



یک رویکرد ترکیبی از داده های سنجش از دور و کتابخانه طیفی جهت برآورد گسیلمندی سطح

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴

حسن امامی^{۱*}، آرش رحمانی زاده^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده فنی و مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده فنی و مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

چکیده

در این تحقیق، یک رویکرد ترکیبی از داده های سنجش از دور و کتابخانه طیفی جهت برآورد گسیلمندی سطح پیشنهاد گردیده است که بر روی هر سنجنده اپتیکی قابل اجراست. روش پیشنهادی نه تنها با دقت بهتری گسیلمندی سطح را بصورت تابعی از انعکاس عوارض مختلف سطح تخمین می زند، بلکه توابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی و انعکاسی را در برآورد گسیلمندی سطح مدنظر قرار می دهد. همچنین، روش پیشنهادی رابطه ضعیف بین گسیلمندی و بازتاب فقط باند قرمز در روش های قبلی را بدلیل استفاده از بازتاب همه باندهای انعکاسی تقویت می نماید. روش پیشنهادی بر روی تصویری از لندست ۸ اجرا شد و گسیلمندی حاصل با دو محصول گسیلمندی سنجنده هواپرد پیشرفته با رادیمترسنج انعکاسی و حرارتی (استر) مقایسه و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی در باند ۱۰ حرارتی لندست ۸ در مقایسه با محصول گسیلمندی متناظر تصویر بررسی اول و دوم سنجنده استر به ترتیب دارای خطای ۰/۷۶٪ و ۰/۷۵٪ با در نظر گرفتن پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا می باشد، همچنین این خطا در باند ۱۱ حرارتی به ترتیب دارای مقدار ۱/۴۹٪ و ۱/۰۶٪ محاسبه گردید. خطای بیشتر در باند حرارتی ۱۱ می تواند مربوط به اختلاف نسبتاً زیاد در تابع پاسخ طیفی و رنج طیفی و طول موج موثر بین باند ۱۱ لندست ۸ و باند ۱۴ استر باشد. نتایج این تحقیق، گسیلمندی سطح را به صورت تابعی از بازتاب باندهای انعکاسی محاسبه کرده و گسیلمندی سطح در هر پیکسل متناسب با بازتاب انعکاسی مقدار گسیلمندی خاص خود را دارد که متفاوت از پیکسل های مجاورش است در حالی که در روش قبلی برای گروهی از پیکسل ها که مقادیر ثابتی از ضریب گسیل تعلق می گرفت و گسیلمندی سطح بصورت مقدار ثابت و گسسته در هر منطقه ای از تصویر محاسبه می گردید.

کلمات کلیدی: گسیلمندی سطح زمین، دمای سطح زمین، لندست ۸، سنجش از دور.

