بصورت توأم است را ندارد (Honkavaara, 2006). این مطلب در سال ۲۰۰۲ نیز توسط Cramer بصورت پیشنهاد مطرح گردیده بود، که مدل‌های ریاضی بایستی جایگزین مدل‌های فیزیکی گردند. همچنین Jacobsen در سال ۲۰۰۳ به وابستگی بین پارامترهای مدل فیزیکی Moniwa زمانی که از کلیه ترم‌های

مؤثرتر و دقیق‌تر کالیبراسیون داخلی سیستم‌های اپتیکی امروزی مدنظر قرار داد.

بطور کلی چهارنوع سلف کالیبراسیون براساس پارامترهای اضافه برای دوربین‌های هوایی توسعه یافته است:

الف- پارامترهای اضافه بر پایه و بنیان روابط فیزیکی MONIWA 1977

این نوع از پارامترهای اضافی با توجه به منابع خطاهای سیستماتیک عکس‌ها مانند تغییر بعد منظم فیلم، اعوجاج شعاعی و مماسی لنز دوربین، ارائه شده است. نکته قابل توجه اینکه در این نوع از پارامترهای اضافی فقط کشیدگی و یا فشردگی فیلم لحاظ شده است و از تغییر بعدهای غیر منظم آن صرف نظر گردیده است.

ب- پارامترهای اضافه بر پایه و بنیان روابط فیزیکی و ریاضی

- معادلات Brown (1975)

در این روابط پارامترهای مربوط به فاصله اصلی، نقطه اصلی و تغییر شکل فیلم به طور همزمان آمده است ولی تصحیح همزمان این پارامترها به علت وابستگی با یکدیگر به سهولت میسر نیست. بنابراین انتخاب پارامترها و ترتیب به کارگیری آنها باید با دقت انجام شود. از این نوع روابط در کالیبراسیون دوربین‌های فتوگرامتری برد کوتاه استفاده می‌شود.

- معادلات Brown (1976)

این نوع از پارامترهای اضافی با در نظر گرفتن منابع خطای سیستماتیک در تصاویر مانند تغییر بعد و انحنای فیلم، ارائه شده است. این نوع روابط در کالیبراسیون دوربین‌های فتوگرامتری هوایی استفاده می‌شود.

ج- پارامترهای اضافه بر پایه و بنیان چند جمله‌ای‌های جبری

- El-Hakim and Faig (1977) (بر اساس هارمونیک کروی)

این نوع از پارامترهای اضافی بدون در نظر گرفتن منابع خطای سیستماتیک در عکس‌ها مانند تغییر بعد و انحنای

سه دسته توابعی که می‌توانند از معادله‌ی (۱) مشتق شوند عبارتند از: سری فوریه برای مختصات کارتیزین، توابع بسط برای مختصات سیلندری (که با عنوان هارمونیک‌های سیلندری شناخته می‌شوند) و هارمونیک‌های کروی برای مختصات کروی. از سه دسته توابع مشتق از معادله‌ی لاپلاس، سریه فوریه به دلیل سیستم کارتیزین، از بقیه محبوب‌تر است. پارامترهای اضافه ارائه شده بر پایه سری فوریه به عنوان آخرین معادلات ارائه شده جهت خود کالیبراسیون دوربین رقومی می‌باشند که این معادلات به صورت منحصربفرد قابلیت مدل کردن بردارهای خطا را با استفاده از معادلات فوریه دارند.

همانطور که گفته شد پس از اینکه مدت زمان زیادی از چندجمله‌ای‌ها (Brown, Ebner, ...) جهت برآورد پارامترهای اضافه استفاده می‌شد، در نهایت در سال ۲۰۱۲ نوع معادلات از قالب چندجمله‌ای‌ها خارج شده و به سمت معادلات فوریه می‌رود.

در تحقیق انجام شده از سوی Tang & Cramer, 2012 ابتدا جهت برآورد بردارهای خطای حاصل از اعوجاج عدسی، از چندجمله‌ای‌ها و معادلات (Moniwa 1977) استفاده شده و سپس خروجی آن وارد معادلات شرط هم‌خطی بر اساس پارامترهای اضافه بر پایه معادلات فوریه گردید. دلیل این کار کاهش تعداد ترم‌های مورد نیاز در معادلات فوریه بوده است. این افزایش تعداد پارامترهای مؤثر جهت حل معادلات فوریه در یک حل همزمان با پارامترهای توجیه خارجی (معادلات شرط هم‌خطی) امکان وابستگی بین پارامترها را افزایش می‌دهد.

در سال ۲۰۱۲ اساس Rongfu Tang معادلات فوریه جهت سلف کالیبراسیون با ۱۶ پارامتر مجهول را به عنوان مدل ریاضی بهینه معرفی نمود. زیرا تلفیق معادلات فوریه به صورت کامل (۴۸ پارامتری) و معادلات شرط هم‌خطی موجب کاهش دقت می‌گردد، که دلیل اصلی این امر وجود وابستگی بین ضرائب مجهول معادلات فوریه و پارامترهای توجیه خارجی می‌باشد.

آن استفاده شود، با سایر پارامترهای توجیه داخلی و خارجی اشاره نموده است.

پارامترهای اضافه بر اساس چند جمله‌ای‌های جبری در مقایسه با هم‌تایان قدیمی و تاریخی دارای انعطاف‌پذیری و تأثیر بالاتری است. به خصوص مدل لژاندر می‌تواند به عنوان مدل تعمیم یافته‌ی برتر از مدل‌های Ebner و Grün در نظر گرفته شود (Rongfu Tang, 2012).

اما یک ایراد ذاتی در همه‌ی چندجمله‌ای‌ها از جمله Ebner, Grün و Legendre نیاز به حذف پارامترهای دارای وابستگی بالا می‌باشد. این اقدام که در اثر وابستگی زیاد پارامترها تحمیل می‌شود، مفاهیم ریاضی چند جمله‌ای را نقض می‌کند. حذف پارامترهای با شدت همبستگی بالا در چندجمله‌ای‌ها ممکن است اثرات منفی بر کالیبراسیون بگذارد.

تحقیقات نشان می‌دهد که چندجمله‌ای‌های جبری به دلیل دارا بودن درجه‌ی بالایی از همبستگی از دیدگاه ریاضی نامناسب هستند. چهار پارامتر با وابستگی بالا در چند جمله‌ای‌ها در رابطه (۱) بیان شده است.

مشکل دیگر چند جمله‌ای‌های جبری این است که نسبت به رقبای خود به تعداد بیشتری پارامتر ناشناخته نیاز دارند. بنابراین چند جمله‌ای‌های جبری به عنوان پایه‌ای بهینه برای اهداف خودکالیبراسیون مطلوب نیستند. Zeimann در سال ۱۹۸۶ چند جمله‌ای‌های جبری را از نقطه نظر ریاضی به دلیل همبستگی بالا بین پارامترهای مختلف، نامطلوب ارزیابی نمود (Rongfu, 2012).

