



سنجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال یازدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۸  
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.11, No. 1, Spring 2019

۱-۱۸

## ارزیابی جامع الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک استاندارد، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری وابسته به زمین

بهروز مرادی<sup>۱\*</sup>، محمد جواد ولدان زوج<sup>۲</sup>، مجتبی جنتی<sup>۳</sup>، سمیه یآوری<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۲- استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۳- پژوهشگر پسادکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۴- پژوهشگر پسادکتری، دانشکده مهندسی و علوم کاربردی، دانشگاه مموریال نیوفوندلند، کانادا

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱/۲۷

### چکیده

استفاده از توابع کسری، در غیاب اطلاعات افمریز مدار ماهواره و هندسه داخلی سنجنده، یکی از بهترین روش‌ها برای زمین‌مرجع‌سازی تصاویر ماهواره‌ای و استخراج اطلاعات مکانی از تصاویر ماهواره‌ای است. تعداد زیاد ترم‌ها و عدم تفسیرپذیری آنها، باعث شده تا تعدد نقاط کنترل موردنیاز و ایجاد خطای پارامترهای اضافه، به‌عنوان مهم‌ترین ضعف‌های توابع کسری وابسته به زمین شناخته شوند. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، یکی از راهکارهای مناسب رفع این ضعف‌ها است. به‌همین دلیل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف، برای کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری وابسته به زمین استفاده شده است. از آنجا که سازوکار هریک از این الگوریتم‌ها با یکدیگر متفاوت است، میزان کارایی و خصوصیات مختلف این الگوریتم‌ها در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری وابسته به زمین متفاوت است اما تفاوت‌های موجود به‌صورت جامع، مورد مقایسه و تحلیل قرار نگرفته است. در این مقاله، به‌منظور بررسی کامل و جامع توانایی‌های سه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری از دیدگاه‌های مختلف از جمله دقت، سرعت، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز و قابلیت اطمینان به نتایج بدست آمده، از ۴ تصویر ماهواره‌ای متعلق به سنجنده‌های GeoEye-1، IKONOS-2، SPOT-3-1<sup>a</sup> و SPOT-3-1B استفاده شده است. اختلاف دقت کمتر از ۰/۴ پیکسل در نتایج هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، ۱۰ تا ۱۲ برابر بودن سرعت الگوریتم ژنتیک بهبودیافته نسبت به دو الگوریتم دیگر، به ترتیب برتری ۴۵/۲۵ و ۲۷ درصدی درجه آزادی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته نسبت به الگوریتم ژنتیک و ژنتیک و پراکندگی نسبتاً یکسان نتایج هر یک از الگوریتم‌ها در ۱۰ بار اجرای برنامه، حاکی از آن است که دقت هر سه الگوریتم بهینه‌سازی نسبتاً یکسان، سرعت الگوریتم ژنتیک بهبودیافته بیشتر، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته کمتر از دو الگوریتم دیگر و قابلیت اطمینان به نتایج هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌منظور کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری وابسته به زمین، یکسان است.

**کلیدواژه‌ها:** توابع کسری، زمین‌مرجع‌سازی تصاویر ماهواره‌ای، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد غربی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، تلفن: ۰۲۱) ۸۸۷۷۰۲۱۸  
تلفن: ۰۹۳۵۳۶۱۵۰۲۱

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز درباره مدیریت منابع، اطلاعات مکانی است. در سال‌های اخیر، افزایش دسترسی به تصاویر هوایی و ماهواره‌ای با حد تفکیک مکانی بالا<sup>۱</sup>، باعث شده تا فتوگرامتری و سنجش از دور به‌عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارها درباره استخراج اطلاعات مکانی دقیق از محیط پیرامون، شناخته شوند (Unger et al., 2013; Aguilar et al., 2013; Valadan Zoj et al., 2007; Fraser et al., 2003). تصحیح هندسی تصاویر، اولین مرحله استخراج اطلاعات مکانی از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای است که هدف آن برقراری ارتباط بین دو فضای تصویر و زمین است. برای تصحیح هندسی تصویر، از معادلات ریاضی استفاده می‌شود که به دو دسته معادلات پارامتریک<sup>۲</sup> و معادلات غیرپارامتریک<sup>۳</sup> تقسیم می‌شوند (Aguilar et al., 2013; Valadan Zoj et al., 2007; McGlone, C., 1996; Tao et al., 2001).

معادلات پارامتریک، هندسه تصویر را در لحظه تصویربرداری، بازسازی می‌کنند که یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌ها در این حوزه به‌منظور تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، مدل پارامترهای مداری<sup>۴</sup> است (Toutin et al., 2003; Valadan Zoj et al., 2003; Valadan Zoj et al., 1998). در مقابل، معادلات غیرپارامتریک، پارامترهای ارتباط بین دو فضا را از طریق برازش یک رویه به مدل فیزیکی یا مجموعه‌ای از نقاط کنترل بدست می‌آورند (Tao et al., 2001; Yavari et al., 2013; Jannati et al., 2015). با توجه به ماهیت این معادلات، معادلات پارامتریک، وابسته به اطلاعات داخلی سنجنده و معادلات غیرپارامتریک، مستقل از این اطلاعات هستند. در نتیجه، استفاده از معادلات غیرپارامتریک می‌تواند اطلاعات داخلی سنجنده‌های مختلف را به‌صورت محرمانه حفظ کنند که این موضوع مورد توجه کمپانی‌های تولیدکننده تصاویر ماهواره‌ای قرار گرفته است (Tao et al., 2001; Valadan Zoj et al., 1998).

در میان انواع معادلات غیرپارامتریک، توابع کسری<sup>۵</sup> به‌دلیل بهره‌مندی از دقت قابل قبول، سرعت بالا، سادگی محاسبات، عدم تمایل به نوسان و خواص درونی‌یابی بهتر در مقایسه با سایر توابع، مورد توجه محققان فتوگرامتری و سنجش از دور قرار گرفته‌اند (Tao et al., 2001; Yavari et al., 2013).

توابع کسری با دو رویکرد قابل حل هستند: (۱) رویکرد مستقل از زمین<sup>۶</sup> (۲) رویکرد وابسته به زمین<sup>۷</sup>. در رویکرد مستقل از زمین، تابع انتقال مناسب جهت برقراری ارتباط فضای تصویر و زمین موجود است [توسط کمپانی تولیدکننده تصویر ماهواره‌ای به استفاده‌کنندگان داده می‌شود] و در روش وابسته به زمین از نقاط کنترل، به‌منظور برآورد ضرایب توابع کسری استفاده می‌شود (Tao et al., 2001; Yavari et al., 2016; Jannati et al., 2015).

توابع کسری در ساختار کامل [درجه سوم با مخرج‌های نامساوی]، دارای ۸۰ پارامتر مجهول هستند [غالباً در مخرج‌ها دو ترم اول ۱ در نظر گرفته می‌شود که منجر به کاهش تعداد پارامترها به ۷۸ می‌شود]. تعداد زیاد ترم‌های مجهول توابع کسری از یک سو، باعث تعدد نقاط کنترل مورد نیاز جهت حل پارامترهای مجهول این توابع در رویکرد وابسته به زمین شده و از سوی دیگر باعث ایجاد خطای پارامترهای اضافه می‌شود. دو راهبرد کلی برای مواجهه با این مشکلات وجود دارد: ۱- کاهش اثر همبستگی چندگانه میان پارامترها از طریق پایدارسازی ماتریس ضرایب، ۲- حذف پارامترهای غیرضروری و یافتن ساختار بهینه توابع کسری. مزیت راهبرد دوم نسبت به راهبرد اول این است که در روش اول از نقاط کنترل به صورت بهینه استفاده نمی‌شود. به این معنا که همچنان تعداد

1. High Resolution Satellite Images (HRSIs)
2. Parametric
3. Non-parametric
4. Orbital Parameter Models
5. Rational Function Models (RFM)
6. Terrain-Dependent
7. Terrain-Independent

کارآمد باشد ( Elbeltagi . E et al., 2005; Russell . C . et al., 1988).

در این مقاله، با استفاده از تعداد و ترکیبات مختلف، نقاط کنترل مربوط به چهار تصویر ماهواره‌ای متفاوت، توانایی سه الگوریتم بهینه‌سازی ذکر شده با نگاهی جامع و کامل از جنبه‌های مختلفی از جمله دقت، سرعت، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز و قابلیت اطمینان به نتایج، در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. به عبارت دیگر، هدف این تحقیق آن است که نگاهی وسیع و همه‌جانبه بر سه الگوریتم بهینه‌سازی ذکر شده داشته باشد و از جنبه‌های مختلف، نقاط قوت و ضعف هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ذکر شده را مورد بررسی قرار دهد تا کاربران مختلف به شناختی که در بردارنده همه خصوصیات و توانایی‌های سه الگوریتم بهینه‌سازی مورد مطالعه در این تحقیق است برسند و با تکیه بر این شناخت، الگوریتم مناسب جهت حل مسئله مورد نظر خود را انتخاب کنند. به منظور رسیدن به این هدف، این مقاله به ۸ بخش اصلی تقسیم شده است. بخش ۱، مقدمه و بخش ۲، توضیح مختصری در خصوص ساختار توابع کسری است. در بخش ۳، ۴ و ۵ به ترتیب، نحوه کار الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبود یافته و ازدحام ذرات بهبود یافته تشریح شده است. بخش ۶، مربوط به ارائه اطلاعات درباره داده‌های مورد استفاده در این تحقیق است. در بخش ۷، نتایج اجرای سه الگوریتم ارائه شده و این نتایج مورد بحث، بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته است و در نهایت در بخش ۸، نتیجه نهایی درباره عملکرد و نقاط ضعف و قوت این سه الگوریتم، ارائه شده است.

