

توسعه یک مدل پنجره مجزا به منظور تهیه نقشه دمای سطح زمین از تصاویر فراطیفی حرارتی

رضا اکبری دوتپه سفلی^۱، مهدی آخوندزاده هنزایی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد نقشه‌برداری، سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی -

پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

rezaakbari8888@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

makhonz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۶، تاریخ تصویب تیر ۱۳۹۶)

چکیده

دمای سطح زمین یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در مطالعات مربوط به سطح زمین مانند حفظ منابع طبیعی، تبادل انرژی و آب بین سطح زمین و جو می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق ارائه الگوریتمی جهت تخمین دمای سطح زمین با استفاده از داده‌های طیف سنج حرارتی فراطیفی هوابرد (HYTES) می‌باشد. برای این منظور از الگوریتم پنجره مجزا استفاده می‌شود. این الگوریتم از طریق باندهای بهینه‌ای که توسط الگوریتم ژنتیک از بین ۲۰۲ باند انتخاب می‌شوند دمای سطح زمین را بدست می‌آورد. فرآیند الگوریتم بدین صورت است که ابتدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک باندهای بهینه از بین ۲۰۲ باند انتخاب شده و سپس ضرایب مربوط به الگوریتم پنجره مجزا بدست می‌آید. تعداد ضرایب به تعداد باندهایی که توسط الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شوند بستگی دارد. سپس با استفاده از ضرایب بدست آمده و باندهای انتخابی، دمای سطح زمین برای دو داده‌ی مختلف از طریق الگوریتم پنجره مجزا بدست می‌آیند. در پایان نیز برای ارزیابی نتایج روش پیشنهادی از محصول حرارتی طیف سنج حرارتی فراطیفی هوابرد (HYTES) استفاده می‌شود تا دقت روش پیشنهادی مشخص شود. دمای بدست آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای هر دو داده با داده‌ی مرجع (محصول حرارتی) مورد ارزیابی قرار گرفت که خطای ریشه کمترین مربعات (RMSE) برای داده‌ی اول ۰/۰۲۵ درجه کلون و برای داده‌ی دوم ۰/۹۹۹ درجه کلون را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به خطاهایی که بدست آمد می‌توان گفت الگوریتم پیشنهاد شده برای بدست آوردن دمای سطح زمین از داده‌های طیف سنج حرارتی فراطیفی هوابرد (HYTES) روش مناسبی می‌باشد.

واژگان کلیدی: دمای سطح زمین، روش پنجره مجزا، الگوریتم ژنتیک، طیف سنج حرارتی فراطیفی هوابرد (HYTES)

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

طیف‌سنج حرارتی فرا طیفی هوابرد HYTES (The Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer) از نوع سنجنده های Pushbroom است که تصویر مادون‌قرمز حرارتی در ۲۵۶ باند از ۷/۵ تا ۱۲ میکرومتر تولید می‌کند و دارای توان تفکیک مکانی نسبتاً بالایی می‌باشد (تقریباً ۲ متر در ارتفاع ۱ کیلومتر). این طیف‌سنج پروژه‌ای سازمان فضایی آمریکا و از نوع هوابرد می‌باشد و برای کمک به مأموریت HypsIRI^۱ برای اولین بار در جولای سال ۲۰۱۲ پرتاب شد. داده‌های این سنجنده کاربردهای فراوانی مانند بررسی فعالیت‌های آتشفشانی و به دست آوردن دما و ضریب گسیل با دقت و توان تفکیک مکانی بالا دارند. سنجنده های فرا طیفی حرارتی دیگری نیز مانند SEBASS وجود دارد که دارای ۱۲۸ باند حرارتی می‌باشد ولی وجه تمایز HYTES با این سنجنده ها توان تفکیک طیفی و مکانی بالایی است که دارد و این ویژگی‌ها باعث می‌شود تا بتوان دمای سطح زمین را با دقت بالایی به دست آورد. در این تحقیق هدف ارائه یک الگوریتم پنجره مجزای تعمیم‌یافته است که دما را با استفاده از باندهای بهینه به دست آورد.

دمای سطح زمین یکی از متغیرهای کلیدی در دانش زمین می‌باشد. کاربرد مستقیم و غیرمستقیم دمای سطح زمین در اندازه گیری مشخصه‌های محیطی دیگر، تعیین این مؤلفه را در این دانش اهمیت می‌بخشد [۱]. تصاویر سنجنش‌ازدور به دلیل پوشش وسیع و به هنگام بودن، ابزار مناسبی جهت تهیه نقشه‌ی دمای سطح زمین می‌باشد [۲]. به دست آوردن دمای سطح زمین بر مبنای داده های سنجنش‌ازدور در طیف حرارتی (طول‌موج‌های بلند) مطرح می‌شود. سنجنش‌ازدور حرارتی با اندازه‌گیری رادیانس ساطع‌شده از سطح زمین و پارامترهای اتمسفر برای به دست آوردن دما استفاده می‌شود [۳].

اطلاعات به‌دست‌آمده از دمای سطح زمین می‌تواند اطلاعات مفیدی در زمینه مطالعه پدیده‌های مختلف از جمله تجزیه و تحلیل جزایر حرارتی شهر، تشخیص آنومالی‌های حرارتی مربوط به زلزله، شناسایی منابع زمین‌گرمایی، پایش خشک‌سالی و آتش‌سوزی ارائه دهد [۱].

روش‌های مختلفی برای به دست آوردن دما وجود دارد که روش‌های تک باندی^۲، پنجره مجزا^۳ و جداسازی دما و ضریب گسل (TES)^۴ از بقیه متداول‌تر هستند.

روش تک باندی بر پایه‌ی معادله انتقال تشعشعی می‌باشد. در این روش ضریب گسیل معلوم فرض می‌شود و همچنین به پروفیل‌های اتمسفری نیاز می‌باشد تا دما محاسبه شود. مزیت این روش سادگی آن و قابل‌استفاده بودن برای سنجنده‌هایی فقط با یک باند حرارتی می‌باشد و از معایب آن می‌توان به نیاز داشتن به ضریب گسیل و پروفیل‌های اتمسفری دقیق اشاره کرد. این روش اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط Price به کار گرفته شد [۴].

روش پنجره مجزا برای به دست آوردن دما از دو باند مجاور استفاده می‌کند. تلفیق دو باند مجاور حرارتی باعث کاهش اثرات اتمسفری می‌شود. این روش برای سنجنده‌هایی با حداقل دو باند حرارتی مناسب می‌باشد. این روش به ضرایب هر مدل که با توجه به منطقه تعیین می‌شود و ضریب گسیل بستگی دارد. این روش اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط Anding و Kauth ارائه شد [۵].

روش سوم روش جداسازی دما و ضریب گسل می‌باشد. در دو روش تک باندی و پنجره مجزا معمولاً ضریب گسیل به‌عنوان پارامتر معلوم فرض می‌شود زیرا محاسبه آن مشکل می‌باشد. ولی در این روش ضریب گسیل هم‌زمان با دما محاسبه می‌شود. الگوریتم جداسازی ضریب گسیل و دما در سال ۱۹۹۸ در گروه سنجنده استر طراحی و توسعه یافت و با اعمال تغییراتی برای سایر سنجنده ها استفاده گردید این الگوریتم درواقع تلفیق سه الگوریتم ضریب گسیل نرمال شده، روش نسبت طیفی و روش گسیل مندی حداقل و حداکثر است. این روش بر پایه ایجاد یک رگرسیون تجربی بین اختلاف ضریب گسیل با ضریب گسیل میانگین پنج باند حرارتی استوار است و با استفاده از تکرار، به‌طور هم‌زمان پارامترهای ضریب گسیل سطح و دمای سطح را تعیین می‌کند [۶].