علاوه بر چند جمله‌ای‌های جبری، سایر توابع ریاضی نیز می‌توانند به عنوان پارامترهای اضافه ریاضی مناسب باشند. در این بخش توابع ریاضی دیگر که می‌توانند به عنوان عملگرهای تخمین مورد استفاده قرار گیرند به اختصار مرور می‌شوند. این معادلات از معادله مشهور لاپلاس (رابطه یک) مشتق می‌شوند.

$$\frac{d^2 f}{dx^2} + \frac{d^2 f}{dy^2} = 0 \quad (1)$$

بگیرید.  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  نیز مختصات عکس می‌باشند. در روابط فوق  $C_{m,n}$  و  $S_{m,n}$  معادلات متعامد را ایجاد می‌کنند که متعامد بودن  $C_{m,n}$  و  $S_{m,n}$  در ابعاد کامل در رابطه ۵ نشان داده شده است.

$$\int_{-b_y}^{b_y} \int_{-b_x}^{b_x} C_{m,n} C_{m',n'} dx dy = 0 \quad \text{if } m \neq m' \text{ or } n \neq n'$$

$$\int_{-b_y}^{b_y} \int_{-b_x}^{b_x} S_{m,n} S_{m',n'} dx dy = 0 \quad \text{if } m \neq m' \text{ or } n \neq n'$$

$$\int_{-b_y}^{b_y} \int_{-b_x}^{b_x} C_{m,n} S_{m',n'} dx dy = 0 \quad (5)$$

در رابطه (۳)  $a_{m,n}$   $b_{m,n}$   $a'_{m,n}$  و  $b'_{m,n}$  ضرایب مجهول (پارامترهایی) هستند که در محاسبات خودکالیبراسیون برآورد می‌شوند.  $m$  و  $n$  حداکثر درجه‌ی انتخاب شده توسط کاربر است که تعیین کننده تعداد ترم‌های بکارگرفته شده در این سری می‌باشد.

چندجمله‌ای فوریه با  $m = n = 1$  حاوی ۱۶ ترم بوده که در رابطه (۶) نشان داده شده است.

$$\Delta x = a_1 c_{1,0} + a_2 c_{0,1} + a_3 c_{1,-1} + a_4 c_{1,1} + a_5 c_{2,0} + a_6 s_{0,1} + a_7 s_{1,-1} + a_8 s_{1,1}$$

$$\Delta y = a_9 c_{1,0} + a_{10} c_{0,1} + a_{11} c_{1,-1} + a_{12} c_{1,1} + a_{13} s_{2,0} + a_{14} s_{0,1} + a_{15} s_{1,-1} + a_{16} s_{1,1} \quad (6)$$

چندجمله‌ای فوریه با  $m = n = 2$  دارای ۴۸ ترم به صورت رابطه (۷) است.

$$\Delta x = a_1 c_{2,0} + a_2 c_{0,2} + a_3 c_{2,0} + a_4 c_{1,-1} + a_5 c_{1,1} + a_6 c_{2,2} + a_7 c_{1,2} + a_8 c_{1,-2} + a_9 c_{2,-1}$$

$$+ a_{10} c_{2,1} + a_{11} c_{2,-2} + a_{12} c_{2,2} + a_{13} s_{2,0} + a_{14} s_{0,1} + a_{15} s_{2,0} + a_{16} s_{1,-1} + a_{17} s_{1,1}$$

$$+ a_{18} s_{2,2} + a_{19} s_{1,2} + a_{20} s_{1,-2} + a_{21} s_{2,-1} + a_{22} s_{2,1} + a_{23} s_{2,-2} + a_{24} s_{2,2}$$

$$+ a_{25} s_{2,0} + a_{26} s_{1,-1} + a_{27} s_{1,1} + a_{28} s_{2,2} + a_{29} s_{1,2} + a_{30} s_{1,-2} + a_{31} s_{2,-1}$$

$$+ a_{32} s_{2,1} + a_{33} s_{2,-2} + a_{34} s_{2,2} \quad (7)$$

در دو ساختار قبلی، امکان استفاده از سایر ترکیبات ترم‌های سینوسی و کسینوسی در معادلات فوریه لحاظ نشده است. همانطور که گفته شد در این تحقیق، انتخاب ترکیبی بهینه از این ترم‌ها مدنظر می‌باشد که برای اینکار از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شده است.

### ۲-۳- الگوریتم ژنتیک

برای بهبود این روش بایستی در ابتدا پارامترهای تأثیرگذار

در تحقیق مذکور، روش فوریه در دو حالت ۱۶ پارامتری و ۴۸ پارامتری بررسی شده است و در نهایت کلیه نتایج بر اساس ۱۶ پارامتر بیان و مورد بررسی قرار گرفته است. حال آنکه بررسی سایر ترکیبات ترم‌های فوریه مورد تحقیق قرار نگرفته است. از این رو هدف این تحقیق تعیین ساختار بهینه ترم‌های معادلات فوریه برای خودکالیبراسیون دوربین رقومی به کمک الگوریتم ژنتیک جهت دسترسی به نتایج مطلوب‌تر می‌باشد. برای رسیدن به این هدف از شبیه‌سازی بردارهای خطا در دوربین رقومی Ultra Cam بهره گرفته شده است.

### ۳- مروری بر مفاهیم نظری مورد استفاده

در ادامه مطالب نظری مورد استفاده جهت پیاده‌سازی روش‌های بهینه خود کالیبراسیون به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

#### ۳-۱- ساختار ترم‌های اضافه مبتنی بر معادلات فوریه

قضیه‌ی فوریه در حالت دوبعدی بیان می‌کند که هر تابع دو متغیر  $f(x,y)$  دارد، که در آن  $x, y \in [-\pi, \pi]$  می‌باشد، با دقت مشخص به وسیله‌ی ترکیب دو متغیره از ترم‌های سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌های مختلف (رابطه ۲) می‌تواند تخمین زده شود.

$$\cos(mx \pm ny), \sin(mx \pm ny), m, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

در استفاده از این سری جهت تخمین رفتار اعوجاجات هندسی در سطح تصویر ( $\Delta x$  و  $\Delta y$ ) داریم:

$$\Delta x = \sum_{m=1}^M \sum_{n=-N}^N (a_{m,n} c_{m,n} + b_{m,n} s_{m,n}) + \sum_{n=1}^N (a_{0,n} c_{0,n} + b_{0,n} s_{0,n})$$

$$\Delta y = \sum_{m=1}^M \sum_{n=-N}^N (a'_{m,n} c_{m,n} + b'_{m,n} s_{m,n}) + \sum_{n=1}^N (a'_{0,n} c_{0,n} + b'_{0,n} s_{0,n}) \quad (3)$$

که در آن:

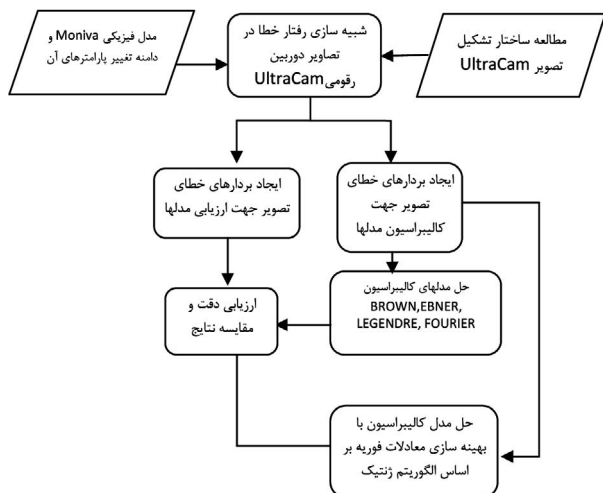
$$-b_x \leq \bar{x} \leq b_x, -b_y \leq \bar{y} \leq b_y$$

$$u = \bar{x}\pi/b_x \quad v = \bar{y}\pi/b_y \quad u \in [-\pi, \pi], v \in [-\pi, \pi]$$

$$c_{m,n} = 10^{-8} \cos(mu + nv) \quad s_{m,n} = 10^{-8} \sin(mu + nv) \quad (4)$$

$2b_x$  و  $2b_y$  را به ترتیب عرض و طول عکس در نظر

از بردارهای خطای شبیه‌سازی شده در دوربین رقومی Ultra Cam استفاده شده است. نگاره (۱) روند انجام تحقیق را نشان می‌دهد.



