

ارائه روشی برای ارزیابی دقت و اعتبارسنجی دمای سطح زمین حاصل از داده‌های سنجش از دور: مطالعه موردی استان فارس

حسن امامی^{۱*}، برات مجردی^۲، عبدالرضا صفری^۳

^۱ دانشجوی دکتری نقشه‌برداری، فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

h_emami@ut.ac.ir

^۲ استادیار گروه نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

mojaradi@iust.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

asafari@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۴، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۴)

چکیده

دمای سطح زمین از جمله متغیرهایی است که در دامنه وسیعی از مطالعات علوم زمین و محیط زیست کاربرد دارد. فناوری سنجش از دور، امکان پایش مکانی و زمانی این کمیت را در سطوح وسیع فراهم می‌آورد. اما ارزیابی دقت این کمیت از مسائل چالش برانگیز بوده و هست. تغییرات سریع دما در مکان و زمان از یک طرف، و عدم تطابق مقیاس مکانی بین سنسورهای ماهواره‌ای و زمینی از طرفی دیگر، اعتبار سنجی آن را با داده‌های زمینی دشوار نموده است. علاوه بر اعتبارسنجی این کمیت با داده‌های زمینی، سه روش دیگر، اعتبار سنجی مبتنی بر رادیانس، ارزیابی غیرمستقیم و اعتبار سنجی تقاطعی بین محصول دو سنجنده، وجود دارد. از بین این روشها، روش اعتبار سنجی تقاطعی با توجه به گسترش روزافزون سنجنده‌های حرارتی از معمول‌ترین روش ارزیابی دقت دمای سطح می‌باشد. تطبیق زمان، اطلاعات طیفی، مکانی و زاویه دید سنجنده، از نیازهای اساسی روش اعتبار سنجی تقاطعی است. در مقاله حاضر، روشی برای اعتبارسنجی تقاطعی دمای سطح حاصل از لندست ۸ با سنجنده‌های مادیس ارائه شده است. بدلیل برداشت دو بار در هر شبانه‌روز، توسط هر یک از سنجنده‌های مادیس، محصول دمای آن بعنوان مرجع انتخاب گردید. محصول دمای مادیس در بیش از پنجاه مورد با روش‌های مختلف اعتبارسنجی شده و دارای دقت کمتر یک درجه کلون می‌باشد. نتایج روش پیشنهادی نشان داد که ارزیابی دقت در مناطق با همگنی بالا، با پارامترهای میانگین اختلاف‌ها و ریشه میانگین مربع خطا به ترتیب دارای دقت ۰.۶ و ۱.۶۳ درجه کلون در تصویر بررسی اول بوده و همچنین این مقادیر در تصویر بررسی دوم به ترتیب دارای دقت ۰.۹۴ و ۱.۲۷ درجه کلون بدست آمدند. با توجه به نتایج حاصل، روش پیشنهادی نه تنها روش با ثباتی برای ارزیابی دقت دمای سطح می‌باشد، بلکه این روش برای هر سنجنده حرارتی و برای هر زمان و مکانی قابل اجرا است.

واژگان کلیدی: دمای سطح زمین، اعتبار سنجی تقاطعی، لندست ۸، مادیس، تطبیق اطلاعات زمانی، طیفی و مکانی دو تصویر

۱- مقدمه

دمای سطح زمین از جمله متغیرهایی است که در دامنه وسیعی از مطالعات و تحقیقات علوم زمین و محیط زیست مورد نیاز است و در بسیاری از کاربردهای مانند مدل سازی تبخیر و تعرق، برآورد رطوبت خاک، آب و هوایی شهری، هیدرولوژیکی، پایش پوشش گیاهی و مطالعات زیست محیطی یکی از پارامترهای کلیدی در مقیاس محلی و جهانی است. دمای سطح زمین تابعی از انرژی خالص در سطح زمین است که به عوامل مختلفی از جمله گسیلمندی سطح، رطوبت و جریان اتمسفر بستگی دارد. فناوری سنجش از دور، امکان پایش مکانی و زمانی همزمان این کمیت را در سطوح وسیع فراهم می‌آورد. اما ارزیابی دقت و اعتبارسنجی این کمیت از مسائل چالش برانگیز بوده و هست، زیرا از یک طرف تغییرات سریع آن در دامنه مکان و زمان، طوریکه تغییر بیش از ده درجه کلون در فاصله بسیار کوتاه و یا بیش از یک درجه کلون در یک زمان بسیار کوتاه (کمتر از یک دقیقه) اتفاق می‌افتد [۲۳، ۳۲]، از طرف دیگر، بدلیل عدم تطابق مقیاس مکانی بین سنسورهای ماهواره‌ای و زمینی اعتبارسنجی آن را با داده‌های زمینی پیچیده و دشوار کرده است. از آنجا که ناهمگنی قوی از ویژگی‌های سطح زمین در پوشش گیاهی، توپوگرافی و انواع خاک است [۲۵، ۲۸]، دمای سطح زمین به سرعت در دامنه مکانی و زمانی تغییر می‌کند [۳۲، ۴۷]. همچنین، خصوصیات کافی از توزیع دمای سطح و تکامل زمانی آن، نیاز به نمونه برداری با روش مکانی و زمانی دقیق دارد. لذا این اندازه‌گیری را نمی‌توان با استفاده از سیستم‌های مبتنی بر زمین به دلیل پیچیدگی و عدم دقت اندازه‌گیری معمولی دمای سطح زمین و خطاهای ناشی از نمونه‌گیری ناکافی انجام داد. با توسعه روزافزون سنجش از دور حرارتی، داده‌های ماهواره‌ای رایج‌ترین روش را برای اندازه‌گیری دمای سطح زمین با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا را فراهم آورده‌اند [۴۳].

با این وجود، ارزیابی دقت و اعتبارسنجی دمای حاصل از داده‌های ماهواره‌ای اغلب چالش برانگیز بوده و هست، اگرچه در دهه‌های اخیر چندین الگوریتم برای بازیابی دمای سطح از داده‌های حرارتی گسترش داده شده است، با این حال اعتبارسنجی دمای حاصل از این داده‌ها بدلیل مشکلات زیر چندان توسعه نیافته و نیازمند توسعه الگوریتم‌های جدید است [۷، ۱۴، ۳۱، ۵۰]. اولین مشکل

اعتبارسنجی دمای سطح، اندازه‌گیریهای زمینی دما در مقیاس محلی است و رادیانس حرارتی حاصل، دارای اثرات ترکیبی با شرایط محیطی و اتمسفر است لذا برای اندازه‌گیری دمای سطح جهت ارزیابی دقت، بایستی همزمان ضریب گسیل سطح، رادیانس‌های حرارتی محیط و اتمسفر نیز اندازه‌گیری شود که یک کار زمانبر بوده و پایش آن سخت و دشوار است. دومین مشکل، اندازه‌گیری دمای سطح با روش زمینی در مقیاس پیکسل است، زیرا هر پیکسل تصویر مساحتی حدود چند صدمتر یا کیلومتر را پوشش می‌دهد، با توجه به تغییرات مکانی ویژگیهای سطح زمین و تغییرات مکانی-زمانی بزرگ در خود دمای سطح، ارائه یک ایده جهت بدست آوردن دمای مرجع در مقیاس پیکسل کاری دشوار است. مشکل سوم مربوط به نمونه برداری زمانی دمای سطح است که بایستی با فرکانس زمانی بسیار بالا مشخص گردد، چون درجه حرارت سطح ممکن است چندین درجه به علت باد، سایه و سایر عوامل محیطی تغییر کند. به طور کلی، رادیومترهای زمینی اغلب درجه حرارت را در بیش از چند دقیقه اندازه‌گیری می‌کنند در حالیکه سنسورهای حرارتی بر روی ماهواره‌ها، داده‌ها را در کسری از ثانیه بدست می‌آورد.

اگرچه مشکلات و دشواریهای زیادی در اعتبارسنجی دمای سطح حاصل از داده‌های حرارتی ماهواره‌ای وجود دارد، در سالهای اخیر، تلاشها و مطالعات بسیاری برای ارزیابی دقت و اعتبارسنجی این کمیت انجام گرفته است [۸، ۱۶، ۲۹، ۵۰، ۵۱]. روشهایی که دقت مقادیر دمای سطح حاصل از داده‌های ماهواره‌ای را ارزیابی می‌کنند به چهار گروه؛ روش مبتنی بر دمای اندازه‌گیری زمینی^۱، روش مبتنی بر رادیانس^۲، روش ارزیابی غیر مستقیم^۳ و روش اعتبارسنجی تقاطعی^۴ تقسیم‌بندی می‌شوند.

مشکلات روش مبتنی بر دمای حاصل از اندازه‌گیری زمینی ذکر شد، در کل، در این روش فقط می‌توان به چند نوع از عوارض سطح، نظیر مناطق دارای پوشش آب، برف، یخ و نواحی با پوشش گیاهی متراکم و همگن بعنوان نقاط اعتبارسنج در مقیاس پیکسل اتکا کرد. این روش همچنین برای اعتبارسنجی دمای سطح در مقیاس جهانی مناسب

^۱ Temperature-based

^۲ Radiance-based

^۳ Indirect

^۴ Cross-validation

نیست [۱۴، ۳۸]. روش مبتنی بر رادیانس یک روش شبیه سازی و مقایسه بین دمای بازیابی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای با نتایج حاصل از مدل انتقال تابشی است که نیاز به دانش دقیق از ضریب گسیل سطح، شرایط سطح و پروفیل‌های اتمسفری در زمان عبور سنجنده دارد [۸، ۵۱]. موفقیت این روش وابسته به دقت پارامترهای ذکر شده دارد، همچنین صحت این روش در شرایط مختلف سطح بایستی با دیگر روشهای ارزیابی دقت، اعتبارسنجی گردد. جزئیات بیشتر این روش در [۵۱] توضیح داده شده است. در مقابل اعتبارسنجی روش مستقیم زمینی، روش ارزیابی غیر مستقیم دمای سطح با استفاده از مدل‌سازی فعل و انفعالات سطح زمین و اتمسفر مانند مدل ارتباطات زمین^۱ [۳۰]، مدل زمین مشترک^۲ [۱۰] و یا مدل های آب و هوایی مانند پیش بینی مرکز ملی تحقیقات جوی مدل آب و هوا^۳ و مدل جوی گردش عمومی^۴ [۴۳] شبیه‌سازی یا پیش‌بینی می‌کنند. علاوه بر اینکه، در این روش‌ها مدل‌سازی فعل و انفعالات سطح زمین و اتمسفر بصورت کامل دشوار و غیرممکن است، همچنین این روش‌ها قدرت تفکیک مکانی بسیار پایین (بزرگتر از ۱۰ کیلومتر) صحت اعتبارسنجی دماهای حاصل از ماهواره‌ها را در بر می‌گیرد [۴۳]. در روش اعتبار سنجی تقاطعی، بدلیل تغییرات مکانی-زمانی سریع دمای سطح، علاوه بر تطبیق زمان، تطبیق اطلاعات طیفی- مکانی و تطبیق زاویه دید بین دو سنجنده از نیازهای اساسی این روش است [۳۴، ۴۴]. با پیدایش سنجنده‌های حرارتی مختلف این روش یکی از رایج‌ترین روش در ارزیابی دقت دمای سطح می‌باشد. مزیت استفاده از این روش، عدم نیاز به هر نوع اندازه‌گیری‌های زمینی را دارد و دقت آن وابسته به تطبیق اطلاعات طیفی- مکانی و زمانی بین دو سنجنده است.

