



سجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

سال هفتم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۴  
Vol.7, No. 2, Summer 2015

۱-۱۸



## تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از توابع کسری بهینه‌سازی شده به وسیله الگوریتم کلونی مورچه‌ها

امین باغانی\*<sup>۱</sup>، محمدجواد ولدان زوج<sup>۲</sup>، مهدی مختارزاده<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری فتوگرامتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

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

۳. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۹/۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۳/۱۰

### چکیده

در غیاب داده‌های افریز ماهواره و مدل سنجنده، تبدیلات غیرپارامتریک نظیر مدل توابع کسری از مهم‌ترین و پرکاربردترین انواع مدل‌های ریاضی در جوامع فتوگرامتری و سنجش از دور به‌شمار می‌آیند. وابستگی این مدل‌ها به تعداد زیادی نقاط کنترل زمینی، مشکلات عددی موجود در حل آنها و مشکل انتخاب ترم‌های سازنده ساختار تابع کسری را می‌توان از ضعف‌های عمده این روش برشمرد. از آنجاکه ضرایب در توابع غیرپارامتریک دارای تفسیر و معنای فیزیکی مشخصی نیستند، در روش‌های معمول کلیه ترم‌ها وارد فرایند محاسباتی می‌شوند و خطای وابستگی میان ترم‌ها ایجاد می‌کنند. در پژوهش حاضر، الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای بهینه‌سازی توابع کسری مناسب‌سازی شد و از الگوریتم ویژه‌سازی شده به‌منظور یافتن ترکیب بهینه ترم‌ها در ساختار توابع کسری استفاده گردید. الگوریتم مذکور، روی سه تصویر در سطوح تصحیح هندسی مختلف با ترکیب‌های گوناگونی از نقاط کنترل و نقاط چک مستقل در سه سیستم مختصات زمینی UTM، CT و ژئودتیک و بدون نرمال کردن مختصات‌های زمینی و تصویری آزمون شد. نتایج آزمون‌های تجربی نشان دادند که الگوریتم ویژه‌سازی شده کلونی مورچه‌ها در پژوهش حاضر از نظر تعداد ترم‌ها و دقت موقعیت مکانی قابلیت بالایی دارد. نتایج نشان دادند که استفاده از سیستم مختصات CT برای فضای زمین، نتایج بهتری را از نظر دقت و نحوه همگرایی الگوریتم به توابع کسری بهینه به‌دست می‌دهد. نتایج برای تصاویر مختلف و حتی تصاویر خام با استفاده از چهار نقطه کنترل، دقت زیرپیکسل را نشان داد.

**کلیدواژه‌ها:** تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا، مدل‌های ریاضی، مدل توابع کسری، الگوریتم کلونی مورچه‌ها.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، گروه مهندسی فتوگرامتری.

Email: amin\_baghani@mail.kntu.ac.ir

تلفن: ۰۹۱۲۶۱۱۵۹۴۰

## ۱- مقدمه

امروزه با دراختیارداشتن تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا، امکان استخراج اطلاعات مکانی دقیق از این تصاویر فراهم شده است. این اطلاعات را می‌توان در فعالیت‌های مختلفی نظیر تهیه و به‌روزرسانی نقشه‌های پوششی، مدیریت منابع طبیعی، محیط‌زیست، کشاورزی و جز اینها به‌کار برد. برای این منظور لازم است فضای تصویر به فضای زمین تبدیل شود. مدل‌های تبدیل موجود به دو دسته مدل‌های پارامتریک (نظیر مدل پارامترهای مداری) و غیرپارامتریک (نظیر مدل توابع کسری) تقسیم می‌شوند. از آنجاکه مدل‌های پارامتریک، هندسه تصویر در لحظه تصویربرداری را بازسازی می‌کنند، به پارامترهای توجیه داخلی سنجنده و داده‌های ناوبری ماهواره نیاز دارند. مشکل اصلی در استفاده از مدل‌های پارامتریک، تمایل نداشتن برخی از فروشندگان تصاویر ماهواره‌ای - نظیر GEOEYE - به انتشار داده‌های افریز و پارامترهای توجیه داخلی سنجنده‌هاست (Toutin, 2004). افزون بر این، مدل‌های مذکور وابسته به سنجنده‌اند و برای هر سنجنده‌ای تغییر می‌کنند. در نتیجه حل آنها پیچیدگی‌های زیادی خواهد داشت و توسعه نرم‌افزارها براساس مدل فیزیکی سنجنده با توجه به اینکه هر سال نسل جدیدی از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در اختیار کاربران غیرنظامی قرار می‌گیرد، دشوار خواهد بود.

درمقابل، مدل‌های غیرپارامتریک نیازی به اطلاعات ماهواره ندارند و وابسته به نوع سنجنده نیستند و پیچیدگی‌های محاسباتی کمتری دارند. بنابراین به‌علت مزیت‌های مدل‌های غیرپارامتریک، اغلب جوامع فتوگرامتری و سنجنش از دور تمایل به استفاده از این مدل‌ها برای تصحیح هندسی تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا دارند.

توابع کسری در دهه گذشته به‌طور گسترده مطالعه شده‌اند و به‌صورت موفقیت‌آمیزی روی تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان

مثال، تائو و هو<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) بررسی جامعی درخصوص توابع کسری از دیدگاه فتوگرامتری انجام دادند. در تحقیق حبیب و همکاران (۲۰۰۷)، توابع کسری با دیگر مدل‌های عمومی و همچنین مدل فیزیکی از نظر دقت‌های هندسی برای تصاویر هوایی و فضایی بررسی شدند. فراسر و روانبخش<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) و چن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، روش‌های مختلفی را برای حل مسئله مهم تعیین بهینه پارامترهای توابع کسری به‌کار گرفتند. پواتاناکوکچای و میکائیل<sup>۴</sup> (۲۰۰۸)، فراسر و هانلی<sup>۵</sup> (۲۰۰۳)، هو و تائو (۲۰۰۲)، زیانگ و ژانگ<sup>۶</sup> (۲۰۰۹)، و تانگ<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، با در نظر گرفتن دقت محدود پارامترهای توابع کسری در روش زمین مستقل، که تکمیل‌های فروشنده تصویر آنها را منتشر می‌کنند، روش‌های مختلفی برای بهبود دقت این پارامترها ارائه کردند که توابع کسری موجود را با اضافه کردن مجموعه‌ای از دیگر نقاط کنترل بهبود می‌دهند.

مجموعه‌ای از کاربردهای توابع کسری در پردازش‌های هندسی تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا را می‌توان چنین برشمرد: توجیه سنجنده (Fraser et al., 2006; Fraser & Hanley, 2005)، سرشکنی بلوک فتوگرامتری (Grodecki & Dial, 2003)، تعیین موقعیت زمینی (Li et al., 2007)، ترمیم تصویر (Tao & Hu, 2001b)، و بازسازی سه‌بعدی زمین (Toutin, 2002; Tao et al., 2004; Tao & Hu, 2002). مدل کردن مجموعه داده‌های تصاویر SAR نیز با توابع کسری در تحقیق ژانگ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۲) ارائه شد.

توابع کسری از تقسیم دو چندجمله‌ای بر هم به‌دست می‌آیند که ارتباط بین فضای تصویر و فضای زمین را به‌خوبی برقرار می‌کنند و جایگزین ایده‌آلی

1. Tao & Hu

2. Fraser & Ravanbakhsh

3. Chen

4. Puatanachokchai & Mikhail

5. Fraser & Hanley

6. Xiong & Zhang

7. Tong

8. Zhang

Zoej et al., 2007). ضرایب در مدل توابع کسری معنا و مفهوم فیزیکی مشخصی ندارند و در نتیجه تعیین بهترین ترکیب این ضرایب با استفاده از دانش اولیه عملاً غیرممکن می‌شود. بنابراین برای حل این مشکل، استفاده الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری راه حل مناسبی به نظر می‌رسد.

ولدان زوج (۲۰۰۷)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به انتخاب ترم‌های بهینه ساختار مدل توابع کسری کرد و برای انتخاب مجموعه داده‌های مورد نظر، یک محصول Geo از سکوی IKONOS مربوط به شهر همدان را به کار گرفت. اگرچه وی به دقت‌های زیرپیکسل با استفاده از پنج نقطه کنترل دست یافت، اما به پیاده‌سازی الگوریتم روی مجموعه داده‌های متنوع‌تر و همچنین تصاویر خام نپرداخت. همچنین در پژوهش مذکور، تأثیر انتخاب سیستم مختصات زمینی بر نتایج، ارزیابی نشد. در مطالعه ولدان زوج زمان اجرای الگوریتم نسبتاً بالاست، به گونه‌ای که سازگاری آن با بسیاری از پردازش‌های دیگر فتوگرامتری که نیاز به سرعت بالا دارند، به مقدار زیادی کاهش می‌یابد و کارایی اجرایی الگوریتم را در عمل به شدت کم می‌کند.

یاوری و همکاران (۲۰۱۳) مقایسه‌ای بین الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب ترم‌های بهینه ساختار مدل توابع کسری انجام دادند. در پژوهش آنها، مجموعه داده‌های استفاده شده یک محصول Geo از سکوی IKONOS مربوط به شهر همدان و یک محصول LIB از سکوی SPOT مربوط به شهر زنجان بود. اگرچه مجموعه داده‌های به کار گرفته شده جامعیت بیشتری از مطالعه ولدان زوج و همکاران (۲۰۰۷) داشت، بررسی‌ای در خصوص تصاویر خام در آن انجام نشده است. در پژوهش مذکور نیز مانند تحقیق ولدان زوج و همکاران (۲۰۰۷)، به بررسی تأثیر انتخاب سیستم مختصات‌های زمینی روی نتایج پرداخته نشد. زمان‌های اجرای مربوط به الگوریتم PSO نیز اگرچه اندکی پیشرفت در مقایسه با الگوریتم GA نشان داد، اما با استفاده از الگوریتم‌های

برای مدل فیزیکی سنجنده به‌شمار می‌آیند (Tao & Hu., 2001). روابط (۱) و (۲) شکل پیشرو توابع کسری را نشان می‌دهند.