مطالعات گوناگونی برای به دست آوردن دما از سنجنده های فرا طیفی حرارتی انجام شده است. Sobrino و همکاران با استفاده از داده‌های فراطیفی حرارتی AHS^۵ دمای سطح زمین را با سه روش به دست آوردند [۷]. Xinke zhong و

^۲ Single band

^۳ Split window

^۴ Temperature Emissivity Separation (TES)

^۵ Airborne Hyperspectral Scanner

^۱ Hyperspectral Infrared Imager

شده است. همچنین برای ارزیابی نتایج روش پنجره مجزا نیز از این داده‌ها استفاده شده است. دقت محصولات دمایی این سنجنده بنابر گفته سازمان فضایی آمریکا بالا می‌باشد و از طریق الگوریتم جداسازی دما و ضریب گسیل (TES) به دست آمده است.

۲-۲- داده‌های ضریب گسیل

ضریب گسیل در الگوریتم پنجره مجزا برای به دست آوردن دما لازم می‌باشد که در این تحقیق از مقادیر ضریب گسیل HYTES که دارای دقت بالایی می‌باشد استفاده می‌شود. ضریب گسیل در این سنجنده از طریق روش TES محاسبه شده است. البته ضریب گسیل به دلیل وجود ویژگی‌های جذب بخار آب بالا در محدوده‌ی ۷/۴ تا ۸ میکرومتر فقط در ۲۰۲ باند با دقت بالایی به دست آمده است.

۳- منطقه‌ی مورد مطالعه

در این تحقیق منطقه‌ی مورد مطالعه منطقه‌ای به نام Aliso Canyon در ایالت کالیفرنیا در کشور آمریکا است. داده‌های مربوط به این منطقه شامل دو عکس هستند که به‌صورت نواری هستند که در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. این تصاویر در تاریخ ۱۷ ژانویه ۲۰۱۶ از دو قسمت متفاوت منطقه Aliso Canyon از ارتفاع ۱۷۷۷ متری گرفته شده است. توان تفکیک مکانی این تصاویر ۳/۲۴ متر می‌باشد و در ۲۵۶ باند طیفی مادون قرمز حرارتی اخذ می‌شوند. تصویر اول مورد مطالعه در منطقه Aliso Canyon در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه و ۳۹/۲۴ ثانیه تا ۳۴ درجه و ۱۶ دقیقه و ۲۷/۴۸ ثانیه‌ی شمالی و طول جغرافیایی ۱۱۸ درجه و ۳۵ دقیقه و ۳۱/۲۰ ثانیه تا ۱۱۸ درجه و ۳۵ دقیقه و ۱۶/۸۰ ثانیه‌ی غربی قرار دارد (شکل ۲) و تصویر دومی از این منطقه در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه و ۲۹/۸۸ ثانیه تا ۳۴ درجه و ۱۶ دقیقه و ۱۵/۹۶ ثانیه‌ی شمالی و طول جغرافیایی ۱۱۸ درجه و ۳۳ دقیقه و ۵۷/۶ ثانیه تا ۱۱۸ درجه و ۳۳ دقیقه و ۴۳/۲۰ ثانیه‌ی غربی قرار دارد (شکل ۳).

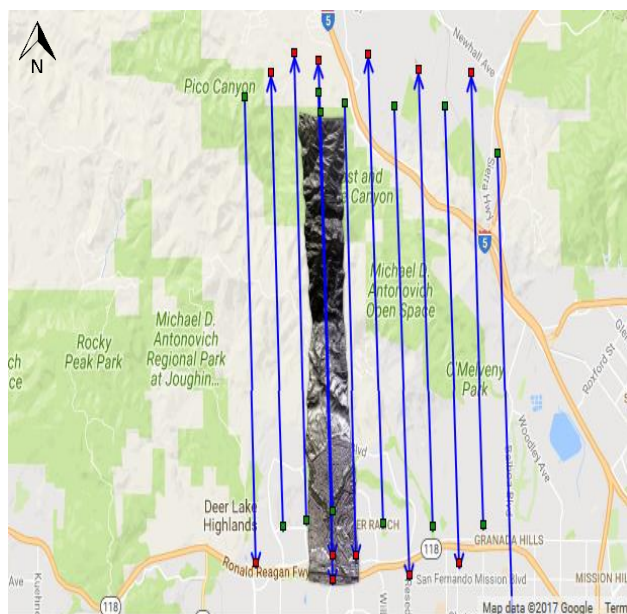
همکاران در سال ۲۰۱۶ برای به دست آوردن دما از داده‌های فراطیفی حرارتی، یک روش Multi-Channel ارائه دادند که از ۳۶ باند برای به دست آوردن دمای سطح زمین طبیعی استفاده کرده و نتایج با محصول حرارتی سنجنده Infrared Atmospheric Sounding Interferometer مورد ارزیابی قرار گرفت [۸]. در سال ۲۰۱۰ Ning Wang و همکاران با استفاده از روش شبکه عصبی Multilayer perceptron دمای سطح زمین را از داده‌های فراطیفی حرارتی به دست آوردند. در این روش ابتدا بر روی داده‌های فراطیفی حرارتی یک تبدیل PCA زده می‌شود تا ابعاد داده کاهش پیدا کند سپس خروجی این تبدیل به‌عنوان ورودی به شبکه عصبی وارد می‌شود و خروجی این شبکه دمای سطح زمین است. این شبکه با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده آموزش می‌بیند. دمای به‌دست‌آمده با این روش با محصول حرارتی سنجنده‌ی Infrared Atmospheric Sounding Interferometer مورد ارزیابی قرار گرفت [۲]. ولی بر روی HYTES مطالعه‌ی قابل‌توجه‌ای انجام نشده است. در این تحقیق با استفاده از تعمیم روش پنجره مجزا دما به دست می‌آید البته ناسا با استفاده از روش جداسازی ضریب گسل و دما، دما را از داده‌های این سنجنده به دست آورده ولی از روش پنجره مجزا تاکنون استفاده نشده است. در این روش از تمامی ۲۵۶ باند استفاده نمی‌شود بلکه باندهای بهینه انتخاب شده و ضرایب الگوریتم محاسبه می‌شوند و در نهایت با استفاده از روش پنجره مجزا دما به دست می‌آید.

در این تحقیق الگوریتمی نوین برای به دست آوردن دما با استفاده از داده‌های HYTES ارائه شده است. این سنجنده ۲۵۶ باند دارد که ۵۴ باند آن نویز زیادی دارند و از ۲۰۲ باند سنجنده برای ارزیابی الگوریتم استفاده می‌شود. ابتدا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک باندهای بهینه از میان ۲۰۲ باند انتخاب می‌شوند و در مرحله دوم با استفاده از روش پنجره مجزا دما به دست می‌آید. در مرحله آخر نیز نتایج به‌دست‌آمده توسط الگوریتم پیشنهادی با محصول دمایی HYTES که از روش TES به دست آمده و دقت بالایی دارد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

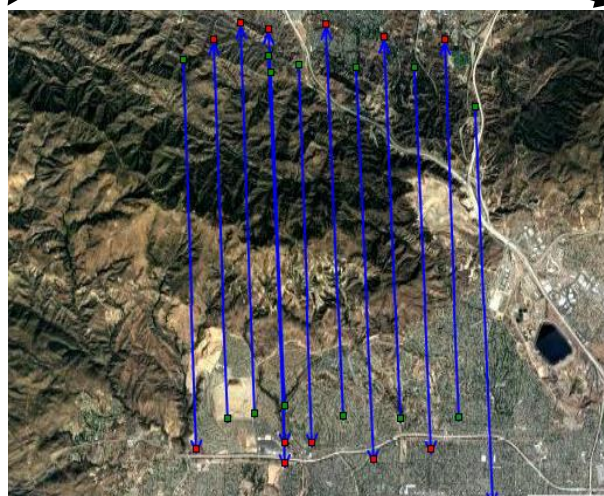
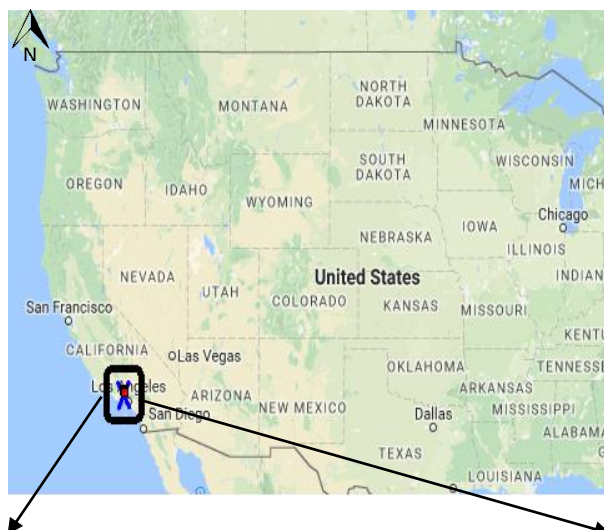
۲- داده‌های ماهواره‌ای مورد مطالعه