در مقاله حاضر، روشی سه مرحله‌ای برای اعتبارسنجی تقاطعی دمای سطح زمین حاصل از سنجنده لندست ۸ با تولیدات دمای سنجنده‌های مادیس^۵ در اراضی استان فارس ارائه شده است. بدلیل پوشش وسیع و برداشت دوبار در هر شبانه‌روز توسط هر یک از سنجنده‌های مادیس، محصول دمای آن بعنوان مرجع در شرایط جوی عاری از ابر انتخاب گردید. داده‌ها و محصولات سنجنده‌های

مادیس بصورت مجانی و همیشه در دسترس می‌باشند و از طریق وب‌سایت سیستم توزیع و آرشیو مادیس^۶ قابل دسترسی است. محصول دمای مادیس در بیش از ۵۰ مورد با داده‌های محلی در رنج دمای ۱۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و بخار آب ۰٫۴ تا ۴ سانتی‌متر در مقیاس یک کیلومتر اعتبارسنجی شده و دارای دقت بهتر از یک درجه کلون برای هر دو سنجنده مادیس است [۷، ۳۴، ۵۱، ۵۲]. با اینکه دمای حاصل از مادیس دارای دقت بهتر از یک درجه کلون برای هر دو سنجنده ترا و آکوا است ولی این دما، متوسط دما برای منطقه یک کیلومتر در یک کیلومتر است، بنابر این هر دمای مادیس معادل ۱۰۰ مقدار دمای لندست ۸ در سطح یک پیکسل مادیس است (با توجه به اختلاف قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده) لذا دمای حاصل از لندست ۸ به مراتب دقیقتر از دمای مادیس در مقیاس محلی خواهد بود. این روش پیشنهادی با توجه به عدم وجود پایگاه داده صحت سنجی دما در کشورمان، از داده‌های مادیس فقط در مناطق همگن حرارتی بعنوان رفرنس استفاده کرده است. بنا براین این روش پیشنهادی، برای هر زمان- مکان و برای هر سنجنده حرارتی قابل استفاده است.

بخشهای مختلف این مقاله بصورت زیر سازماندهی گردیده است: بعد از یک مقدمه، مشکلات ارزیابی دقت و اعتبارسنجی دمای سطح حاصل از داده‌های حرارتی ماهواره‌ای بیان شده است که نیازمند توسعه روشها و الگوریتم‌های جدید در این خصوص است. در بخش بعدی، روش سه مرحله‌ای پیشنهادی، برای اعتبارسنجی تقاطعی دمای سطح به تفصیل توضیح داده شده است. در بخش سوم اجرای روش پیشنهادی بر روی دو تصویر لندست ۸ در دو تاریخ مختلف ارائه شده است. در نهایت، در بخش چهارم نتیجه‌گیری از این تحقیق، آنالیز و بررسی گردیده است.

۲- روش پیشنهادی ارزیابی دقت دمای سطح

بدلیل عدم وجود شبکه‌های دائمی سنجش دمای سطح و پایگاه داده مناسب بعنوان دمای مرجع در کشورمان، روش پیشنهادی در این خصوص کمک شایانی در ارزیابی دقت دمای سطح در اغلب مطالعات و تحقیقات علوم زمین و محیط زیست خواهد داشت. طرح کلی از

^۱ Community Land Model ;^۲ Common Land Model

^۳ Atmospheric General Circulation Model

^۴ National Center for Atmospheric Research

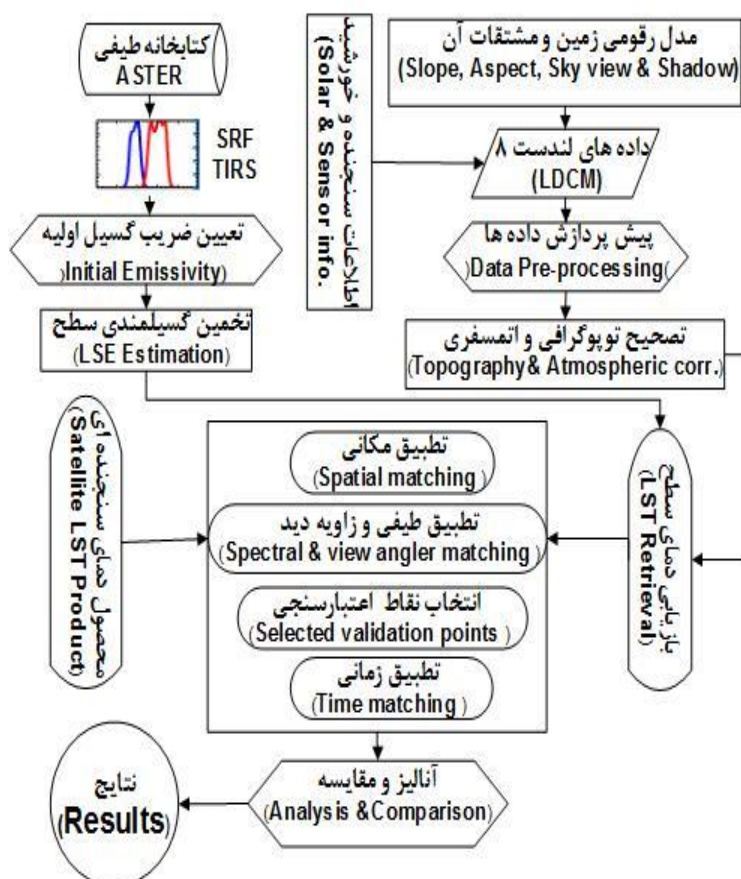
^۵ MOD/MYD11_L2 V5

^۶ Atmospheric Archive and Distribution System

^۷ Terra & Aqua

روش پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. این روش پیشنهادی دارای مرحل زیر است: در مرحله اول داده‌های تحقیق پیش پردازش شده و تصحیح توپوگرافی و اتمسفری بر روی آنها انجام گرفت. در مرحله دوم، ابتدا ضریب گسیل کلاسه‌های مختلف متناسب با روش محاسبه گسیلمندی سطح، با استفاده از کتابخانه طیفی ASTER، قانون کیرشف و مطابق با توابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی سنجنده لندست ۸ محاسبه شد و سپس میزان

گسیلمندی سطح محاسبه و درجه حرارت سطح زمین بازیابی گردید. در مرحله سوم، بعد از تهیه محصول دمای سنجنده‌های مادیس، ترا و آکوا^۱، پردازش‌های لازم بر روی آنها انجام گرفت و داده‌ها برای اجرای روش پیشنهادی آماده گردید. در مرحله چهارم روش پیشنهادی در سه مرحله جهت تطبیق زمانی-طیفی و مکانی محصول دمای سنجنده لندست ۸ و سنجنده مادیس اجرا و نتایج آنالیز و بررسی گردیده است.



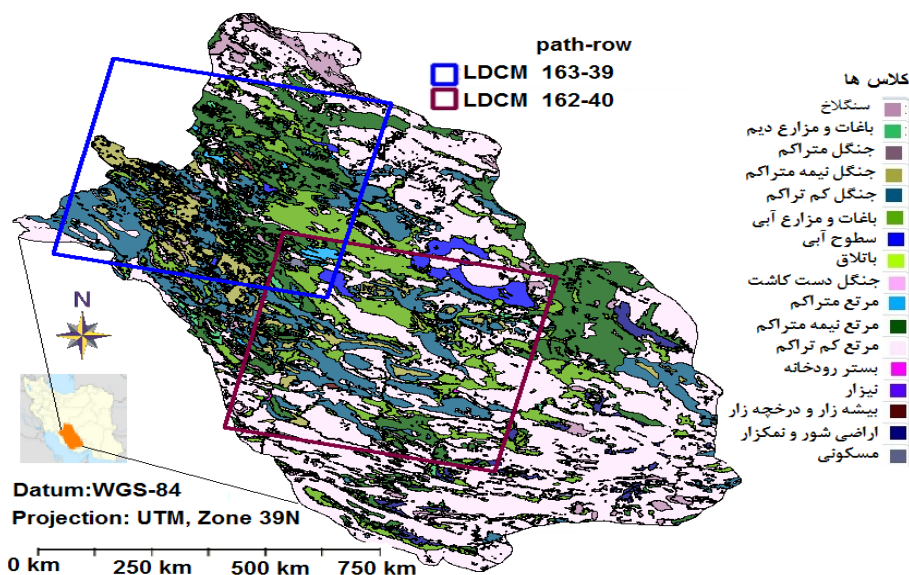
شکل ۱- طرح کلی از روش پیشنهادی اعتبارسنجی دقت دمای سطح

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

منطقه مورد مطالعه قسمتی از استان فارس بوده که با دو تصویر لندست ۸ پوشش داده می‌شود، این منطقه در بین طول جغرافیای ۲۵° ۲۵' - ۳۲° ۴۴' شمالی و عرض جغرافیای ۵۰° ۳۲' - ۵۵° ۵۴' شرقی قرار دارد. نقشه کاربری این منطقه شامل هفده نوع کلاس (کلاسه‌های متنوع) می‌باشد و تصاویر لندست ۸ متناظر این منطقه در تاریخ ۱۴ و ۲۱ ژوئن ۲۰۱۳ جمع آوری شده است. لازم به ذکر است که بدلیل وجود خطاهای کالیبراسیون در داده‌های

لندست ۸، این داده‌ها برای تصحیح و پردازش دوباره از سازمان زمین شناسی ایالات متحده^۱ درخواست گردید و در تاریخ می ۲۰۱۵ دوباره پردازش و تاثیر پارامترهای بهبود کالیبراسیون بر روی آنها انجام گرفت و در تحقیق حاضر از داده‌های جدید پردازش شده، استفاده گردید. شکل (۲) منطقه مورد مطالعه را با کلاسه‌های کاربری مختلف و موقعیت تصاویر لندست ۸ نشان می‌دهد.