نگاره (۱): فلوجارت مرحله فاز شبیه‌سازی

بر اساس فلوجارت فوق روش تحقیق در این مقاله شامل سه مرحله اصلی زیر می‌باشد:

- شبیه‌سازی رفتار خطا در تصاویر دوربین رقومی Ultra Cam
  - پیاده‌سازی مدل‌های سنتی خودکالیبراسیون
  - پیاده‌سازی مدل خودکالیبراسیون فوریه-ژنتیک پیشنهادی
  - ارزیابی دقت و مقایسه نتایج
- در ادامه به تشریح هر کدام از این مراحل پرداخته شده است.

#### ۴-۱- شبیه‌سازی رفتار خطا در تصاویر دوربین Ultra Cam

در ابتدا سیستم تصویربرداری و پردازش تصاویر بکار رفته در دوربین Ultra Cam مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس با یک مدل ساده با قابلیت آنالیز فیزیکی مانند مدل فیزیکی Moniwa تولید بردارهای خطا در محدوده دامنه تغییرات پارامترهای این مدل به صورت معکوس انجام شده است.

#### مطالعه ساختار تشکیل تصویر در دوربین Ultra Cam

از نقطه نظر هندسی، در سنجنده‌ی Ultra Cam ساختار هندسی هر یک از دوربین‌های اخذ تصاویر چند طیفی مشابه

را در پروژه‌های مختلف استخراج نمود. برای محقق شدن این موضوع استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌تواند کمک شایانی در تعیین پارامترهای اضافه مؤثر داشته باشد.

الگوریتم‌های ژنتیک (با نماد اختصاری GA) تکنیک جستجویی در علم رایانه برای یافتن راه‌حل تقریبی به منظور بهینه‌سازی و مسائل جستجو است.

الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی فرگشتی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند. این الگوریتم برای اولین بار توسط جان هلند معرفی شد. در واقع الگوریتم‌های ژنتیک از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کنند.

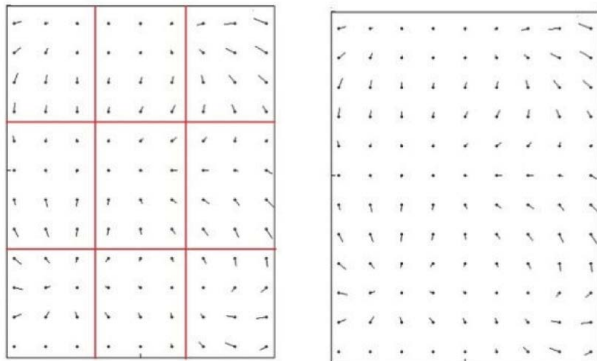
در هوش مصنوعی الگوریتم ژنتیک (یا GA) یک تکنیک برنامه‌نویسی است که از تکامل ژنتیکی به عنوان یک الگوی حل مسئله استفاده می‌کند.

مسئله‌ای که باید حل شود دارای ورودی‌هایی می‌باشد که طی یک فرایند الگوبرداری شده از تکامل ژنتیکی به راه‌حل‌ها تبدیل می‌شود سپس راه‌حل‌ها بعنوان کاندیدها توسط تابع ارزیاب (Fitness Function) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و چنانچه شرط خروج مسئله فراهم شده باشد الگوریتم خاتمه می‌یابد. در صورت بهره‌گیری از تابع ارزیاب در الگوریتم ژنتیک با افزایش این تابع بهبود نتایج حاصل می‌شود. در صورتی که به جای تابع ارزیاب از تابع هزینه استفاده شود، بهبود الگوریتم همراه با کاهش تابع هزینه همراه خواهد بود. الگوریتم ژنتیک بطور کلی یک الگوریتم مبتنی بر تکرار است که اغلب بخش‌های آن به صورت فرایندهای تصادفی انتخاب می‌شوند.

در این تحقیق مدل‌های ریاضی جبری، معادلات فوریه و معادلات فوریه بهینه شده بر اساس الگوریتم ژنتیک مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴- روش تحقیق و نتایج پیاده‌سازی

به منظور تعیین بهترین ترکیب از ترم‌های معادلات فوریه



نگاره (۳): اجتماع بردارهای خطا در یک تصویر کامل

### شبیه‌سازی بردارهای خطا در تصویر کامل دوربین

#### UltraCam

با توجه به اینکه بخش عمده خطاهای هندسی در سیستم‌های تصویربرداری هوایی ناشی از اعوجاجات شعاعی عدسی می‌باشد، معادلات فیزیکی Moniwa1977 بدلیل امکان تفکیک منبع و ریشه هر خطا به عنوان رایج‌ترین معادلات در شبیه‌سازی خطاهای هندسی مطرح می‌باشند.

اگرچه این معادلات به راحتی می‌توانند بردارهای خطا در فضای تصویر حاصل از یک عدسی را برآورد نمایند، ولی در مدل‌سازی یک تصویر حاصل از چند عدسی لازم است تا پس از شبیه‌سازی بردارهای خطا برای هر عدسی، نسبت به شبیه‌سازی تجمیع آنها در تصویر نهایی نیز اقدام نمود.

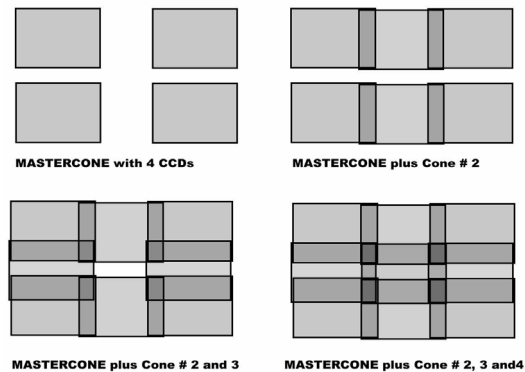
به منظور انتساب مقادیر منطقی به پارامترهای مدل Moniwa1977 در هر عدسی، از اطلاعات فایل کالیبراسیون دوربین رقومی Ultra cam XP ایده گرفته شده است. در این فایل پارامترهای اعوجاجات هر عدسی به تفکیک ارائه شده است (جدول ۱).

با استفاده از مقادیر این جدول میزان تقریبی پارامترهای مدل فیزیکی Moniwa1977 شناسایی شده و با تعریف دامنه تغییرات برای هر یک از این پارامترها، جامعه آماری از مقادیر محتمل برای پارامترهای اعوجاج تشکیل تصویر در دوربین Ultra cam تولید گردید.

با یک دوربین معمولی پرسپکتیو بوده و هر یک از آنها، از یک منطقه‌ی زمینی اخذ تصویر می‌کنند. اما بدیهی است که بواسطه‌ی تفاوت در موقعیت و وضعیت دوربین‌های مذکور، تناظر یک به یکی بین پیکسل‌های تصاویر خام برقرار نخواهد بود.