۱- مقدمه

در طول چند دهه گذشته، تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای داده‌های ضروری را برای پایش محیط زیست تولید کرده است. مشاهدات زمین از طریق سنجش از راه دور را می‌توان به سنجش از دور مرئی و مادون قرمز نزدیک، سنجش از راه دور فروسرخ حرارتی و سنجش از راه دور مایکروویو بر اساس محدوده پاسخ طیفی سیستم‌های سنجش از دور طبقه‌بندی شود. از آنجایی که حسگرهای حرارتی روی فضاپیماها فقط تشعشعات طیفی را در بالای جو اندازه‌گیری می‌کنند، تشعشعات اندازه‌گیری شده نه تنها تحت تأثیر پارامترهای سطحی مانند گسیلمندی سطح زمین و دما، بلکه تحت تأثیر ترکیب و ساختار حرارتی جو در طول مسیر بین سطح و سنسورها قرار می‌گیرند. در سنجش از دور، دو ویژگی سطح (گسیلمندی عوارض سطح زمین و دمای سطح زمین) را می‌توان مستقیماً از داده‌های حرارتی بازیابی کرد. پارامترها یا متغیرهای دیگر سطح مانند رطوبت خاک و تبخیر و تعرق سطح زمین را می‌توان به‌طور غیرمستقیم تعیین کرد. پارامتر گسیلمندی سطح، یکی از مهم‌ترین ویژگی ذاتی مواد و پدیده‌های سطح زمین است، لذا نه تنها بر آورد این پارامتر برای به دست آوردن دمای سطح زمین ضروری است بلکه آن اطلاعات مفیدی برای زمین‌شناسی و مطالعات زیست‌محیطی، نقشه‌های معدنی فراهم می‌کند و یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی برای مدل‌های آب و هوا، محیط زیست و بیولوژیکی است (۳ و ۹). اهمیت برآورد پارامتر گسیلمندی تا اندازه‌ای ارزشمند است که یک پروژه بزرگ در موسسه فناوری کالیفرنیا توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی ناسا، آزمایشگاه نیروی محرکه جت، انجام شد. برای رسیدن به چنین محصول ارزشمند، ناسا در طول ۱۵ سال با استفاده از میلیون‌ها تصویرسنجنده استر مجموعه پایگاه داده‌های مختلف، گسیلمندی نظیر ASTER GEDv2- GEDv3 و GEDv4 (Global Emissivity Dataset) را تولید کردند (۷ و ۸). علاوه بر این، پایگاه داده دیگری از گسیلمندی ماهیانه سطح توسط دانشگاه ویسکانسین از روی داده‌های سنجنده مادیس توسعه داده شده است. وجود این پایگاه‌های داده از پارامتر ضریب گسیل سطح، ارزشمند بودن این پارامتر را در کاربرهای مختلف بیان می‌کند (۲۷). به منظور برآورد گسیلمندی سطح از داده‌های ماهواره‌ای چندین روش وجود دارد که در محدوده طیفی مرئی - مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی یا هر دو آنها اعمال می‌شود. در ناحیه سنجش از دور نوری، با توجه به روش‌هایی تعیین گسیلمندی توأم با دمای سطح را می‌توان به سه نوع متمایز طبقه‌بندی کرد (۱۵). گروه اول، روش‌های بازیابی گام به گام است که ابتدا گسیلمندی و سپس دمای سطح به طور جداگانه تعیین می‌شود (۲، ۴، ۵، ۱۱، ۲۱ و ۳۵). در این گروه فرض بر معلوم بودن پروفیل‌های اتمسفری است. گروه دوم، الگوریتم‌های بازیابی همزمان هر دو گسیلمندی و دمای سطح با فرض معلوم بودن پروفیل‌های اتمسفری، بر اساس برخی از فرضیات یا محدودیت است (۳۸). گروه سوم، روش‌هایی که پروفیل‌های اتمسفری، گسیلمندی و دمای سطح به طور همزمان بازیابی می‌گردد (۱۷ و ۴۰). لذا، روش‌های