۲-۱- داده‌های دمایی

در این تحقیق از محصولات دمایی HYTES به‌عنوان داده‌های آموزشی برای الگوریتم ژنتیک استفاده



شکل ۳- تصویر دوم مورد مطالعه از منطقه‌ی Aliso Canyon



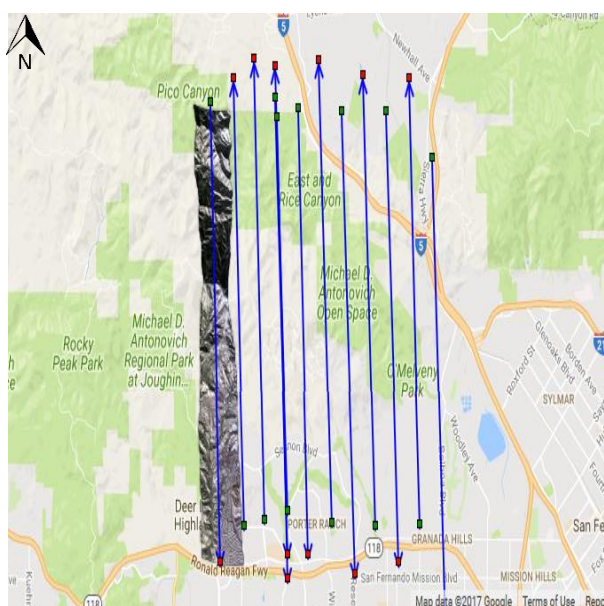
شکل ۱- منطقه‌ی Aliso Canyon در ایالت کالیفرنیا با ۱۳ تصویر برداشت شده توسط سنجنده HYTES

۳- روش انجام تحقیق

۳-۱- استفاده از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب باندهای بهینه

۳-۱-۱- اساس تئوری الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک برای اولین بار توسط Holland ارائه شد [۹]. این الگوریتم یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی بر پایه مفهوم انتخاب طبیعی می‌باشد. مزیت این الگوریتم تصادفی این است که از مجموعه‌ای از جواب‌ها به جای یک جواب برای یافتن پاسخ نهایی استفاده می‌کند. الگوریتم ژنتیک در طول تکرار هر جواب را به صورت یک کروموزوم نمایش می‌دهد که هر کروموزوم دارای ژن‌هایی است که باندها در داخل ژن‌ها قرار می‌گیرند. الگوریتم با تعدادی جواب تصادفی شروع می‌شود و جواب‌هایی که با توجه به تابع هدف دارای بیشترین ارزش هستند برای تولید مثل انتخاب می‌شوند. در تکرار دوم جواب‌های انتخاب شده دوباره ازدواج کرده و دو فرزند جدید (جواب جدید) تولید می‌کنند حالا دوباره تابع هدف برای همه فرزندان و والدین محاسبه می‌شود و بهترین جواب‌ها برای تولید مثل انتخاب شده و بقیه‌ی جواب‌ها حذف می‌شوند. این تکرار تا زمانی که تابع هدف یک جواب به حد آستانه مورد نظر برسد ادامه می‌یابد [۱۰].



شکل ۲- تصویر اول مورد مطالعه از منطقه Aliso Canyon

۳-۱-۳- تابع هدف

تابع هدف برای تشخیص میزان ارزش هر کروموزوم یا جواب لازم می‌باشد و طبق تابع هدف جواب‌های بهتر برای نسل بعدی نگه داشته می‌شوند و بقیه حذف می‌شوند. در این تحقیق تابع هدف، RMSE دمای محاسبه شده توسط الگوریتم پیشنهادی و دمای محصول سنجنده HYTES می‌باشد (معادله ۱) یعنی هر چقدر این مقدار کم باشد کروموزوم یا جواب موردنظر دارای ارزش بیشتری می‌باشد. همان‌طور که در ابتدا گفته شد سنجنده ی HYTES دارای ۲۵۶ باند می‌باشد که ۵۴ باند آن طبق گفته‌ی ناسا دارای نویز زیادی هستند پس ۲۰۲ باند باقی می‌ماند که باید از بین این ۲۰۲ باند بهترین باندها انتخاب شوند، پس هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک دارای ۲۰۲ ژن یا متغیر می‌باشد که به صورت ۰ یا ۱ می‌باشد، ۰ بودن به منزله‌ی استفاده نکردن از آن باند در محاسبه دما و ۱ بودن به منزله‌ی استفاده کردن از آن باند در محاسبه ی دما می‌باشد (شکل ۶). در این تابع هدف هر کروموزوم وارد الگوریتم پنجره مجزا برای محاسبه‌ی دما می‌شود و با توجه به تعداد باندهای انتخابی ضرایب الگوریتم پنجره مجزا محاسبه شده و سپس دما به دست می‌آید که این دما با محصول دمایی سنجنده مقایسه شده و کروموزومی (جوابی) که اختلاف کمتری داشته باشد ارزش بیشتری خواهد داشت [۱۰].

۱	۰	۱		۱	۱	۰	۱
---	---	---	-------	---	---	---	---

شکل ۶- یک کروموزوم با ۲۰۲ ژن به صورت ۰ و ۱

یک کروموزوم X :

مقدار دمای محاسبه شده با باندهای انتخابی (کروموزوم): $f(x)$

محصول دمایی سنجنده: $F(X)$

تابع هدف (۱) $RMSE(F(X), f(x))$

۳-۱-۴- روش انتخاب^۳

در این تحقیق نحوه‌ی انتخاب کروموزوم‌ها برای تولید نسل بر پایه روش انتخاب چرخ گردان^۴ می‌باشد. طبق این روش کروموزومی که ارزش بیشتری طبق تابع هدف

پارامترهایی که برای شروع الگوریتم نیاز است مشخص شوند عبارت‌اند از: اندازه جمعیت کروموزوم‌ها (تعداد جواب‌ها در هر تکرار)، تعداد متغیرها یا ژن‌ها در هر کروموزوم (تعداد متغیرها یا همان تعداد باندها که از بین آن‌ها باندهای موردنظر انتخاب می‌شوند)، تابع هدف (برای انتخاب جواب‌ها برای تکرار بعدی) و یک شرط توقف (به صورت حد آستانه یا تعداد تکرار) [۱۱].