این مشکل در فرایند پردازشی مرتفع شده و در نهایت تصاویر خام هم‌مرجع شده بعد از انجام نمونه‌برداری مجدد مکانی تولید می‌گردند. اما چگونگی تشکیل تصویر پانکروماتیک در این سنجنده از پیچیدگی هندسی بیشتری برخوردار است.

در سنجنده Ultra Cam، چهار دوربین رقومی مجزا برای این هدف طراحی شده‌اند. هر یک از دوربین‌های مذکور با محورهای اصلی نسبتاً موازی بر بدنه‌ی Ultra Cam جای گرفته‌اند. تفاوت هر یک از این دوربین‌ها در نحوه‌ی طراحی و چیدمان CCDها در فضای تصویر می‌باشد. نگاره ۲ نحوه چیدمان تصاویر را نشان می‌دهد.



نگاره (۲): نحوه قرار گرفتن تصویر هر عدسی در دوربین

#### Ultra Cam

متناسب با هر تصویر با توجه به اینکه هر تصویر دارای اعوجاجات عدسی مربوط به خود است، بردارهای خطا در تصویر نهایی مجموعه‌ای از بردارهای خطا از هر زیر تصویر می‌باشد. نگاره (۳) بردارهای خطا به صورت تجمیعی در تصویر نهایی را نشان می‌دهد.



می‌گردد. حال می‌توان بردارهای خطا در فضای تصویر را بر اساس الگوریتم شبیه‌سازی ارائه شده ایجاد نمود. این بردارها به دو دسته بردارهای کنترل جهت حل مدل‌های کالیبراسیون و بردارهای ارزیابی جهت کنترل صحت نتایج حاصل تقسیم‌بندی شد.

**۴-۲- پیاده‌سازی مدل‌های مختلف تخمین خطای هندسی**  
 همانگونه که قبلاً ذکر شد، در این بخش ابتدا به پیاده‌سازی مدل‌های رایج و پیشنهادی قبلی جهت مدل‌سازی خطاهای هندسی شبیه‌سازی شده پرداخته شده است. در ادامه مدل پیشنهادی که شامل ترم‌های بهینه منتخب از معادلات فوریه بر اساس الگوریتم ژنتیک می‌باشد، پیاده‌سازی شده است. سپس جزئیات اجرایی این مراحل تشریح شده است.

### پیاده‌سازی مدل‌های پیشنهادی

به منظور ارزیابی نقاط ضعف و قوت روش‌های پیشنهادی، مدلی‌های ریاضی زیر مورد پیاده‌سازی و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

### معادلات (Moniwa 1977)

پارامترهای اضافه در این روش دارای تعریف فیزیکی بوده و تعداد آنها ۷ پارامتر می‌باشد (رابطه ۸)

$$\Delta x_z = \Delta r_z + \Delta p_z + \Delta g_z$$

$$\Delta y_z = \Delta r_y + \Delta p_y + \Delta g_y$$

$$\Delta r_z = (x - x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)$$

$$\Delta r_y = (y - y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)$$

$$r = ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Delta p_z = p_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2p_2(x - x_0)(y - y_0)$$

$$\Delta p_y = p_1(r^2 + 2(y - y_0)^2) + 2p_2(x - x_0)(y - y_0)$$

$$\Delta g_z = A(x - x_0)$$

$$\Delta g_y = B(y - y_0) \quad \Delta g_z = B(y - y_0) \quad (8)$$

$\Delta x_z$  و  $\Delta y_z$  تصحیحات در امتداد محورهای  $x$  و  $y$

$\Delta r_z$  و  $\Delta r_y$  تصحیحات مربوط به اعوجاج شعاعی لنز در امتداد

محورهای  $x$  و  $y$

جدول (۱): مقادیر اولیه پارامترهای اعوجاج حاصل از فایل

کالیبراسیون دوربین رقومی ULTRA CAMXP

پارامتر	عدسی ۰	عدسی ۱	عدسی ۲	عدسی ۳
K1	3.03e-04	-2.85e-05	-1.18e-04	2.75e-04
K2	-1.55e-07	-3.68e-08	-8.21e-08	-7.17e-07
K3	7.52e-11	4.34e-11	5.45e-11	1.27e-09
B1	8.152e-005	3.114e-005	1.258e-005	9.458e-005
B2	-1.0153e-005	0.514e-005	-2.114e-005	-5.107e-005
P1	-6.173e-007	0.698e-007	3.303e-007	6.414e-007
P2	8.341e-006	3.986e-006	-1.086e-006	-5.112e-006

بر اساس جدول فوق مقدار اولیه هر پارامتر با میانگین‌گیری مقادیر عدسی‌های مختلف و تعیین دامنه تغییرات بر حسب پراکندگی این پارامترها در حدود ۵-۱۰ میکرون انتخاب شد.

پس از انتساب مقادیر تصادفی به پارامترهای هر عدسی در دامنه فوق، اندازه بردار خطا برای نقاط فرضی در تصویر آن عدسی در قالب یک شبکه ۱۴\*۲۱ صورت گرفت. سپس جهت شبیه‌سازی مرحله اتصال این تصاویر (Stitching) به بردارهای خطای هر عدسی یک مدل پرسپکتیو دوبعدی تصادفی اعمال شد. در پایان از تجمیع بردارهای خطای ۴ عدسی رفتار خطای هندسی در یک تصویر کامل دوربین Ultra Cam شبیه‌سازی شد.

بر اساس روال فوق، در ابتدا یک شبکه منظم از مختصات نقاط زمینی با توجه به مقیاس عکس و تعداد تصاویر و تعداد نوارهای پروازی به صورت شبیه‌سازی شده ایجاد می‌گردد. شبکه نقاط زمینی به عنوان نقطه کنترل زمینی وارد معادلات شرط هم‌خطی می‌گردد.

سپس با توجه به تعداد تصاویر و تعداد نوارها پارامترهای توجیه خارجی (مرکز تصویر و وضعیت دوربین) برای هر تصویر با توجه به اینکه تصاویر قائم فرض شده‌اند (میزان تیلت ۳درجه) ایجاد می‌گردد. بر اساس معادلات شرط هم‌خطی و مقادیر نقاط کنترل زمینی و پارامترهای توجیه خارجی، مقادیر مختصات عکسی برای هر تصویر معلوم

### معادلات Fourier

همانطور که توضیح داده شد این روش در سال ۲۰۱۲ توسط Cramer & Tang به عنوان بهترین پارامترهای اضافه استفاده شده در تصاویر هوایی رقومی معرفی گردیده است. این تحقیق در دو حالت ۱۶ و ۴۸ پارامتر اضافه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است (روابط ۶ و ۷).

### پایه‌سازی مدل پیشنهادی فوریه-ژنتیک

در طراحی ساختار الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این تحقیق از رویکرد کدگذاری باینری بهره گرفته شده که هر ژن مبین حضور و عدم حضور یک پارامتر از مجموعه پارامترهای اضافی می‌باشد. سایر تنظیمات این الگوریتم مطابق جدول شماره (۲) انتخاب شده است.

جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده در روش الگوریتم ژنتیک

جمعیت اولیه ۲۰۰ کروموزوم
جمعیت حوزچه تکثیر برابر با نصف جمعیت جامعه
تعداد نسل‌ها ۱۰۰ (شرط اتمام الگوریتم)
درصد حضور شایسته‌ها در نسل‌ها آتی ۵ درصد
احتمال انتخاب بهینه بمنظور حضور در حوزچه تکثیر ۷۰ درصد
فرایند Crossover دونقطه‌ای
احتمال جهش ژنتیکی ۳ درصد
تابع هزینه معادل RMSE نقاط مستقل چک

مطابق با مندرجات جدول (۲) تابع هزینه بکار گرفته شده در ساختار طراحی شده برای الگوریتم ژنتیک معادل RMSE نقاط مستقل چک در نظر گرفته شده است (رابطه ۱۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ex_i^2 + ey_i^2 + ez_i^2}{n-1}} \quad (12)$$

معیار همگرایی این الگوریتم مبتنی بر انتخاب شایسته‌ترین کروموزوم در آخرین نسل در نظر گرفته شده است. جهت تعیین تعداد نسل‌های مورد استفاده به منظور شرط اتمام الگوریتم، بایستی همگرایی این الگوریتم مورد ارزیابی

$dx_y$  و  $dy_x$  تصحیحات مربوط به اعوجاج مماسی لنز در امتداد

محورهای  $x$  و  $y$

$dg_x$  و  $dg_y$  تصحیحات مربوط به تغییر بعد فیلم در امتداد

محورهای  $x$  و  $y$

$K_1, K_2, K_3$  پارامترهای اعوجاج شعاعی عدسی

$P_1$  و  $P_2$  پارامترهای اعوجاج مماسی عدسی

$A$  و  $B$  پارامترهای تغییر بعد فیلم در امتداد محورهای  $x$  و  $y$

### معادلات EBNER

تعداد پارامترهای مورد استفاده ۱۲ پارامتر به شرح رابطه ۹ می‌باشد. در روابط Grün از ۴۴ پارامتر بر اساس معادلات چند جمله‌ای‌ها در مدل‌سازی سلف کالیبراسیون استفاده شده است.

$$x_p = a_1x + a_2y - a_3(2x^2 - \frac{4x^4}{3}) + a_4xy + a_5(y^2 - \frac{2y^4}{3}) + a_6x(x^2 - \frac{2x^4}{3}) + a_7y(y^2 - \frac{2y^4}{3}) + a_8(x^2 - \frac{2x^4}{3})(y^2 - \frac{2y^4}{3})$$

$$y_p = -a_1x + a_2y + a_3(2y^2 - \frac{4y^4}{3}) + a_4xy + a_5(x^2 - \frac{2x^4}{3}) + a_6y(y^2 - \frac{2y^4}{3}) + a_7x(x^2 - \frac{2x^4}{3}) + a_8(x^2 - \frac{2x^4}{3})(y^2 - \frac{2y^4}{3}) \quad (9)$$

$\Delta x_p$  و  $\Delta y_p$  تصحیحات در امتداد محورهای  $x$  و  $y$

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$  پارامترهای مشترک تغییر شکل فیلم در امتداد

محورهای  $x, y$  و  $a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}$  پارامترهای تغییر بعد فیلم در

امتداد محورهای  $x$  و  $a_{13}, a_{14}$  پارامترهای تغییر بعد فیلم

در امتداد محورهای  $y$

### معادلات Legendre

این معادلات از نوع چند جمله‌ای‌های متعامد بوده و به دلیل استفاده از تعداد ضرایب مجهول بالا (۶۶ پارامتر) قابلیت مدل کردن بردارهای خطا با دقت بالا را دارند (رابطه ۱۱).

$$l_m(x, b_x) = L_m(x/b_x), \quad l_n(y, b_y) = L_n(y/b_y)$$

$$p_{m,n} = 10^{-8} l_m(x, b_x) l_n(y, b_y) \quad (10)$$

$$\Delta x = a_1p_{1,0} + a_2p_{0,1} + a_3p_{2,0} + a_4p_{1,1} + a_5p_{0,2} + a_6p_{2,1} + a_7p_{1,2} + a_8p_{0,3} + a_9p_{2,2} + a_{10}p_{1,3} + a_{11}p_{0,4} + a_{12}p_{2,3} + a_{13}p_{1,4} + a_{14}p_{0,5} + a_{15}p_{2,4} + a_{16}p_{1,5} + a_{17}p_{0,6} + a_{18}p_{2,5} + a_{19}p_{1,6} + a_{20}p_{0,7} + a_{21}p_{2,6} + a_{22}p_{1,7} + a_{23}p_{0,8} + a_{24}p_{2,7} + a_{25}p_{1,8} + a_{26}p_{0,9} + a_{27}p_{2,8} + a_{28}p_{1,9} + a_{29}p_{0,10} + a_{30}p_{2,9} + a_{31}p_{1,10} + a_{32}p_{0,11} + a_{33}p_{2,10} + a_{34}p_{1,11} + a_{35}p_{0,12} + a_{36}p_{2,11} + a_{37}p_{1,12} + a_{38}p_{0,13} + a_{39}p_{2,12} + a_{40}p_{1,13} + a_{41}p_{0,14} + a_{42}p_{2,13} + a_{43}p_{1,14} + a_{44}p_{0,15} + a_{45}p_{2,14} + a_{46}p_{1,15} + a_{47}p_{0,16} + a_{48}p_{2,15} + a_{49}p_{1,16} + a_{50}p_{0,17} + a_{51}p_{2,16} + a_{52}p_{1,17} + a_{53}p_{0,18} + a_{54}p_{2,17} + a_{55}p_{1,18} + a_{56}p_{0,19} + a_{57}p_{2,18} + a_{58}p_{1,19} + a_{59}p_{0,20} + a_{60}p_{2,19} + a_{61}p_{1,20} + a_{62}p_{0,21} + a_{63}p_{2,20} + a_{64}p_{1,21} + a_{65}p_{0,22} + a_{66}p_{2,21} + a_{67}p_{1,22} + a_{68}p_{0,23} + a_{69}p_{2,22} + a_{70}p_{1,23} + a_{71}p_{0,24} + a_{72}p_{2,23} + a_{73}p_{1,24} + a_{74}p_{0,25} + a_{75}p_{2,24} + a_{76}p_{1,25} + a_{77}p_{0,26} + a_{78}p_{2,25} + a_{79}p_{1,26} + a_{80}p_{0,27} + a_{81}p_{2,26} + a_{82}p_{1,27} + a_{83}p_{0,28} + a_{84}p_{2,27} + a_{85}p_{1,28} + a_{86}p_{0,29} + a_{87}p_{2,28} + a_{88}p_{1,29} + a_{89}p_{0,30} + a_{90}p_{2,29} + a_{91}p_{1,30} + a_{92}p_{0,31} + a_{93}p_{2,30} + a_{94}p_{1,31} + a_{95}p_{0,32} + a_{96}p_{2,31} + a_{97}p_{1,32} + a_{98}p_{0,33} + a_{99}p_{2,32} + a_{100}p_{1,33} \quad (11)$$

**فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ص ۱۰۵)**  
 بهینه‌سازی مدل ریاضی فوری به کمک الگوریتم ژنتیک ... / ۱۰۵

منظور کمی‌سازی رفتار بردارهای خطا در فضای تصویر بشمار می‌روند. در نهایت بر اساس تحلیل‌های آماری ذکر شده مدل‌های ریاضی بهینه با کمترین وابستگی و بالاترین دقت و انعطاف جهت مدلسازی مشخص می‌گردد.