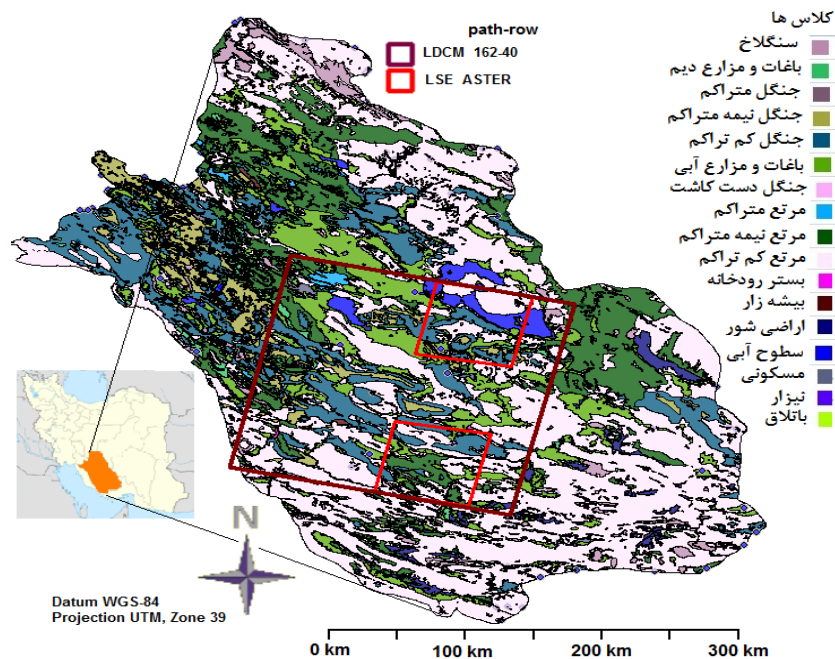
مختلف برآورد گسیلمندی سطح با اهداف یکسان ولی تحت شرایط مختلف، برای کاربردهای مختلف، دارای مزایا و محدودیت‌هایی پیشنهاد شده است. در میان روش‌های مختلف تعیین گسیلمندی در گروه اول، روش مبتنی بر شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده یک روش نسبتاً ساده و بر اساس یک رویکرد نظری است. مناطق با پوشش گیاهی متراکم، تقریباً شبیه جسم سیاه عمل کرده و طیف ضریب گسیل آنها تقریباً ثابت و نزدیک به ۱ است. بنابراین تخمین ضریب گسیل برای این نوع از پدیده‌های سطح آسان‌تر از سطوح خاک یا سنگ می‌باشد. در واقع، روش برآورد گسیلمندی مبتنی بر شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده یک مقدار ثابت از ضریب گسیل را برای این مناطق فرض می‌کنند (۳۱). علاوه بر این، این روش می‌تواند در بسیاری از ماهواره‌های سنجش از دور که دارای باندهای طیفی در محدوده قرمز و مادون قرمز نزدیک هستند، استفاده شود. رویکردهای مختلفی از روش مبتنی بر شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده، برای برآورد گسیلمندی سطح استفاده شده است (۱۰، ۱۸، ۱۹، ۳۱، ۳۲، ۳۴، ۳۶ و ۳۷). اخیراً تانگ و همکاران (۳۲) 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 می‌یابد و امکان استفاده روش پیشنهادی تانگ و همکارانش (۳۲) در سنجنده لندست ۸ وجود ندارد. چون تغییرات گسیلمندی، وابسته به پارامترهای سطح (نظیر بافت، توپوگرافی، رطوبت) و سنجنده (نظیر قدرت تفکیک مکانی-طیفی، تابع پاسخ طیفی، طول موج موثر باندهای حرارتی و زاویه دید سنجنده) می‌باشد (۱۶). لذا، با بکارگیری مقادیر انعکاس باندهای انعکاسی در محاسبه گسیلمندی سطح، تاثیر پارامترهای سطح در محاسبه گسیلمندی بصورت غیرمستقیم دخالت داده می‌شود. ولی تعمیم روش بهبود یافته مادیس تانگ و همکاران (۳۲) بر داده‌های لندست ۸ به دلایل زیر امکانپذیر نیست. شرط اول، همسان نبودن زاویه دید دو سنجنده است. یکی از پارامترهای اساسی که باعث تغییر گسیلمندی سطح می‌گردد، زاویه دید سنجنده است که برای زاویه دید بزرگ‌تر از ۳۰ درجه تاثیرش بر روی گسیلمندی سطح محسوس بوده و غیرقابل اغماض است (۳۳). زاویه دید سنجنده لندست ۸ نزدیک به صفر ولی سنجنده مادیس در منطقه مطالعاتی ما بزرگ‌تر از ۵۰ درجه است شرط دوم، یکسان کردن قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده است که این تفاوت بین لندست ۸ و مادیس حدود ۱۰ برابر است. برای یکسان کردن قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده نمی‌توان با روش ساده اندازه پیکسل‌ها را ۱۰ برابر کرد، زیرا قدرت تفکیک مکانی برای هر پیکسل تصویر از روی تابع گسترش نقطه‌ای هر سنجنده (تابع پاسخ مکانی) تعیین می‌گردد (۲۶). که اولاً این تابع بصورت ترکیب خطی از توابع گسترش نقطه‌ای سیستم اپتیکی هر سنجنده بدست می‌آید، ثانیاً در اختیار عموم قرار نمی‌گیرد و مطالعات مختلف آن را به روش‌های مختلف تقریب