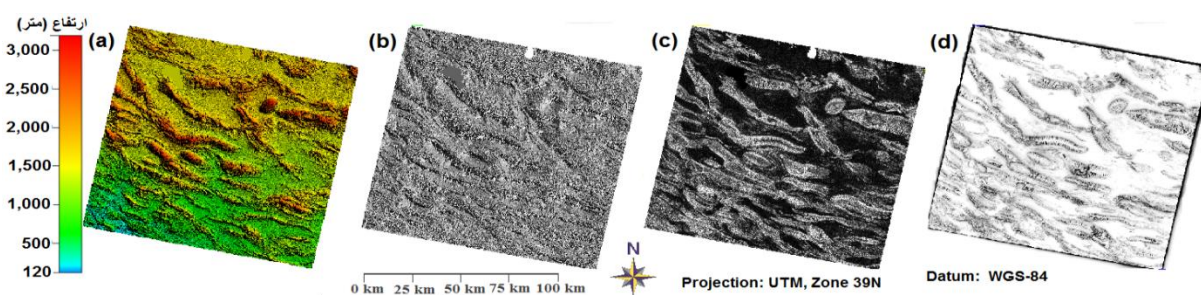
^۱ United States Geological Survey



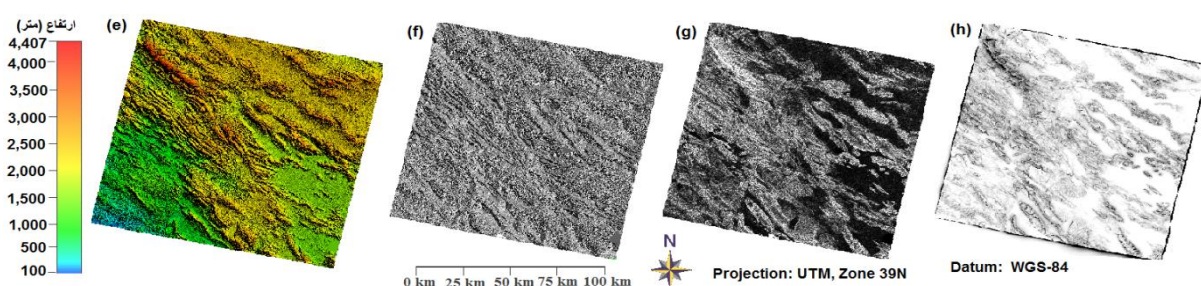
شکل ۲- منطقه مورد مطالعه همراه با نقشه کاربری (نقشه کاربری توسط جهاد کشاورزی استان فارس تهیه گردیده است)

تصحیح توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی سنجنده^۱ ASTER استفاده گردید و مشتقات لازم نظیر شیب^۲، تغییر شیب^۳، سایه^۴ و پارامتر برجستگی سطح^۵ محدود به بخشی از آسمان که دربرگیرنده تصویر است، استخراج گردید. در شکل (a^۳)، (b، c، d) مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن در تصویر اول لندست ۸ و شکل (e^۴، f، g، h) مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن در تصویر دوم نشان داده شده است.

بدیهی است قبل از محاسبه و استخراج پارامترهای فیزیکی سطح زمین نظیر دما، گسیلمندی، رادیانس انعکاسی-حرارتی سطح، آلبدو سطح و نظایر آن، انجام تصحیح رادیومتریکی تصاویر الزامی است. برای رسیدن به این هدف بایستی اثر اتمسفر، هندسه دید سنجنده، روشنایی خورشید و اثر توپوگرافی و ویژگیهای سطح روی تصاویر درنظر گرفته شود و تاثیر این عوامل در تخمین پارامترهای سطح حذف یا به حداقل برسد. در این تحقیق، برای انجام



شکل ۳- مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن در تصویر اول لندست ۸: (a) مدل رقومی ارتفاعی (b) شیب، (c) تغییر شیب، (d) skyview

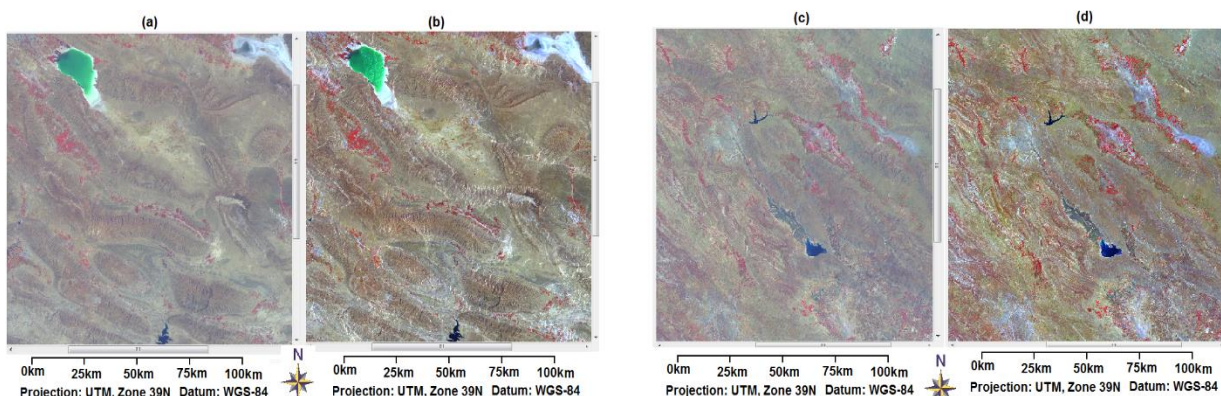


شکل ۴- مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن در تصویر دوم لندست ۸: (e) مدل رقومی ارتفاعی (f) شیب، (g) تغییر شیب، (h) skyview

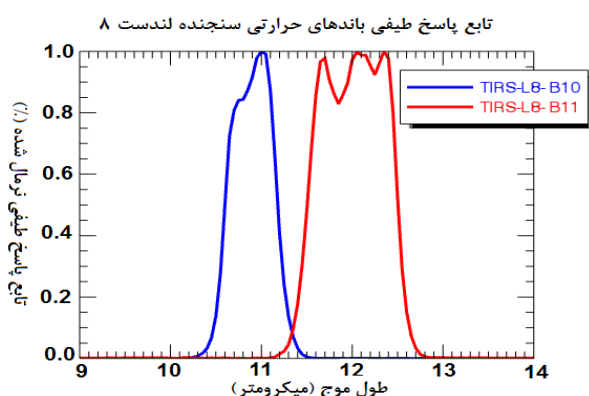
- ۱ ASTDEM
- ۲ Slope
- ۳ Aspect
- ۴ Shadow
- ۵ Skyview

سپس با استفاده از نرم افزار تصحیح اتمسفری و توپوگرافی ATCOR2/3^۱ که بصورت مستقل بر پایه محیط برنامه نویسی زبان تعاملی داده^۲ استوار بوده و از پایگاه داده مدل‌های انتقال تابش MODTRAN-4^۳ استفاده می‌کند [۳۶]، تصحیح اتمسفری و توپوگرافی بر روی تصاویر انجام گرفت. ATCOR2 اشاره به فقط تصحیح اتمسفری دارد و ATCOR3 بیانگر تصحیح اتمسفری توأم با تصحیح توپوگرافی را دارد که با پذیرش مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن این کار را انجام می‌دهد. پایگاه داده MODTRAN شامل طیف گسترده‌ای از انتقال تابشی از قبل محاسبه شده برای شرایط مختلف آب و هوایی، زاوای مختلف خورشید و سنجنده تهیه شده است. در نرم افزار تصحیح اتمسفری و توپوگرافی (ATCOR) اطلاعات مربوط به سنجنده و تصویر (نظیر

زاویه زنیت خورشید و سنجنده در زمان اخذ داده، زاویه سمت^۴ سنجنده و خورشید، تاریخ و زمان اخذ داده، اندازه پیکسل‌ها و غیره) از متافایل^۵ هر تصویر معرفی می‌گردد. علاوه بر آن، از الگوریتم پوشش گیاهی متراکم تیره (DDV)^۶ جهت برآورد ضخامت اپتیکی اتمسفری یا پارامتر قابلیت دید استفاده می‌کند [۳۶] و نوع مدل اتمسفری و آیروسل نیز از روی طول جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و تاریخ اخذ تصاویر تعیین گردید [۹، ۱۳] و به نرم‌افزار ATCOR معرفی شد. همچنین، جهت انجام تصحیح توپوگرافی، ارتفاع متوسط منطقه از مدل رقومی و قدرت تفکیک مکانی آن به همراه مشتقات حاصل از آن به نرم افزار معرفی گردید و نهایتاً تصحیح توپوگرافی و اتمسفری بر روی تصاویر انجام گرفت. شکل (a، b، c، d) نمونه‌ای از این تصحیحات را در قسمتی از تصاویر نشان می‌دهد.



شکل ۵- تصحیح توپوگرافی و اتمسفری در قسمتی از تصاویر: (a و b) به ترتیب تصویر اولیه و تصویر تصحیح شده در تصویر اول لندست ۸، (c و d) به ترتیب تصویر اولیه و تصویر تصحیح شده در تصویر دوم لندست ۸.



شکل ۶- توابع پاسخ طیفی نرمال شده باندهای حرارتی سنجنده لندست ۸ (مرجع داده‌ها، سایت سازمان زمین شناسی ایالات متحده)

از آنجاییکه تغییرات ضریب گسیل سطح تقریباً مستقل از دمای سطح است ($\Delta\epsilon=10^{-4}$)، لذا ضریب گسیل

۲-۲- تعیین گسیلمندی اولیه کلاسها و سطح زمین

برای تخمین دمای سطح، نیاز به ضریب گسیل اولیه عوارض سطح (بسته به روش تخمین گسیلمندی و نقشه کاربری منطقه مورد مطالعه) و میزان گسیلمندی سطح زمین می‌باشد. با توجه به توابع پاسخ طیفی سنجنده حرارتی لندست ۸ مطابق شکل (۶)، ضریب گسیل اولیه عوارض سطح در منطقه مورد مطالعه محاسبه گردید.