۳-۱-۲- عملگرهای تولیدمثل

برای حل مسئله بعد از این‌که جواب‌های بالارزش انتخاب شدند تحت عمل تقاطع^۱ و جهش^۲ قرار می‌گیرند. در مرحله تقاطع دو کروموزومی که انتخاب شده‌اند با هم ترکیب شده و دو فرزند (جواب) تولید می‌کنند که ویژگی‌های دو والد را دارا می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در این تحقیق از عملگر تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده است که هرکدام از دو کروموزوم والد را در یک نقطه‌ی تصادفی قطع کرده و به دو قسمت تقسیم می‌کند سپس قسمت اول کروموزوم اولی با قسمت دوم کروموزوم دومی و دو قسمت دیگر دو کروموزوم باهم ترکیب شده و دو فرزند تولید می‌کنند. در جهش یک ژن (باند) از فرزند به طور تصادفی انتخاب می‌شود و تغییر می‌کند (مطابق شکل ۵ یعنی اگر ۰ باشد ۱ و اگر ۱ باشد ۰ می‌شود). این کار برای افزایش فضای جستجوی جواب مسئله انجام می‌شود.

parents	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
children	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

شکل ۴- عملگر تقاطع تک نقطه‌ای

Before:	(1	0	1	1	0	1	1	0)
After:	(0	1	1	0	0	1	1	0)

شکل ۵- عملگر جهش

^۳ selection

^۴ Roulette-wheel selection

^۱ Crossover

^۲ Mutation

داشته باشد شانس بیشتری برای شرکت در تولید مثل و انتقال به نسل بعدی خواهد داشت [۱۰].

روش انتخاب چرخ گردان به صورت زیر می باشد:

p_i : احتمال انتخاب i امین کروموزوم

f_i : میزان برازندگی هر کروموزوم، N : تعداد کل کروموزوم ها

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (2)$$

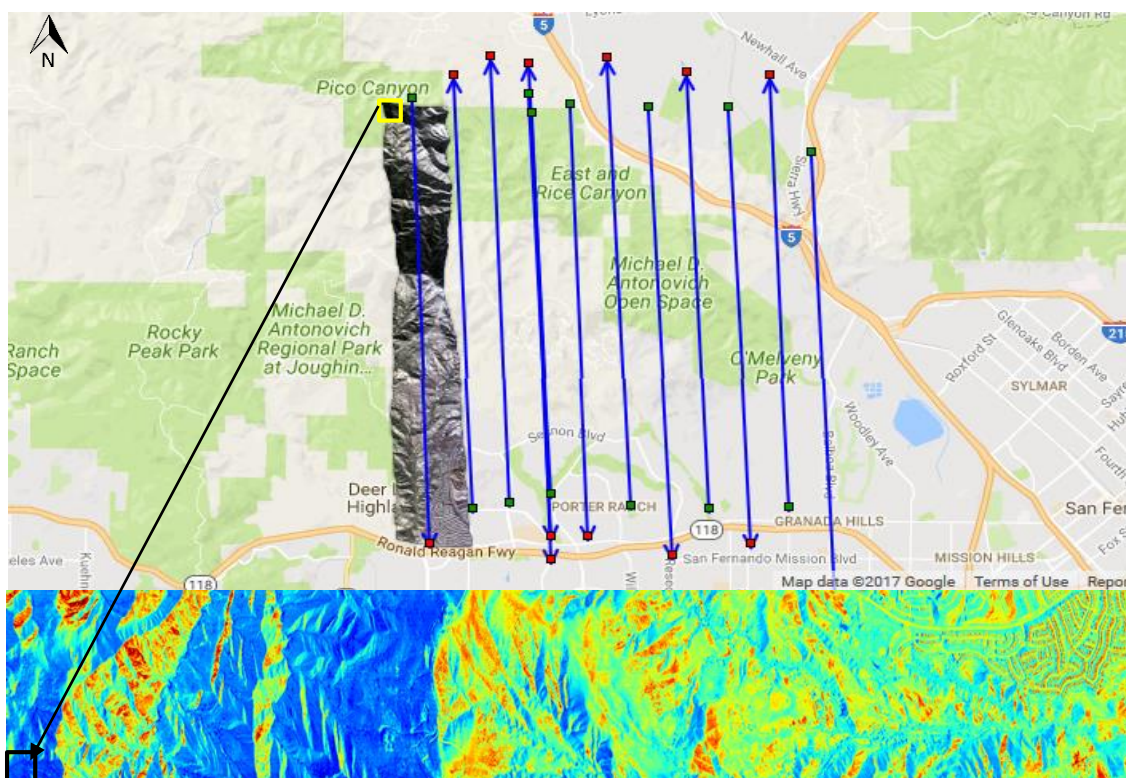
۳-۱-۵- پارامترهای اولیه

در ابتدای الگوریتم ژنتیک پارامترهای اولیه ی الگوریتم به این صورت می باشد: اندازه ی جمعیت اولیه = ۸۰ ، حداکثر تعداد تکرار = ۲۰۰ ، نرخ تقاطع = ۸۰ درصد ، نرخ جهش = ۱۰ درصد و تعداد متغیرها یا همان ژن های هر کروموزوم به اندازه تعداد باندهای بدون نویز یعنی ۲۰۲ می باشد [۱۱].

۳-۱-۵- انتخاب بهترین باندها با الگوریتم ژنتیک

به دلیل تعداد زیاد باندهای این سنجنده و حجم بالای داده ها از میان ۲۰۲ باند بهترین باندها با استفاده از الگوریتم ژنتیک انتخاب می شوند و با استفاده از این باندها دما محاسبه

می شود. الگوریتم ژنتیک دارای ۸۰ کروموزوم اولیه می باشد که هر کروموزوم دارای ۲۰۲ ژن به صورت ۰ یا ۱ می باشد. یک قسمت ۱۰۰*۱۰۰ پیکسل از داده ی اولی به عنوان داده ی آموزشی برای الگوریتم ژنتیک انتخاب می شود (شکل ۷). هر کروموزومی که وارد تابع هدف می شود ابتدا تعداد باندها و شماره باندهای آن مشخص می شود سپس با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا و به وسیله ی داده های آموزشی ضرایب الگوریتم پنجره مجزا محاسبه می شود و با استفاده از آن ضرایب به دست آمده و باندهای مشخص شده در کروموزوم دما داده های آموزشی محاسبه شده و با دمای مرجع این داده ها مقایسه می شود، این کار تا زمانی که اختلاف دمای محاسبه شده و دمای مرجع به حد آستانه مورد نظر برسد ادامه می یابد. نتیجه این الگوریتم ژنتیک رسیدن به یک کروموزوم یا جوابی است که باندهای انتخاب شده در آن کروموزوم بهترین باندها برای محاسبه دما از طریق الگوریتم پنجره مجزا می باشد. پس از اینکه بهترین باندها انتخاب شد ضرایب الگوریتم پنجره مجزا متناسب با این باندها نیز معلوم می باشد حال می توان با استفاده از این باندها و ضرایب متناسب آن ها دما را برای داده محاسبه نمود.



شکل ۷- تصویر اولی مورد مطالعه از منطقه ی Aliso Canyon و محصول دمایی آن که قسمتی از آن (گرید ۱۰۰*۱۰۰) به عنوان داده ی آموزشی در الگوریتم ژنتیک استفاده می شود.