می‌زنند (۶ و ۱۲). بایستی با استفاده از روش‌های نظیر قیصر اشنایدر (۱۲) توابع گسترش نقطه‌ای سیستم اپتیکی هر دو سنجنده را تعیین و سپس قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده را یکسان نمود. شرط سوم، بعد از هم یکسان کردن قدرت تفکیک مکانی، پیدا کردن رابطه طیفی بین پیکسل‌های همسان در دو سنجنده است. بدلیل متفاوت بودن تابع پاسخ طیفی و رنج طول موج متفاوت باندهای حرارتی متناظر بین مادیس و لندست ۸، طیف یک پیکسل مادیس معادل طیف 10×10 پیکسل لندست ۸ است. برای این منظور بایستی با استفاده از کتابخانه‌های طیفی گسیلمندی نظیر MODIS UCSB emissivity library رابطه طیفی بین دو سنجنده را برای کلاس‌های اساسی سطح زمین بدست آورد و رابطه طیفی بین پیکسل‌های همسان دو سنجنده برقرار کرد. علاوه بر برقراری شرایط فوق، خطای تصحیح هندسی در حد $0/1$ پیکسل در سنجنده مادیس معادل یک پیکسل در باند های حرارتی سنجنده لندست ۸ است لذا بجز در مناطق همگن حرارتی امکان مقایسه طیف حرارتی در حالت کلی وجود ندارد و چنین خطایی خود از علل بروز خطا در اندازه‌گیری پارامترهای سطح می باشد (۳۹). بخشهای مختلف این مقاله بصورت زیر سازماندهی گردیده است: بعد از یک مقدمه، که اشاره به روشهای مختلف برآورد گسیلمندی سطح بر اساس شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده را داشت و مشکلات این روش‌ها را بیان کرد که نیازمند توسعه روش‌های جدید در این خصوص است. در بخش بعدی، منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق معرفی گردیده و پیش‌پردازش‌های لازم بر روی داده‌ها به تفصیل توضیح داده شده است. در بخش سوم، یک رویکرد ترکیبی از داده‌های سنجش از دور و کتابخانه طیفی جهت برآورد گسیلمندی سطح ارائه شده است. در بخش چهارم، مقایسه و اعتبارسنجی روش پیشنهادی آمده است و در نهایت، در بخش پنجم نتیجه‌گیری از این تحقیق، آنالیز و بررسی گردیده است.

۲- منطقه مطالعاتی، داده‌ها و پیش‌پردازش آنها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