رابطه (۱)

$$c = \frac{P_r(X, Y, Z)}{P_f(X, Y, Z)} \quad r = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_r(X, Y, Z)}$$

رابطه (۲)

$$P(X, Y, Z) = \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \sum_{k=1}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k =$$

$$a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 XY + a_5 XZ + a_6 YZ + a_7 X^2 + \dots + a_{19} Z^3$$

در رابطه (۱)،  $c$  و  $r$  به ترتیب مختصات سطر و ستون تصویر  $X, Y, Z$  مختصات زمینی است. در فرم پیشرو توابع کسری، مختصات تصویری  $(r, c)$  به وسیله کسری متشکل از دو چندجمله‌ای ساخته شده از مختصات زمینی  $(X, Y, Z)$  بیان می‌شوند. در رابطه (۲)،  $a_{ijk}$  و  $b_{ijk}$  و  $c_{ijk}$  و  $d_{ijk}$  مجموعه ضرایبی هستند که چندجمله‌ای‌های  $P_4, P_3, P_2, P_1$  را می‌سازند. برای چندجمله‌ای‌های مخرج، اندیس‌های  $i$  و  $j$  و  $k$  نمی‌توانند به طور هم‌زمان صفر باشند. به عبارت دیگر، ترم ثابت چندجمله‌ای‌ها از مخرج حذف و به دلیل همبستگی کامل با ترم ثابت چندجمله‌ای صورت، در قالب عدد ۱ در مخرج ظاهر می‌شود.

باید در نظر داشت که اشکال اصلی تبدیلات غیرپارامتریک، نیاز آن به تعداد کافی نقاط کنترل زمینی با توزیع مناسب برای انجام تصحیح هندسی تصاویر در روش زمین وابسته است. بنابراین مدل‌های غیرپارامتریک حساسیت زیادی به توپوگرافی زمین، تعداد و توزیع نقاط کنترل و خطای آنها دارند (Tao & Hu., 2001).

مدل توابع کسری نیز به عنوان مدلی غیرپارامتریک، نیاز به تعداد نسبتاً زیادی نقطه کنترل زمینی با توزیع مناسب دارد که استخراج‌شان زمان‌بر و پرهزینه است. همچنین در مدل‌های غیرپارامتریک، به علت حضور ترم‌هایی که دارای وابستگی با سایر ترم‌ها هستند، مشکل بروز وابستگی میان ترم‌ها وجود دارد (Valadan

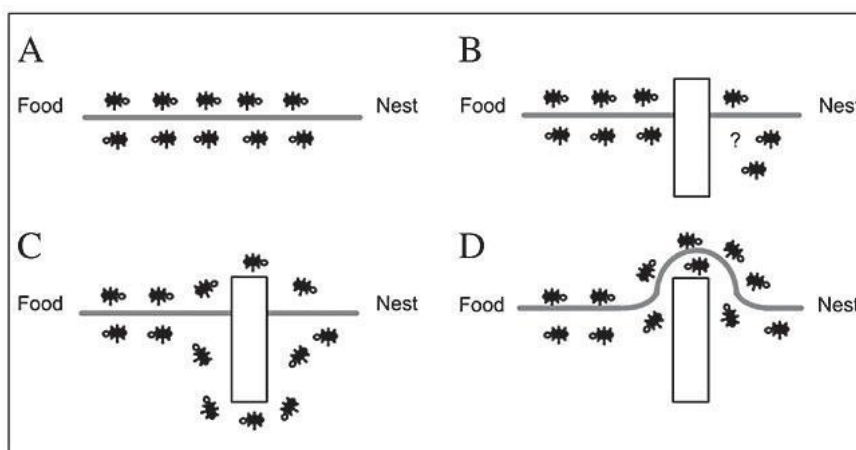
فرمون ترشح می‌کنند و مسیرهای متفاوت حاوی مقادیر متفاوتی از فرمون خواهند بود (مسیرهای پرتردد حاوی مقادیر فرمون بیشتری خواهند بود). در ادامه مورچه‌ها به‌صورت غریزی تمایل بیشتری به انتخاب مسیرهای دارای فرمون بیشتر از خود نشان می‌دهند. حال اگر مانعی بر سر راه مورچه‌ها قرار بگیرد (شکل ۱(B))، مورچه‌هایی که در مقابل مانع هستند دیگر نمی‌توانند اثر فرمون را دنبال کنند. بنابراین به‌صورت اتفاقی برخی مورچه‌ها چرخش به راست و برخی دیگر چرخش به چپ را انتخاب می‌کنند (شکل ۱(C)). مورچه‌هایی که به‌صورت اتفاقی راه کوتاه‌تر را انتخاب می‌کنند درمقایسه با مورچه‌هایی که مسیر طولانی‌تر را انتخاب کرده‌اند، با سرعت بیشتری فرمون قبلی را تقویت می‌کنند. بنابراین در ادامه مورچه‌های بیشتری مسیر کوتاه‌تر را که مقدار فرمون بیشتری دارد، انتخاب می‌کنند (شکل ۱(D)). به‌دلیل این بازخورد مثبت، اکثر مورچه‌ها به‌سرعت مسیر کوتاه‌تر را برمی‌گزینند (Dorigo et al., 1999).

مسائل بهینه‌سازی در الگوریتم کلونی مورچه‌ها در قالب یک گراف متشکل از رئوس و یال‌ها سازماندهی می‌شوند. شکل ۲ نحوه سازماندهی یک مسئله را در قالب گراف نشان می‌دهد.

PSO و GA هنوز هم بایستی زمان‌های نسبتاً طولانی برای یافتن ترم‌های بهینه ساختار مدل تابع کسری صرف شود.

روش بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها را که برگرفته از زندگی واقعی مورچه‌ها در طبیعت است، مارکو دریگو در سال ۱۹۹۲ ارائه کرد. الگوریتم کلونی مورچه‌ها از هوش جمعی بهره برده و بر این اصل بنا نهاده شده است که تعاملات محلی، محدود و ساده اعضای یک دسته جمعیت با محیط منتهی به رفتار جمعی هوشمندانه‌ای می‌شود. این تعاملات غریزی‌اند و بدون نظارت انجام می‌شوند و نتیجه آنها غالباً رفتار پیچیده و هوشمندانه جمعی و به‌طور خاص انجام برخی بهینه‌سازی‌های پیچیده است. نکته مهم در زندگی کلونی مورچه‌ها، توانایی سازگاری مورچه‌ها با تغییرات محیط پیرامون‌شان است. به‌عنوان مثال زمانی که کوتاه‌ترین مسیر به‌دلیل وجود یک مانع بسته شده باشد، مورچه‌ها کوتاه‌ترین مسیر جدید پیدا می‌کنند (Dorigo et al., 1999).

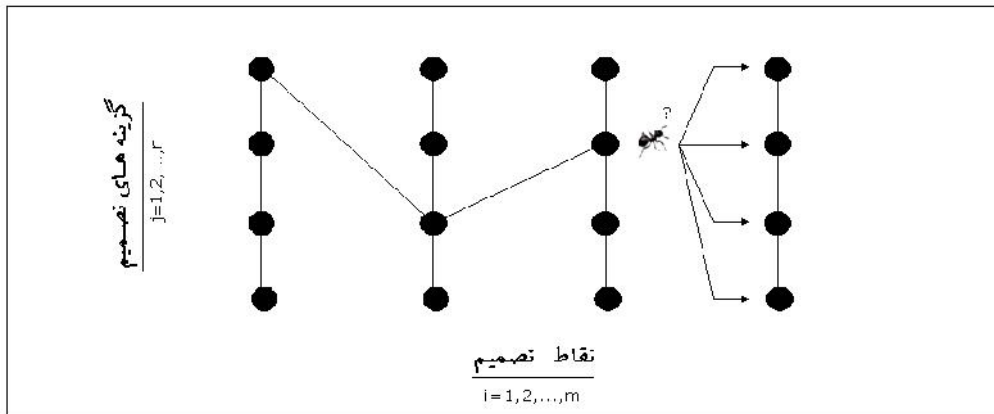
شکل ۱(A) مورچه‌ها را در خط مستقیمی میان لانه و مکان غذا نشان می‌دهد. اولین وسیله‌ای که برای تشکیل و حفظ این خط به کمک مورچه‌ها می‌آید، اثر فرمون است. مورچه‌ها هنگام راه‌رفتن مقدار معینی



شکل ۱. نمایش مراحل یافتن کوتاه‌ترین مسیر به‌وسیله مورچه‌ها

منبع: Dorigo et al., 1999





شکل ۲. گراف الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها

منبع: قصیری و همکاران، ۱۳۸۸

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مطالعه‌شده و داده‌های مورد استفاده

در تحقیق حاضر، دو تصویر از مجموعه سنجنده‌های SPOT و یک تصویر از مجموعه سنجنده‌های IKONOS به کار گرفته شدند. هر دو تصویر سنجنده SPOT مربوط به منطقه‌ای در شهر اصفهان در مرکز کشور ایران هستند، که طول و عرض جغرافیایی گوشه شمال شرقی آن به ترتیب  $32^{\circ}7'47''$  و  $51^{\circ}7'48''$  و طول و عرض جغرافیایی گوشه جنوب غربی آن به ترتیب  $32^{\circ}6'25''$  و  $51^{\circ}6'45''$  است. تصویر سنجنده IKONOS مربوط به شهر همدان در غرب کشور ایران است، که طول و عرض جغرافیایی گوشه شمال شرقی آن به ترتیب  $34^{\circ}8'52''$  و  $48^{\circ}5'41''$  و طول و عرض جغرافیایی گوشه جنوب غربی آن به ترتیب  $34^{\circ}4'32''$  و  $48^{\circ}7'50''$  است.