۳-۲- الگوریتم پنجره مجزا

الگوریتم‌های پنجره مجزا بر مبنای کاهش اثرات اتمسفری از طریق تلفیق دو باند حرارتی مجاور طراحی شده‌اند [13]. این روش‌های پنجره مجزا با تلفیق خطی دمای درخشندگی در دو باند مجاور حرارتی دمای سطح زمین را تخمین می‌زنند. شکل عمومی این الگوریتم‌ها مطابق رابطه‌ی ۳ می‌باشد:

$$LST = a_0 + a_1 T_i + a_2 (T_i - T_j) \quad (3)$$

a_k ها ضرایب این روش می‌باشد که مطابق با تعداد باندهای انتخابی تعداد ضرایب نیز تغییر می‌کنند. این ضرایب تابع پاسخ طیفی باندها، ضریب گسیل باندها، بخار آب اتمسفر و زاویه زینتی می‌باشند [۱۳].

$$a_k = f_k(g_i, g_j, \varepsilon_i, \varepsilon_j, WV, VZA) \quad (4)$$

g پاسخ تابع طیفی، ε ضریب گسیل، WV بخار آب اتمسفر و VZA زاویه زینتی می‌باشند. در روش‌های پنجره مجزا دقت به دست آوردن دمای سطح زمین به دقت تعیین ضرایب این روش بستگی دارد. این ضرایب با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و مقایسه آن با مقادیر سنجنده تعیین می‌شوند. از مزایای این روش عدم نیاز به پروفیل اتمسفری دقیق و همچنین روش کارآمدی برای تمامی سنسورها با حداقل دو باند حرارتی اشاره کرد. وابستگی این روش به اطلاع از ضریب گسیل و همچنین تعیین ضرایب هر مدل برای هر منطقه را می‌توان از محدودیت‌های این روش دانست. در دهه‌های اخیر الگوریتم‌های پنجره مجزا متفاوتی ارائه شده است که تفاوت آن‌ها در تعیین پارامترها و تابع رابطه ۴ می‌باشند. الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق بر اساس الگوریتم ارائه شده توسط بکر ولی به شکل رابطه ۳ با ضرایب رابطه ۵ طراحی شده است [۱۴]. (A_0 ضریب ثابت است)

$$T_s = A_0 + \left(A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{(T_i + T_j)}{2} + \quad (5)$$

$\left(A_4 + A_5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_6 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{(T_i - T_j)}{2}$
 $\Delta\varepsilon$ ضریب گسیل میانگین دو باند حرارتی مجاور،
 T اختلاف ضریب گسیل دو باند مجاور حرارتی می‌باشد،

دمای درخشندگی سطح زمین می‌باشد که از رادیانس ساطع شده از سطح زمین به وسیله‌ی عکس قانون پلانک به دست می‌آید و T_s دمای سطح زمین می‌باشد [۱۵].

۳-۲-۱- تعیین ضرایب الگوریتم پنجره مجزا

در روش پنجره مجزا تعداد ضرایب این روش به تعداد باندهای انتخاب شده بستگی دارد همان‌طور که در معادله ۵ مشاهده می‌کنید اگر تعداد باندهای مورد استفاده دو باند باشد تعداد ضرایب روش هفت می‌باشد که با افزایش تعداد باندها تعداد ضرایب نیز افزایش خواهد یافت. البته این را هم باید ذکر کرد که تعداد باندهای انتخابی برای این روش پنجره مجزا باید زوج باشد چون اساس این روش بر مبنای استفاده از دو باند مجاور می‌باشد. حال با توجه به این روش می‌توان یک رابطه‌ای به شکل رابطه‌ی ۶ برای بیان ارتباط بین تعداد باندها و تعداد ضرایب الگوریتم نوشت:

$$NCoefficients = (Nband \times 3) + 1 \quad (6)$$

$NCoefficients$: تعداد ضرایب الگوریتم پنجره مجزا
 $Nband$: تعداد باندها انتخاب شده توسط الگوریتم
 ژنتیک که باید عددی زوج باشد. به‌طور کلی برای محاسبه نمودن ضرایب روش پنجره مجزا مراحل زیر تا رسیدن به بهترین باندها و ضرایب متناسب آن‌ها در الگوریتم ژنتیک ادامه می‌یابد:

الف) انتخاب بهترین باندها که تعداد آن‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شود.

ب) محاسبه تعداد ضرایب با توجه به تعداد باندها

$$NCoefficients = (Nband \times 3) + 1$$

ج) طراحی ماتریس مشاهدات (Y) که دمای سطح زمین می‌باشد (یک منطقه ۱۰۰ در ۱۰۰ پیکسل)

$$Y^T = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ \ T_{9998} \ T_{9999} \ T_{10000}] \quad (7)$$

T_i = دمای پیکسل i داده‌های آموزشی که یک منطقه ۱۰۰ در ۱۰۰ پیکسل (۱۰۰۰۰ پیکسل) می‌باشد.

د) طراحی ماتریس مجهولات X که ضرایب این روش می‌باشند:

$$(A)$$

$$X^T = [A_0 \ A_1 \ A_2 \ A_3 \ \ A_{Ncoefficient-1} \ A_{Ncoefficient}]$$

ه) طراحی ماتریس ضرایب A که مقادیر معلوم در رابطه ۵ می‌باشند:

For $N_{pixel} = 1:n$
For $i = 1:2:Nband$

$$\begin{aligned} A_{N_{pixel} \times N_{coefficient}} &= [\quad], A_{N_{pixel} \times 1} = 1 \\ A_{N_{pixel} \times (3i-1)} &= [T_i + T_{i+1}] \\ A_{N_{pixel} \times 3i} &= \left[\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} (T_i + T_{i+1}) \right] \\ A_{N_{pixel} \times (3i+1)} &= \left[\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} (T_i + T_{i+1}) \right] \\ A_{N_{pixel} \times (3i+2)} &= [T_i - T_{i+1}] \\ A_{N_{pixel} \times (3i+3)} &= \left[\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} (T_i - T_{i+1}) \right] \\ A_{N_{pixel} \times (3i+4)} &= \left[\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} (T_i - T_{i+1}) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

n : تعداد پیکسل‌ها، $Nband$: تعداد باندها

و) تعیین ضرایب از طریق سرشکنی کمترین مربعات:

$$X_{N_{coefficients} \times 1} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (10)$$

ز) به دست آوردن دمای سطح زمین یا همان ماتریس مشاهدات با استفاده از باندهای انتخابی و ضرایب به‌دست‌آمده از روش پنجره مجزا:

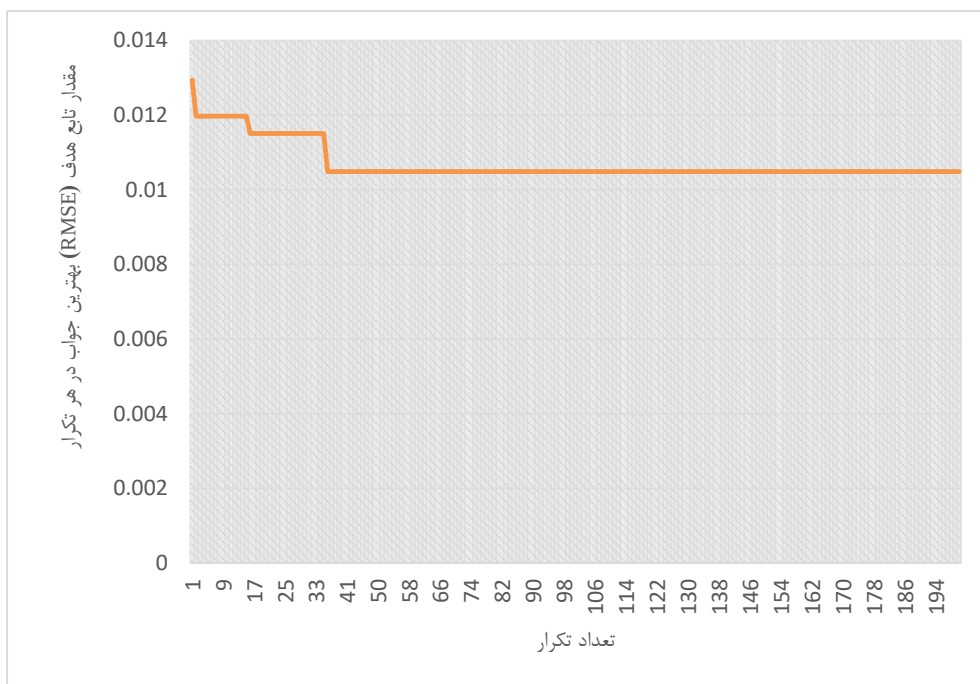
$$\hat{Y}_{10000 \times 1} = AX \quad (11)$$

ح) به دست آوردن $RMSE$ بین دمای به‌دست‌آمده از این روش و دمای مرجع:

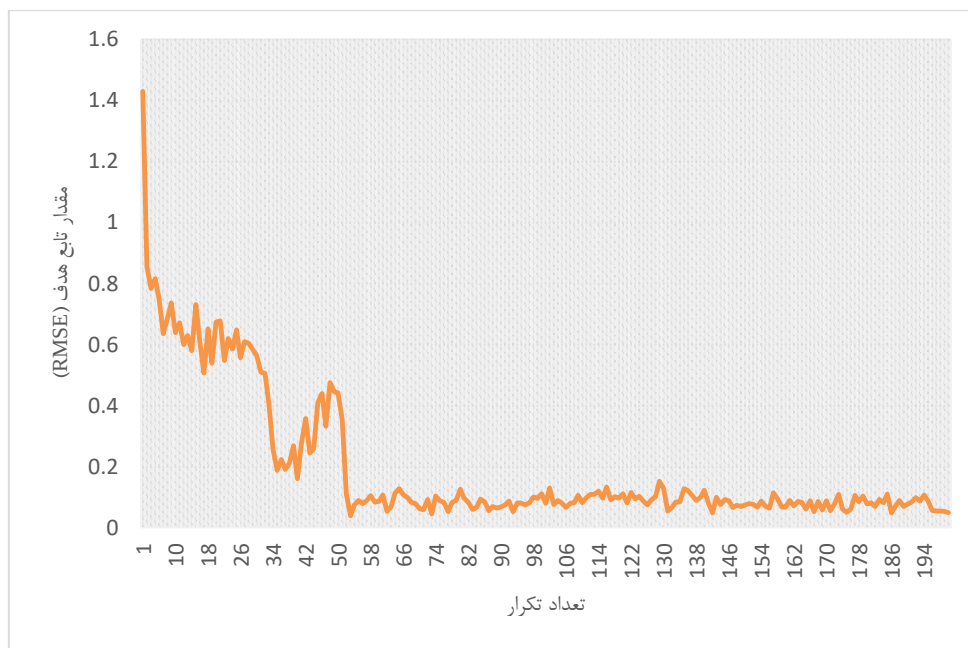
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{1 \times i} - \hat{Y}_{1 \times i})^2}{n}} \quad (12)$$

n = تعداد پیکسل‌ها که ۱۰۰۰۰ می‌باشد.

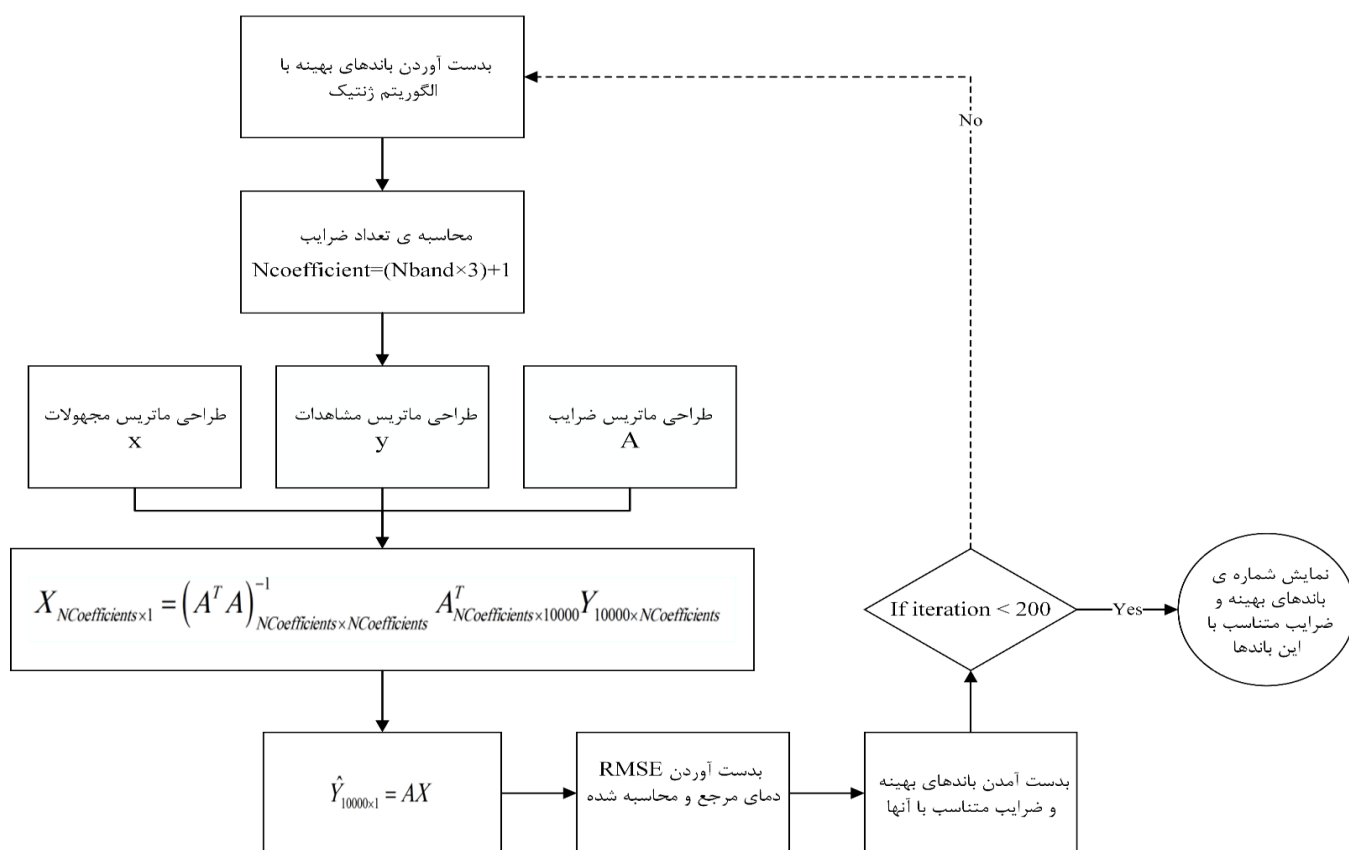
این فرآیند تا ۲۰۰ بار در الگوریتم ژنتیک تکرار شد تا به حد آستانه موردنظر برای $RMSE$ برسد، بعد از ۲۰۰ تکرار الگوریتم ژنتیک ۱۱۰ باند را انتخاب می‌کند که با توجه به رابطه ۶ تعداد باندها تعداد ضرایب ۳۳۱ می‌باشد که از طریق رابطه ۱۰ به دست می‌آید. همان‌طور که در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف که در این تحقیق $RMSE$ می‌باشد در هر تکرار کاهش میابد و در نمودار شکل ۹ روند بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مشاهده می‌شود که در هر تکرار میانگین مقدار تابع برازندگی ($RMSE$) جواب‌ها کاهش میابد.



شکل ۸- مقدار تابع هدف (costfunction) برای بهترین جواب در هر تکرار



شکل ۹- مقدار میانگین تابع هدف (costfunction) برای تمامی جوابها در هر تکرار الگوریتم ژنتیک



شکل ۱۰- به دست آوردن باندهای بهینه و ضرایب متناسب باندها توسط الگوریتم ژنتیک

این روش ۱۱۰ باند می‌باشد که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

در شکل ۱۰ به‌طور خلاصه مراحل به دست آوردن باندهای بهینه و ضرایب نشان داده شده است. تعداد باندهای انتخابی توسط الگوریتم ژنتیک برای استفاده در