نقاط کنترل زیادی برای برآورد تمامی ۸۰ پارامتر مدل نیاز است و تنها اثر همبستگی این پارامترها کاهش می‌یابد. اما در راهبرد دوم، علاوه بر کاهش این اثر، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز نیز به سبب کاهش پارامترهای مدل، تقلیل می‌یابد. از این رو بایستی بنابر ساختار توپوگرافی منطقه، هندسه تصویر، توزیع و تعداد نقاط کنترل، ترم‌های بهینه تابع کسری کشف و ترم‌های اضافی حذف شوند. این امر، باعث کاهش تعداد نقاط کنترل مورد نیاز جهت حل تابع انتقال میان دو فضا شده و یکی از بهترین روش‌ها به منظور جلوگیری از خطای پارامترهای اضافه است ( Tao et al., 2001; Yavari et al., 2013; Jannati et al., 2015). با توجه به اینکه ترم‌های توابع کسری دارای تفسیر فیزیکی نیستند، یکی از مهمترین و بهترین روش‌ها درباره کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی<sup>۱</sup> است ( Tao et al., 2001; Yavari et al., 2013; Jannati et al., 2015).

الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (Holland, J. H. 1975)، الگوریتم ازدحام ذرات توسعه یافته<sup>۳</sup> (Yavari et al., 2013) و الگوریتم ژنتیک توسعه یافته<sup>۴</sup> (Jannati et al., 2015) سه مورد از مهم‌ترین و کارآمدترین الگوریتم‌ها در این باره هستند. بدیهی است به دلیل ساختار متفاوت هر یک از الگوریتم‌های فوق، توانایی آنها در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری از جهات مختلف با یکدیگر متفاوت است. این موضوع باعث می‌شود تا شناخت خصوصیات مختلف هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و توانایی‌های منحصر به فرد هر کدام، نقش بسیار مهمی در انتخاب آنها برای پروژه‌های گوناگون و حل مسائل مختلف ایفا کند. جمع‌بندی و بررسی تحقیقات گذشته درباره ارزیابی توانایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مقایسه آنها نشان می‌دهد که جنبه‌های محدودی از خصوصیات این الگوریتم‌ها در کشف ترکیب بهینه توابع کسری مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و بررسی جامع خصوصیات این الگوریتم‌ها از جهات مختلف و ارزیابی نقاط ضعف و قوت آنها می‌تواند بسیار

1. Optimization algorithm
2. Genetic algorithm
3. Particle Swarm Optimization for Rational Function model Optimization (PSORFO)
4. Genetic Modification concept (GM)

## ۲- توابع کسری

توابع کسری از تقسیم دو چندجمله‌ای<sup>۱</sup> سه‌بعدی به‌دست آمده و دارای دو شکل مستقیم و معکوس هستند. در حالت مستقیم، مختصات تصویری  $[r,c]$  از تقسیم دو چندجمله‌ای سه‌بعدی براساس مختصات مختصا در فضای شی بدست می‌آیند [رابطه ۱] و در حالت معکوس، مختصات زمینی  $[X,Y]$  از تقسیم دو چندجمله‌ای سه‌بعدی بر اساس مختصات تصویری و ارتفاع زمینی نقاط بدست می‌آیند [رابطه ۲] ( Tao et al., 2001; Yavari et al., 2012).

$$r = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)}, \quad c = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$X = \frac{P_5(r, c, Z)}{P_6(r, c, Z)}, \quad Y = \frac{P_7(r, c, Z)}{P_8(r, c, Z)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در روابط فوق  $P_i$  معادله چندجمله‌ای سه‌بعدی است و به فرم زیر است.

$$P_i = \sum_{a=0}^n \sum_{b=0}^{n-a} \sum_{c=0}^{n-a-b} A_{abc} U^a V^b W^c \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه ۳،  $A_{abc}$  ضریب هر ترم معادله چندجمله‌ای و  $n$  درجه تابع چندجمله‌ای را نشان می‌دهد. در رابطه ۱ و ۲ نیز  $[r,c]$  مختصات تصویری نرمال شده و  $[X,Y,Z]$  مختصات زمینی نرمال شده هستند. نرمال کردن مختصات به دلیل افزایش استحکام عددی محاسبات و بهبود دقت نتایج، در فتوگرامتری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است ( Tao et al., 2001; Jannati et al., 2015; Yavari et al., 2012; Yavari et al., 2016).

## ۳- بهینه‌سازی توابع کسری با استفاده از الگوریتم ژنتیک استاندارد

الگوریتم ژنتیک، اولین بار توسط جان‌هالند معرفی شد (Holland, J. H. 1975). این الگوریتم یک روش فرااکتشافی است که تلاش می‌کند با استفاده از اصول

انتخاب طبیعی داروین، تکامل ژنتیکی و تکنیک‌های زیست‌شناسی همچون وراثت<sup>۲</sup> و جهش<sup>۳</sup>، راه‌حل بهینه مسائل مختلف را کشف کند ( Valadan Zoej et al., 2007; Jannati et al., 2015; Yavari et al., 2012). به‌طور کلی الگوریتم ژنتیک، یک الگوریتم مبتنی بر تکرار است که اغلب بخش‌های آن به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

یکی از مهم‌ترین مفاهیم در الگوریتم ژنتیک، کروموزوم<sup>۴</sup> است؛ که مجموعه کروموزوم‌ها، بیان‌کننده مجموعه راه‌حل‌های ممکن، جهت رسیدن به جواب بهینه مسئله موردنظر است. در واقع هر کروموزوم، زیرمجموعه‌ای از فضای راه‌حل است که الگوریتم ژنتیک به دنبال بهترین راه‌حل [بهترین کروموزوم] است (Holland, J. H. 1975).

هر کروموزوم، از کنار هم قرار گرفتن چند ژن تشکیل می‌شود که مجموع خصوصیات ژن‌ها، بیان‌کننده خصوصیت کلی کروموزوم موردنظر است. در نتیجه، اولین قدم در پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، تعیین و کدگذاری ژن‌ها و تشکیل کروموزوم است. پس از تولید چند کروموزوم، جمعیت اولیه ایجاد خواهد شد. سپس جهت اعتبارسنجی، برای هر یک از کروموزوم‌ها مقدار تابع هزینه بدست می‌آید و کروموزوم‌ها بر اساس مقدار هزینه مرتب می‌شوند ( Holland, J. H. 1975; Jannati et al., 2015).

به جهت تشکیل جمعیت نسل بعد، بایستی چند زوج کروموزوم به‌عنوان والدین نسل بعد انتخاب شده و اقدام به تولید فرزند نمایند. این انتخاب به‌گونه‌ای انجام می‌شود که کروموزوم‌های شایسته‌تر احتمال انتخاب بیشتر و کروموزوم‌های دارای شایستگی کمتر، احتمال انتخاب کمتری دارند. سپس بر روی کروموزوم‌های انتخاب شده، عملیات وراثت و جهش اعمال می‌شود و جمعیت نسل بعد، به تعداد جمعیت اولیه و با بیشترین

- |               |              |
|---------------|--------------|
| 1. Polynomial | 2. Crossover |
| 3. Mutation   | 4. Chromosom |

#### ۴- بهینه‌سازی توابع کسری با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته

الگوریتم ژنتیک بهبود یافته در سال ۲۰۱۵ توسط جنتی و ولدان زوج معرفی شد (Jannati et al., 2015). در این الگوریتم، از اصلاح ژنتیکی، برای افزایش سرعت الگوریتم ژنتیک استاندارد استفاده شده است. اصلاح ژنتیکی، تغییر آرایش ژنتیکی یک موجود به منظور قرار دادن برخی ویژگی‌های مورد نظر در موجود میزبان است؛ که به موجودات تولید شده از طریق این فرآیند، تراریخته یا موجودات اصلاح ژنتیکی شده می‌گویند (Jannati et al., 2015).

در الگوریتم ژنتیک استاندارد، تمام خصوصیات یک کروموزوم به صورت همزمان و در قالب یک عدد  $(\frac{1}{RMSE})$  ارزیابی می‌شوند. این در حالی است که بررسی خصوصیات ژن‌ها به عنوان اجزای تشکیل دهنده هر کروموزوم، ارزشمندتر بوده و با جزئیات و دقت بیشتری می‌تواند نقش هر ژن را در ساختار کروموزوم بیان کند. بنابراین نیاز به شناسایی مجزای ژن‌های با شایستگی بیشتر و استفاده از آنها در ساختار کروموزوم احساس می‌شود. الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، ژن‌های با شایستگی بیشتر را کشف کرده و با قراردادن این ژن‌ها در ساختار کروموزوم، سعی در افزایش سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک استاندارد دارد. روش کار به این صورت است که بعد از هر تکرار، درصدی از فرزندان (کروموزوم‌ها) با بیشترین مقادیر شایستگی به اضافه درصدی از فرزندان با شایستگی پایین انتخاب می‌شوند و به ترتیب در دو مجموعه *qualified* و *unqualified* ذخیره می‌شوند که جمعیت آنها برای آنالیزهای آتی بایستی کافی باشد. سپس ضریب کیفیت QC برای تعیین کیفیت هر ژن به شکل زیر تعیین می‌شود (Jannati et al., 2015).