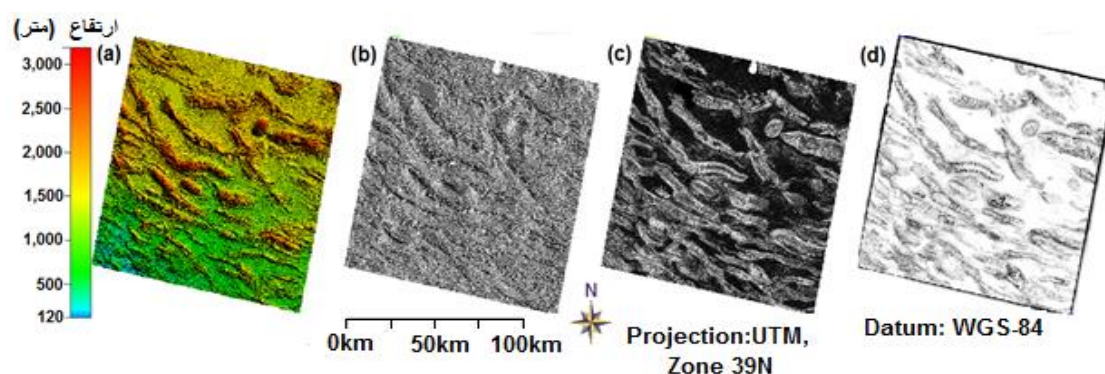
منطقه مورد مطالعه قسمتی از استان فارس بوده که در بین طول جغرافیای $26^{\circ} 25' - 32^{\circ} 44'$ شمالی و عرض جغرافیای $50^{\circ} 32' - 55^{\circ} 54'$ شرقی قرار دارد. نقشه کاربری این منطقه شامل ۱۷ نوع کلاس بوده و تصویر لندست ۸ متناظر این منطقه در تاریخ ۴ می ۲۰۲۱ جمع‌آوری شده است. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه را با کلاس‌های کاربری و موقعیت تصاویر لندست ۸ و محصول گسیلمندی استر را در دو صحنه تصویر نشان می‌دهد.



شکل (۱): منطقه مورد مطالعه همراه با نقشه کاربری (تهیه شده توسط جهاد کشاورزی استان فارس)
Figure (1): Study area with landuse map (prepared by Fars Province Agricultural Jihad)

لندست ۸ حاوی دو سنجنده جداگانه، که شامل سنسور باندهای انعکاسی (Operational Land Imager (OLI)) و سنسور باندهای حرارتی (Thermal Infrared Sensor (TIRS)) می باشد (۱۴). سنسور باندهای انعکاسی لندست ۸ طیف وسیعی از امواج مرئی-مادون قرمز نزدیک و امواج مادون قرمز کوتاه می باشد، در حالیکه سنسور باندهای حرارتی دارای دو باند حرارتی با محدوده طیفی ۱۰/۵ تا ۱۲/۵ میکرومتر را پوشش می دهند. در این تحقیق، علاوه بر تصویر لندست ۸، سه نوع داده دیگر استفاده شده است. اولین نوع داده، محصول استاندارد گسیلمندی سنجنده استر است که برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج روش پیشنهادی استفاده گردید. این محصول از روی داده های زمینی گسیلمندی تصحیح شده بدست آمده است و گسیلمندی زمینی سطح نیز با استفاده از الگوریتم جداسازی دما/گسیلمندی تولید شده است. دومین نوع داده، کتابخانه طیفی استر می باشد، نسخه ۲/۰ از کتابخانه طیفی سنجنده استر، تلفیقی از سه کتابخانه طیفی دیگر است: کتابخانه طیفی دانشگاه جانز هاپکینز، کتابخانه طیفی آزمایشگاه نیروی محرکه جت و کتابخانه طیفی سازمان زمین شناسی ایالات متحده می باشد. برای محاسبه ضریب گسیل طیفی باندهای حرارتی و شبیه سازی بازتاب باندهای انعکاسی عوارض سطح زمین در روش پیشنهادی از این کتابخانه طیفی در رنج طول موج ۰/۴ تا ۱۴ میکرومتر استفاده گردید (۱ و ۲۰). سومین نوع داده، مدل رقومی ارتفاعی سنجنده رادار فضایی با ماموریت اخذ توپوگرافی (Shuttle

(Radar Topography Mission (SRTM می‌باشد که برای انجام تصحیح توپوگرافی بر روی تصویر لندست ۸ استفاده شد. برای انجام تصحیح توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات لازم نظیر شیب، تغییر شیب، سایه و پارامتر برجستگی سطح، محدود به بخشی از آسمان که دربرگیرنده تصویر است، استخراج و استفاده گردید. مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن: (a) مدل رقومی ارتفاعی (b) تغییر شیب، (c) شیب، (d) sky view
Figure (2): Digital Elevation Model and its derivatives: (a) Digital Elevation Model, (b) Aspect, (c) Slope, (d) sky view