جدول ۱- شماره‌ی باندهای انتخاب شده از بین ۲۰۲ باند توسط الگوریتم ژنتیک

شماره‌ی باندهای انتخابی توسط الگوریتم ژنتیک										
۲۱	۲۰	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱۰	۶	۴	۲	۱
۴۱	۳۹	۳۷	۳۶	۳۴	۳۲	۳۱	۲۶	۲۵	۲۴	۲۲
۵۹	۵۸	۵۷	۵۶	۵۳	۵۲	۴۶	۴۵	۴۴	۴۳	۴۲
۷۴	۷۳	۷۲	۷۱	۷۰	۶۹	۶۸	۶۶	۶۵	۶۲	۶۰
۹۵	۹۲	۹۱	۹۰	۸۸	۸۷	۸۶	۸۰	۷۸	۷۶	۷۵
۱۲۲	۱۲۱	۱۱۶	۱۱۵	۱۱۲	۱۰۶	۱۰۵	۱۰۴	۱۰۱	۹۹	۹۶
۱۴۲	۱۴۰	۱۳۸	۱۳۷	۱۳۶	۱۳۵	۱۳۲	۱۳۰	۱۲۹	۱۲۷	۱۲۳
۱۶۱	۱۵۹	۱۵۸	۱۵۵	۱۵۱	۱۵۰	۱۴۹	۱۴۷	۱۴۶	۱۴۴	۱۴۳
۱۸۲	۱۸۰	۱۷۸	۱۷۷	۱۷۲	۱۷۱	۱۷۰	۱۶۹	۱۶۶	۱۶۳	۱۶۲
۲۰۱	۲۰۰	۱۹۸	۱۹۷	۱۹۶	۱۹۴	۱۹۲	۱۸۹	۱۸۷	۱۸۶	۱۸۴

که این ضرایب به دست آمده مختص این داده نبوده و برای تصاویر و داده‌های دیگر HYTES نیز می‌توان با روش پنجره مجزا و با این ضرایب دما را با دقت خوبی به دست آورد. این روش بر روی داده‌ی دوم با ۹۰۰۰۰۰ پیکسل (گرید ۳۰۰*۳۰۰) نیز اعمال گردید و دمای به دست آمده با این روش (شکل ۱۳) با محصول حرارتی این داده (شکل ۱۲) نیز مورد مقایسه قرار گرفت و خطای $RMSE$ و میانگین اختلاف آن‌ها محاسبه شد که به ترتیب ۰/۹۹۹۸ و ۰/۵۶۵ می‌باشند که دارای مقدار قابل قبولی می‌باشند (جدول ۴).

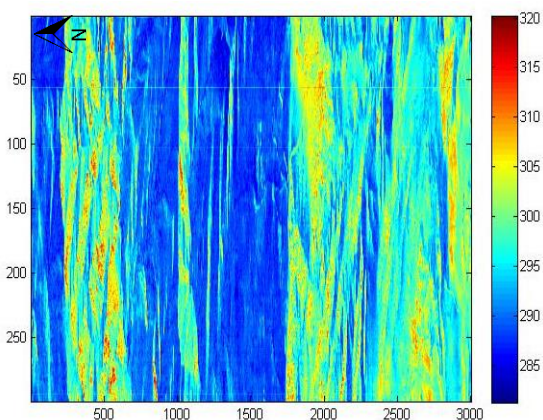
پس با توجه به رابطه ۶ تعداد ضرایب این روش ۳۳۱ می‌باشد که بدین ترتیب به دست می‌آیند:

$$X^T = [a_0 \ A_1 \ A_2 \ A_3 \ \dots \ A_{329} \ A_{330}]_{1 \times 331} \quad (13)$$

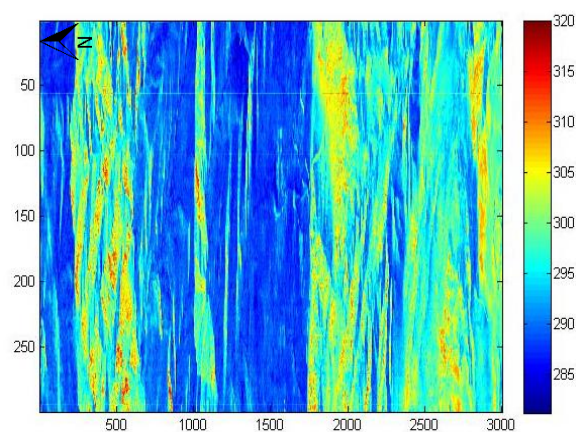
$$X_{331 \times 1} = (A^T A)^{-1}_{331 \times 331} A^T_{331 \times 10000} Y_{10000 \times 331} \quad (14)$$

ضرایب به دست آمده از این رابطه در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای به دست آوردن ضرایب این روش پنجره مجزا از یک قسمتی از داده‌ی اولی (گرید ۱۰۰*۱۰۰) به عنوان داده‌ی آموزشی استفاده کردیم برای آن که بتوان نشان داد



شکل ۱۱- نقشه حرارتی به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌ی اولی



شکل ۱۰- نقشه‌ی حرارتی HYTES داده‌ی اولی

جدول ۲- ضرایب پیشنهادی

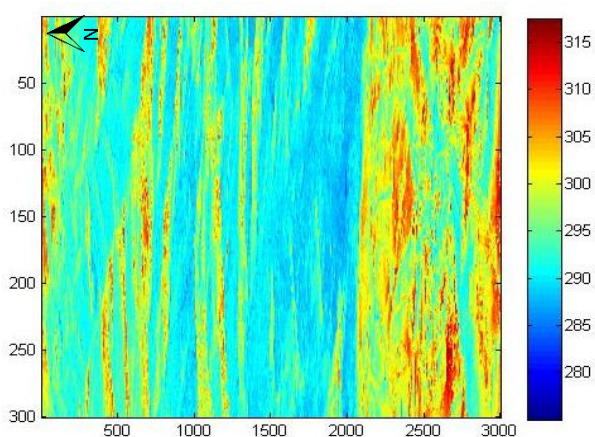
A_{46} تا a_0	A_{94} تا A_{47}	A_{141} تا A_{95}	A_{189} تا A_{142}	A_{236} تا A_{190}	A_{283} تا A_{237}	A_{330} تا A_{284}
-51.4497	-0.1155	- 0.1067	0.1170	-0.0394	0.0196	0.0076
-0.0009	0.0539	0.1261	0.0880	-0.0927	-0.0249	-0.0041
0.0006	0.0654	0.1477	0.0181	0.0527	0.0843	-0.2765
0.0002	0.0237	0.0050	- 0.1461	-0.0001	0.1985	-1.8374
-0.0042	-0.0081	0.0110	0.0175	0.0219	-0.1246	0.5962
0.0403	-0.0810	- 0.1939	0.0084	0.0061	0.0116	0.0440
0.0239	0.1331	- 0.0710	0.0235	0.0002	0.0060	0.0001
-0.0001	-0.2288	0.1951	- 0.1294	-0.0359	0.1065	-0.0001
0.0074	-0.0001	0.0230	- 0.2363	-0.0249	0.3767	0.0512
0.0035	-0.0023	0.0006	0.1221	-0.0803	0.3348	-0.1222
0.0062	-0.0003	- 0.0001	0.0232	0.0076	-0.0603	0.1588
-0.0760	-0.0029	0.0379	- 0.0115	0.0078	0.0063	0.0014
0.0105	0.0658	0.1711	0.1119	-0.0785	-0.0029	0.0001
-0.0009	-0.1561	0.0455	0.0388	-0.2349	- 0.0169	0.0001
-0.0050	-0.0658	- 0.0005	0.0465	0.2226	0.2172	-0.0065
-0.0028	0.0043	0.0077	- 0.0004	0.0951	-0.1427	0.1071
-0.0225	0.0021	0.0035	0.0002	0.0305	0.3062	0.0115
0.2103	0.0572	- 0.0071	0.0001	0.0152	0.0131	0.2130
0.0405	0.0408	0.0619	0.0014	0.0904	0.0070	0.0001
0.0026	-0.1694	- 0.1847	- 0.0202	0.0942	-0.1078	-0.0001
-0.0076	-0.1591	- 0.0397	- 0.0332	0.0365	-0.5941	-0.0313
0.0088	-0.0024	0.0001	0.0595	-0.0474	0.0571	0.0878
-0.0252	0.0075	0.0001	- 0.0108	-0.0234	0.0023	-0.1299
0.1429	0.1579	0.1051	0.0051	-0.0117	0.0229	0.0425
-0.4742	-0.0161	0.1358	- 0.0564	-0.0429	-0.0054	-0.0002
-0.0009	-0.0920	- 0.0434	- 0.0441	-0.1584	-0.0014	0.0001
0.0009	0.0566	0.1935	-0.0116	-0.4482	0.0345	0.0559
-0.0002	0.0023	- 0.0038	0.1151	-0.0011	0.0282	-0.1786
0.0135	-0.0130	0.0016	0.0130	-0.0005	-0.1674	-0.0460
-0.1495	-0.0580	- 0.0918	0.0058	0.0001	-0.0001	0.1345
0.0276	0.0443	0.1578	-0.1811	0.0338	-0.0002	-0.0001
0.0019	0.4439	0.0731	0.0797	-0.7983	0.1611	-0.0001
0.0002	-0.1658	0.1569	0.2192	-0.0313	0.0443	0.1262
0.0001	0.0201	0.0169	0.1166	-0.0205	-0.0682	0.1511
-0.0032	-0.0228	- 0.0089	-0.0060	-0.0086	-0.0620	-0.0769
0.0570	0.1623	- 0.4200	0.0029	0.0041	0.0781	0.2094
0.0271	0.0112	-0.3473	0.0971	0.0106	0.0196	-0.0001
-0.0017	- 0.0122	- 0.1244	0.2695	0.2603	-0.0917	-0.0001
0.0029	0.1590	0.0001	-0.1157	-0.2960	0.6080	0.5879
0.0145	-0.0005	0.0144	-0.2397	-0.0740	-0.2867	0.3411
-0.0038	0.0001	0.0073	-0.0029	0.0471	0.3366	-0.0029
-0.0070	0.1361	0.0038	-0.0014	0.0275	-0.0255	0.0669
-0.4597	0.2556	- 0.0424	-0.2255	0.0924	0.0128	0.0001
0.0002	- 0.0433	- 0.1182	-0.2463	0.3916-	-0.4254	0.0001
-0.0030	- 0.0014	- 0.1225	-0.1946	0.5625-	0.6048	0.0741
-0.0013	- 0.0070	- 0.0258	0.3248	0.0207-	0.5233	-0.0959
0.0092	- 0.0031	0.0130	0.0131	0.0385-	-0.2117	-0.0377
	0.0072		0.0032			