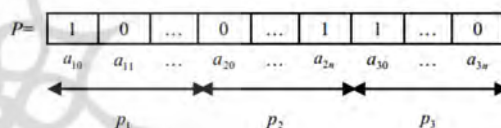
$$QC(i) = \frac{N_i^{qualified} - N_i^{unqualified}}{\sum_{k=1}^n (N_k^{qualified} - N_k^{unqualified})} \quad (۴)$$

$$i = ۱, ۲, ۳, \dots, n$$

#### 1. Fitness function

شایستگی تشکیل می‌شود. این مراحل به صورت تکراری و تا رسیدن به شرط توقف انجام می‌شود. پس از رسیدن به شرط توقف، بهترین کروموزوم به عنوان راه حل بهینه مسئله مورد نظر شناخته می‌شود.

در استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت کشف ترم‌های بهینه توابع کسری، ژن‌ها بیان‌کننده ترم‌های توابع کسری هستند. هر یک از ژن‌ها، با اعداد ۰ و ۱ و به صورت تصادفی مقداردهی می‌شوند، که عدد ۱، نشان‌دهنده حضور ترم و عدد ۰ نشان‌دهنده عدم حضور ترم مورد نظر است. شکل زیر، نمونه‌ای از کروموزوم تولید شده برای کشف ترکیب بهینه ترم‌های تابع کسری است که با اعداد ۰ و ۱ کدگذاری شده است (Valadan Zoej et al., 2007).



شکل ۱. نمونه کروموزوم تولید شده در ژنتیک برای کدگذاری ترم‌های توابع کسری (Valadan Zoej et al., 2007)

هر کروموزوم، نشان‌دهنده ترکیب یکتایی از ترم‌های توابع کسری است که توسط تابع ارزیاب<sup>۱</sup> مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه، سایر مراحل الگوریتم ژنتیک تا زمان رسیدن به شرط توقف انجام شده و در نهایت شایسته‌ترین کروموزوم، به عنوان ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری مورد نظر انتخاب می‌شود. جدول ۱، پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک استاندارد مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک استاندارد

Population size	50
Chromosomes length	59
Selection method	Tournament selection
Crossover method	uniform crossover
Mutation probability	% 25 of all chromosomes

Eberhart and Kennedy در سال ۱۹۹۵، بر اساس هوش اجتماعی گروهی از پرندگان یا ماهی‌ها، طراحی و معرفی شد. این الگوریتم به‌طورذاتی، مناسب حل مسائل با فرم پیوسته است، اما در سال ۱۹۹۷، Kennedy and Eberhart، مدل باینری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را معرفی کردند. این الگوریتم، بنابر دلایلی که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، برای کشف ترم‌های بهینه توابع کسری مناسب نیست. از این رو جهت رفع نواقص آن در سال ۲۰۱۳، یآوری و همکاران، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری بهبود یافته را به‌منظور کشف ترکیب بهینه توابع کسری معرفی کردند.

#### ۵-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری توسعه یافته

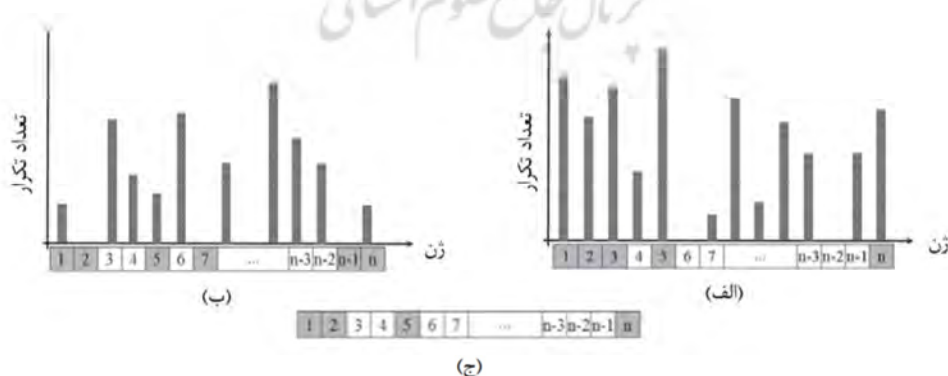
در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری، جمعیتی از ذرات به‌صورت تصادفی با رشته‌ای از مقادیر باینری، مقداردهی می‌شوند. این ذرات نشان‌دهنده ترکیب مختلف ترم‌های توابع کسری هستند که عدد ۱ نشان‌دهنده حضور و عدد ۰ نشان‌دهنده عدم حضور ترم مورد نظر است. شکل ۳، نمونه‌ای از ذره مقداردهی شده جهت کشف ترکیب بهینه تابع کسری درجه ۳ با مخرج مساوی را نشان می‌دهد (Yavari et al., 2013).

که در آن  $QC(i)$ ، ضریب کیفیت  $i$ -امین ژن و  $n$  تعداد کل ژن‌ها است.  $N_i^{unqualified}$  و  $N_i^{qualified}$  به ترتیب پایه تکرار  $i$ -امین ژن در مجموعه  $S^{unqualified}$  و  $S^{qualified}$  است. در نتیجه ژن‌های با ضریب کیفیت بالا، در فرزندان شایسته، فراوان‌تر و در فرزندان غیرشایسته، تکرار کمتری خواهد داشت. سپس مجموعه‌ای از ژن‌ها، با بالاترین مقادیر ضریب کیفیت شناسایی، و کروموزوم‌های اصلاح ژنتیکی شده به‌وسیله ترکیب تصادفی آنها تولید می‌شوند. شکل ۲، فرآیند تولید کروموزوم‌های تراریخته را نشان می‌دهد. ژن‌هایی که به‌صورت همزمان در هر دو هیستوگرام مشخص شده‌اند، به احتمال زیاد، ژن‌های شایسته برای تولید کروموزوم تراریخته هستند. (Jannati et al., 2015).

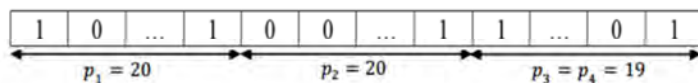
درباره وجه تمایز دو الگوریتم ژنتیک استاندارد و الگوریتم ژنتیک بهبودیافته، می‌توان اینگونه بیان کرد که در پیکره الگوریتم ژنتیک استاندارد، در هر تکرار، کروموزوم‌های شایسته‌تر اقدام به تولید فرزند کرده و جمعیت نسل بعد را تشکیل می‌دهند؛ درحالی‌که در الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، ادغام فرزندان تولیدشده به روش فوق و فرزندان تراریخته، جمعیت نسل بعد را تشکیل می‌دهد.

#### ۵-۲- بهینه‌سازی توابع کسری با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، اولین بار توسط



شکل ۲. الف- نمودار مربوط به هیستوگرام تعداد تکرار هر ژن در فرزندان با شایستگی بیشتر. ب- نمودار مربوط به هیستوگرام تعداد تکرار هر ژن در فرزندان با شایستگی کمتر. ج- کروموزوم اصلاح ژنتیکی شده بر اساس ژن‌های با شایستگی بالا که با رنگ خاکستری نشان داده شده‌اند (Jannati et al., 2015)



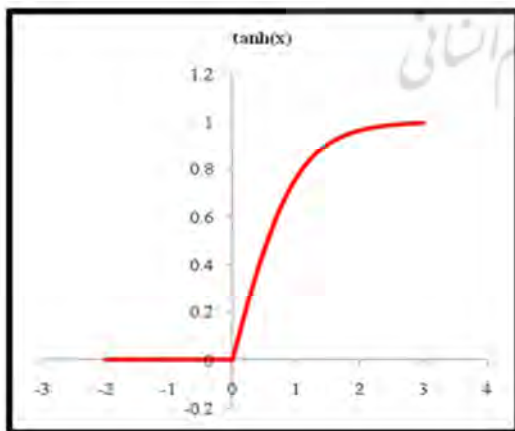
شکل ۳. نمونه‌ای از ذره مقداردهی شده در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Yavari et al., 2013)

$$p_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{if } r_{ij} < \Phi(v_{ij}(t)) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه،  $r_{ij}$  یک عدد تصادفی در بازه  $[0,1]$  است. همچنین  $\Phi(\cdot)$ ، یک تابع نرمال‌کننده است که مقادیر  $v_{ij}(t)$  را به بازه احتمال  $[0,1]$  منتقل می‌کند. معمولاً فرض بر این است که این تابع یک تابع سیگموئید باشد. در صورتی که  $\Phi(\cdot)$  یک تابع سیگموئید در نظر گرفته شود، حضور یا عدم‌حضور ترم‌های توابع کسری با احتمال یکسان در نظر گرفته می‌شود (Yavari et al., 2013).