جدول ۱ خصوصیات داده‌های به کار گرفته شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

نقاط استخراج شده از این تصاویر در سه دسته: نقاط کنترل، نقاط چک الگوریتم و نقاط چک مستقل به کار گرفته شدند. نقاط کنترل در محاسبات دستگاه معادلات تعیین ضرایب شرکت داشتند. نقاط چک الگوریتم به وسیله تابع شایستگی به منظور ارزیابی شایستگی راه‌حل‌های ساخته شده از طریق الگوریتم مورد استفاده قرار گرفتند.

وضعیت‌های مسئله، مجموعه‌ای از تمامی تورهای ممکن برای پیمایش مورچه‌ها در این گراف است. هر راه‌حل ممکن در الگوریتم کلونی مورچه‌ها، به صورت یک گراف متشکل از مجموعه‌ای از یال‌ها و گره‌ها نمایش داده می‌شود. انتخاب یک گره از سوی مورچه‌ها براساس میزان فرمون منتسب به آن گره انجام می‌شود و میزان فرمون موجود روی هر گره متناسب با میزان شایستگی آن گره و در نتیجه تعداد دفعات انتخاب آن از سوی مورچه‌ها تعیین می‌شود. تبخیر فرمون نیز متناسب با فرمون موجود روی هر گره از کلیه گره‌ها صورت می‌پذیرد (قصیری و همکاران، ۱۳۸۸).

هدف اصلی پژوهش حاضر، بهینه‌سازی توابع کسری با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه‌هاست به نحوی که مدل بهینه فاقد ترم‌های دارای وابستگی با سایر ترم‌ها و ناپایداری عددی باشد. علاوه بر تعیین مدل‌های بهینه به وسیله الگوریتم ویژه‌سازی شده کلونی مورچه‌ها، تحقیق حاضر اهداف دیگری از قبیل تأثیر سیستم مختصات زمینی مورد استفاده و همچنین نوع محصول تصویر به کار گرفته شده، بر چگونگی حل مسئله انتخاب ترم‌های بهینه به منظور حضور در ساختار تابع کسری را دنبال می‌کند.

جدول ۱. داده‌های به‌کار گرفته‌شده

سکو	سنجنده	محصول	GSD (m)	نوع تصحیحات محصول	مرجع نقاط کنترل و چک
		Level 1A	۱۰	تصحیح رادیومتریکی	
SPOT-1	HRV	Level 1B	۱۰	تصحیح رادیومتریکی، دوران زمین، انحنای زمین و اثر پانورامیک ناشی از دید غیرقائم	اندازه‌گیری به‌وسیله GPS دوفرکانسه
IKONOS	Panchromatic	Geo	۱	تصحیح رادیومتریکی، دوران زمین، انحنای زمین و اثر پانورامیک ناشی از دید غیرقائم	نقشه رقومی ۱:۱۰۰۰ تولیدشده از عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰ به‌وسیله سازمان نقشه‌برداری کشور

## ۲-۲- روش تحقیق

در پژوهش حاضر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها به منظور انتخاب ترکیب بهینه ترم‌های سازنده توابع کسری ویژه‌سازی شد و تحت شرایط مختلفی آزمون گردید. برای این منظور در گام نخست، توابع کسری و نحوه انتخاب ترم‌ها در قالب یک گراف تعریف و ساختاربندی شد. در گام دوم، سازوکار پیمایش گراف به‌وسیله مورچه‌ها تعریف شد. این مرحله، انتخاب مسیر نام دارد. در گام سوم مسیرهای پیمایش شده به‌وسیله مورچه‌ها مورد ارزیابی شایستگی قرار گرفتند و فرمون کلیه مسیرهای ایجادشده به‌وسیله مورچه‌ها بر مبنای شایستگی شان به‌روزرسانی شد، سپس از کلیه مسیرها تبخیر فرمون صورت گرفت. این مرحله، به‌روزرسانی فرمون‌ها نام دارد. قراردادن حدود فرمون مسیر و مقداردهی مجدد فرمون‌ها در مواقع ضروری از دیگر بخش‌هایی هستند که به‌منظور بهبود کارایی الگوریتم در مرحله به‌روزرسانی فرمون مسیرها به آن افزوده شد.

## ۲-۲-۱- ساختاربندی راه‌حل‌ها به‌صورت گراف

به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی به‌روش کلونی مورچه‌ها، نخستین قدم ساختاربندی راه‌حل‌های ممکن در قالب گراف است. در پژوهش حاضر، گراف ساخت راه‌حل برای مسئله انتخاب ترکیب بهینه ترم‌ها در ساختار توابع کسری مطابق شکل ۳ طراحی شد.

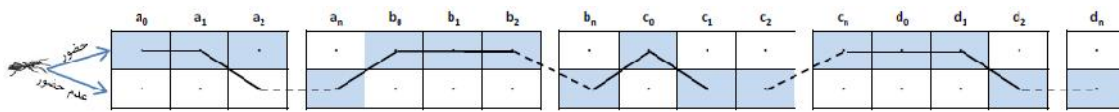
نقاط چک مستقل در هیچ‌یک از مراحل الگوریتم نقشی نداشتند و از آنها فقط برای ارزیابی دقت نهایی استفاده شد.

در محصولات Level 1A سکوی SPOT، صرفاً تصحیحات رادیومتریکی آشکارسازها اعمال شدند، به‌طوری که خطای اختلاف حساسیت آشکارسازها جبران شود. تعداد ستون‌های این تصاویر معادل تعداد آشکارسازهای موجود در سنجنده است. هندسه اولیه تصویبررداری در این محصول حفظ شده است و تصویر تقریباً در هندسه تصویر در لحظه تصویبررداری قرار دارد و از این منظر تصویری خام به‌شمار می‌آید.

در محصولات Level 1B سکوی SPOT، برخی از خطاهای هندسی موجود در تصاویر حذف شده‌اند. در این تصاویر زوایای موجود در فضای شیء با زوایا در فضای تصویر برابرند و خطای اندازه‌گیری طول در تمامی جهت‌ها به حداقل رسیده است. خطای تصحیح‌شده در این تصاویر شامل دوران زمین، انحنای زمین و اثر پانورامیک ناشی از دید غیرقائم است. در محصولات Level 1B نمونه‌برداری مجدد فقط در یک راستا انجام می‌شود و این تصاویر ژئوکد نشده‌اند.

در تصویر IKONOS اثر دید غیرقائم سنجنده کاهش یافته است. کاهش FOV سنجنده (افزایش قدرت تفکیک مکانی) نسبت به تصاویر SPOT نیز دقت آن را بهبود می‌بخشد.

## تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از توابع کسری بهینه‌سازی شده به وسیله الگوریتم کلونی مورچه‌ها



شکل ۳. نحوه پیمایش مورچه‌ها در گراف ساخت حل مسئله

شد. به این ترتیب، فاز جست‌وجوی اولیه بسیار اکتشافی است و تا حد زیادی از همگرایی زودرس یا محلی الگوریتم جلوگیری می‌شود، چراکه با وجود فرومون بالا و تبخیر کم، الگوریتم به اندازه کافی زمان خواهد داشت تا سطح وسیع‌تری از فضای احتمال را جست‌وجو کند.

### ۲-۲-۲- انتخاب مسیر و به‌روزرسانی فرومون‌ها

در پژوهش حاضر به‌منظور تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب کردن یا انتخاب‌نکردن یک ترم در تابع کسری (بازدیدکردن یا بازدیدنکردن یک گره در گراف مسیر یک مورچه)، رابطه (۳) طراحی و مورد استفاده قرار گرفت:

رابطه (۳)

$$G_i = \begin{cases} 1 & \text{if } ph_i(t) > (q_i + q(t)) \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

در رابطه (۳) عدد یک برای  $G_i$  نشان‌دهنده حضور ترم  $\lambda_m$  در ساختار تابع کسری مربوط و عدد صفر نشان‌دهنده حضورنداشتن آن در گراف  $G$  است.  $Ph_i(t)$  میزان فرومون موجود روی گره  $\lambda_m$  در تکرار  $t$ ام است.  $q_i$  متغیری تصادفی در بازه  $[0, 1]$  است که در هر تکرار برای هر گره تولید می‌شود. پارامتر  $q_0(t)$  نیز مطابق رابطه (۴) محاسبه شد.

$$q(t) = (1 - \rho) q(t-1) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)،  $\rho$  ضریب تبخیر و پارامتر ثابتی است که عددی بین صفر و یک اتخاذ می‌کند. پارامتر  $q_0$  در انتخاب گره‌ها در گراف ایجاد مقاومت می‌کند. اتخاذ مقادیر بالای این پارامتر منجر به راه‌حلهایی با تعداد ترم‌های کمتر یا عبور از سطر اول گراف شکل ۳ می‌شود و مقادیر کوچک پارامتر  $q_0$  تشویق مورچه‌ها به

گراف حرکت طراحی‌شده برای هر مورچه در راستای دو مسیر موازی است که متشکل از گره‌های منتسب به هر ترم‌اند. حضورداشتن یا نداشتن هر ترم تابع کسری متناظر با گرهی جداگانه در این گراف است. گره‌های معرف حضور ترم‌ها در مسیر سطر اول و گره‌های معرف حضورنداشتن ترم‌ها در مسیر سطر دوم گراف قرار گرفته‌اند.

در پژوهش حاضر، فضای جست‌وجو برای صورت و مخرج هر یک از کسرهای مربوط به  $t$  و  $c$  در رابطه (۱)، حداکثر از درجه سوم، یعنی ۲۰ ترم با مخرج‌های نامساوی در نظر گرفته شد و از حل جداگانه برای دو راستای حرکت سنجنده و چیدمان آشکارسازها استفاده گردید. حل جداگانه، امکان اتخاذ استراتژی‌های مختلف را در راستای حرکت سنجنده و چیدمان آشکارسازها به الگوریتم داد. بنابراین ابعاد گراف ساخت راه‌حل در این حالت، برابر  $2 \times 78$  بود. درحالی‌که اگر مخرج کسرهای نامساوی در نظر گرفته می‌شدند، ابعاد گراف ساخت راه‌حل‌ها برابر  $2 \times 59$  بود.