جدول ۳- نتایج ارزیابی الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌ی اول با داده‌ی مرجع

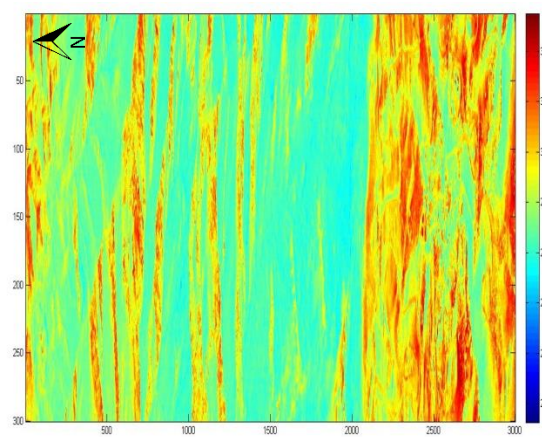
خطا		داده مرجع
میانگین	RMSE	
۰/۰۱۲۸	۰/۰۲۵۱	نقشه حرارتی HYTES

جدول ۴- نتایج ارزیابی الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌ی دوم با داده‌ی مرجع

خطا		داده مرجع
میانگین	RMSE	
۰/۰۵۶۵	۰/۹۹۹۸	نقشه حرارتی HYTES



شکل ۱۳- نقشه حرارتی به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌ی دومی



شکل ۱۴- نقشه‌ی حرارتی HYTES

۶- نتیجه‌گیری

دمای سطح زمین اساسی‌ترین متغیر برای تعیین مشخصات آب و هوایی، کنترل فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی، تبادل انرژی و آب بین زمین و جو و طبقه‌بندی عوارض است [۱]. تصاویر سنجش از دور به دلیل پوشش وسیع و به هنگام بودن ابزار مناسبی برای تهیه نقشه‌های دمای سطح زمین می‌باشند [۲]. با توجه به اینکه سنجنده‌های فراطیفی حرارتی دارای باندهای حرارتی بیشتر با پهنای باند کمتری نسبت به سنجنده‌های چند طیفی می‌باشند دارای توان تفکیک طیفی بالایی بوده و بنابراین دما را می‌توان با دقت بالایی به دست آورد. سنجنده‌ی HYTES دارای توان تفکیک مکانی بالایی نیز می‌باشد پس برای تهیه نقشه‌ی دمای سطح زمین می‌تواند بسیار

مراجع

- [1] Wan, Z. (1999). "MODIS Land Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Documentation.", Version 3.3 URL.
- [2] Ning W., Zhao-Liang L., Bo-Hui T., Funian Z. and Chuanrong Li. (2010). "Retrieval of atmospheric and land surface parameters from satellite-based Thermal Infrared hyperspectral data using a neural network technique". International Journal of Remote Sensing, 34:9-10, 3485-3502.

- [3] Goodenough, D. G., Bhogal, A. S., Dyk, A., and Hudson, D. (1999). "Data Fusion Of Remote Sensing Data For Forest Parameter Estimation." Proc. Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition / 21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 801-808.
- [4] Price J. C. (1983). "Estimating Surface Temperatures from Satellite Thermal Infrared Data--A Simple Formulation for the Atmospheric Effect.", Remote Sens. Environ, 13, pp. 353-361.
- [5] Anding D., Kauth R. (1970). "Estimation of Sea Surface Temperature from Space". Remote Sens. Environ. 1, pp. 217-220.
- [6] Gillespie, A. R.; Rokugawa, S.; Matsunaga, T.; Cothorn, J. S.; Hook, S. ; Kahle, A. B. (1998). "A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, 1113-1126.
- [7] José A. Sobrino, Juan C. Jiménez-Muñoz , Pablo J. Zarco-Tejada, Guadalupe Sepulcre-Cantó, Eduardo de Miguel (2006). "Land surface temperature derived from airborne Hyperspectral scanner Thermal infrared data". Remote Sensing of Environment 102, 99-115.
- [8] XinkeZhong, Xing Huo, Chao Ren, JelilaLabedand Zhao-Liang Li, (2016). "Retrieving Land Surface Temperature from Hyperspectral Thermal Infrared Data Using a Multi-Channel Method". Sensors, 16. 687, 1-14.
- [9] Holland, J. (1975). "Adaptation in Natural and Artificial Systems." University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA.
- [10] Saleem Ullah , Thomas A. Groen , Martin Schlerf ,(2012). Using a Genetic Algorithm as an Optimal Band Selector in the Mid and Thermal Infrared (2.5-14 μm) to Discriminate Vegetation Species, Sensors 2012, 12, 8755-8769.
- [11] Goldberg, D.E. (1989). "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning." Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.: Boston, MA, USA, p. 372.
- [12] Jiménez-Muñoz, J. C.; Sobrino, J. A (2010). "Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature retrieval from Low-Resolution Thermal Infrared Sensors", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 5, 806-809.
- [13] Baldridge, A. M.; Hook, S.J.; Grove, C.I.; Rivera, G (2009). "The ASTER Spectral Library Version 2.0", Remote Sensing of Environment, 113, 711-715.
- [14] Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P., (2001). "A mono-algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region". International Journal of Remote Sensing 22 (18), 583-594.
- [15] Z.-L. Li, H. Wu, N. Wang, S. Qiu, J. A. Sobrino, Z. Wan, B.-H. Tang, and G. Yan. (2013). "Land surface emissivity retrieval from satellite data," Int. J. Remote Sens., vol. 34, no. 9/10, pp. 3084-3127.