^۱ Atmospheric/topographic correction
^۲ Interactive Data Language
^۳ MODerate resolution atmospheric TRANsmission
^۴ Azimuth angle
^۵ Metafile of image
^۶ Dense dark vegetation (DDV)

اولیه سطح با در نظر گرفتن تابع پاسخ طیفی سنجنده حرارتی لندست ۸ از معادله (۱) محاسبه می‌گردد [۵].

$$\varepsilon_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) \varepsilon_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

در این معادله، i اشاره به باندهای حرارتی (باند ۱۰ و ۱۱) دارد، λ_1 و λ_2 به واحد میکرومتر و اشاره به محدوده باندهای حرارتی دارد، ε_{λ} بدون واحد بوده و اشاره به ضریب گسیل طیفی عوارض سطح زمین دارد، $R_i(\lambda)$ به درصد و بیانگر تابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی است که تابعی از طول موج است، $d\lambda$ نمادی برای متغیر انتگرال‌گیری است و یک کمیت خیلی کوچک را نشان می‌دهد و ε_i بدون واحد بوده و اشاره به ضریب گسیل باندهای حرارتی دارد. برای محاسبه ε_{λ} ضریب گسیل طیفی عوارض سطح زمین از کتابخانه طیفی ASTER در رنج طول موج ۰٫۴ تا ۱۴ میکرومتر استفاده شد [۳، ۳۵]. سپس، ضریب گسیل طیفی عوارض لازم از هر طیف توسط قانون کیرشهف^۱ در محدوده باندهای حرارتی سنجنده لندست ۸ محاسبه گردید. انتخاب یک مقدار معمول برای برخی از عوارض سطح نظیر خاک، بدلیل تغییرات زیاد ضریب گسیل انواع خاک، کار دشواری نسبت به پوشش گیاهی و سایر عوارض سطح می‌باشد [۴۰]. لذا برای انتخاب ضریب گسیل طیفی کلاس‌ها، متوسط ضریب گسیل مجموعه‌ای از کلاس‌های مشابه (بعنوان مثال از ۲۳ نوع ضریب گسیل خاک برای محاسبه ضریب گسیل طیفی آن کلاس) استفاده گردید. نتایج محاسبات ضریب گسیل طیفی برای کلاس‌های لازم، متناسب با روش تخمین گسیلمندی سطح، بصورت جدول (۱) محاسبه شدند.

جدول ۱- ضریب گسیل کلاس‌ها در باندهای حرارتی لندست ۸

کلاس	ε_{10}^a	ε_{11}^b	σ_{11}^b
پوشش گیاهی	0.9833	0.9842	0.0095
خاک بایر	0.9697	0.9757	0.0079
ترکیب خاک و گیاه	0.9765	0.9800	0.0063
مناطق آبی	0.9909	0.9861	0.0007

a, ضریب گسیل کلاس‌ها در باند ۱۰ و ۱۱, b: انحراف معیار نمونه های طیفی

سپس بمنظور تخمین میزان گسیلمندی در این تحقیق، از روش مبتنی بر اختلاف شاخص گیاهی نرمال شده^۲ استفاده شد. روشهای مختلفی با استفاده از روش اختلاف شاخص گیاهی نرمال شده میزان گسیلمندی سطح زمین را تخمین زده اند [۲۰، ۲۷، ۴۱، ۴۵، ۴۶، ۴۸]. اولین بار [۴۶] یک همبستگی بسیار بالایی بین گسیلمندی سطح در باند پوششی ۸-۱۴ میکرومتر و شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده لگاریتمی با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون گزارش کردند. پس از آن، [۴۵] یک روش تئوری بر اساس شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده پیشنهاد دادند که اثر ساختار هندسی پوشش گیاهی^۳ در تخمین ضریب گسیل را در نظر گرفتند. با این حال، این روش نیاز به دانش قبلی از برخی پارامترهای هندسی از پوشش گیاهی، مانند ارتفاع، عرض، و جدایی بین ردیف درخت‌ها را داشت که استفاده از این روش را محدود می‌کرد [۲۰]. با توجه به پیچیدگی روش پیشنهاد شده توسط [۴۵]، یک روش حد آستانه بر اساس شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده توسط [۳۹] پیشنهاد شد. آنها پیچیدگی مدل قبلی را کاهش دادند و برآورد گسیلمندی سطح را فرموله کردند. در روش پیشنهادی [۳۹]، ضریب گسیل هر باند حرارتی می‌تواند با استفاده از سه تابع خطی، با شرایطی که در یک پیکسل است از جمله اینکه از پوشش گیاهی کامل، یا از خاک کامل و یا از مخلوط خاک / پوشش گیاهی تشکیل شده است، برآورد شود. اخیراً [۴۲] نیز بهبود یافته روش مبتنی بر شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده را بر روی داده های یک کیلومتری سنجنده مادیس با استفاده از بازتاب انعکاسی باندهای مرئی-مادون قرمز بکار برد. بر این اساس، با در نظر گرفتن اختلاف در قدرت تفکیک مکانی، تابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی، محدوده طول موج باندهای حرارتی و طول موج موثر بین سنجنده مادیس و لندست ۸ وجود دارد که گسیلمندی سطح با تغییر این پارامترها تغییر می یابند و امکان استفاده از روش پیشنهادی [۴۲] در سنجنده لندست ۸ وجود ندارد. چون تغییرات گسیلمندی، وابسته به پارامترهای سطح (نظیر بافت، توپوگرافی، رطوبت) و سنجنده (نظیر قدرت

^۲ NDVI Based Emissivity Method

^۳ Cavity effect

^۱ Kirchhoff's law

تفکیک مکانی-طیفی، تابع پاسخ طیفی، طول موج موثر باندهای حرارتی و زاویه دید سنجنده) می‌باشد [۲۴]. در این تحقیق، بعد از تصحیح توپوگرافی و اتمسفری تصاویر از روش [۴۱] جهت تخمین گسیلمندی سطح استفاده شد زیرا این روش تکمیل شده روشهای قبلی در تخمین میزان گسیلمندی براساس اختلاف شاخص گیاهی نرمال است و بر روی انواع سنجنده‌ها با داده های مختلف ارزیابی و تایید شده است. برخی مطالعات نیز [۲۷] این روش را با محصولات سنجندهای دیگر ارزیابی و تایید کرده اند. همچنین، مناطق آبی در هر تصویر جداگانه فیلترکرده^۱ و مقادیر ضریب گسیل محاسباتی از جدول (۱) به آنها اختصاص داده شد تا داده های مورد نیاز برای بازیابی درجه حرارت سطح تکمیل گردد.

۲-۳- بازیابی دمای سطح

با داشتن گسیلمندی سطح، دمای سطح با استفاده از الگوریتم های تک باندی^۲ و دوباندی^۳ قابل محاسبه و بازیابی است. با اینکه در الگوریتم دو باندی، استفاده از دو باند حرارتی مجاور هم، باعث به حداقل رسیدن خطا در بازیابی دمای سطح می گردد [۳۷]. ولی بدلیل اینکه باند ۱۱ حرارتی لندست ۸ دارای بایاس و خطای بزرگ در محاسبه دماست [۴] و هنوز هم تحت کالیبراسیون می باشد و به پیشنهاد سازمان زمین شناسی ایالات متحده امکان استفاده از الگوریتم دو باندی حرارتی در محاسبه دمای سطح نیست. از این رو ناچار به استفاده از الگوریتم های تک باندی یعنی فقط باند ۱۰ حرارتی لندست ۸ هستیم. لازم به توضیح است که برخی مولفین [۱۱، ۱۹] با استفاده از داده‌های زمینی، مشخصات باندهای حرارتی سنجنده ۸ و مدل انتقال حرارتی MODTRAN و پایگاه داده TIGR^۴ الگوریتم دو باندی برای این سنجنده توسعه دادند. ولی در عمل مطالعاتی مختلف نشان دادند که باند ۱۱ حرارتی لندست ۸ دارای بایاس و خطای بزرگ در محاسبه دماست [۴، ۱۲]. بر این اساس سازمان زمین شناسی ایالات متحده استفاده از الگوریتم دو باندی در داده های لندست ۸ را توصیه نکرده است. اخیراً نیز

سازمان زمین شناسی ایالات متحده (اول نوامبر ۲۰۱۵) اعلان کرد که خطای هم رجستر کردن همچنان در سنجنده حرارتی لندست ۸ باقیست (http://landsat.usgs.gov/about_LU_Vol_9_Issue_7.php#2b).

بدیهی است در صورت استفاده از الگوریتم دو باندی نه تنها بر کلیت روش پیشنهادی ایرادی نخواهد داشت بلکه، دمای حاصل از داده لندست ۸ با دقت بهتری از حالت الگوریتم تک باندی محاسبه خواهد شد و انتظار می رود نتایج بهبود یافته و دارای دقت بهتر از نتایج ارائه شده در این تحقیق باشد. لذا در این تحقیق از روش تک باندی [۲۱] مطابق معادله (۲) استفاده گردید.

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\epsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (2)$$

در این معادله، T_s دمای سطح زمین به درجه کلوین، ϵ گسیلمندی سطح و بدون واحد می‌باشد، γ و δ دو پارامتر وابسته به تابع پلانک هستند که از معادله (۳) قابل محاسبه هستند، ψ_1 ، ψ_2 و ψ_3 به توابع اتمسفری معروفند و از معادله (۴) قابل محاسبه هستند و L_{sen} تابش طیفی دریافتی سنجنده در واحد وات در هر استرادیان در هر متر مربع^۵ است.

$$\gamma = \left\{ \frac{K_2 L_{sen}}{T_{sen}^2} \left[\frac{\lambda_e^4}{K_1} + \lambda_e^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$\delta = T_{sen} - \gamma L_{sen}$$

در معادله (۳)، K_1 و K_2 ضرایب ثابت باندهای حرارتی به ترتیب در واحدهای وات بر متر مربع _میکرومتر و درجه کلوین می باشند، T_{sen} دمای ظاهری رسیده به سنجنده به درجه کلوین، λ_e طول موج موثر باند حرارتی به میکرومتر می‌باشد.

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}, \quad \psi_2 = -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau}, \quad \psi_3 = L^\downarrow \quad (4)$$

در معادله (۴)، τ ضریب عبور اتمسفری به درصد، $L^\uparrow$ و $L^\downarrow$ به ترتیب تابش اتمسفری رو به بالا و رو به پایین که هر دو در واحد وات در هر استرادیان در هر متر مربع می‌باشند. در این تحقیق، توابع اتمسفری مستقیماً از وب-

^۱ Mask

^۲ Single channel algorithm

^۳ Split windows algorithm

^۴ Thermodynamic Initial Guess Retrieval (TIGR)

^۵ watt per steradian per square metre

سایت محاسبه پارامترهای تصحیح اتمسفری^۱ که توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا^۲، ناسا، برای سنجنده‌های حرارتی لندست توسعه داده شده است، محاسبه گردید که در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای تصحیح اتمسفری منطقه مورد مطالعه

تصویر	τ	L^+	L^-	بخار آب
162-40	0.85	1.19	1.98	1.20
163-39	0.92	0.64	1.09	0.80

حال با استفاده از الگوریتم تک باندی، دمای سطح مطابق معادله (۲) در دو فریم از تصویر لندست ۸ بازیابی و محاسبه گردید.