عملیات به‌روزرسانی فرومون‌ها نیز روی رئوس این گراف طراحی شد. عبور مورچه‌ها از گره‌های ردیف اول منتسب به هر ترم معرف حضورداشتن، و عبور مورچه‌ها از گره‌های ردیف دوم منتسب به هر ترم معرف حضورنداشتن ترم‌های مربوط در ساختار تابع کسری متناظر با گراف است. مطابق شکل ۳، مسیرهای متناظر با تابع کسری بهینه، پرتدد هستند و در نتیجه فرومون بیشتری در مقایسه با سایر مسیرها به خود اختصاص می‌دهند.

به‌منظور افزایش سطح جست‌وجوی اکتشافی در شروع الگوریتم، فرومون‌های اولیه مسیر ابتدا با تخمینی دست‌بالا، و پارامتر تبخیر با مقدار عددی کوچکی اتخاذ

پس از تبخیر فرومون از کلیه گره‌ها، نوبت به به‌روزرسانی فرومون در گره‌هایی می‌رسد که به‌وسیله مورچه‌ها پیمایش شده‌اند. رابطه (۶) نحوه به‌روزرسانی فرومون‌ها را نشان می‌دهد.

رابطه (۶)

$$ph_i(t) = ph_i(t-1) + \sum_{k=1}^m \Delta ph_i^k, \quad \forall i \in G$$

در رابطه (۶)،  $\forall i \in G$  نشان می‌دهد که به‌ازای هر گره  $i$  از گراف  $G$  که به‌وسیله مورچه  $k$ ام در تکرار  $t$ ام پیمایش شده است، عملیات به‌روزرسانی انجام می‌پذیرد. پارامتر  $ph_i(t)$  مقدار فرومون موجود روی گره  $i$ ام را در تکرار  $t$ ام نشان می‌دهد.  $\Delta ph_i^k$  مقدار فرومونی است که مورچه  $k$ ام روی گره‌هایی که طی مسیر خود از آنها عبور کرده است، می‌ریزد و این مقدار متناسب با میزان شایستگی راهکار انتخابی به‌وسیله مورچه  $k$ ام اتخاذ می‌گردد که مستلزم تعریف یک تابع شایستگی برای مسئله مورد بهینه‌سازی است.  $\Delta ph_i^k$  در رابطه (۶)، طبق رابطه (۷) برآورد شد.

$$\Delta ph_i^k = \frac{1}{(1 + e^{RMSE^k})^2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه (۷) که تابعی نمایی است،  $e$  عددی ثابت موسوم به عدد اویلر است و  $RMSE^k$  از ارزیابی دقت تابع کسری حاصل از مسیر منتخب مورچه  $k$ ام روی نقاط چک الگوریتم به‌دست می‌آید و مقدار فرومون محاسبه‌شده برای گره  $i$ ام به‌وسیله مسیر منتخب مورچه  $k$ ام که برابر  $\Delta ph_i^k$  است، همواره مقداری بین صفر و یک اتخاذ می‌کند. بهنگام‌رسانی فرومون‌های ترم‌های حاضر در مسیر مورچه  $k$ ام مطابق رابطه (۶) انجام می‌شود. استفاده از این روش برای فرومون‌ریزی و تبخیر باعث می‌شود پس از مدتی فرومون بیشتری روی ترم‌های بهینه جمع شوند و در نتیجه شانس بیشتری برای انتخاب از سوی مورچه‌های بعدی پیدا کنند و ترم‌های غیربهینه نیز دارای میزان فرومون کمتری شوند و متقابلاً شانس کمتری نیز برای انتخاب از سوی مورچه‌های بعدی داشته باشند.

انتخاب ترم‌های بیشتر یا عبور مورچه‌ها از سطر دوم گراف را در پی دارد. مقدار پارامتر  $q_0$  در تکرار  $t$ ام، با نرخ  $(1-p)$  کاهش می‌یابد.

در هر گام پیمایش گراف و ساخت راه‌حل، مورچه‌ها از قانون انتخاب احتمالی مطابق رابطه (۳) تبعیت می‌کنند تا تصمیم بگیرند کدام گره را بایستی به‌عنوان گره بعدی بازدید کنند. این بدان معنی است که چه ترم‌هایی در ساختار تابع کسری حضور داشته باشند و چه ترم‌هایی حضور نداشته باشند.

از آنجاکه یک ساختار تابع کسری بهینه، از تعداد ترم‌های کمی استفاده می‌کند و انتخاب ترم‌های بیشتر از تعداد نقاط کنترل، درجه آزادی منفی را به‌بار خواهد آورد، با طراحی روابط انتخاب گره بعدی به‌وسیله مورچه‌ها به‌شکل روابط (۳) و (۴) پارامتر  $q_0$  در ابتدای الگوریتم، نسبتاً بزرگ اتخاذ شده است تا توابع با تعداد مجهولات بیشتر از نقاط کنترل ساخته نشوند. با اتخاذ روندی کاهشی مطابق رابطه (۴) برای این پارامتر، سطح اکتشافی به‌مرور افزایش می‌یابد، تا هم تعداد ترم‌های کمتری انتخاب شوند و هم جست‌وجوی فضای احتمالی به‌خوبی صورت بگیرد.

در هر تکرار، متناسب با فرومون موجود روی هر گره، از کلیه گره‌ها مطابق رابطه (۵) تبخیر صورت می‌پذیرد:

رابطه (۵)

$$ph_i(t) = (1-p) ph_i(t-1), \quad \forall i \in G,$$

ضریب تبخیر است که نرخ تبخیر فرومون

از گره‌ها را مشخص می‌کند و پارامتر  $ph_i(t)$  مقدار فرومون موجود روی گره  $i$ ام را در تکرار  $t$ ام نشان می‌دهد. پارامتر  $p$  به‌منظور جلوگیری از تجمع نامحدود فرومون روی یک گره به‌کار رفته است و الگوریتم را قادر می‌سازد تا چنانچه در تکرارهای پیشین فرومون به‌شکل نامناسبی روی گره‌ها تجمع کند، تا حدی این تجمع نامناسب را تعدیل کند.  $\forall i \in G$  به این معنی است که برای هر گره  $i$  عضو گراف  $G$  عملیات تبخیر فرومون صورت می‌پذیرد.

کلیه ترم‌ها میزان فرومون اولیه اختصاص پیدا خواهد کرد. رابطه (۸) نحوه مقداردهی مجدد فرومون‌ها را نشان می‌دهد.

رابطه (۸)

$$ph_i = \text{initial\_ph} \quad \text{if} \quad \sum_{i=1}^m ph_i < th$$

در رابطه (۸)، هر گره با پارامتر  $i$  نمایش داده می‌شود و گراف مورد نظر دارای  $m$  گره است. پارامتر  $\text{initial\_ph}$  همان میزان فرومون اولیه است که در ابتدای اجرای الگوریتم به هر یک از ترم‌ها منتسب می‌شود.  $th$  نیز حد آستانه‌ای است که مقدار ثابتی دارد و برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم تنظیم شده است و  $ph_i$  میزان فرومون موجود در گره  $i$ ام را نشان می‌دهد.  $\sum_{i=1}^m ph_i$  نشان‌دهنده مجموع فرومون‌های موجود روی کلیه گره‌های گراف است.

### ۳- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، مدل توابع کسری با مخرج‌های نامساوی که دارای ۷۸ پارامتر مجهول است و حل مستقیم با استفاده از سناریوی زمین وابسته به‌ازای تعداد متفاوتی نقاط کنترل و نقاط چک مستقل و سه سیستم مختصات UTM، CT و ژئودتیک روی مجموعه داده‌های معرفی شده در جدول ۱ پیاده‌سازی شد. به‌منظور ارزیابی قابلیت‌های الگوریتم کلونی مورچه‌های ویژه‌سازی شده در حل مشکلات عددی حل دستگاه معادلات، مختصات‌های تصویری و زمینی بدون نرمال‌سازی به کار گرفته شدند. دقت‌های ارائه شده در این بخش، در فضای تصویر و برای نقاط چک مستقل‌اند. جدول ۲ پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم کلونی مورچه‌های ویژه‌سازی شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۳ نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم ACO را برای محصول Level 1A سکوی SPOT نشان می‌دهد.

افزون‌براین ترتیبی اتخاذ شد که هنگام کشف یک مسیر بهتر در حین اجرای الگوریتم، مقداری فرومون اضافی متناسب با شایستگی مسیر یافته شده به آن مسیر اختصاص پیدا کند و از سایر مسیرها نیز علاوه‌بر تبخیر کلی مقداری تبخیر فرومون صورت پذیرد. بدین ترتیب از بهترین مسیر یافت شده تا کنون، بیش از سایر مسیرها حمایت می‌شود.

### ۲-۲-۳- حدود فرومون مسیر

به‌منظور جلوگیری از همگرایی زودرس جست‌وجو، در پژوهش حاضر برای مقادیر فرومون‌ها حدود بالا و پایین  $(ph_{min}, ph_{max})$  در نظر گرفته شد. زیرا در صورت محدودنبودن میزان فرومون‌ها پس از مدتی تعدادی ترم‌های با فرومون بزرگ‌تر از یک و تعدادی هم ترم‌های با فرومون کوچک‌تر از صفر خواهیم داشت، که به ترتیب سبب انتخاب قطعی و عدم انتخاب قطعی ترم‌های مرتبط به وسیله الگوریتم خواهد شد و همگرایی زودرس را به دنبال خواهد داشت. با اتخاذ این استراتژی، هیچ یک از ترم‌ها برای همیشه دارای حضور یا عدم حضور قطعی نمی‌شوند و سطح اکتشافی الگوریتم به خوبی حفظ خواهد شد.