از آنجایی که هدف از بهینه‌سازی توابع کسری حضور کمترین تعداد ترم‌ها با حفظ دقت، قابل‌قبول است، تابع نرمال‌سازی  $\Phi(\cdot)$  را بایستی طوری طراحی کرد که به جای حفظ ترم‌ها بیشتر به دنبال حذف آنها باشد. به همین دلیل در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری بهبودیافته،  $\Phi(\cdot)$  با رابطه ۸ جایگزین شده است (Yavari et al., 2013)، شکل ۴.

$$\Phi(x) = \begin{cases} \tanh(x), & \text{if } x > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه (۸)}$$



شکل ۴. تابع تانژانت هایپربولیک (Yavari et al., 2013)

سپس برای هر یک از ذرات، تابع هزینه به منظور به‌روزرسانی سرعت ذرات در نظر گرفته می‌شود. در یک روند تکراری، سرعت هر ذره  $v$  با استفاده از سرعتی که در حال حاضر دارد، موقعیت فعلی ذره موردنظر  $p$ ، بهترین موقعیت آن در تمام تکرار  $[PBest]$  و بهترین موقعیت تمام ذرات در طول روند  $[GBest]$ ، به‌روز می‌شود (Kennedy et al., 1997).

$$v_{ij}(t+1) = w(t) \cdot v_{ij}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [GBest_i(t) - p_{ij}(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [PBest_i(t) - p_{ij}(t)]$$

رابطه (۵)

در رابطه فوق،  $i$  اندیس ذره در جمعیت،  $j$  اندیس بیت‌ها در رشته باینری هر ذره،  $t$  تعداد تکرار،  $r_1$  و  $r_2$  دو مقدار تصادفی در بازه  $[0,1]$ ،  $c_1$  و  $c_2$  دو ضریب ثابت شتاب و  $w(t)$  وزن اینرسی تابع زمان است (Kennedy et al., 1997).

سرعت بدست‌آمده ( $v_{ij}$ ) در محدوده  $[v_{min}, v_{max}]$  نشان‌دهنده بیشترین و کمترین مقادیری هستند که به محدوده فوق منتقل شده‌اند. مقادیر بزرگتر  $w(t)$ ، وضعیت الگوریتم را به سمت جستجوی عمومی تغییر می‌دهد، در حالیکه مقادیر کوچک‌تر، سبب باهوش شدن الگوریتم برای جستجوهای محلی شدید می‌شود. در نتیجه،  $w(t)$  به‌عنوان یک تابع کاهشی از تکرارها، مطابق رابطه ۶ است (Yavari et al., 2012).

$$w(t) = w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \cdot \frac{t_{max} - t}{t} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه فوق،  $v_{min}$  و  $v_{max}$  دو پارامتر ثابت تجربی و  $t_{max}$  بیشترین تعداد تکرار است.

در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری،  $v_{ij}$  احتمال اختصاص یک به  $p_{ij}$  است. در نتیجه، موقعیت ذرات از رابطه ۷ بدست می‌آید (Kennedy et al., 1997).

نقاط عکسی متناظر آنها با دقت تقریبی ۰/۵ پیکسل اندازه‌گیری شده است. همچنین نقاط کنترل زمینی دو سری داده همدان و ارومیه از نقشه‌های رقومی ۱:۲۰۰۰ تولیدشده، توسط سازمان نقشه‌برداری کشور با دقت مسطحاتی ۰/۶ متر و دقت ارتفاعی ۰/۵ متر استخراج شده است. نقاط استخراج شده شامل عوارض مشخص و قابل تشخیص نظیر گوشه ساختمان‌ها، دیوارها، و تقاطع جاده‌ها هستند.

#### ۷- ارزیابی نتایج و بحث

در این مقاله، از تابع کسری درجه سوم با مخرج‌های مساوی که دارای ۵۹ پارامتر مجهول است، به‌عنوان تابع انتقال میان دو فضای تصویر و زمین استفاده شده است. همچنین به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم‌های ذکر شده، هر یک از الگوریتم‌ها با استفاده از ترکیبات متفاوت نقاط کنترل و چک و با توزیع مناسب در سطح تصویر، اجرا شده و نتایج آنها در جداول ۳ تا ۶ آورده شده است. در هر آزمایش از نقاط کنترل موجود در سه نقش متفاوت استفاده شده است. بخشی از این نقاط به‌منظور محاسبه ضرایب توابع کسری مورد استفاده قرار گرفت، که در این مقاله نقاط کنترل زمینی [GCPs] خوانده

در نتیجه با جایگزینی تابع نرمال‌سازی تانژانت هایپربولیک، در الگوریتم ازدحام ذرات به‌منظور حل توابع کسری، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری بهبودیافته تولید و معرفی می‌شود. در نهایت، پس از تکرار الگوریتم و برقراری شرط توقف، بهترین رشته باینری، به عنوان بهینه‌ترین ترکیب غیروابسته ترم‌ها در معادله تابع کسری، شناخته می‌شود.

#### ۶- داده‌های مورد استفاده در تحقیق

در این مقاله، به منظور ارزیابی عملکرد سه الگوریتم بهینه‌سازی فوق در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری، از چهار تصویر ماهواره‌ای GeoEye-1، SPOT-3-1A، SPOT-3-1B و IKONOS-2 استفاده شده است. تصاویر اول و دوم متعلق به شهرهای ارومیه و همدان، و تصاویر سوم و چهارم متعلق به شهر اصفهان هستند. همچنین این تصاویر به ترتیب دارای ۵۰، ۳۰، ۳۵ و ۳۲ نقطه کنترل زمینی هستند. خصوصیات و اطلاعات هندسی مربوط به هر تصویر، در جدول ۲ آورده شده است.

نقاط کنترل زمینی سری داده اصفهان به روش GPS تفاضلی و با استفاده از سه دستگاه Asheck 12 دو فرکانسه با دقت زیر متر مشاهده شده و مختصات

جدول ۲. خصوصیات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق

Dataset	Isfahan	Isfahan	Hamedan	Uromieh
Platform	SPOT-3	SPOT-3	IKONOS-2	GeoEye-1
Sensor	HRV	HRV	Panchromatic	Panchromatic
Product	Level 1A	Level 1B	Geo	Geo
Acquisition	July 1993	July 1993	October 2000	August 2010
Off-nadir angle	19.01° W	19.01° W	20.4° E	0.84° W
Pixel Size	13 μ	13 μ	12 μ	8 μ
GSD	10 m	10 m	0.82 m	0.41 m
No. of GCPs	35	32	30	50
Elevation relief	613.10 m	613.10 m	121.60 m	185.00 m



والدین در الگوریتم‌های جستجو، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی، اعم از دقت حاصل شده نهایی، تعداد تکرارهای انجام شده تا رسیدن به شرط توقف و ترکیب بهینه ترم‌ها، در هر بار اجرای الگوریتم تاحدی متفاوت است. از این‌رو، به دلیل افزایش اعتمادپذیری نتایج، هر الگوریتم ده بار اجرا شده و بهترین نتیجه در جدول نتایج، ثبت شده است. شایان ذکر است، در این جداول، Iter. بیانگر تعداد تکرار الگوریتم و NFE<sup>1</sup>، بیانگر تعداد دفعات برآورد تابع هزینه تا زمان رسیدن به شرط توقف است. بدیهی است که تعداد کمتر برآورد تابع هزینه، افزایش سرعت همگرایی الگوریتم را نتیجه خواهد داشت. از این رو این پارامتر می‌تواند یک معیار مناسب در سنجش سرعت همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی نسبت به یکدیگر باشد.

می‌شوند. بخشی از نقاط کنترل به‌منظور برآورد تابع هزینه و ارزیابی هر یک از ساختارهای مورد جستجو استفاده شد، که در این مقاله نقاط چک وابسته [DCPs] نامیده می‌شوند. در نهایت، بخش دیگری از نقاط که نه در برآورد ضرایب توابع کسری شرکت داشته و نه در فرآیند جستجو سهمیم بوده‌اند، به صورت مستقل برای ارزیابی ساختار بهینه نهایی مورد استفاده قرار گرفتند که از این پس نقاط چک مستقل [ICPs] نامیده می‌شوند.

به سبب همبستگی ترم‌های توابع کسری، ترکیب‌های متنوعی از ترم‌ها می‌تواند دقت‌هایی قابل رقابت در سطح نقاط چک تامین نماید. از طرف دیگر، به دلیل تصادفی بودن ماهیت جمعیت اولیه و انتخاب

جدول ۳. نتایج حل توابع کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته بر روی تصویر سنجنده GeoEye-1

	Algorithm	GCPs,DCPs,ICPs	RMSE (Pixel)	Max of $\delta_r$ (Pixel)	Max of $\delta_c$ (Pixel)	P1,P2,P3	df	Iter.	NFE
GeoEye-1	GA Standard	۶, ۷, ۳۷	۰.۸۵	۱.۳۴	-۱.۵۲	۴, ۳, ۲	۳	۲۱۱	۱۰۶۰۰
		۸, ۷, ۳۵	۰.۸۸	۱.۲۲	۱.۳۱	۵, ۴, ۳	۴	۱۸۶	۹۳۵۰
		۱۰, ۷, ۳۳	۰.۷۴	-۱.۱۴	-۱.۲۶	۵, ۵, ۱	۹	۹۹	۵۰۰۰
	GA Concept	۱۲, ۷, ۳۱	۰.۷۳	-۱.۲۴	۱.۳۳	۴, ۶, ۴	۱۰	۱۰۵	۵۳۰۰
		۶, ۷, ۳۷	۰.۹۴	-۱.۲۶	۱.۷۳	۵, ۴, ۱	۲	۱۹	۱۰۰۰
		۸, ۷, ۳۵	۰.۷۲	-۱.۲۴	۱.۲۴	۵, ۶, ۲	۳	۴	۲۵۰
	PSORFO	۱۰, ۷, ۳۳	۰.۷۱	۱.۱۶	-۱.۰۴	۴, ۵, ۳	۸	۲	۱۵۰
		۱۲, ۷, ۳۱	۰.۷	-۱.۱۱	۱.۱۹	۵, ۶, ۴	۹	۲	۱۵۰
		۶, ۷, ۳۷	۰.۹۶	-۱.۲۲	-۱.۳۱	۳, ۳, ۱	۵	۲۵۲	۱۲۶۵۰
	PSORFO	۸, ۷, ۳۵	۰.۹۱	-۱.۳۵	-۱.۱۳	۳, ۳, ۳	۷	۱۷۵	۸۸۰۰
		۱۰, ۷, ۳۳	۰.۶۴	۰.۸۸	-۱.۱۲	۴, ۴, ۴	۸	۱۰۵	۵۳۵۵
		۱۲, ۷, ۳۱	۰.۶۱	۱.۱۲	-۱.۰۸	۳, ۶, ۳	۱۲	۸۵	۴۳۰۰