۳- اجرای روش پیشنهادی

همانطوریکه ذکر شد، بدلیل عدم وجود شبکه‌های دائمی سنجش دمای سطح و پایگاه داده مناسب بعنوان دمای مرجع در کشورمان، در زمان عبور اغلب سنجنده‌ها از جمله سنجنده لندست ۸، یکی از مشکلات اساسی دمای حاصل از داده‌های حرارتی سنجش از دور، ارزیابی دقت و اعتبارسنجی آن می‌باشد. بدیهی است که مناسب ترین داده مرجع برای ارزیابی دقت و اعتبارسنجی تقاطعی دمای سطح حاصل از لندست ۸، استفاده از محصول دمای سنجنده ASTER می‌باشد بدلیل اینکه تقریباً باندهای حرارتی متناظر دو سنجنده دارای قدرت تفکیک مکانی و طیفی همسان و نزدیک به هم هستند، ولی عدم همزمانی اخذ داده بین این دو سنجنده، استفاده از محصول دمای ASTER بعنوان دمای مرجع را غیرممکن ساخته است. از این‌رو، از محصول دمای سنجنده‌های مادیس بعنوان داده مرجع در روش پیشنهادی استفاده گردید. چرا که داده‌ها و محصولات سنجنده‌های مادیس دارای دقت بهتر از یک درجه کلون برای هر دو سنجنده ترا و آکوا است و این محصولات بصورت مجانی و همیشه در دسترس بوده و از طریق وبسایت سیستم توزیع و آرشیو مادیس قابل دسترسی هستند. لازم به ذکر است که هدف این تحقیق، ارائه روشی جدید برای ارزیابی دقت دمای حاصل از سنجندهایی با قدرت تفکیک متوسط و بالا است. با اینکه

دمای حاصل از مادیس دارای دقت بهتر از یک درجه کلون برای هر دو سنجنده ترا و آکوا است ولی این دما، متوسط دما برای منطقه یک کیلومتر در یک کیلومتر است، بنابر این هر دمای مادیس معادل ۱۰۰ مقدار دمای لندست ۸ در سطح یک پیکسل مادیس است (با توجه به اختلاف قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده) لذا دمای حاصل از لندست ۸ به مراتب دقیقتر از دمای مادیس در مقیاس محلی خواهد بود. چون همانطوریکه در مقدمه ذکر گردید تغییرات سریع دما در دامنه مکانی، بیش از ده درجه کلون در فاصله بسیار کوتاه اتفاق می افتد [۳۲، ۳۳]. در این مطالعه لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر در باندهای حرارتی در نظر گرفته شده است و دمای حاصل از آن در مناطق همگن حرارتی مطابق روش پیشنهادی با سنجنده مادیس ارزیابی و پیشنهاد گردیده است. اعتبارسنجی یک فرایندی است که بطور مستقل عدم قطعیت داده های به دست آمده از خروجی یک سیستم یا مدل را ارزیابی می‌کند. بدون اعتبار سنجی، هیچ روش، الگوریتم، و یا پارامترهای حاصل از داده‌های سنجش از دور را نمی‌توان با اعتماد و قطعیت استفاده کرد [۴۳]. برای اعتبارسنجی تقاطعی بین دمای سطح حاصل از لندست ۸ و محصول دمای سنجنده‌های مادیس تطبیق زمان داده‌ها، قدرت تفکیک طیفی، قدرت تفکیک مکانی و زاویه دید دو سنجنده الزامی و از مشکلات ارزیابی دقت است [۱۸، ۳۴]. برای حل این مشکلات، روش ارائه شده در تحقیق حاضر بصورت مراحل زیر، ارزیابی دقت بین این دو سنجنده را پیشنهاد داده و فقط برای تطبیق قدرت تفکیک مکانی از روش [۱۸، ۳۴] استفاده کرده است.

۳-۱- تطبیق قدرت تفکیک مکانی

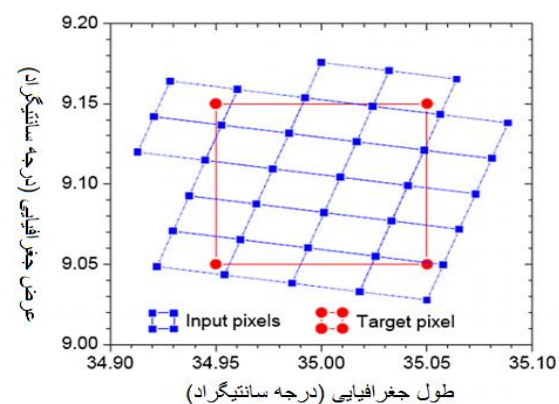
برای تطبیق اختلاف قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی متناظر بین دو سنجنده لندست ۸ (۱۰۰ متر) و مادیس (۱۰۰۰ متر)، آنها بایستی به اندازه یکسان تبدیل شوند تا امکان مقایسه دمای حاصل از دو سنجنده فراهم گردد. برای این منظور از روش پیشنهادی [۱۸، ۳۴] مطابق معادله (۵) استفاده گردید.

$$R_i = \sum_{j=1}^N \omega_{ji} R_j / \sum_{j=1}^N \omega_{ji} \quad \square; \omega_{ji} = S_{ji} / S_j \quad (5)$$

^۱ Atmospheric Correction Parameter Calculator

^۲ National Aeronautics and Space Administration

در این معادله R_i رادیانس محاسبه شده برای λ_m پیکسل مرکزی، N تعداد کل پیکسل‌های λ_m در مجاورت پیکسل مرکزی λ_m ، وزن پیکسل λ_m در بین پیکسل‌های مجاور نسبت به λ_m پیکسل مرکزی، S_{ji} مساحت ناحیه همپوشانی بین پیکسل‌های λ_m و λ_j ، S_j کل مساحت دربرگیرنده پیکسل λ_m و R_j رادیانس پیکسل λ_m می‌باشند. این روش به الگوریتم تجمعی وزندار محلی گروهی از پیکسل‌ها^۱ معروف است و برای تبدیل قدرت تفکیک مکانی پیکسل‌های لندست ۸ به یک کیلومتر از یک پنجره پردازش 11×11 استفاده گردید. شکل (۷) فرآیند انجام این الگوریتم را بصورت گرافیکی نمایش می‌دهد.



شکل ۷- روش تجمعی پیکسل‌ها [۱۸]

در این شکل، نقاط آبی رنگ مختصات گوشه‌های پیکسل λ_m با قدرت تفکیک مکانی کوچک را نشان می‌دهند، در حالیکه نقاط قرمز رنگ بیانگر مختصات گوشه‌های پیکسل λ_m را با قدرت تفکیک مکانی بزرگتر می‌باشند. براساس رابطه مکانی بین پیکسل λ_m و λ_j وزن w_{ji} پیکسل λ_m با استفاده از الگوریتم تقاطع چندضلعی محاسبه می‌شود و در نهایت مقدار تجمعی پیکسل λ_m با استفاده از معادله (۵) محاسبه می‌گردد.

۳-۲- تطبیق قدرت تفکیک طیفی و زاویه دید

بعد از اینکه قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده همسان گردید، بطور یقین نمی‌توان گفت که از نظر طیفی نیز پیکسل‌های نظیر طیف همسان دارند، زیرا اطلاعات طیفی رسیده به سنجنده وابسته به عوامل مختلفی نظیر میزان گسیلمندی سطح، توپوگرافی سطح، زاویه دید

سنجنده، خطای تصحیح هندسی بین داده‌های دو سنجنده و غیره می‌باشد. با اینکه در تصحیح توپوگرافی و اتمسفری تصاویر، برخی عوامل دخیل حذف یا به حداقل می‌رسد ولی اثر برخی از عوامل مذکور همچنان باقی است. برای این منظور، در روش پیشنهادی قبل از استخراج دمای نقاط همسان بین داده‌های دو سنجنده، مناطق همگن حرارتی تعیین شدند. انتخاب مناطق همگن حرارتی خطای تصحیح هندسی بین داده‌های دو سنجنده و اثر زاویه دید سنجنده را ناچیز و قابل اغماض می‌کند [۴۹]. برای انتخاب مناطق همگن حرارتی از آنالیز ماتریس سازگار یا هم‌رخداد^۲ درجات خاکستری که شامل مقدار زیادی اطلاعات در خصوص اطلاعات مکانی محلی در یک تصویر است، استفاده گردید. این ماتریس یک تابعی از زاویه و فاصله بین دو پیکسل مجاور است، که تعداد رخداد همسان از روابط بین هر پیکسل با همسایگانش را نشان می‌دهد و در چهار جهت $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ و 135° محاسبات لازم را انجام می‌دهد [۱۵]. لازم به ذکر است که این ماتریس در تحقیقات مختلف به نامهای متفاوت نظیر ماتریس وابستگی مکانی درجات خاکستری^۳، ماتریس هم‌رخداد درجات خاکستری^۴، ماتریس سازگار^۵ و ماتریس وابستگی درجات خاکستری^۶ نیز شناخته می‌شوند [۱۵، ۱۷، ۲۶، ۳۳]. در استفاده از ماتریس سازگاری درجات خاکستری، مشکل اصلی نحوه استخراج اطلاعات همگن است. برای این منظور، مجموعه‌ای از ویژگیهای بافت^۷ تصویری، از طریق ماتریس سازگار درجات خاکستری استخراج می‌شود که این ویژگیها بافت، توسط [۱۵] پیشنهاد گردیده است. این ویژگیها خصوصیات مختلفی از تصویر را با استفاده از ماتریس سازگار اندازه‌گیری می‌کنند که همه آنها مستقل از هم نیستند. از بین این ویژگیهای مختلف بافت تصویری، به طور خاص، دو ویژگی بافت یعنی ممان اختلاف معکوس^۸ و ممان دوم زاویه‌ای^۹ در یک تصویر توصیفی از همگنی محلی در یک تصویر است [۲، ۶]. معادلات (۶) و (۷) نحوه محاسبات دو المان اختلاف معکوس و ممان دوم زاویه‌ای را به ترتیب نشان می‌دهد.

^۲ Co-occurrence matrix

^۳ Grey-Tone Spatial-Dependence Matrix

^۴ Grey-Level Co-occurrence Matrix

^۵ Concurrence Matrix

^۶ Grey Level Dependency Matrix

^۷ Texture features

^۸ Inverse difference moment

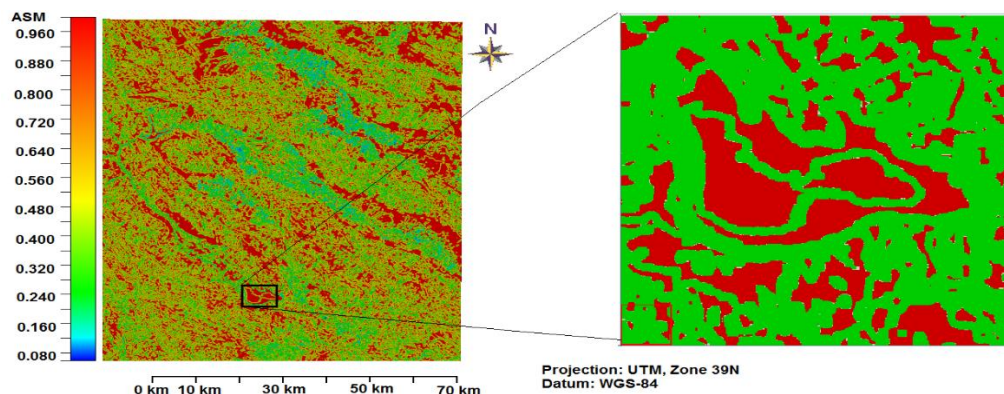
^۹ Angular second moment

^۱ Aggregation algorithm area-weighted pixel

در این معادلات $1/[1+(i-j)^2]$ وزن همگنی است، $N \times N$ اندازه پنجره پردازش، $P(i,j)$ مقدار هر پیکسل در پنجره پردازش است. f مقدار همگنی محاسبه شده برای سلول مرکزی در پنجره پردازش است. مقادیر این المانها بین صفر و یک است.