### ۲-۲-۴- مقداردهی مجدد فرومون مسیر

در پژوهش حاضر، به‌منظور اکتشاف بیشتر مسیرهایی که دارای احتمال کوچکی برای انتخاب هستند، از مقداردهی مجدد فرومون‌های مسیر استفاده شد. هنگامی که الگوریتم به واگرایی نزدیک شود، یعنی زمانی که برای یک تعداد تکرار معین از تکرارهای الگوریتم هیچ مسیر بهبودیافته‌ای پیدا نشود، به کلیه گره‌های گراف همان میزان فرومون اولیه اختصاص پیدا می‌کند. واگرایی الگوریتم با قراردادن آماره‌هایی روی میزان فرومون موجود روی ترم‌ها تشخیص داده می‌شود. بدین شکل که اگر مجموع فرومون موجود روی کلیه ترم‌ها از حد آستانه‌ای کوچک‌تر شود، به

## امین باغانی و همکاران

جدول ۲. پارامترهای تنظیمی الگوریتم کلونی مورچه‌ها در این تحقیق

initial ph	q.(۰)	$\rho$	ph <sub>max</sub>	ph <sub>min</sub>
۰/۶۲۵	۰/۲	۰/۰۰۰۳۸	۰/۹۵	۰/۰۵

جدول ۳. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه‌ها روی تصویر SPOT L1A

سیستم مختصات زمینی	تعداد نقاط کنترل & تعداد نقاط چک (از چپ به راست)	خطای RMSE نقاط چک (پیکسل)			تعداد ضرائب حاضر $\Delta r$		تعداد ضرائب حاضر $\Delta c$		زمان اجرا (ثانیه)	تعداد تکرار
		$\Delta r$	$\Delta c$	$\Delta$	صورت	مخرج	صورت	مخرج		
UTM	۴ & ۲۴	۰/۵۸۵	۱/۶۳۲	۱/۷۳۴	۳	۱	۴	۰	۳۷	۱۰۱۷۸
	۵ & ۲۳	۰/۵۵۷	۰/۴۲۴	۰/۷	۳	۲	۵	۰	۳۵	۹۵۹۸
	۶ & ۲۲	۰/۴۰۸	۰/۴۴۹	۰/۶۰۷	۴	۲	۵	۰	۱۹	۵۱۵۴
	۱۰ & ۱۴	۰/۴۱۶	۰/۳۸۷	۰/۵۷۶	۶	۲	۴	۲	۵	۱۲۵۱
	۱۴ & ۱۴	۰/۴۴۶	۰/۳۴۵	۰/۵۶۴	۶	۲	۶	۳	۴	۹۷۸
CT	۴ & ۲۴	۰/۴۴۸	۰/۴۵۳	۰/۶۳۷	۳	۱	۳	۱	۴	۹۷۵
	۵ & ۲۳	۰/۴۵۱	۰/۴۲۵	۰/۶۱۷	۳	۲	۳	۲	۲	۶۵۸
	۶ & ۲۲	۰/۴۴۲	۰/۴۱۹	۰/۶۰۹	۳	۳	۳	۲	۲	۵۷۸
	۱۰ & ۱۴	۰/۴۸۹	۰/۳۸۱	۰/۶۲	۳	۲	۴	۱	۲	۵۱۲
	۱۴ & ۱۴	۰/۴۲۸	۰/۳۲۹	۰/۴۹	۴	۴	۵	۱	۲	۴۵۳
Geodetic	۴ & ۲۴	۰/۴۹۳	۳/۵۵	۳/۵۸۴	۳	۰	۳	۱	۴۲	۱۱۵۸۴
	۵ & ۲۳	۰/۵۳۳	۰/۵۰۲	۰/۷۳۲	۴	۰	۴	۱	۳۲	۸۷۹۵
	۶ & ۲۲	۰/۴۴۵	۰/۴۱۹	۰/۶۱۱	۳	۳	۵	۱	۴	۱۰۰۵
	۱۰ & ۱۴	۰/۴۱۲	۰/۴۲۴	۰/۵۹۱	۴	۴	۵	۴	۳	۸۹۵
	۱۴ & ۱۴	۰/۴۰۸	۰/۳۹۲	۰/۵۰۲	۶	۵	۵	۲	۳	۸۲۵

جدول ۴. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه‌ها را برای محصول L1B سکوی SPOT نشان می‌دهد.

جدول ۴. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه‌ها روی تصویر SPOT L1B

مخته	تعداد نقاط کنترل & تعداد نقاط چک (از چپ به راست)	خطای RMSE نقاط چک (پیکسل)			تعداد ضرائب حاضر $\Delta r$		تعداد ضرائب حاضر $\Delta c$		زمان اجرا (ثانیه)	تعداد تکرار
		$\Delta r$	$\Delta c$	$\Delta$	صورت	مخرج	صورت	مخرج		
۱	۴ & ۲۴	۰/۵۸۱	۰/۶۹۳	۰/۹۰۴	۳	۰	۴	۰	۳۷	۱۰۱۵۸
	۵ & ۲۳	۰/۵۴۷	۰/۶۶۶	۰/۸۶۲	۳	۱	۴	۱	۲۱	۵۶۹۵
	۶ & ۲۲	۰/۵۳۱	۰/۴۶۵	۰/۷۰۵	۴	۱	۴	۰	۶	۱۵۲۲
	۱۰ & ۱۴	۰/۵۲۸	۰/۳۲۹	۰/۶۳۱	۷	۱	۶	۱	۲	۵۸۱
	۱۴ & ۱۴	۰/۵۳۷	۰/۲۰۱	۰/۵۷۳	۷	۳	۵	۲	۲	۴۸۷
۲	۴ & ۲۴	۰/۵۸۹	۰/۵۵	۰/۸۰۶	۳	۲	۳	۱	۷	۱۹۵۲
	۵ & ۲۳	۰/۵۸۴	۰/۵۴۲	۰/۷۹۷	۳	۲	۳	۱	۴	۹۸۸
	۶ & ۲۲	۰/۵۳۸	۰/۳۵۷	۰/۶۴۶	۴	۱	۴	۱	۲	۶۸۷
	۱۰ & ۱۴	۰/۵۱۴	۰/۳۴۱	۰/۶۱۷	۴	۲	۵	۱	۱	۴۰۸
	۱۴ & ۱۴	۰/۵۵۷	۰/۳۲۶	۰/۶۴۵	۴	۲	۴	۲	۱	۳۹۵
۳	۴ & ۲۴	۰/۵۵۱	۰/۸۵۷	۱/۰۱۹	۳	۰	۴	۰	۴۱	۱۱۱۵۸
	۵ & ۲۳	۰/۴۷۹	۰/۵۴۸	۰/۷۲۷	۳	۱	۴	۱	۱۷	۴۷۸۵
	۶ & ۲۲	۰/۵۴	۰/۴۱۶	۰/۶۸۲	۳	۲	۴	۰	۳	۷۸۵
	۱۰ & ۱۴	۰/۵۴۱	۰/۲۵۵	۰/۵۹۸	۴	۲	۶	۲	۳	۸۸۱
	۱۴ & ۱۴	۰/۵۲۲	۰/۲۳	۰/۵۷	۵	۱	۵	۱	۱	۳۵۹

جدول ۵. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه‌ها را برای تصویر IKONOS نشان می‌دهد.

تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از توابع کسری بهینه‌سازی شده به وسیله الگوریتم کلونی مورچه‌ها

جدول ۵. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه‌ها روی تصویر IKONOS

سیستم مختصات زمینی	تعداد نقاط کنترل & تعداد نقاط چک (از چپ به راست)	خطای RMSE نقاط چک (پیکسل)			تعداد ضرائب حاضر $\Delta r$		تعداد ضرائب حاضر $\Delta c$		زمان اجرا (ثانیه)	تعداد تکرار
		$\Delta r$	$\Delta c$	$\Delta$	صورت	مخرج	صورت	مخرج		
UTM	۴ & ۲۴	۰/۵۹۲	۰/۵۲۴	۰/۷۹۱	۴	۰	۳	۱	۳	۶۵۱
	۵ & ۲۳	۰/۵۲۲	۰/۵۷۵	۰/۷۷۷	۴	۱	۴	۱	۲	۲۵۸
	۶ & ۲۲	۰/۴۴۸	۰/۵۸۴	۰/۷۳۶	۵	۱	۴	۲	۲	۱۵۲
	۱۰ & ۱۴	۰/۴۰۶	۰/۴۸۹	۰/۶۳۶	۵	۱	۵	۲	۱	۹۸
	۱۴ & ۱۴	۰/۴۰۷	۰/۴۹۹	۰/۶۴۴	۶	۲	۶	۲	۱	۶۹
CT	۴ & ۲۴	۰/۵۲	۰/۵۶۳	۰/۷۶۶	۳	۰	۳	۱	۳	۵۴۵
	۵ & ۲۳	۰/۴۹۴	۰/۵۶۲	۰/۷۴۸	۴	۰	۳	۱	۲	۲۰۱
	۶ & ۲۲	۰/۴۶۳	۰/۶۰۱	۰/۷۵۹	۴	۰	۴	۱	۱	۱۲۴
	۱۰ & ۱۴	۰/۴۸۶	۰/۵۲۵	۰/۷۱۵	۴	۰	۴	۱	۲	۱۵۴
	۱۴ & ۱۴	۰/۴۴۱	۰/۵۱۵	۰/۶۷۸	۴	۰	۴	۰	۱	۶۶
Geodetic	۴ & ۲۴	۰/۶۷۲	۰/۶۵۹	۰/۹۴۱	۴	۰	۴	۰	۳	۴۵۱
	۵ & ۲۳	۰/۵۰۶	۰/۵۸۲	۰/۷۷۱	۴	۱	۵	۰	۳	۴۵۵
	۶ & ۲۲	۰/۵۰۲	۰/۵۸۴	۰/۷۷	۶	۰	۴	۱	۱	۷۲
	۱۰ & ۱۴	۰/۴۵۱	۰/۴۹	۰/۶۶۶	۶	۰	۴	۲	۱	۵۶
	۱۴ & ۱۴	۰/۴۱۹	۰/۴۹۵	۰/۶۴۹	۵	۲	۴	۲	۱	۶۳

مذکور به آن پرداخته نشده است، نشان می‌دهد. از دیگر دستاوردهای پژوهش حاضر، برقراری ارتباط میان فضای تصویر و زمین با حداقل تعداد نقاط کنترل است. از آنجاکه توابع کسری بهینه تعداد نرم‌های کمی در ساختار خود دارند، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز نیز در آنها کاهش می‌یابد.