1 Number of Function Evaluation (NFE)

جدول ۴. نتایج حل توابع کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته بر روی

تصویر سنجنده IKONOS-2

Algorithm	GCPs,DCPs,ICPs	RMSE (Pixel)	Max of $\delta_r$ (Pixel)	Max of $\delta_c$ (Pixel)	P1,P2,P3	df	Iter.	NFE	
IKONOS-2	GA Standard	۶,۷,۱۷	۱.۱	۱.۵۷	۱.۳۳	۴,۳,۲	۳	۲۳۱	۱۱۶۰۰
		۸,۷,۱۵	۰.۹۵	۱.۱۴	-۱.۲۸	۶,۵,۴	۱	۱۱۲	۵۶۵۰
		۱۰,۷,۱۳	۰.۷۷	-۱.۳۴	-۱.۰۳	۸,۳,۴	۵	۱۴۴	۷۲۵۰
		۱۲,۷,۱۱	۰.۷۹	-۱.۰۸	۰.۹۸	۶,۷,۵	۶	۱۰۶	۵۳۵۰
	GA Concept	۶,۷,۱۷	۰.۸۱	۱.۴۷	-۱.۰۴	۵,۴,۱	۲	۲۱	۱۱۰۰
		۸,۷,۱۵	۰.۷۵	۰.۹۱	۱.۰۹	۶,۷,۲	۱	۷	۴۰۰
		۱۰,۷,۱۳	۰.۶۶	۰.۷۱	-۱.۱۸	۷,۵,۴	۴	۳	۲۰۰
		۱۲,۷,۱۱	۰.۶	-۰.۸۳	-۱.۰۶	۸,۷,۵	۴	۲	۱۵۰
	PSORFO	۶,۷,۱۷	۰.۹۸	۱.۳۲	۱.۵۱	۳,۳,۲	۴	۱۹۰	۹۵۵۰
		۸,۷,۱۵	۰.۸۷	-۱.۲۵	۱.۲۸	۲,۵,۴	۵	۱۲۱	۶۱۰۰
		۱۰,۷,۱۳	۰.۹۲	-۱.۳۳	-۱.۱۸	۴,۴,۴	۸	۱۰۲	۵۱۵۰
		۱۲,۷,۱۱	۰.۶۸	۱.۳۲	۱.۱۱	۵,۴,۵	۱۰	۸۲	۴۱۵۰

جدول ۵. نتایج حل توابع کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته بر روی

تصویر سنجنده SPOT-3-1A

Algorithm	GCPs,DCPs,ICPs	RMSE (Pixel)	Max of $\delta_r$ (Pixel)	Max of $\delta_c$ (Pixel)	P1,P2,P3	df	Iter.	NFE	
SPOT-3-1A	GA Standard	۶,۷,۲۲	۳.۰۱	-۶.۶۶	-۳.۵۵	۳,۷,۱	۱	۳۱۲	۱۵۶۵۰
		۸,۷,۲۰	۲.۲۲	-۳.۶۱	-۲.۲۱	۶,۴,۲	۴	۲۶۶	۱۳۳۵۰
		۱۰,۷,۱۸	۱.۵۹	-۱.۹۹	-۲.۰۱	۶,۴,۲	۸	۱۸۰	۹۰۵۰
		۱۲,۷,۱۶	۱.۱۴	۱.۵۱	۲.۸۳	۷,۷,۳	۷	۱۲۱	۶۱۰۰
	GA Concept	۶,۷,۲۲	۳.۳۲	-۲.۶۵	-۷.۲۹	۴,۵,۲	۱	۴۰	۲۰۵۰
		۸,۷,۲۰	۱.۰۴	-۱.۳۵	-۱.۶۵	۵,۷,۳	۱	۲۱	۱۱۰۰
		۱۰,۷,۱۸	۰.۹۶	-۱.۲۲	-۱.۶۷	۶,۶,۴	۴	۶	۳۵۰
		۱۲,۷,۱۶	۰.۹۳	-۱.۲۴	-۱.۳	۸,۷,۲	۷	۵	۳۰۰
	PSORFO	۶,۷,۲۲	۲.۱۴	-۲.۸۷	-۳.۲۱	۳,۷,۱	۳	۳۶۱	۱۸۱۰۰
		۸,۷,۲۰	۰.۹۵	۱.۲۴	-۱.۱۶	۶,۴,۲	۴	۳۴۲	۱۷۱۵۰
		۱۰,۷,۱۸	۰.۹۱	۱.۰۹	۲.۰۱	۶,۴,۲	۸	۱۷۷	۸۹۰۰
		۱۲,۷,۱۶	۰.۷۹	۱.۲۲	۰.۹۱	۷,۷,۳	۱۱	۱۱۳	۵۷۰۰

جدول ۶. نتایج حل توابع کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته بر روی

تصویر سنجنده SPOT-3-1B

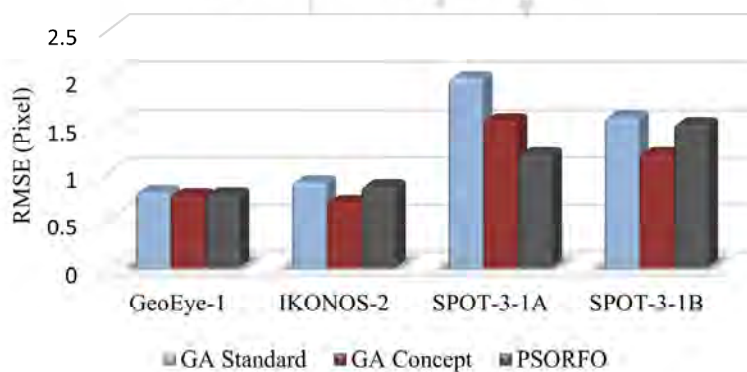
Algorithm	GCPs,DCPs,ICPs	RMSE (Pixel)	Max of $\delta_r$ (Pixel)	Max of $\delta_c$ (Pixel)	P1,P2,P3	Df	Iter.	NFE	
SPOT-3-1B	GA Standard	۶,۷,۱۹	۲.۲۱	۲.۲۲	-۱.۸۷	۳,۳,۳	۳	۲۹۵	۱۴۸۰۰
		۸,۷,۱۷	۱.۸۷	۲.۱۶	۱.۲۹	۶,۶,۱	۳	۲۴۹	۱۲۵۰۰
		۱۰,۷,۱۵	۱.۳۲	۱.۸۹	-۱.۵۴	۶,۸,۳	۳	۱۶۸	۸۴۵۰
	GA Concept	۱۲,۷,۱۳	۰.۹۸	۰.۹۹	۱.۲۳	۸,۷,۳	۶	۱۸۳	۹۲۰۰
		۶,۷,۱۹	۱.۱۸	-۱.۶۶	۱.۹	۳,۵,۳	۱	۳۷	۱۹۰۰
		۸,۷,۱۷	۰.۹۹	۱.۳۴	-۱.۸۲	۵,۷,۳	۱	۱۶	۸۵۰
	PSORFO	۱۰,۷,۱۵	۰.۹۵	۱.۳۹	۱.۵۹	۵,۹,۲	۴	۱۱	۶۰۰
		۱۲,۷,۱۳	۰.۹	-۱.۱۷	۱.۳۷	۸,۷,۴	۵	۷	۴۰۰
		۶,۷,۱۹	۲.۱۱	۲.۵۷	۴.۱۱	۳,۲,۴	۳	۲۷۳	۱۳۷۰۰
	PSORFO	۸,۷,۱۷	۱.۵۴	۱.۹۷	۲.۵۸	۴,۶,۳	۳	۲۵۴	۱۲۷۵۰
		۱۰,۷,۱۵	۱.۴۸	-۲.۶۶	-۱.۱۲	۴,۸,۳	۵	۱۹۸	۹۹۵۰
		۱۲,۷,۱۳	۰.۹۶	۰.۹۷	۱.۲۷	۷,۷,۲	۸	۱۲۸	۶۴۵۰

[RMSE] است. نمودار ۱، بیان‌کننده دقت حل تابع کسری توسط هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد مطالعه است. لازم به ذکر است در این نمودار، به جهت مقایسه دقیق‌تر و سهولت در نمایش نتایج، از ستون RMSE مربوط به هر الگوریتم، که به ازای تعداد مختلف نقاط کنترل و چک بدست آمده است، میانگین‌گیری شده و مقدار میانگین، مورد مقایسه قرار گرفته است.