برای این منظور علاوه بر تعیین میزان دقت نقاط کنترل و چک (دقت بر حسب سانتیمتر)، سه پارامتر جهت بررسی میزان وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**- Correlation factor additional**

معیار وابستگی بین پارامترهای اضافه (معیار تست داخلی پارامترهای اضافه)

**- Correlation factor**

معیار وابستگی بین تمام پارامترهای موجود در مثلث‌بندی به روش سلف کالیبراسیون (تست داخلی مثلث‌بندی)

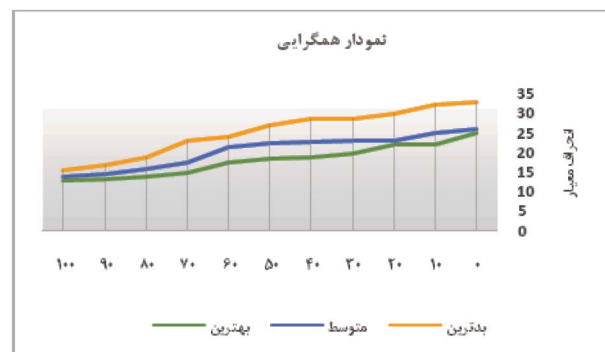
**- Correlation factor\_add&EOP**

معیار وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی (تست خارجی پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی) برای ارزیابی دقت روش‌های بیان شده از دو حالت پروازی و نقاط کنترل زمینی و چک به شرح جدول شماره ۳ بهره گرفته شده است.

جدول (۳): طراحی حالت پرواز و نقاط کنترل زمینی و چک شبیه سازی شده

مقیاس عکسبرداری ۱:۱۰۰۰۰		
حالت دوم	حالت اول	پارامترهای پرواز
۳	۵	تعداد نوار
۳۰	۴۵	تعداد تصویر
%۶۰	%۸۰	پوشش طولی
%۲۰	%۶۰	پوشش عرضی
۹۶	۹۶	تعداد نقاط کنترل
۲۵	۲۵	تعداد نقاط چک

قرار گیرد. برای محقق شدن این امر نمودار (۱) همگرایی این الگوریتم را نشان می‌دهد. همانگونه که مشهود است همگرایی قبل از نسل ۱۰۰ام حاصل می‌گردد. این موضوع در اجراهای مختلف بررسی و حداکثر تعداد تکرار ۱۰۰ در همه موارد کافی شناخته شد. از اینرو شرط توقف الگوریتم حداکثر تعداد ۱۰۰ منظور شده است.



نمودار (۱): ارزیابی همگرایی الگوریتم ژنتیک در حالت تعداد نقاط کنترل ۹۶ و نقاط چک ۲۵ و پوشش طولی ۸۰٪ و عرضی ۶۰٪ در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰، تعداد ۴۵ تصویر در ۵ نوار

**۳-۴ ارزیابی دقت و مقایسه نتایج**

در فرایند ارزیابی دقت و صحت هندسی، بردارهای خطا در نقاط چک (بردارهای خطا ایجاد شده در فضای تصویر جهت تست پارامترهای اضافه محاسبه شده) از ارجحیت بالاتری نسبت به بردارهای خطا کنترلی (بردارهای خطا جهت محاسبه مقادیر پارامترهای اضافه) برخوردار خواهند بود. (M. Mikhail, 2004)

در زمینه‌ی ارزیابی بردارهای خطای برآورد شده در فضای تصویر، تشخیص و تحلیل کمی بردارهای خطا از نقطه‌نظر وجود رفتارهای سیستماتیک مورد توجه خواهد بود. هر چند که ارزیابی بصری بردارهای ترسیم شده، دید کلی از رفتار خطاهای باقیمانده را در فضای تصویر فراهم می‌آورد؛ ولیکن برآورد کمیاتی همچون: ۱- RMSE، ۲- همبستگی میان مؤلفه‌های x و y از بردارهای خطا، ۳- اتروپی، ۴- بردار میانگین خطا و ۵- انحراف استاندارد از میانگین، نمونه‌هایی از تحلیل‌های آماری قابل انجام به

با توجه به جدول (۵) دقت نقاط چک در روش ارائه شده (معادلات فوریه بهینه شده بر اساس الگوریتم ژنتیک) نسبت به سایر روش‌ها در حدود ۲۰ درصد در حالت مسطحاتی و ۱۵ درصد در بعد ارتفاعی بهبود یافته است. نمودار (۲) میزان دقت نقاط کنترل و چک برای هر روش را به نمایش گذاشته است.

جدول (۵): نتایج ارزیابی در شبیه سازی حالت اول (تعداد

نقاط کنترل ۹۶ و نقاط چک ۲۵ و پوشش طولی ۸۰٪ و

عرضی ۶۰٪ در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰، تعداد ۴۵ تصویر در ۵ نوار)

RMSE of CheckPoints (cm)			RMSE of GCPs (cm)			پارامترهای اضافه
RMSE (Z)	RMSE (Y)	RMSE (X)	RMSE (Z)	RMSE (Y)	RMSE (X)	
18.25	11.86	9.58	17.24	9.15	8.97	EBNER
15.48	7.11	6.28	13.08	4.81	4.28	LEGENDRE
16.38	7.2	6.87	13.15	5.14	4.25	FOURIER(48)
14.28	6.84	6.54	12.58	4.71	4.11	FOURIER(16)
11.26	5.05	5.12	9.25	3.29	3.12	GA_Fourier
وابستگی بین تمام پارامترهای اضافه و توجیه خارجی	وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی	وابستگی بین پارامترهای اضافه	تعداد پارامترها			پارامترهای اضافه
0.2215	0.2869	0.2314	12			EBNER
0.1345	0.1659	0.1163	66			LEGENDRE
0.1459	0.1689	0.1978	48			FOURIER(48)
0.1228	0.1508	0.1063	16			FOURIER(16)
0.1048	0.1157	0.0769	24			GA_Fourier

یکی از دلایل اصلی بهبود دقت در روش ذکر شده کاهش میزان وابستگی بین پارامترهای اضافه و در عین حال با پارامترهای توجیه خارجی می‌باشد. نتایج حاصل از تست داخلی و خارجی دوربین رومی مبین این مسأله می‌باشد. نمودار (۳) میزان وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی را به تفکیک نشان می‌دهد.