جدول ۶ دقت‌های به‌دست‌آمده در پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در تحقیق ولدان زوج و همکاران (۲۰۰۷) را نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم ویژه‌سازی شده ژنتیک

خطای RMSE	تعداد نقاط کنترل & تعداد نقاط چک (از چپ به راست)	
	تعداد نقاط کنترل	تعداد نقاط چک
۰/۷۴۲	۱۹	۳۵ &
۰/۹۵۳	۲۷	۲۰ &
۰/۸	۳۲	۱۰ & IKONOS
۰/۷۷۴	۳۳	۷ &
۰/۷۷۵	۳۵	۵ &

منبع: Valadan Zoej et al., 2007

جدول ۷ دقت‌های به‌دست‌آمده در پیاده‌سازی الگوریتم ویژه‌سازی شده PSO در تحقیق یاور و همکاران (۲۰۱۳) را نشان می‌دهد.

در جدول‌های ۳، ۴ و ۵، پارامترهای  $\Delta r$ ،  $\Delta c$  و  $\Delta$  به ترتیب نشان‌دهنده خطا در راستای سطر تصویر، ستون تصویر و خطای مجموع هستند. این جدول‌ها نشان می‌دهند که الگوریتم ارائه‌شده در هر سه تصویر استفاده‌شده در پژوهش حاضر با تعداد نقاط کنترل پایین - حتی چهار نقطه کنترل - و بدون نرمال کردن مختصات، توانسته است به دقت زیرپیکسل دست پیدا کند. افزایش تعداد نقاط کنترل بیش از پنج نقطه تأثیر چندانی بر دقت مدل‌های بهینه نداشت و حتی با استفاده از چهار نقطه کنترل نیز دقت زیرپیکسل حاصل شد. دستیابی به دقت‌های زیرپیکسل در تصویر خام که هیچ‌گونه تصحیح هندسی ندارد، یکی از دستاوردهای مهم پژوهش حاضر است. در دو تحقیق ولدان زوج و همکاران (۲۰۰۷) و یاور و همکاران (۲۰۱۳) که به‌طور مشخص به بهینه‌سازی توابع کسری پرداخته‌اند، اصلاً از تصاویر خام استفاده نشده و فقط تصاویری که یک سطح تصحیح هندسی دارند، بررسی شده‌اند. بدیهی است یافتن ترکیب مناسب توابع کسری با حداقل تعداد ترم‌ها در تصاویر خام بسیار دشوارتر از تصاویر تصحیح هندسی شده است. این مسئله به‌خوبی قابلیت بالای الگوریتم ارائه‌شده در تحقیق حاضر را که در دو الگوریتم بهینه‌سازی ارائه‌شده در تحقیقات

می توان تعداد نقاط کنترل را با حفظ دقت در حد زیرپیکسل، تا حتی چهار نقطه کنترل برای کل تصویر کاهش داد. استفاده از تصویر خام در پژوهش حاضر نشان دهنده این است که الگوریتم قدرت کافی برای یافتن بهترین ترکیب بهینه در تصاویر پیچیده و دارای انواع اعوجاجات را دارد.

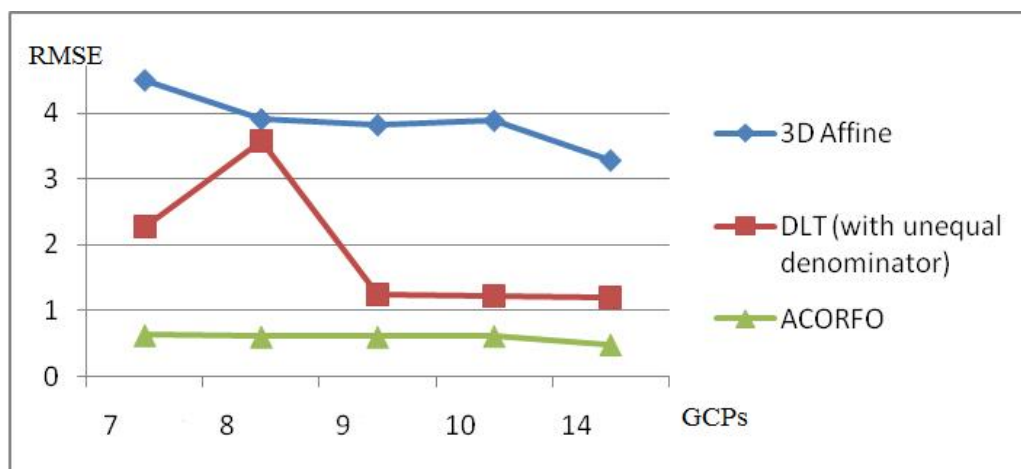
شکل ۴ مقایسه توابع کسری بهینه شده به وسیله الگوریتم ارائه شده در این تحقیق را با دو مدل غیر پارامتریک پر کاربرد در فتوگرامتری که روی تصویر SPOT L1A پیاده سازی شد، نشان می دهد. نتایج مقایسه توابع بهینه الگوریتم ارائه شده در تحقیق حاضر با مدل افاین سه بعدی و تبدیل مستقیم خطی با مخرج های نامساوی پیاده سازی شده روی داده های استفاده شده در تحقیق حاضر، دقت های بالاتر توابع کسری با ساختار بهینه را در مقایسه با آنها نشان می دهد. به دلیل بالاتر بودن تعداد پارامترهای مدل تبدیل مستقیم خطی با مخرج های نامساوی، حداقل تعداد نقاط کنترل قابل استفاده در این مدل ریاضی، هفت نقطه است، در حالی که با استفاده از الگوریتم ارائه شده در این پژوهش، دستیابی به دقت زیرپیکسل حتی با استفاده از چهار نقطه کنترل ممکن شد.

جدول ۷. نتایج پیاده سازی الگوریتم ویژه سازی شده PSO

خطای RMSE	تعداد نقاط کنترل & تعداد نقاط چک (از چپ به راست)	
	۰/۱۶	۳۰ & ۲۸
۰/۱۶۶	۱۰ & ۴۸	
۰/۱۷۳	۵ & ۵۳	
۰/۱۸۹	۴ & ۵۴	
۱/۰۲	۳۰ & ۲۸	SPOT L1B
۱/۴۸	۱۰ & ۴۸	
۱/۸۴	۵ & ۵۳	
۲/۴۸	۴ & ۵۴	

منبع: Yavari et al., 2013

در دو تحقیق یاوری و همکاران (۲۰۱۳) و ولدان زوج و همکاران (۲۰۰۷) از تصاویر خام که اعوجاجات آنها به مراتب بیش از محصول Geo سنجنده IKONOS و محصول L1B از سنجنده SPOT هستند، استفاده نشده است. مقایسه جدول های ۳ تا ۷ نشان می دهد که الگوریتم ارائه شده در تحقیق حاضر، به خصوص هنگامی که از تعداد نقاط کنترل کمتری استفاده می کنند، در مقایسه با دو الگوریتم تحقیق های پیشین دقت بالاتری دارد. بدین ترتیب با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه های ویژه سازی شده در مطالعه حاضر،



شکل ۴. مقایسه میان مدل های افاین سه بعدی و تبدیل مستقیم خطی و تابع بهینه الگوریتم کلونی مورچه ها در تصویر SPOT L1A

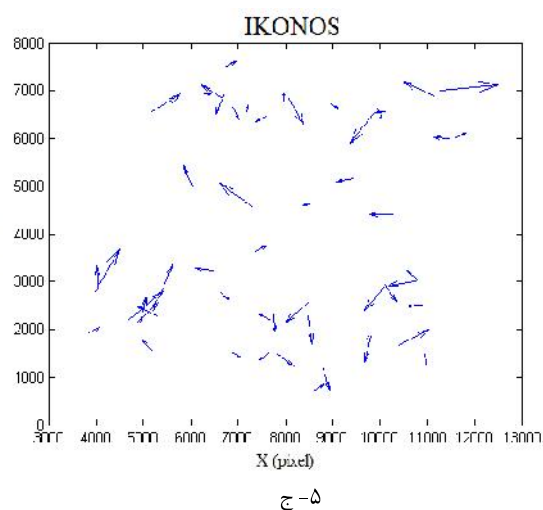
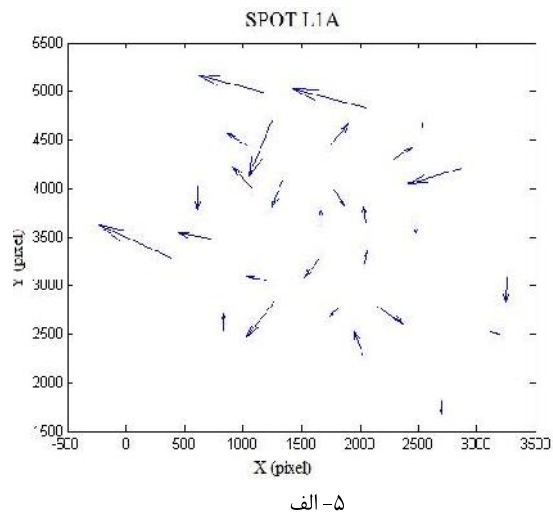
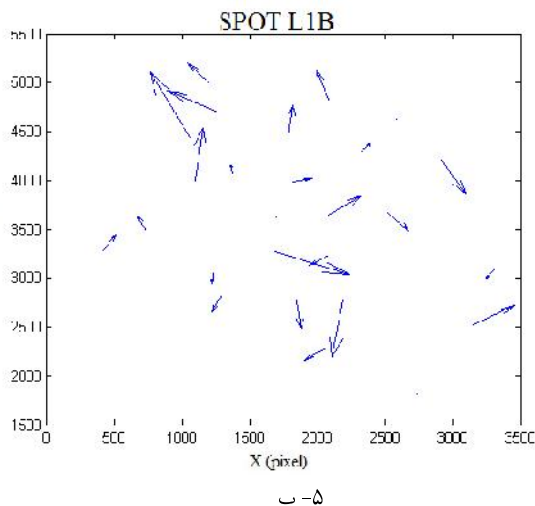


## تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از توابع کسری بهینه‌سازی شده به وسیله الگوریتم کلونی مورچه‌ها

به دست آمد و سایر تحقیقات نیز وضعیت مشابهی دارند. لازم به ذکر است که مطالعات مذکور هیچ کدام اقدام به انتخاب ترم‌های بهینه نکردند و روی توابع کسری معمولی و مرسوم پیاده‌سازی شدند و مجموعه داده‌های به کار گرفته شده نیز با تحقیق حاضر کاملاً یکسان نیست.