با توجه به جداول فوق و بررسی اعداد و نتایج بدست آمده، می‌توان این سه الگوریتم را از سه دیدگاه مهم مورد واکاوی و مقایسه قرار داد.

#### ۷-۱- دقت حل توابع کسری

یکی از فاکتورهای مهم درباره ارزیابی توانایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری، دقت نهایی حل توابع کسری



نمودار ۱. دقت حل توابع کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته

کانونی کم و زاویه گشایش دوربین زیاد هستند، به‌همین دلیل هندسه آنها به هندسه پروژکتیو نزدیک‌تر است. همچنین تصاویر سنجنده SPOT-3 نسبتاً خام هستند و در مقایسه با تصاویر سنجنده‌های GeoEye-1 و IKONOS-2 پس از اخذ، تصحیحات هندسی کمتری روی آنها اعمال شده است. این موضوعات باعث می‌شوند که تصاویر GeoEye-1 و IKONOS-2 در مقایسه با تصاویر SPOT-3، با تعداد پارامترهای مجهول کمتر و به تبع آن تعداد نقاط کنترل مورد نیاز کمتر، به دقت بالاتر در حل توابع کسری برسند. در نتیجه اختلاف RMSE حل توابع کسری به ازای تعداد کمینه و بیشینه نقاط کنترل برای تصاویر GeoEye-1 و IKONOS-2 ناچیز و برای تصاویر SPOT-3 چشمگیر می‌شود و در نتیجه در نمودار فوق، میزان میانگین RMSE حاصل از حل توابع کسری برای تصاویر SPOT-3 به مراتب بیشتر از تصاویر GeoEye-1 و IKONOS-2 می‌شود. همچنین بایستی توجه شود (در جداول ۳ تا ۶) که در تصاویر سنجنده‌های GeoEye-1 و IKONOS-2، هر سه الگوریتم توانایی رسیدن به دقت زیر پیکسل را تنها با استفاده از ۶ نقطه کنترل دارند.

همچنین، به‌منظور بررسی اتفافی بودن بردارهای خطای باقیمانده و عدم وجود خطای سیستماتیک در سطح نقاط چک، نمودار پراکنش بردارهای خطای باقیمانده برای سه الگوریتم مورد بررسی بر روی سری داده ارومیه و به ازای ۱۰ نقطه کنترل، ۷ نقطه چک وابسته و ۳۳ نقطه چک غیروابسته در شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه شده است. شایان ذکر است در شکل‌های زیر، نقاط قرمز رنگ، نقاط ابتدایی بردارهای خطای باقیمانده [مختصات صحیح نقاط چک] را نشان می‌دهد و خطوط آبی، جهت بردارهای خطای باقیمانده را نشان می‌دهند. همچنین در این شکل‌ها، به‌منظور سهولت در نمایش بردارهای خطا، میزان خطای باقیمانده در هر یک از نقاط چک در عدد ۲۵۰ ضرب شده است.

با بررسی دقیق نمودار فوق، به دو نتیجه بسیار مهم و اساسی می‌توان دست یافت. این نتایج عبارتند از:

۱- هر سه الگوریتم مورد مطالعه در این تحقیق، با دقت یکسان قادر به کشف ترکیب بهینه ترم‌ها و حل توابع کسری بین دو فضا هستند. به عبارت بهتر می‌توان اینگونه بیان کرد که این سه الگوریتم، از نقطه‌نظر دقت حل توابع کسری بر یکدیگر برتری ندارند و نمی‌توان یکی از الگوریتم‌ها را در حل توابع کسری دقیق‌تر از دو الگوریتم دیگر معرفی کرد.

۲- فارغ از نوع الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده، میانگین RMSE حاصل از حل توابع کسری به ازای تعداد مختلف نقاط کنترل، در تصاویر SPOT-3 به مراتب بیشتر از تصاویر GeoEye-1 و IKONOS-2 است. با مراجعه به جداول ۳ تا ۶ مشاهده می‌شود که در تصاویر GeoEye-1 و IKONOS-2، اختلاف RMSE بین کمترین و بیشترین تعداد نقاط کنترل در هر سه الگوریتم بهینه‌سازی ناچیز است، اما در تصاویر SPOT-3، اختلاف RMSE بین کمترین و بیشترین تعداد نقاط کنترل چشمگیر است. این موضوع منجر به افزایش میانگین RMSE [کاهش دقت] حاصل از حل توابع کسری به ازای تعداد مختلف نقاط کنترل در تصاویر SPOT-3 می‌شود (این مقادیر میانگین در نمودار فوق نمایش داده شده‌اند). از سوی دیگر، در این جدول‌ها مشاهده می‌شود که میزان RMSE حاصل از حل توابع کسری به ازای تعداد کمینه نقاط کنترل (به عنوان مثال ۶ نقطه کنترل) برای تصاویر SPOT-3 بسیار بیشتر از تصاویر GeoEye-1 و IKONOS-2 است، اما به ازای تعداد بیشینه نقاط کنترل [به عنوان مثال ۱۲ نقطه کنترل] برای همه تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق نسبتاً یکسان است. علت اصلی موضوع فوق را می‌توان در بررسی هندسه تصویربرداری سنجنده‌های مختلف یافت.

سنجنده‌های GeoEye-1 و IKONOS-2 دارای فاصله کانونی زیاد<sup>۱</sup> و زاویه گشایش دوربین<sup>۲</sup> کم هستند، در نتیجه هندسه آنها به هندسه افاین نزدیک‌تر است اما سنجنده‌های SPOT-3 دارای فاصله

1. Focal length      2. Field of view

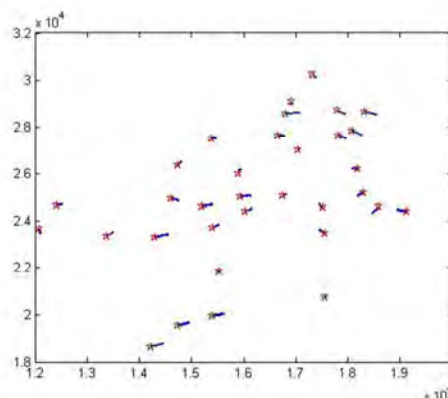
### ۷-۲- سرعت حل توابع کسری

آنچنان که بیان شد، NFE بیانگر تعداد دفعات برآورد تابع هزینه است و معیار مناسبی درباره سرعت حل توابع کسری است. بدیهی است تعداد بیشتر برآورد تابع هزینه، باعث کاهش سرعت همگرایی و تعداد کمتر برآورد تابع هزینه باعث افزایش سرعت همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌شود. به‌منظور مقایسه دقیق‌تر و سهولت در نمایش مقادیر جهت مقایسه سرعت همگرایی الگوریتم‌ها، در ابتدا از مقادیر NFE مربوط به هر یک از الگوریتم‌ها که به ازای تعداد مختلف نقاط کنترل و چک بدست آمده است، میانگین‌گیری شده و مقدار  $\frac{1}{NFE}$  به عنوان معیار سرعت همگرایی الگوریتم‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمودار ۲، نشان‌دهنده سرعت همگرایی هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مطرح شده است.

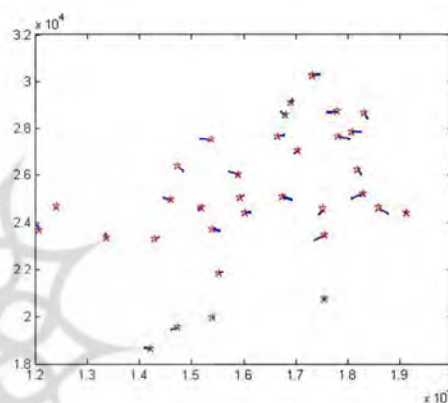
با توجه به نمودار فوق، پر واضح است که الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، ۱۰ تا ۱۲ بار سریع‌تر از دو الگوریتم دیگر قادر به کشف ترم‌های بهینه و حل توابع کسری است، که توجه به ژن‌های شایسته‌تر و حضور این ژن‌ها در جمعیت‌های بعدی، می‌تواند مهمترین دلیل این موضوع باشد.