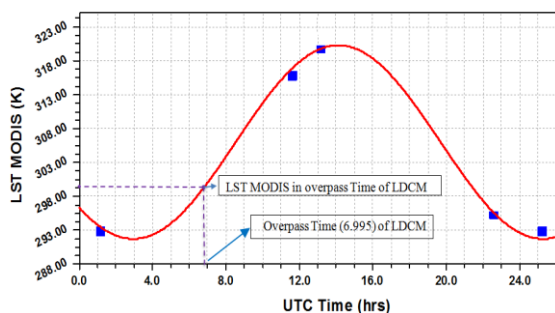
$$f = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{1}{1+(i-j)^2} p(i,j) \quad (6)$$

$$f = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{p(i,j)\}^2 \quad (7)$$



شکل ۸- مثالی از مناطق همگن حرارتی استخراج شده از طریق المان ASM در قسمتی از تصویر جهت مناطق تست و نقاط اعتبارسنجی

زمان‌های عبور سنجنده‌های مادیس، ترا و آکوا، (که تقریباً شروع برداشت از زمان ۰۱:۳۰ تا ۲۴:۰۰ به زمان استاندارد جهانی^۱ است) در طول یک شبانه‌روز در نظر گرفته شدند و سیستم تصویر و اندازه پیکسل‌ها بین تولیدات مادیس یکسان گردید. در ابتدا، حداقل پنج زمان عبوری برای هر پیکسل یا نقطه اعتبارسنجی، همراه با محصولات دمای سنجنده‌های مادیس^۲ استخراج گردید. سپس برای هر نقطه اعتبارسنجی انتخابی، تغییرات دمای سطح در طول یک شبانه روز که یک تابع سینوسی است، مدل گردید. این تابع سینوسی در شکل (۹) نشان داده شده است [۱]. لازم به ذکر است که در شرایط آفتابی و عاری از ابر، عامل اصلی کنترل درجه حرارت سطح زمین، انرژی خورشید است که معمولاً تغییرات تابش خورشیدی در طول روز تقریباً یک تابع سینوسی است [۱].



شکل ۹- تغییرات دمای سطح در طول یک شبانه روز در محصول سنجنده های مادیس در یک نقطه اعتبارسنجی

برای استخراج مناطق همگن از یک پنجره پردازش به اندازه 11×11 انتخاب گردید. انتخاب اندازه پنجره پردازش در این تحقیق با توجه به اختلاف قدرت تفکیک مکانی بین سنجنده حرارتی لندست ۸ و سنجنده حرارتی مادیس بود. شکل (۸) مثالی از مناطق همگن حرارتی استخراج شده از طریق المان ASM در قسمتی از تصویر جهت مناطق تست و نقاط اعتبارسنجی نشان می‌دهد. مناطق قرمز رنگ در شکل (۸) دارای همگنی بالا بود و مناطق آبی رنگ عدم همگنی حرارتی مناطق را نمایش می‌دهند. در هر دو المان، مناطقی که دارای مقدار همگنی بین ۰٫۹ تا ۱٫۰ بودند بعنوان مناطق با همگنی بالا و مقدار بین ۰٫۸ تا ۰٫۹ بعنوان مناطق نسبتاً همگن بعنوان مناطق تست و نقاط اعتبارسنجی در این تحقیق استفاده گردید. با انتخاب مناطق همگن در ارزیابی دقت تاثیر زاویه دید سنجنده در رادیانس حرارتی رو به بالای سطح ناچیز و قابل اغماض می‌باشد [۴۹].

۳-۳- تطبیق زمانی بین دو سنجنده

در سومین مرحله که از اهمیت زیادی برخوردار است، تطبیق زمانی بین محصول دمای دو سنجنده لندست ۸ و مادیس می‌باشد. چرا که تغییرات سریع دما در مکان و زمان، طوریکه تغییر بیش از ده درجه کلون در فاصله بسیار کوتاه و یا بیش از یک درجه کلون در یک زمان بسیار کوتاه (کمتر از یک دقیقه) اتفاق می‌افتد [۲۳، ۳۲]. برای این منظور،

^۱ Coordinated Universal /Greenwich Mean Time

^۲ MOD/ MYD 11_L2 and MOD/MYD 11 A1 products

در این تحقیق، تابع سینوسی تغییرات دما بصورت معادله (۸) مدل می‌گردد.

$$LST_{ij}^{Modis} = a_i + b_i \times \cos(c_i T_{ij}^{Modis} + d_i) \quad (8)$$

در این معادله LST_{ij}^{Modis} دمای سطح i ام نقطه همگن اعتبارسنجی در j ام زمان عبور محاسبه شده برای سنجنده مادیس، T_{ij}^{Modis} j ام زمان عبور سنجنده های ترا و آکوا مادیس در i ام نقطه همگن اعتبارسنجی و a_i, b_i, c_i, d_i ضرایب ثابت برای i ام نقطه همگن می‌باشند. این ضرایب برای هر نقطه همگن i ام بوسیله حداقل پنج دمای زمانهای عبور سنجنده‌های مادیس محاسبه می‌شوند. دقت تابع سینوسی بدست آمده برای هر نقطه اعتبارسنجی کمتر از یک درجه کلین و در رنج دقت محصول دمای مادیس می‌باشد. نهایتاً دمای مادیس در زمان عبور سنجنده لندست ۸ برای i ام نقطه همگن با استفاده از معادله (8) محاسبه گردید و بعنوان دمای مرجع در نظر گرفته شد.

برای ارزیابی روش پیشنهادی، دو تصویر لندست ۸ در دو زمان مختلف انتخاب شدند و به ترتیب ۳۸ و ۶۲ نقطه اعتبارسنجی در مناطق همگنی بالا (۰٫۹۰ تا ۱٫۰) در تصویر اول و دوم لندست ۸ استخراج گردید، همچنین این تعداد نقاط اعتبارسنجی در مناطق نسبتاً همگن (۰٫۸۰ تا ۰٫۹۰) به ترتیب ۳۰ و ۴۹ نقطه در تصویر اول و دوم لندست ۸ در نظر گرفته شدند. در ادامه ارزیابی نتایج به تفصیل آورده شده است.

۴- نتایج و بحث

هدف این تحقیق، ارائه روشی جدید برای ارزیابی دقت دمای حاصل از سنجندهایی با قدرت تفکیک متوسط و بالا است. با اینکه دمای حاصل از مادیس دارای دقت بهتر از یک درجه کلین برای هر دو سنجنده ترا و آکوا است ولی این دما، متوسط دما برای منطقه یک کیلومتر در یک کیلومتر است، بنابر این هر دمای مادیس معادل ۱۰۰ مقدار دمای لندست ۸ در سطح یک پیکسل مادیس است (با توجه به اختلاف قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده) لذا دمای حاصل از لندست ۸ به مراتب دقیقتر از دمای مادیس در مقیاس محلی خواهد بود. چون همانطوریکه توضیح داده شد، تغییرات سریع دما در دامنه مکانی، بیش از ده درجه کلین در فاصله بسیار کوتاه اتفاق می‌افتد [۲۳، ۳۲]، در این مطالعه لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر در باندهای

حرارتی در نظر گرفته شده است و دمای حاصل از آن در مناطق همگن حرارتی مطابق روش پیشنهادی با سنجنده مادیس ارزیابی و پیشنهاد گردیده است. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی در تعیین اختلاف بین محصولات دمای حاصل از سنجنده لندست ۸ و مادیس، میانگین اختلاف‌ها^۱، میانگین قدرمطلق اختلاف‌ها^۲، انحراف معیار اختلاف‌ها^۳ و ریشه میانگین مربع خطا^۴ مطابق معادلات (۹)، (۱۰) و (۱۱) بعنوان معیارهای کمی ارزیابی در نظر گرفته شدند [۲۲].

$$MD_{LST} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (LST_{i,LDCM} - LST_{i,MODIS}^{opt.Ldcm}) \quad (9)$$

$$MAD_{LST} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |LST_{i,LDCM} - LST_{i,MODIS}^{opt.Ldcm}| \quad (10)$$

$$SD_{LST} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(LST_{i,LDCM} - LST_{i,MODIS}^{opt.Ldcm}) - MD_{LST}]^2} \quad (11)$$

$$RMSE_{LST} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(LST_{i,LDCM} - LST_{i,MODIS}^{opt.Ldcm})]^2} \quad (12)$$

در این معادلات، $LST_{MODIS}^{opt.Ldcm}$ و LST_{MODIS} هر دو در واحد درجه کلین و به ترتیب دمای سطح حاصل از سنجنده مادیس در زمان عبور لندست ۸ و دمای سطح حاصل از سنجنده در هر نقطه اعتبارسنجی متناظر، N تعداد نقاط یا پیکسل‌های اعتبارسنجی انتخاب شده، می‌باشد. ارزیابی دقت بین دو سنجنده با توجه مقادیر همگنی مناطق در دو گروه، با همگنی بالا و نسبتاً همگن به ترتیب در محدوده‌های ۰٫۸۰ تا ۰٫۹۰ و ۰٫۹۰ تا ۱٫۰۰ در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از این ارزیابی در جدول (۲) نشان داده شده است.