به منظور بررسی توانایی الگوریتم در حذف خطاهای سیستماتیک موجود در تصویر، بردار خطاهای هر سه تصویر آزمون شده در مطالعه حاضر در شرایطی که از پنج نقطه کنترل استفاده شده است، ترسیم شد.

مقایسه دقت‌های ارائه شده در جدول‌های ۳ و ۴ و ۵ در پژوهش حاضر با تحقیقات پیشین روی توابع کسری مرسوم، نظیر تحقیق‌های تائو و هو (۲۰۰۱)، تائو و هو (۲۰۰۱b)، توتین (۲۰۰۴)، فراسر و همکاران (۲۰۰۶)، حبیب و همکاران (۲۰۰۷) و دیگران نشان می‌دهد که از نظر افزایش دقت و کاهش نقاط کنترل مورد نیاز، بهبود زیادی در الگوریتم ارائه شده در مطالعه حاضر حاصل شده است. به عنوان مثال در پژوهش تائو و هو (۲۰۰۱) با استفاده از ۷۱ نقطه کنترل زمینی برای تصویر سنجنده SPOT، دقت حدود ۱/۵ پیکسل



شکل ۵. الف) بردار خطاهای الگوریتم کلونی مورچه‌ها روی محصول L1A سکوی SPOT با ۵ نقطه کنترل

ب) بردار خطاهای الگوریتم کلونی مورچه‌ها روی محصول L1B سکوی SPOT با ۵ نقطه کنترل

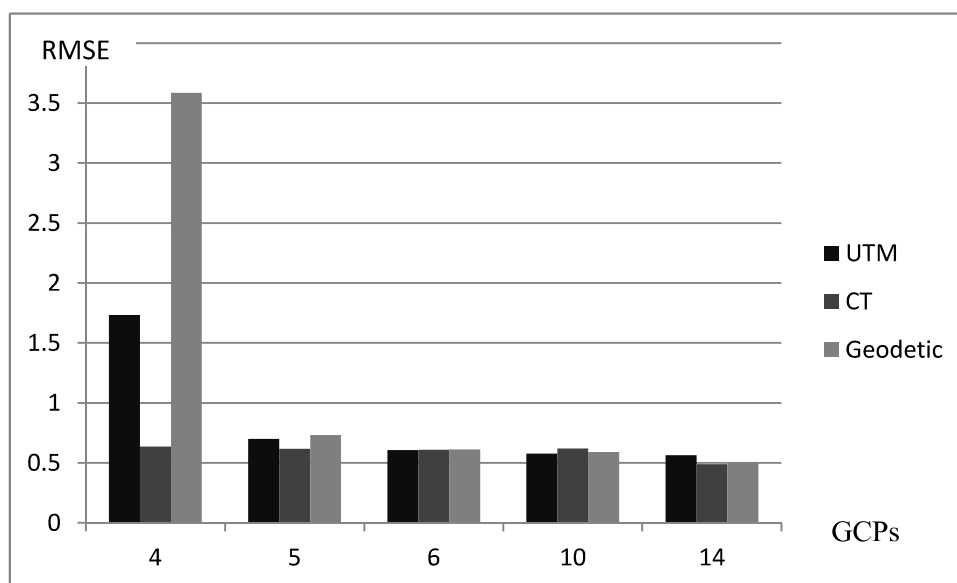
ج) بردار خطاهای الگوریتم کلونی مورچه‌ها روی تصویر IKONOS

کنترل پایین تری استفاده می‌شود. همچنین تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به همگرایی در سیستم مختصات CT از دو سیستم مختصات دیگر پایین تر است و نشان از زیادتر بودن ترکیب‌های بهینه در سیستم مختصات CT دارد. معمولاً با افزایش تعداد نقاط کنترل در دو سیستم مختصات UTM و ژئودتیک، تعداد ترم‌های مورد استفاده در تابع کسری بهینه انتخاب شده افزایش می‌یابد. در مورد سیستم مختصات CT با افزایش تعداد نقاط کنترل، مدل تمایلی به افزایش تعداد پارامترهای خود ندارد، زیرا با در نظر گرفتن سیستم مختصات صفحه‌ای نظیر UTM، مدل مرتبط حتماً بایستی توانایی حذف یا کاهش خطای انحنای زمین را به خوبی داشته باشد. اما هنگامی که از سیستم مختصات CT استفاده می‌شود، دیگر نیازی نیست اثر انحنای زمین نیز به وسیله پارامترهایی در مدل گنجانده شود و خطای انحنای زمین به صورت خودکار حذف خواهد شد. بنابراین به نظر می‌رسد سیستم مختصات بهینه به منظور بهینه‌سازی انتخاب ترم‌ها، از لحاظ دقت و تعداد تکرارهای مورد نیاز، سیستم مختصات CT باشد.

شکل‌های (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج) نشان می‌دهند که الگوریتم کلونی مورچه‌ها ویژه‌سازی شده، توانایی حذف خطاهای سیستماتیک از تصاویر مورد آزمون در تحقیق حاضر را دارد، زیرا رفتار خطاها دارای شکلی تصادفی و غیرسیستماتیک است.

هرچند در این مقاله نمی‌توان نتایج تمامی آزمون‌ها را نمایش داد، اما با توجه به تعداد تکرارهای همگرایی الگوریتم در حالت‌های مختلف در جداول ۳، ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که در تصاویر SPOT L1B و IKONOS تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به همگرایی کمتر از تصویر SPOT L1A است، زیرا در SPOT L1B و IKONOS که سطح تصحیح هندسی قبلی دارند، بسیاری از پیچیدگی‌های هندسی حذف شده‌اند و در آنها راحت‌تر می‌توان به ترکیبی بهینه از ترم‌ها دست یافت. در این تصاویر همگرایی به ترم‌های بهینه آسان‌تر از تصویر خام SPOT L1A انجام می‌شود و به تعداد تکرارهای کمتری برای رسیدن به همگرایی نیاز است.

نتایج نشان دادند که سیستم مختصات CT دقت نسبتاً بالاتری از دو سیستم مختصات دیگر بررسی شده در تحقیق حاضر دارند، به‌ویژه هنگامی که از تعداد نقاط



شکل ۶. مقایسه میان دقت مدل‌های بهینه در تصاویر، سیستم‌های مختصات و تعداد نقاط کنترل متفاوت

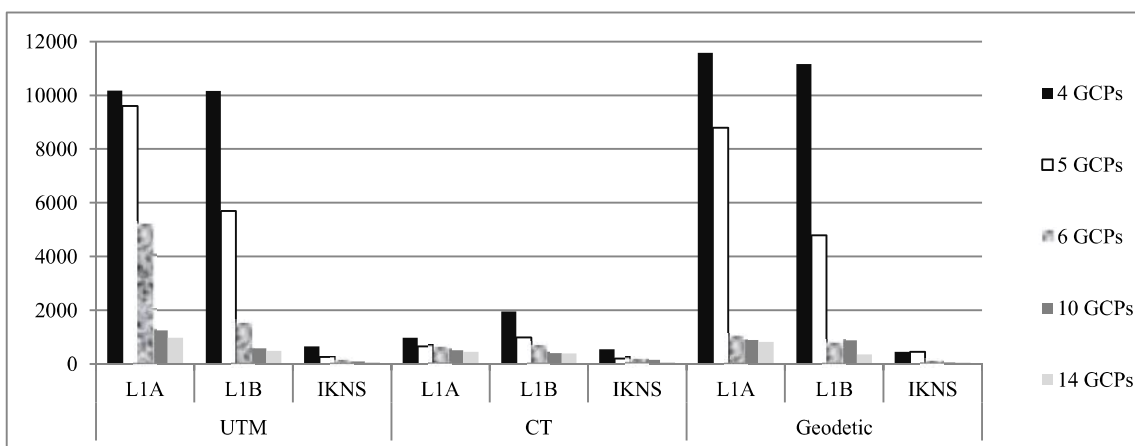
## تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از توابع کسری بهینه‌سازی شده به وسیله الگوریتم کلونی مورچه‌ها

نیاز در این سیستم مختصات به خوبی کاهش می‌یابد. یکی دیگر از دستاوردهای مهم پژوهش حاضر، دستیابی به سرعت‌های بالا در یافتن ترم‌های بهینه ساختار توابع کسری است. نتایج نشان دادند که با بهره‌گیری از سیستم مختصات زمینی CT، سرعت‌های به مراتب بالاتری در یافتن یک بهینه سرتاسری برای مدل توابع کسری به دست می‌آید. نتایج تحقیق یآوری و همکاران (۲۰۱۳) که به مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و PSO پرداخته است، نشان می‌دهند که اگرچه سرعت الگوریتم PSO تقریباً بالاتر از الگوریتم ژنتیک است، هنوز هم از لحاظ زمان اجرا بسیار زمان‌بر است. با آنکه تمامی شرایط مطالعه حاضر و مقاله یآوری و همکاران (۲۰۱۳) یکسان نیست، اما انجام مقایسه ساده‌ای میان زمان اجرای الگوریتم PSO و زمان اجرای الگوریتم کلونی مورچه‌های ویژه‌سازی شده در این پژوهش حاضر که هر دو روی تصویر IKONOS شهر همدان پیاده‌سازی شدند، نشان می‌دهد که الگوریتم کلونی مورچه‌ها از لحاظ زمان اجرایی بسیار موفقیت‌آمیز بوده است. شکل ۸ این مقایسه را نشان می‌دهد.