### ۷-۳- تعداد نقاط کنترل موردنیاز

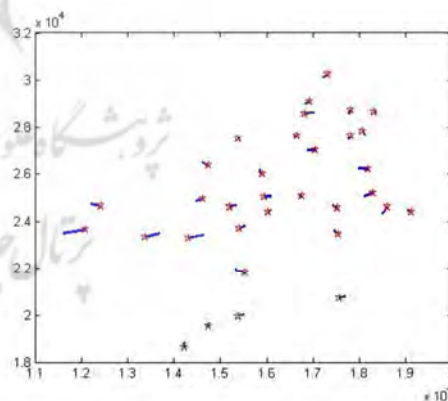
با توجه به محدودیت تعداد نقاط کنترل در تصاویر ماهواره‌ای، یکی از فاکتورهای مهم، در انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی مناسب جهت کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز الگوریتم موردنظر است. با توجه به اینکه، افزایش تعداد نقاط کنترل باعث کاهش درجه آزادی محاسبات می‌شود، می‌توان از معیار درجه آزادی، برای ارزیابی تعداد نقاط کنترل موردنیاز الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت حل توابع کسری استفاده کرد. نمودار ۳، میانگین درجه آزادی بدست‌آمده از هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی را بر روی تصاویر ماهواره‌ای مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۵. دیاگرام بردارهای خطای باقیمانده الگوریتم ژنتیک

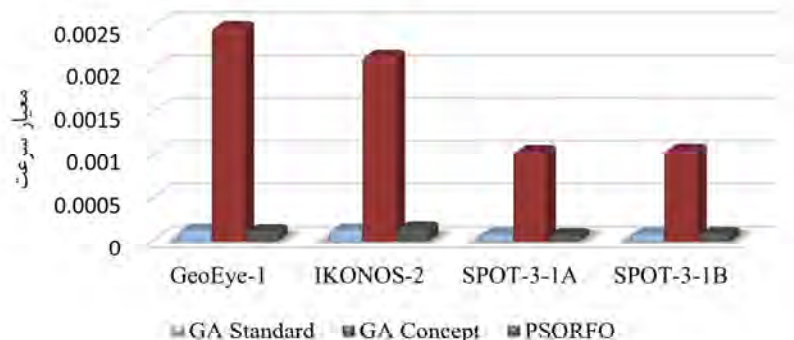


شکل ۶. دیاگرام بردارهای خطای باقیمانده الگوریتم ژنتیک بهبود یافته

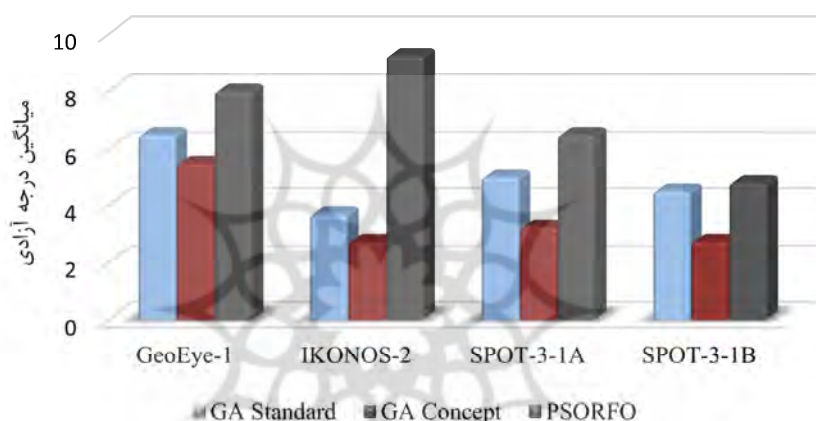


شکل ۷. دیاگرام بردارهای خطای باقیمانده الگوریتم ازدحام ذرات بهبود یافته

براساس شکل‌های فوق، هیچ‌گونه خطای سیستماتیکی در نتایج سه الگوریتم مشاهده نمی‌شود.



نمودار ۲. سرعت حل توابع کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته



نمودار ۳. درجه آزادی حل توابع کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته

۴-۷- قابلیت اطمینان به نتایج بدست آمده یکی از مهمترین ایراداتی که همواره بر همه الگوریتم‌های فرااکتشافی وارد بوده و منجر شده تا این الگوریتم‌ها مورد انتقاد محققان این حوزه قرار گیرد، پراکندگی بین جواب‌های حاصل شده از هر بار اجرای این الگوریتم‌ها است. هرچند این موضوع، ریشه در ذات این الگوریتم‌ها دارد و به علت تصادفی بودن جمعیت اولیه انتخاب شده است، اما میزان پراکندگی جواب‌ها در الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی با یکدیگر متفاوت است. بدیهی است هرچه پراکندگی بین جواب‌های بدست آمده در هر بار اجرای برنامه کمتر باشد، قابلیت اطمینان به نتایج بدست آمده از آن الگوریتم بیشتر

اختلاف میانگین درجه آزادی هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد بررسی و نمودار حاصل شده از آن [نمودار فوق] بیان می‌کند که میانگین درجه آزادی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری به ترتیب، ۴۵/۲۵٪ و ۲۷٪ بیشتر از میانگین درجه آزادی الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک بهبودیافته و ژنتیک است. به عبارت بهتر، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته، با حفظ دقت، قادر به حل توابع کسری با تعداد کمتر نقاط کنترل در مقایسه با دو الگوریتم بهینه‌سازی دیگر است.

می‌دهد. فاصله بین کمترین و بیشترین میزان RMSE در ۱۰ بار اجرای برنامه می‌تواند معیاری برای سنجش مقدار پراکندگی بین جواب‌ها باشد. مقدار این معیار [اختلاف بین کمترین و بیشترین مقدار RMSE نتایج] به ترتیب بر روی تصویر SPOT-3-1A و GeoEye-1 برای هر سه الگوریتم بهینه‌سازی تقریباً ۱.۵ و ۱ پیکسل است. یکسان بودن این معیار برای هر سه الگوریتم بهینه‌سازی بر روی دو تصویر متفاوت نشان می‌دهد که پراکندگی بین نتایج بدست آمده در ۱۰ بار اجرای برنامه برای سه الگوریتم یکسان بوده و در نتیجه قابلیت اطمینان به نتایج سه الگوریتم در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری، نسبتاً یکسان است.

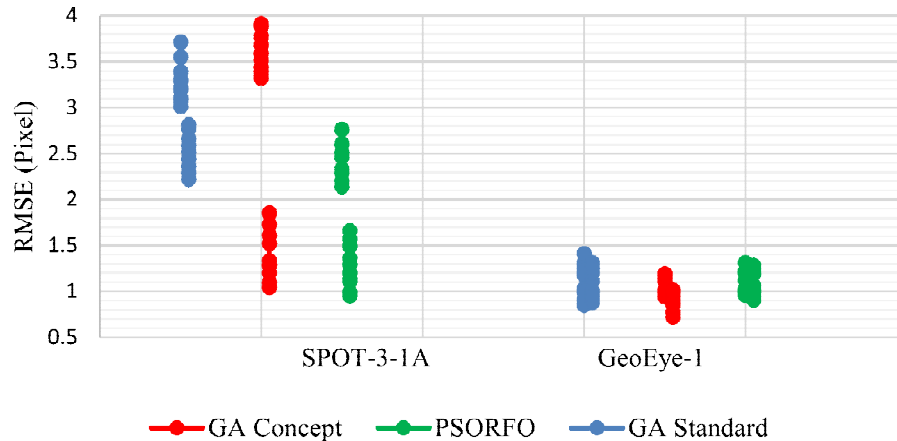
است. جدول ۷، RMSE‌های حاصل شده در ۱۰ بار اجرای هر یک از الگوریتم‌های ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته را بر روی دو تصویر GeoEye-1 و SPOT-3-1A نشان می‌دهد. همچنین نمودار ۴، پراکندگی نتایج بدست آمده را به صورت بصری نمایش می‌دهد.

در این نمودار، نقاط آبی، قرمز و سبز رنگ به ترتیب بیانگر میزان RMSE بدست آمده از هر یک از الگوریتم‌های ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته است. سمت راست نمودار، نتایج بدست آمده بر روی تصویر GeoEye-1 و سمت چپ نمودار، نتایج بدست آمده بر روی تصویر SPOT-3-1A را نشان

جدول ۷. مقدار RMSE بدست آمده در ۱۰ بار اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته بر روی دیتای دو تصویر SPOT-3-1A و GeoEye-1

	Algorithm	GCPs,DCPs,ICPs	Best RMSE (Pixel)	RMSE in 10 run (Pixel)									
				۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
SPOT-3-1A	GA Standard	۶,۷,۲۲	۳.۰۱	۳.۱۹	۳.۲۲	۳.۰۱	۳.۳۱	۳.۱۰	۳.۷۱	۳.۳۹	۳.۵۵	۳.۰۸	۳.۲۹
		۸,۷,۲۰	۲.۲۲	۲.۴۴	۲.۴۵	۲.۵۲	۲.۷۷	۲.۳۶	۲.۶۶	۲.۲۲	۲.۲۹	۲.۸۱	۲.۵۹
	GA Concept	۶,۷,۲۲	۳.۳۲	۳.۳۳	۳.۳۲	۳.۸۸	۳.۵۲	۳.۴۴	۳.۹۱	۳.۷۷	۳.۳۹	۳.۵۹	۳.۶۸
		۸,۷,۲۰	۱.۰۴	۱.۷۳	۱.۲۹	۱.۳۳	۱.۲۸	۱.۶۱	۱.۰۴	۱.۰۹	۱.۵۲	۱.۸۵	۱.۲۰
	PSORFO	۶,۷,۲۲	۲.۱۴	۲.۱۴	۲.۵۱	۲.۲۹	۲.۱۴	۲.۷۶	۲.۶۱	۲.۶	۲.۳۳	۲.۴۶	۲.۲۰
		۸,۷,۲۰	۰.۹۵	۱.۵۷	۱.۱۱	۰.۹۵	۰.۹۹	۱.۲۹	۱.۳۶	۱.۴۹	۱.۶۶	۱.۲۰	۱.۱۳
GeoEye-1	GA Standard	۶,۷,۳۷	۰.۸۵	۱.۰۳	۱.۳۱	۱.۴۱	۱.۲۶	۰.۹۱	۱.۱۷	۱.۱۹	۰.۸۵	۰.۹۹	۱.۲۲
		۸,۷,۳۵	۰.۸۸	۱.۳۱	۱.۱۱	۱.۲۰	۰.۹۲	۰.۹۹	۱.۲۶	۱.۰۰	۰.۸۸	۰.۹۶	۱.۲۵
	GA Concept	۶,۷,۳۷	۰.۹۴	۱.۱۹	۱.۱۸	۰.۹۶	۰.۹۴	۰.۹۹	۱.۱۱	۱.۱۵	۱.۱۹	۰.۹۴	۱.۰۱
		۸,۷,۳۵	۰.۷۲	۰.۷۷	۱.۰۱	۰.۷۲	۰.۸۵	۰.۹۱	۱.۰۱	۰.۹۵	۰.۹۷	۰.۸۸	۱.۰۰
	PSORFO	۶,۷,۳۷	۰.۹۶	۰.۹۸	۱.۰۱	۱.۲۲	۱.۱۲	۱.۳۱	۱.۰۲	۰.۹۹	۱.۲۰	۱.۲۲	۰.۹۶
		۸,۷,۳۵	۰.۹۱	۱.۱۹	۱.۰۶	۱.۰۰	۰.۹۸	۱.۰۱	۰.۹۴	۱.۲۸	۱.۲۳	۰.۹۱	۱.۲۴