مطابق نتایج حاصل در جدول (۲)، مثبت بودن اختلاف میانگین دماهای محاسباتی در هر دو تصویر بررسی شده، نشان می‌دهد که دمای حاصل از سنجنده لندست ۸ نسبت به دمای مادیس بیشتر برآورد شده است.^۵ دلیل آن از یک طرف می‌تواند بر خلاف محصول دمای مادیس، عدم استفاده از الگوریتم دوباندی محاسبه دمای سطح در لندست ۸ باشد، چرا که استفاده از الگوریتم دوباند حرارتی باعث به حداقل رسیدن خطا در ارزیابی دمای سطح می‌گردد [۳۷]. از طرف

^۱ Mean differences (MDs)

^۲ Mean absolute differences (MADs)

^۳ Standard deviations of differences (SDs)

^۴ Root-mean-square error

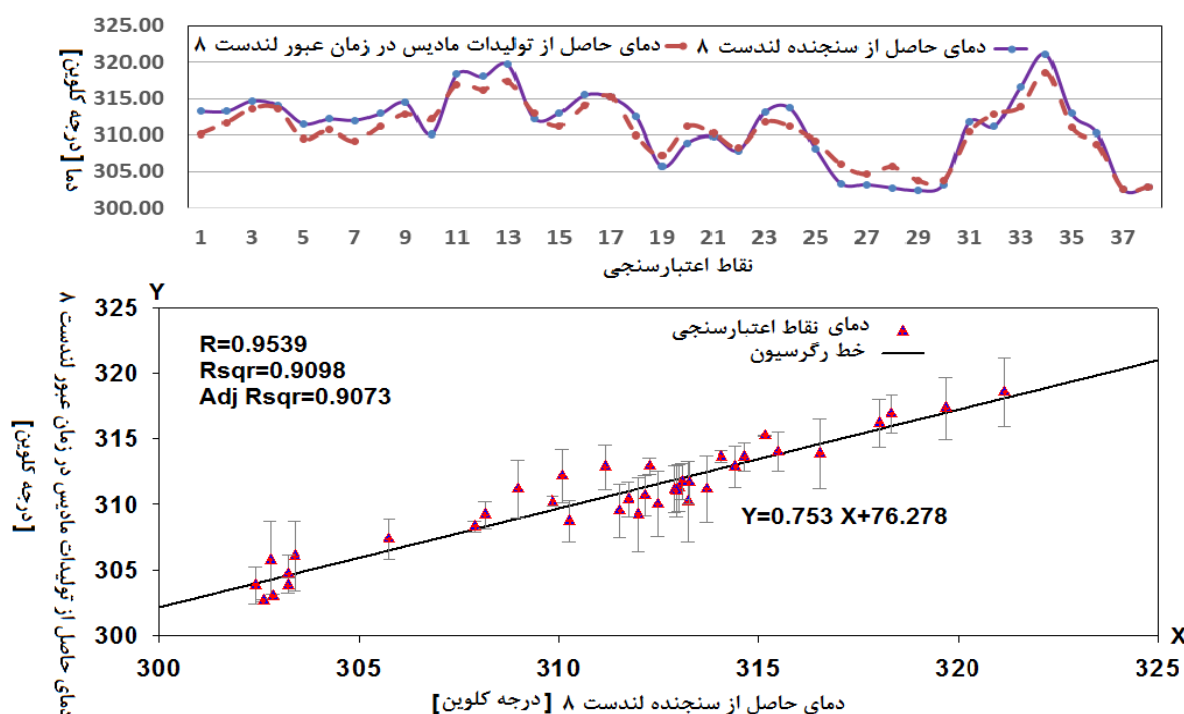
^۵ Overestimate

دیگر، علیرغم اینکه سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده استفاده از باند حرارتی ۱۰ را فقط توصیه کرده است، ولی بدلیل عدم کالیبراسیون مطلق سنجنده حرارتی لندست ۸ بایس و خطاهای آنها همچنان باقی است و پارامترهای کالیبراسیون آن بطور کامل بهبود نیافته است. بدیهی است

در صورت استفاده از الگوریتم دو باندی نه تنها بر کلیت روش پیشنهادی ایرادی نخواهد داشت بلکه، دمای حاصل از داده لندست ۸ با دقت بهتری از حالت الگوریتم تک باندی محاسبه خواهد شد و انتظار می رود نتایج بهبود یافته و دارای دقت بهتر از نتایج ارائه شده در این تحقیق باشد.

جدول ۲- مقایسه دمای سطح بین لندست ۸ و دمای حاصل تولیدات مادیس در زمان عبوری لندست ۸ در نقاط اعتبارسنجی

$LST_{LDCM} - LST_{MODIS}^{opt.Ldcm}$				تعداد نقاط (N)	میزان همگنی	مشخصه تصویر
MD _{LST} (K)	MAD _{LST} (K)	SD _{LST} (K)	RMSE(K)			
0.60	1.63	1.79	1.72	۳۸	0.90-1.00	۱۶۲-۴۰
۰.۹۴	۱.۲۷	1.73	۱.۹۵	۶۲	0.90-1.00	۱۶۳-۳۹
2.11	4.27	4.96	4.82	30	0.80-0.90	۱۶۲-۴۰
۲.۸۲	۳.۸۳	3.79	۴.۵۸	۴۹	0.80-0.90	۱۶۳-۳۹

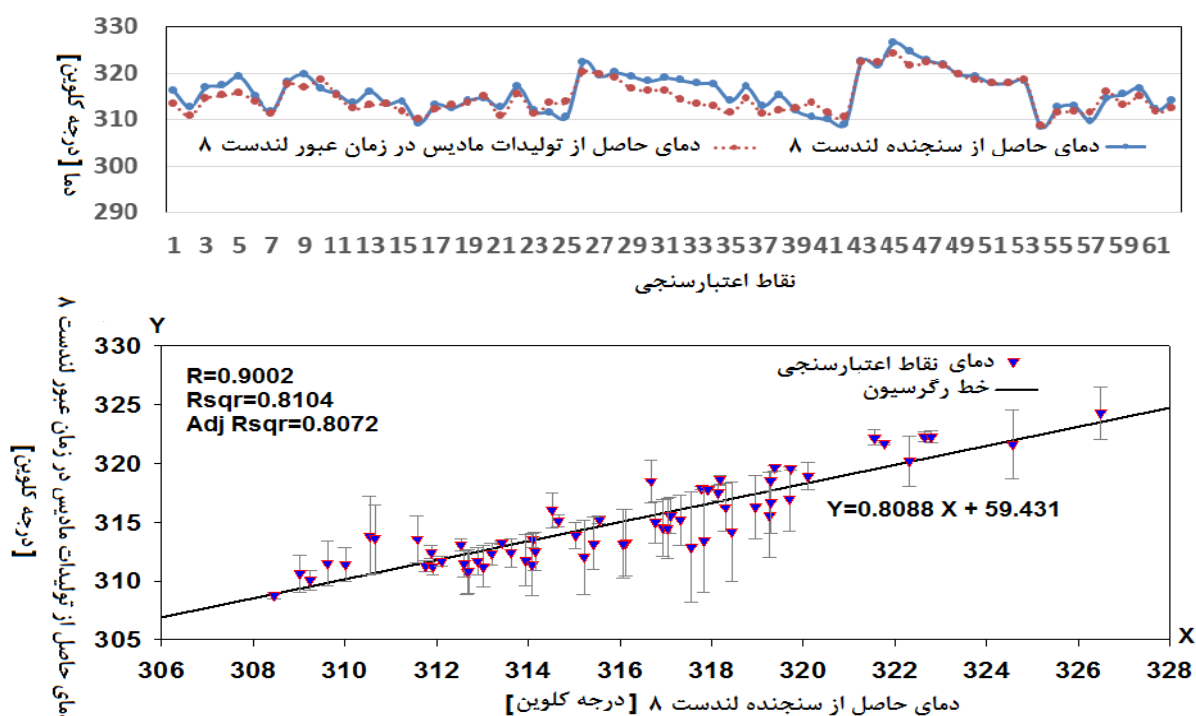


شکل ۱۰- مقایسه دمای سطح بین لندست ۸ و دمای حاصل تولیدات مادیس در زمان عبوری لندست ۸ در نقاط اعتبارسنجی در تصویر بررسی اول

همچنین ارزیابی دقت دمای محاسباتی در مناطق با همگنی بالا (۰.۹۰ تا ۱.۰۰) با پارامتر میانگین اختلافها به ترتیب دارای دقت ۰.۶ و ۰.۹۴ درجه کلون در رنج بررسی اول و دوم لندست ۸ گردیده است که در رنج خطای زیر یک درجه کلون دمای سنجنده‌های مادیس می‌باشد که در بیشتر از ۵۰ مورد با روشهای مختلف اعتبارسنجی صحت و دقت آنها به تأیید رسیده است [۷، ۳۴، ۵۱، ۵۲]. علاوه بر آن، ارزیابی دقت دمای محاسباتی در مناطق با همگنی بالا با پارامتر ریشه میانگین مربع خطا به ترتیب دارای دقت ۱.۶۳ و ۱.۲۷ درجه کلون در

تصویر بررسی اول و دوم لندست ۸ گردید. با این وجود، جهت بررسی ارزیابی دقت اعتبارسنجی در تک‌تک نقاط انتخابی، برای مناطق با همگنی بالا در تصاویر بررسی اول و دوم به ترتیب در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همچنین نوار خطای^۱ هر نقطه نیز ترسیم گردیده است.

^۱ Error bar



شکل ۱۱- مقایسه دمای سطح بین لندست ۸ و دمای حاصل تولیدات مادیس در زمان عبوری لندست ۸ در نقاط اعتبارسنجی در تصویر بررسی دوم

ارزیابی پارامترهای میانگین اختلاف‌ها و ریشه میانگین مربع خطا نظیر بالا در مناطق نسبتاً همگن (۰,۸۰ تا ۰,۹۰) نیز صورت گرفت و نشان داد که دقت نسبتاً خوبی دارند ولی نسبت به مناطق با همگنی بالا دارای دقت پایین می‌باشند. انتخاب چنین مناطقی بعنوان نقاط اعتبارسنجی در ارزیابی دقت دمای سطح در کاربرهایی با مقیاس محلی توصیه نمی‌شود ولی برای برخی کاربردها در مقیاس جهانی (پیکسل سائزهای چندین کیلومتر) که به دقت بالایی در محاسبه دما نیاز نیست و یا برای سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی پایین می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

لذا با توجه به نتایج حاصل در این تحقیق، برای کاربردهای مختلف در مقیاس محلی^۱ نظیر مدل سازی تبخیر و تعرق، برآورد رطوبت خاک، آب و هوایی شهری، هیدرولوژیکی، پایش پوشش گیاهی و مطالعات زیست محیطی، نقاط اعتبارسنجی بایستی از مناطق با همگنی بالا (۰,۹۰ تا ۱,۰۰) در تصویر انتخاب گردد. چنین مناطقی شامل، نواحی با پوشش گیاهی متراکم، مناطق آبی نظیر سدها یا دریاچه‌ها، نمکزارها، و نواحی نظایر آنها که دارای همگن حرارتی هستند، می باشند که پوشش

گیاهی و مناطق آبی در اکثر تصاویر وجود دارد و می‌توان از این مناطق بعنوان نواحی همگن حرارتی برای ارزیابی و اعتبارسنجی دمای سطح در این روش پیشنهادی استفاده نمود. همچنین برای کاربردهایی در مقیاس جهانی^۲ که دقت کمتری در محاسبه دمای سطح نقاط اعتبارسنجی مورد نیاز است، می توان مناطق با همگنی در رنج (۰,۸۰ تا ۱,۰۰) انتخاب و استفاده کرد. همچنین مطابق شکل (۱۰) و (۱۱) بررسی نوار خطاها در تک‌تک نقاط اعتبارسنجی، نشان می دهد که در نقاطی که همگنی نزدیک به ۱,۰۰ دارند، دارای نوار خطایی حداقل بوده و این بیانگر دقت قابل قبول در روش پیشنهادی است. چنین مناطقی معمولاً مناطق آبی و نواحی پوشش گیاهی با تراکم بالای ۰,۵ در معیار اختلاف شاخص گیاهی نرمال شده در تصاویر بررسی شده داشتند.