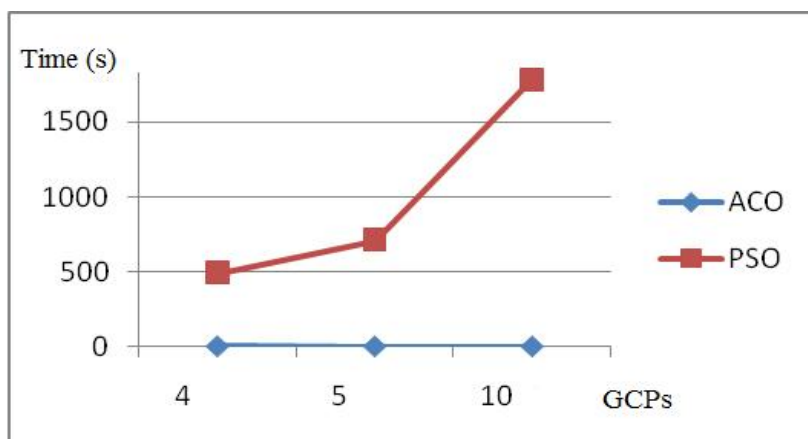
شکل ۶ مقایسه‌ای میان دقت مدل‌های بهینه‌سازی سیستم‌های مختصات زمینی مختلف و به‌ازای تعداد نقاط کنترل متفاوت را نشان می‌دهد. طبق نمودارها، سیستم مختصات CT دقت به مراتب بالاتری را در مقایسه با دو سیستم مختصات دیگر نشان می‌دهند و تطابق بهتر این سیستم مختصات را با توابع کسری در مقایسه با دو سیستم مختصات دیگر بیان می‌کنند.

شکل ۷ مقایسه‌ای از تعداد تکرارهای لازم را برای رسیدن به همگرایی در حالت‌های مختلف و داده‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر نشان می‌دهد.

در شکل ۷، محور طول‌ها به ترتیب از چپ به راست تصاویر SPOT L1A، SPOT L1B و IKONOS را در سه سیستم مختصات استفاده‌شده در مطالعه حاضر نشان می‌دهد و محور عرض‌ها تعداد تکرارهای همگرایی را. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مشکل تعداد تکرارهای لازم برای یافتن بهینه سراسری و در نتیجه زمان طولانی اجرای الگوریتم بیشتر زمانی رخ می‌دهد که از تعداد نقاط کنترل کمتری استفاده می‌شود. این مشکل با استفاده از سیستم مختصات CT به طور کامل حل می‌شود و تعداد تکرارها و زمان مورد



شکل ۷. مقایسه میان تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به همگرایی در تصاویر، سیستم‌های مختصات و تعداد نقاط کنترل متفاوت



شکل ۸. مقایسه میان زمان اجرای الگوریتم PSO در مقاله یوری و همکاران (۲۰۱۳) و الگوریتم کلونی مورچه‌های ویژه‌سازی شده در پژوهش حاضر روی تصویر IKONOS شهر همدان (برحسب ثانیه)

در سیستم مختصات CT، برخلاف دو سیستم مختصات دیگر به کار گرفته شده در تحقیق حاضر، با افزایش تعداد نقاط کنترل، مدل‌های بهینه تمایلی به افزایش تعداد پارامترهای خود ندارند. نتایج نشان می‌دهند که سیستم مختصات بهینه برای به کارگیری در بهینه‌سازی انتخاب ترم‌ها، سیستم مختصات CT است، چراکه مدل‌های بهینه در آن هم از لحاظ دقت به دو سیستم مختصات دیگر مزیت دارد و هم از لحاظ سرعت و تعداد تکرارهای مورد نیاز برای همگرایی به مدل بهینه قابلیت‌های بهتری دارد.

#### ۵- منابع

قصری ک، سرحدی، ح.، ۱۳۸۸، یافتن کوتاه‌ترین تور همیلتونی ایران با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های سیستم اجتماع مورچه‌ها و جست‌وجوی محلی، پژوهشنامه حمل‌ونقل، سال ششم، شماره دوم، صص. ۱۶۱-۱۴۹.

Chen, L.C., Teo, T.A., Liu, C.L., 2006, **The Geometrical Comparisons of RSM and RFM for FORMOSAT-2 Satellite Images**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72 (5), PP. 573-579.

با در اختیار داشتن سرعت‌های بالا در انتخاب ترم‌های بهینه مدل توابع کسری برای هر تصویر می‌توان مسئله بهینه‌سازی انتخاب ترم‌ها را به زوج تصویر در بازسازی سه‌بعدی زمین و حتی بلوک‌های فتوگرامتری تسری داد. این توفیق گامی است به سوی فتوگرامتری آنی که در آن پردازش‌های آنی فتوگرامتری با حفظ دقت مورد نیاز، دغدغه اصلی پژوهشگران است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، الگوریتم کلونی مورچه‌ها به منظور انتخاب ترم‌های بهینه توابع کسری ویژه‌سازی شد و روی مجموعه‌ای از تصاویر و سیستم‌های مختصات زمینی مختلف استفاده شد. دستیابی به دقت زیرپیکسل با استفاده از حتی چهار نقطه کنترل نشان داد که افزون بر دستیابی به بالاترین دقت‌ها حتی در تصاویر خام، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز نیز آشکارا کاهش یافته است. بردارهای خطای ترسیم شده برای هر سه تصویر نشان دادند که الگوریتم کلونی مورچه‌ها به خوبی خطاهای سیستماتیک را از تصاویر مذکور حذف کرده است. از دیگر دستاوردهای مهم پژوهش حاضر، سرعت بالای آن در مقایسه با الگوریتم‌های تحقیقات پیشین است.

- Dorigo, M., Di Caro, G., 1999a, **Ant Colony Optimization: A new meta-heuristic**, Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC'99), Piscataway, NJ, IEEE Press, PP. 1470–1477.
- Fraser, C.S., Dial, G., Grodecki, J., 2006, **Sensor Orientation via RFMs**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 72(3), PP. 182–194.
- Fraser, C.S., Hanley, H.B., 2003, **Bias Compensation in Rational Functions for IKONOS Satellite Imagery**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69, PP. 53–57.
- Fraser, C.S., Hanley, H.B., 2005, **Bias-compensated RFMs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71(8), PP. 909–915.
- Fraser, C.S., Ravanbakhsh, M., 2009, **Georeferencing Accuracy of GEOEYE-1 Imagery**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 75(6), PP. 634–638.
- Grodecki, J., Dial, G., 2003, **Block Adjustment of High-resolution Satellite Images Described by Rational Functions**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(1), PP. 59–68.
- Habib, A., Kim, K., Shin, S.W., Kim, C., Bang, K.I., Kim, E.M., Lee, D.C., 2007, **Comprehensive Analysis of Sensor Modeling Alternatives for High-resolution Imaging Satellites**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 73(11), PP. 1241–1251.
- Hu, Y., Tao, C.V., 2002, **Updating Solutions of the Rational Function Model Using Additional Control Information**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68(7), PP. 715–724.
- Li, R., Zhou, F., Niu, X., Di, K., 2007, **Integration of IKONOS and QUICKBIRD Imagery for Geopositioning Accuracy Analysis**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73(9), PP. 1067–1074.
- Puatanachokchai, C., Mikhail, E.M., 2008, **Adjustability and Error Propagation for True Replacement Sensor Models**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(3), PP. 352–364.
- Tao, C.V., Hu, Y., 2001, **A Comprehensive Study of the Rational Function Model Photogrammetric Processing**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67 (12), PP. 1347–1357.
- Tao, C.V., Hu, Y., 2001b, **Use of Rational Function Model for Image Rectification**, Canadian Journal of Remote Sensing, 27(6), PP. 593–602.
- Tao, C.V., Hu, Y., 2002, **3D Construction Methods based on the Rational Function Model**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68 (7), PP. 705–714.
- Tao, C.V., Hu, Y., Jiang, W., 2004, **Photogrammetric Exploitation of IKONOS Imagery for Mapping Applications**, International Journal of Remote Sensing, 25(14), PP. 2833–2853.

- Tong, X., Liu, S., Weng, Q., 2010, **Bias-corrected Rational Polynomial Coefficients for High Accuracy Geopositioning of QUICKBIRD Stereo Imagery**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(2), PP. 218–226.
- Toutin, T., 2004, **Review Article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods**, International Journal of Remote Sensing, 25(10), PP. 1893-1924.
- Toutin, T., 2006, **Comparison of 3D Physical and Empirical Models for Generating DSMs from Stereo HR Images**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72 (5), PP. 597–604.
- Valadan Zoej, M.J., Mokhtarzadeh, M., Mansourian, A., Ebadi, H., Sadeghian, S., 2007, **Rational Function Optimization using Genetic Algorithms**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9(4), PP. 403–413.
- Xiong, Z., Zhang, Y., 2009, **A Generic Method for RFM Refinement using Ground Control Information**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 75(9), PP. 1083–1092.
- Yavari, S., Valadan Zoej, M.J., Mohammadzadeh, M., Mokhtarzade, M., 2013, **Particle Swarm Optimization of RFM for Georeferencing of Satellite Images**, Geoscience and Remote Sensing Letters, 10(1), PP. 135-139.
- Zhang, L., He, X., Balz, T., Wei, X., Liao, M., 2012, **Rational Function Modeling for Spaceborne SAR Datasets**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(1), PP. 133-145.