نمودار ۴. پراکندگی مقدار RMSE بدست آمده در ۱۰ بار اجرای هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بر روی دیتای دو تصویری SPOT-3-1A و GeoEye-1



#### ۸- نتیجه‌گیری

درجه آزادی این روش، در مقایسه با دو روش دیگر، تعداد ترم‌های مورد استفاده در مرحله تولید فرزندان ترا ریخته است. در حالیکه الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته، به سبب بررسی و افزودن ترم‌های بهینه به صورت تک‌تک به ساختار بهینه نهایی، با درجه آزادی بالاتری موفق به کشف ساختار بهینه توابع کسری شده است. از این رو، به نظر می‌رسد که با ترکیب عملکرد این دو الگوریتم بتوان الگوریتم ژنتیک بهبودیافته را به نحوی ویرایش نمود که علاوه بر هزینه محاسباتی کم، قادر به تامین درجه آزادی بالاتری در کشف ساختار بهینه توابع کسری باشد.

#### ۹- منابع

- Aguilar, M.A., Saldana, M.M. and Aguilar, F.J., 2013, **Assessing Geometric Accuracy of the Orthorectification Process from Geoeye-1 and worldview-2 Panchromatic Images**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 21: 427-435.
- Elbeltagi, E., Hegazy, T. and Grierson, D., 2005, **Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms**, Advanced Engineering Information, 19 (2005): 43-53.

در این مقاله، با نگاهی جامع و کامل، خصوصیات و توانایی‌های سه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، ژنتیک بهبودیافته و ازدحام ذرات بهبودیافته در یافتن ساختار بهینه ترم‌های توابع کسری وابسته به زمین از نقطه‌نظر دقت، سرعت، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز و قابلیت اطمینان به نتایج، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. به‌عنوان نتیجه‌گیری می‌توان این‌گونه بیان کرد که از نقطه‌نظر دقت و قابلیت اطمینان به نتایج، هر سه الگوریتم نتایج نسبتاً یکسانی را در کشف ترم‌های بهینه و حل توابع کسری دارا هستند. از نقطه‌نظر سرعت، الگوریتم ژنتیک بهبودیافته، ۱۰ تا ۱۲ برابر سریع‌تر از دو الگوریتم دیگر، قادر به کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری است و در نهایت از نقطه‌نظر تعداد نقاط کنترل مورد نیاز، به ترتیب برتری ۴۵/۲۵ و ۲۷ درصدی درجه آزادی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته نسبت به الگوریتم ژنتیک بهبودیافته و ژنتیک، حاکی از آن است که این الگوریتم در مقایسه با دو الگوریتم دیگر، با استفاده از نقاط کنترل، کمتر توانایی کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری را دارد.

با تدقیق و تعمیق در سازوکار الگوریتم ژنتیک بهبودیافته می‌توان دریافت، مهم‌ترین علت پائین بودن



- Fraser, C.S. and Hanley, H.B., 2003, **Bias Compensation in Rational Functions for IKONOS Satellite Imagery**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 69 (1): 53–57.
- Holland, J.H., 1975, **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Jannati, M. and 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): 510-525.
- Kennedy, J. and Eberhart, R.C., **A discrete binary version of the particle swarm algorithm**, Proceedings of IEEE International Conference on Syst., Man, Cybern., Comput. Cybern. Simul., Orlando, FL, 1997, vol. 5, pp. 4104–4108.
- Valadan Zoej, M.J. and Petrie, G., 1998, **Mathematical modeling and accuracy testing of SPOT level 1B stereo pairs**, Photogrammetric Record, (16) 91: 67-82.
- Valadan Zoej, M.J. and Sadeghian, S., 2003, **Orbital parameter modeling accuracy testing of Ikonos Geo image,” Photogrammetric Journal of Finland**, 18(2): 70-80.
- McGlone, C., 1996, **Sensor Modeling in Image Registration, Digital Photogrammetry: An Addendum** (C. W. Greve, editor), American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, pp. 115–123.
- Russell C. Ebrahart, Yuhui shi., 1988, **Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization**, 1988 Annual Conference on Evolutionary Programming, San Diego.
- Tao, C. V. and Y. Hu, 2001, **A Comprehensive Study of the Rational Function Model Photogrammetric Processing.” Photogrammetric Engineering Remote Sensing** 67 (12): 1347–1357.
- Toutin, Th., spring, 2003, **Review Paper: Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms, and Methods**, International Journal of Remote Sensing, 25: 1893-1924.
- Unger, D.R., Kulhavy, D.L. and Hung, I.K., 2013, **Validating the Geometric Accuracy of High Spatial Resolution Multispectral Satellite Data” GIScience and Remote Sensing** 50 (3): 271–280.
- Valadan Zoej, M.J., Mokhtarzadeh, M., Mansourian, A., Ebadi, H. and Sadeghian, S., 2007, **Rational Function Optimization Using Genetic Algorithms**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 9 (4): 403–413.
- Yavari, S., Valadan Zoej, M.J., Mohammadzadeh, A. and Mokhtarzade, M., 2013, **Particle Swarm Optimization of RFM for Georeferencing of Satellite Images**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10 (1): 135-139.
- Yavari, S., Valadan Zoej, M.J., Sahebi, M.R. and Mokhtarzade, M., 2016, **An automatic novel structural linear feature-based matching based on new concepts of mathematically generated lines and points**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 82 (5): 17-28.
- Yavari, S., Valadan Zoej, M.J. and Sadeghian, S., 2008, **Mathematical Modeling of Georectified Dynamic Space Images**, International Journal of Geoinformatics, 4 (4): 47-55.
- Yavari, S., Valadan Zoej, M.J., Mohammadzadeh, A. and Mokhtarzade, M., 2012, **Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm in Rational Function Model Optimization**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia.



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

سال یازدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۸  
Vol.11, No. 1, Spring 2019

1-18

## Comprehensive assessment of standard genetic optimization algorithm, modified genetic optimization algorithm and modified particle swarm optimization algorithm for optimization of terrain-dependent rational function models

Moradi, B.<sup>1\*</sup>, Valadan Zoej, M.J.<sup>2</sup>, Jannati, M.<sup>3</sup>, Yavari, S.<sup>4</sup>

- 1- Master of Photogrammetry student, School of Surveying Engineering, Khaje Nasir Al-Tusi University of Technology
- 2- Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, School of Surveying Engineering, Khaje Nasir al-Din Tusi University of Technology
- 3- Faculty of Geomatics Engineering, K.N Toosi University of Technology
- 4- Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, Canada

### Abstract

In the absence of satellite ephemeris data and inner geometry of satellite's sensor, utilization of Rational Function Models (RFMs) is one of the best approaches to georeferencing satellite images and extracting spatial information from them. However, since RFMs have high number of coefficients, then usually high number of control points is needed for their estimation. In the other hand, RFM terms are uninterpretable and all of them causes over-parametrization error which count as the most important weakness of the terrain-dependent RFMs. Utilization of optimization algorithms is one of the best approaches to eliminate these weaknesses. Therefore, various optimization algorithms have been used to discover the optimal composition of RFM's terms. Since the mechanism of these algorithms is different, the performance and feature characteristics of these algorithms differ in the discovery of the optimal composition train-dependent RFM's terms. But the existing differences not comprehensively analyzed. In this paper, in order to comprehensive assessment the abilities of Genetic Optimization Algorithm (GA), Genetic modified Algorithm (GM), and a modified Particle Swarm Optimization (PSO) in terms of accuracy, quickness, number of control points required, and reliability of results, are evaluated. These methods are evaluated using for different datasets including a GeoEye-1, an IKONOS-2, a SPOT-3-1A, and a SPOT-3-1B satellite images. In terms of accuracy achieved, difference between these methods was less than 0.4 pixel. In terms of speed of evaluation of parameters, GM was 10 to 12 time more quickly in comparison with two other algorithms. In terms of control points required, degree of freedom of modified PSO was 45.25 percent and 27 percent more than GM and GA respectively, and finally in terms of reliability, the dispersion of RMSE obtained in 10 runs of three algorithms are relatively same. These results indicated that accuracy and reliability of all three methods are almost the same, speed of GM is higher and modified PSO needs less control points to optimize terrain-dependent RFM.

**Keywords:** Rational Function Models (RFMs), Georeferencing of Satellite Images, Genetic Algorithm (GA), Genetic Modified Algorithm (GM)