در حالت شبیه‌سازی دوم پوشش تصاویر کاهش یافته است و لذا به تبع آن تعداد تصاویر و در نتیجه تعداد مشاهدات تا حد امکان کاهش می‌یابد، تا میزان تأثیرگذاری روش سلف کالیبراسیون با پارامترهای بهینه استخراج شده

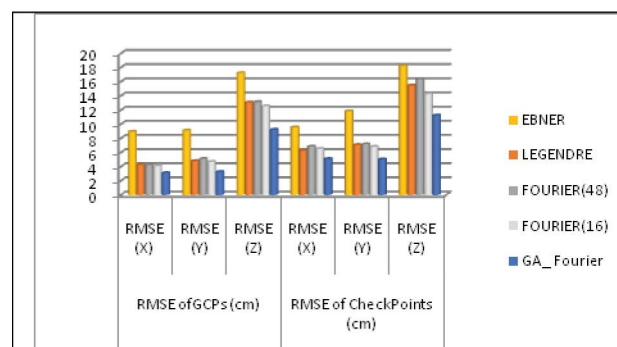
جدول (۴): خلاصه نتایج ۷ بار اجرا در حالت اول جهت

بررسی پایداری الگوریتم

RMSE of CheckPoints (cm)			RMSE of GCPs (cm)			وضعیت
RMSE (Z)	RMSE (Y)	RMSE (X)	RMSE (Z)	RMSE (Y)	RMSE (X)	
11.26	5.05	5.12	9.25	3.29	3.12	بهترین پاسخ
14.60	6.29	6.16	11.61	4.64	4.62	بدترین پاسخ
12.51	5.60	5.59	9.90	3.93	3.62	متوسط
1.39	0.51	0.43	0.83	0.52	0.55	انحراف معیار

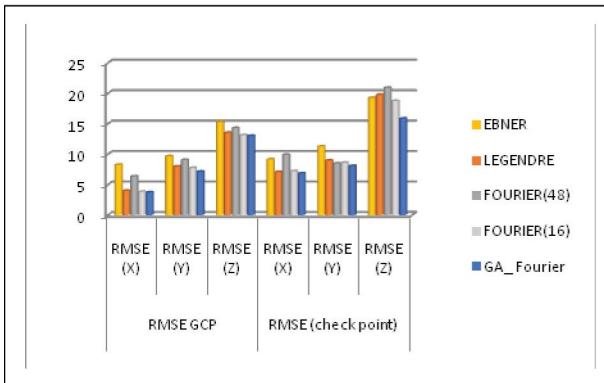
الگوریتم ژنتیک پیشنهادی بر روی بلوک حالت اول اجرا شد. نظر به اینکه بدلیل ایجاد تصادفی جامعه اولیه الگوریتم ژنتیک، ممکن است در اجراهای متوالی به پاسخهای متفاوتی همگرا شود، این الگوریتم ۷ بار بر روی بلوک حالت اول اعمال گردید. در جدول (۴) خلاصه نتایج حاصل از این ۷ بار اجرا جهت بررسی پایداری الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است.

همانگونه که از جدول (۴) مشخص است الگوریتم پیشنهادی از ثبات پاسخ مناسبی برخوردار می‌باشد. در ادامه با پیاده‌سازی روش‌های سنتی و پیشنهادی دیگر محققین زمینه مقایسه بین الگوریتم پیشنهادی و مدل‌های پیشین ایجاد شده است. این نتایج در جدول شماره (۴) ارائه شده است، لازم به ذکر است که در این جدول بهترین پاسخ ۷ بار اجرای متوالی الگوریتم ژنتیک آورده شده است.



نمودار (۲): دقت نقاط کنترل و چک در حالت شبیه سازی شده اول (تعداد نقاط کنترل ۹۶ و نقاط چک ۲۵ و پوشش طولی ۸۰٪ و عرضی ۶۰٪ در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰، تعداد ۴۵ تصویر در ۵ نوار)

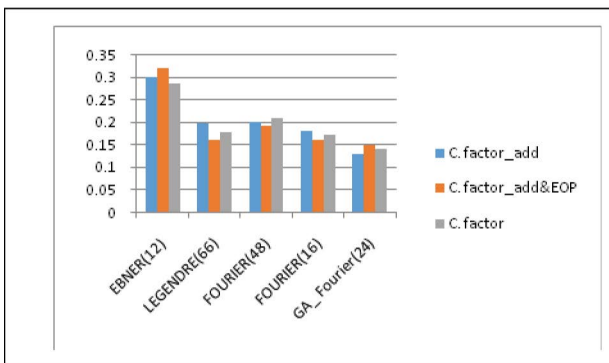
نقاط کنترل و چک برای هر روش را به نمایش گذاشته است.



نمودار(۴): دقت نقاط کنترل و چک

تعداد نقاط کنترل ۹۶ و نقاط چک ۲۵ و پوشش طولی ۶۰٪ و عرضی ۲۰٪ در حالت شبیه سازی دوم مقیاس ۱:۱۰۰۰۰، تعداد ۳۰ تصویر در ۳ نوار

همانطورکه در حالت اول بیان گردید وابستگی کمتر بین پارامترهای مدل ریاضی بهبود یافته با پارامترهای توجیه خارجی باعث بهبود دقت در نتایج مثلث بندی در نقاط کنترل و چک نسبت به سایر روش ها می شود. برای این منظور نمودار (۵) میزان وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی را در دو تست داخلی و تست خارجی به نمایش گذاشته است.

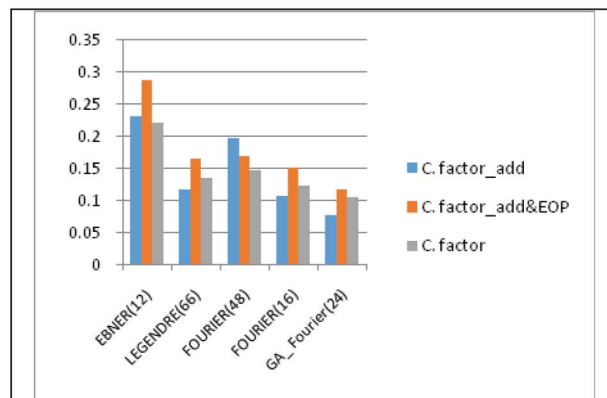


نمودار(۵): میزان وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی در حالت شبیه سازی دوم تعداد نقاط کنترل ۹۶ و نقاط چک ۲۵ و پوشش طولی ۶۰٪ و عرضی ۲۰٪ در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰، تعداد ۳۰ تصویر در ۳ نوار

بر اساس الگوریتم ژنتیک در نتایج سرشکنی به اثبات برسد. نتایج حاصل از حالت دوم در جدول (۶) بیان گردیده است.

جدول(۶): نتایج ارزیابی در شبیه سازی حالت دوم (تعداد نقاط کنترل ۹۶ و نقاط چک ۲۵ و پوشش طولی ۶۰٪ و عرضی ۲۰٪ در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰، تعداد ۳۰ تصویر در ۳ نوار)

RMSE (check point)			RMSE GCP			پارامترهای اضافه
RMSE (Z)	RMSE (Y)	RMSE (X)	RMSE (Z)	RMSE (Y)	RMSE (X)	
19.25	11.29	9.18	15.28	9.69	8.27	EBNER
19.77	8.99	7.09	13.54	7.98	4.01	LEGENDRE
20.94	8.49	9.93	14.32	9.09	6.36	FOURIER(48)
18.77	8.61	7.22	13.14	7.76	3.84	FOURIER(16)
15.88	8.09	6.87	13.02	7.15	3.77	GA_Fourier
وابستگی بین تمام پارامترهای اضافه و توجیه خارجی		وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی		وابستگی بین پارامترهای اضافه		تعداد پارامترها
0.2869		0.3215		0.3025		12
0.1786		0.1629		0.1987		66
0.2103		0.1927		0.2014		48
0.1736		0.1614		0.1825		16
0.1423		0.1498		0.1311		24



نمودار(۳): میزان وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی در حالت شبیه سازی اول (تعداد نقاط کنترل ۹۶ و نقاط چک ۲۵ و پوشش طولی ۸۰٪ و عرضی ۶۰٪ در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰، تعداد ۴۵ تصویر در ۵ نوار)

در حالت دوم نیز دقت نقاط کنترل و چک با توجه به روش بهینه ارائه شده بهبود می یابد. نمودار(۴) نتایج دقت

در این مقایسه عدم وابستگی بین پارامترهای معادلات فوریه بهبود یافته بر اساس الگوریتم ژنتیک با توجه به حالت کاملاً متقارب مشخص می‌باشد، در حالیکه در باقی تصاویر این وابستگی بین پارامترها تصاویر مختلفی را ارائه داده است. که این امر نشان دهنده استقلال بالاتر بین پارامترهای مدل ریاضی فوریه بهبود یافته نسبت به روش‌های مشابه می‌باشد. از این رو استفاده از پارامترهای بهینه معرفی شده از طریق الگوریتم ژنتیک جهت مدلسازی بردارهای خطا در فضای تصویر مفید به نظر می‌رسد.

#### ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

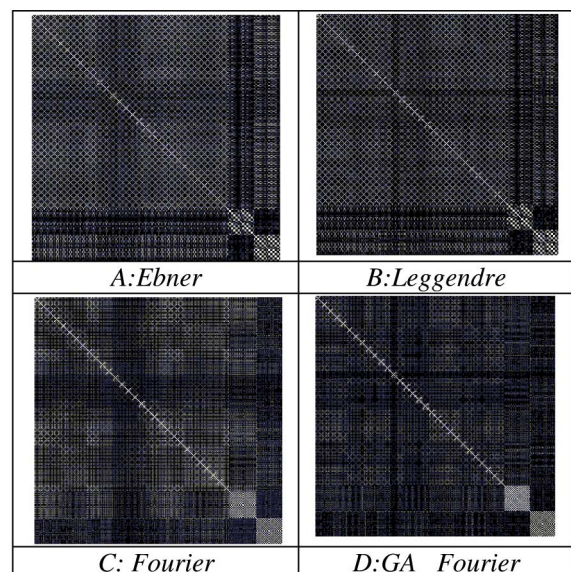
طبق آخرین تحقیقات انجام شده در زمینه سلف کالیبراسیون، استفاده از معادلات فوریه به عنوان بهترین پارامترهای اضافه در شرط همخطی توصیه شده است. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهترین ترم‌های تأثیرگذار بر روی این معادلات جهت سلف کالیبراسیون دوربین رقومی Ultra cam XP استخراج گردید. در نهایت با استفاده از این روش دقت مسطحاتی در حالت پوشش طولی ۸۰ درصد و پوشش عرضی ۶۰ درصد و مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ در حدود ۲۵ درصد و دقت ارتفاعی در حدود ۱۵ درصد نسبت به آخرین روش سلف کالیبراسیون بهبود یافت.

دلیل اصلی افزایش دقت در نقاط کنترل و چک کاهش وابستگی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی می‌باشد.

با توجه به ظهور تکنولوژی پیچیده در ساخت دوربین‌های رقومی استفاده از معادلات ترکیبی که به تازگی در علوم ریاضی رونق پیدا کرده است، می‌تواند یک راه‌حل بهینه و مناسب تلقی گردد. لذا استفاده از این گونه توابع در مدل‌سازی اعوجاجات چندگانه مفید تلقی می‌گردد. از اینرو استفاده از معادلات چیشف- فوریه، ژاکوبی- فوریه و سایر معادلات ترکیبی می‌تواند گام مؤثری در مدل‌سازی معادلات سلف کالیبراسیون دوربین‌های رقومی هوایی باشد.

همانطور که بیان شد معادلات فوریه بهبود یافته با تعداد ترم کمتر دقت بالاتری را نسبت به روش‌های گذشته ارائه نموده است. لازم به ذکر است که تعداد ترم‌های منتخب در اجراهای متوالی بین ۲۳ تا ۲۷ ترم حاصل می‌شد که این تعداد در مقایسه با ۴۸ ترم روابط سنتی فوریه تقریباً به نصف کاهش یافته است.

به دلیل وابستگی بین ترم‌های معادله فوریه از ۱۶ پارامتر به ۴۸ پارامتر، دقت نقاط کنترل و چک کاهش می‌یابد. در حالیکه به دلیل استقلال بالاتر پارامترهای این مدل ریاضی نسبت به سایر روش‌های ارائه شده با افزایش تعداد ترم‌ها مؤثر از ۱۶ پارامتر به ۲۴ پارامتر دقت نقاط کنترل و چک افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش تعداد پارامترهای اضافه دقت نقاط کنترل و چک بهبود می‌یابد. اگر چه در روش‌های پیشین رابطه‌ای معکوس بین دقت نهایی و تعداد ترم‌های سری فوریه گزارش شده است، در روش پیشنهادی بدلیل انتخاب ترم‌های بهینه توسط GA چنین رابطه‌ای وجود ندارد. برای انجام مقایسه ساده‌تر نتایج حاصل از میزان وابستگی بین پارامترهای مدل‌های ریاضی ماتریس کواریانس بر اساس درجات خاکستری در نگاره (۴) نمایش داده شده است.



نگاره (۴): تصاویر حاصل از ماتریس همبستگی چهار مدل ریاضی مختلف جهت حل معادلات سلف کالیبراسیون

Vol. 19, No. 9/September .

13- ZiLiang Ping, Yongj ing Jiang, 2010. A Fast Algorithm For Computing Chebyshev-FourierMoments,International Conference on Future Information Technology and Management Engineering.

#### ۷- منابع و مآخذ

- 1- Brown, D., 1971. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering* 37(8), 855–866.
- 2- Brown, D.,1976. The bundle method – progress and prospects. *InternationalArchives of Photogrammetry* 21 Part 3),1–33.
- 3- C. Canuto,A. Quarteroni,M. Y. Hussaini,T. A. Zang,2006 .Spectral Methods. Fundamentals in Single Domains. Library of Congress Control Number: 2006922326.
- 4- Calibration Report (Geometric Calibration) UltraCamXp,2010. Serial Number UC-SXp-1-30719440,Vexcel Imaging GmbH • Anzengruebergasse ,www.ultracamx.com Page 2 of 14
- 5- Clarke, T., Fryer, J., 1998. The development of camera calibration methods andmodels. *Photogrammetric Record* 16 (91), 51–66.
- 6- Cramer, M., Grenzdrffer, G., Honkavaara, E., 2010 . In-situ digital airborne cameravalidation and certification – the future standard? *International Archives ofPhotogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38 (Part 1).
- 7- Ebner, H., 1976. Self-calibrating block adjustment. *Bildmessung und Luftbildwesen*,44 (4), 128–139.
- 8- Fraser, C., 1997. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetryand Remote Sensing* 52 (4), 149–159.
- 9- J. Chris McGlone, Edward M. Mikhail, James S. Bethel,Manual of Photogrammetry. Fifth Edition. 2004.
- 10- Rongfu Tang, Dieter Fritsch, Michael Cramer ,2012. New rigorous and flexible Fourier self-calibration models for airbornecamera calibration»Institute for Photogrammetry, University of Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, Germany.
- 11- T. A. Clarke, X. Wang and J. G. Fryer, 1998 .The Principal Point and CCD Cameras, *Photogrammetric Record*, 16(92): 293–312 .
- 12- ZiLiang Ping,RiGeng Wu, YunLong Sheng, 2002. Image description with Chebyshev–Fourier moments,Department of Physics, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China, *J. Opt. Soc. Am. A/*