در کل، مزیت استفاده روش پیشنهادی، عدم نیاز به هر نوع اندازه‌گیریهای زمینی دما می باشد. همچنین این روش، علاوه بر اینکه روش با ثباتی در ارزیابی دقت دمای سطح می‌باشد، بلکه با توجه به عدم وجود پایگاه داده صحت سنجی دما در کشورمان برای هر زمان و مکان و برای هر سنجنده حرارتی قابل اجرا است.

^۲ Global

^۱ Local

سپاسگزاری

نویسندگان مایل به ابزار قدردانی از تمامی نهادها و سازمانهایی که داده‌های تحقیق حاضر را در اختیار مولفین قرار دادند، از جمله جهاد کشاورزی استان فارس بدلیل نقشه‌کاربری، سازمان زمین شناسی ایالات متحده و مرکز

مشاهدات منابع زمین بخاطر اخذ تصاویر لندست ۸ و پردازش مجدد آنها در اثر تغییر پارامترهای کالیبراسیون، سیستم توزیع و آرشو مادیس جهت اخذ محصولات مادیس، دانشگاه جانز هاپکینز بدلیل عرضه کتابخانه طیفی ASTER، قدردانی و سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] Alavi Panah, S., (2006). "Thermal remote sensing and its application in the earth sciences". Universaity of Tehran Press, 523.
- [2] Anys, H., Bannari, A., He, D. and Morin, D., (1994). "Texture analysis for the mapping of urban areas using airborne MEIS-II images, Proceedings of the first international airborne remote sensing conference and exhibition, pp. 231-245.
- [3] Baldrige, A., Hook, S., Grove, C. and Rivera, G., (2009). "The ASTER spectral library version 2.0." Remote Sensing of Environment, 113(4) 711-715.
- [4] Barsi, J.A., Schott, J.R., Hook, S.J., Raqueno, N.G., Markham, B.L. and Radocinski, R.G., (2014). "Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Vicarious Radiometric Calibration." Remote Sensing, 6(11): 11607-11626.
- [5] Becker, F. and Li, Z.-L., 1990. "Towards a local split window method over land surfaces." Remote Sensing, 11(3): 369-393.
- [6] Clausi, D.A. and Jernigan, M.E., (1998). "A fast method to determine co-occurrence texture features." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(1): 298-300.
- [7] Coll, C., Caselles, V., Galve, J.M., Valor, E., Niclos, R., Sánchez, J.M. and Rivas, R., (2005). "Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data." Remote Sensing of Environment, 97(3): 288-300.
- [8] Coll, C., Valor, E., Galve, J.M., Mira, M., Bisquert, M., García-Santos, V., Caselles, E. and Caselles, V., (2012). "Long-term accuracy assessment of land surface temperatures derived from the Advanced Along-Track Scanning Radiometer." Remote Sensing of Environment, 116: 211-225.
- [9] Cooley, T., Anderson, G., Felde, G., Hoke, M., Ratkowski, A., Chetwynd, J., Gardner, J., Adler-Golden, S., Matthew, M. and Berk, A., (2002). "FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. 2002 IEEE International. IEEE, pp. 1414-1418.
- [10] Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R.E., Baker, I., Bonan, G.B., Bosilovich, M.G., Denning, A.S., Dirmeyer, P.A., Houser, P.R. and Niu, G., (2003). "The common land model." Bulletin of the American Meteorological Society, 84(8): 1013-1023.
- [11] Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J. and Li, J., (2014). "Split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 TIRS data, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. IEEE, pp. 3578-3581.
- [12] Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J. and Zhao, S., (2015). "A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data." Remote Sensing, 7(1): 647-665.
- [13] Guide, F.U.s., (2004). "ENVI FLAASH Version 4.1, September, 2004 Edition, Research Systems. Inc.
- [14] Guillevic, P.C., Privette, J.L., Coudert, B., Palecki, M.A., Demarty, J., Ottlé, C. and Augustine, J.A., (2012). "Land Surface Temperature product validation using NOAA's surface climate observation networks—Scaling methodology for the Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS)." Remote Sensing of Environment, 124: 282-298.
- [15] Haralick, R.M., Shanmugam, K. and Dinstein, I.H., (1973). "Textural features for image classification." Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on(6): 610-621.
- [16] Hulley, G.C. and Hook, S.J., (2009). "Intercomparison of versions 4, 4.1 and 5 of the MODIS Land Surface Temperature and Emissivity products and validation with laboratory measurements of sand samples from the Namib desert, Namibia." Remote Sensing of Environment, 113(6): 1313-1318.
- [17] Jain, A.K. and Farrokhnia, F., (1990). "Unsupervised texture segmentation using Gabor filters, Systems, Man and Cybernetics, 1990. Conference Proceedings., IEEE International Conference on. IEEE, pp. 14-19.

- [18] Jiang, G.-M., (2007). "Retrievals of land surface emissivity and land surface temperature from MSG1-SEVIRI data, PhD diss., Université Louis-Pasteur Strasbourg.
- [19] Jimenez-Munoz, J.C., Sobrino, J., Skokovic, D., Mattar, C. and Cristobal, J., (2014). "Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data." *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 11(10): 1840-1843.
- [20] Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Gillespie, A., Sabol, D. and Gustafson, W.T., (2006). "Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI." *Remote Sensing of Environment*, 103(4): 474-487.
- [21] Jiménez-Muñoz, J.C. and Sobrino, J.A., (2003). "A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 108(D22)
- [22] Kuenzer, C. and Dech, S., (2013). "Thermal Infrared Remote Sensing, Sensors, Methods, Applications, 17. Springer, 546 pp.
- [23] Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I.F. and Sobrino, J.A., (2013). "Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives." *Remote Sensing of Environment*, 131: 14-37.
- [24] Li, Z.-L., Wu, H., Wang, N., Qiu, S., Sobrino, J.A., Wan, Z., Tang, B.-H. and Yan, G., (2013). "Land surface emissivity retrieval from satellite data." *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10): (3084-3127.
- [25] Liu, Y., Hiyama, T. and Yamaguchi, Y., (2006). "Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area." *Remote Sensing of Environment*, 105(2): 115-128.
- [26] Marceau, D.J., Howarth, P.J., Dubois, J.-M.M. and Gratton, D.J., (1990). "Evaluation of the grey-level co-occurrence matrix method for land-cover classification using SPOT imagery." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4): 513-519.
- [27] Momeni, M. and Saradjian, M., (2007). "Evaluating NDVI-based emissivities of MODIS bands 31 and 32 using emissivities derived by Day/Night LST algorithm." *Remote Sensing of Environment*, 106(2): 190-198.
- [28] Neteler, M., (2010). "Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data." *Remote sensing*, 2(1): 333-351.
- [29] Niclòs, R., Galve, J.M., Valiente, J.A., Estrela, M.J. and Coll, C., (2011). "Accuracy assessment of land surface temperature retrievals from MSG2-SEVIRI data." *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 2126-2140.
- [30] Oleson, K.W., Dai, Y., Bonan, G., Bosilovich, M., Dickinson, R., Dirmeyer, P., Hoffman, F., Houser, P., Levis, S. and Niu, G.-Y., (2004). "Technical description of the community land model (CLM), NCAR Technical Note NCAR/TN-461+ STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- [31] Pinker, R.T., Sun, D., Hung, M.-P., Li, C. and Basara, J.B., (2009). "Evaluation of satellite estimates of land surface temperature from GOES over the United States." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(1): 167-180.
- [32] Prata, A., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J. and Ottele, C., (1995). "Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects." *Remote Sensing Reviews*, 12(3-4): 175-224.
- [33] Pratt, W.K., (1991). "Image detection and registration." *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside, Second Edition*: 651-678.
- [34] Qian, Y.-G., Li, Z.-L. and Nerry, F., (2013). "Evaluation of land surface temperature and emissivities retrieved from MSG/SEVIRI data with MODIS land surface temperature and emissivity products." *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10): 3140-3152.
- [35] Quan, W., Chen, H., Han, X., Liu, Y. and Ye, C) ,2012". (A modified Becker's split-window approach for retrieving land surface temperature from AVHRR and VIRR." *Acta Meteorologica Sinica*, 26: 229-240.
- [36] Richter, R. and Schl pfer, D., (2013). "Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2/3 User Guide, Version 8.3. 1, February 2014).
- [37] Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y. and Karnieli, A., (2014). "Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm." *Sensors*, 14(4): 5768-5780.
- [38] Snyder, W.C., Wan, Z., Zhang, Y. and Feng, Y.-Z., (1997). "Requirements for satellite land surface temperature validation using a silt playa." *Remote Sensing of Environment*, 61(2): 279-289.

- [39] Sobrino, J. and Raissouni, N., (2000). "Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco." *International Journal of Remote Sensing*, 21(2): 353-366.
- [40] Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C. and Paolini, L., (2004). "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5." *Remote Sensing of environment*, 90(4): 434-440.
- [41] Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Sòria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A. and Martínez, P., (2008). "Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2): 316-327.
- [42] Tang, B.-H., Shao, K., Li, Z.-L., Wu, H. and Tang, R., (2015). "An improved NDVI-based threshold method for estimating land surface emissivity using MODIS satellite data." *International Journal of Remote Sensing*(ahead-of-print): 1-15.
- [43] Tang, H. and Li, Z.-L., (2014). "Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications. Springer Science & Business Media, 298 pp.
- [44] Trigo, I.F., Monteiro, I.T., Olesen, F. and Kabsch, E., (2008). "An assessment of remotely sensed land surface temperature." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 113(D17).
- [45] Valor, E. and Caselles, V., (1996). "Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas." *Remote sensing of Environment*, 57(3): 167-184.
- [46] Van de Griend, A. and Owe, M., (1993). "On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces." *International Journal of remote sensing*, 14(6): 1119-1131.
- [47] Vauclin, M., Vieira, S., Bernard, R. and Hatfield, J., (1982). "Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil." *Water Resources Research*, 18(6): 1677-1686.
- [48] Walawender, J.P., Hajto, M.J. and Iwaniuk, P., (2012). "A new ArcGIS toolset for automated mapping of land surface temperature with the use of LANDSAT satellite data, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International. IEEE, pp. 4371-4374.
- [49] Wan, Z., (1999). "MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD)." *Institute for Computational Earth System Science, Santa Barbara*, 75.
- [50] Wan, Z., (2008). "New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products." *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 59-74.
- [51] Wan, Z. and Li, Z.L., (2008). "Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product." *International Journal of Remote Sensing*, 29(17-18): 5373-5395.
- [52] Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. and Li, Z.-L., (2004). "Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature." *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 261-274.