۲-۲- پیش‌پردازش داده‌ها

قبل از محاسبه و استخراج پارامترهای فیزیکی سطح زمین نظیر گسیلمندی، دما، رادیانس انعکاسی-حرارتی سطح، آلبدو سطح و نظایر آن انجام تصحیح رادیومتریکی تصاویر ماهواره‌ای الزامی است. برای رسیدن به این هدف بایستی اثر اتمسفر، هندسه دید سنجنده، روشنایی خورشید و اثر توپوگرافی و ویژگی‌های سطح روی تصاویر در نظر گرفته شود و تأثیر این عوامل در تخمین پارامترهای سطح حذف یا به حداقل برسد. برای این منظور، در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار تصحیح توپوگرافی و اتمسفری ATCOR که به صورت مستقل بر پایه محیط برنامه نویسی زبان تعاملی داده (Interactive Data Language) استوار بوده و از پایگاه داده MODTRAN-5 استفاده می‌کند (۲۲)، تصحیح توپوگرافی و اتمسفری بر روی تصویر لندست ۸ انجام شد. بعد از انجام توپوگرافی و اتمسفری، بازتاب انعکاسی عوارض سطح زمین بدست می‌آید و تمامی محاسبات در این تحقیق بر اساس این پارامترهای زمینی تصحیح شده صورت گرفت. لازم به ذکر است که در این مطالعه، باندهای ۱ تا ۷ و ۹ انعکاسی در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۲/۲۹ میکرومتر و باندهای ۱۰ و ۱۱ حرارتی در محدوده طیفی ۱۰/۵ تا ۱۲/۵ میکرومتر لندست ۸ مورد استفاده قرار گرفت و نیازی به سایر باندهای این سنجنده در این تحقیق نبود.

۲-۳- روش های محاسبه گسیلمندی و روش ترکیبی پیشنهادی

ضریب گسیل یا گسیلمندی، اندازه گیری ظرفیت یک سطح برای انتشار تشعشع حرارتی است. گسیلمندی طیفی، به عنوان نسبت تابش طیفی، $R_\lambda (LST)$ ، گسیل شده توسط جسمی در دمای مشخص، به تابش طیفی، که توسط جسم سیاه در همان دما، $BB_\lambda (LST)$ ، گسیل می شود، بصورت معادله ۱ تعریف می شود.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{R_\lambda (LST)}{BB_\lambda (LST)} \quad [1]$$

که در آن $BB_\lambda (LST)$ تابع پلانک است. تابع پلانک توزیع طیفی تابش از یک جسم سیاه را به صورت معادله ۲ توصیف می کند. $BB_\lambda (T) =$

$$\frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad [2]$$

در این معادله $BB_\lambda (T)$ تابش طیفی یک جسم سیاه در واحد $[W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}]$ در دمای $T [K]$ و λ طول موج است. C_1 و C_2 ثابت های فیزیکی در واحد $C_1 = 1.191 \times 10^8 W \mu m^4 sr^{-1} m^{-2}$ ، $C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu m \cdot K$ هستند. تعریف اولیه گسیلمندی r-emissivity است: به طور کلی، محیطی که تابش را جذب می کند ممکن است تابش را در همان طول موج ساطع کند. قانون کیرشهوف بیان می کند که قابلیت جذب یک جسم برابر است با میزان انتشار آن در همان دما (۱۳). بر اساس قانون کیرشهوف، ضریب گسیل تابشی $r(\theta, \varphi)$ را در امتداد زاویه دید θ و زاویه آزیموت φ از بازتاب نیمکره (ρ) به صورت معادله ۳ تعریف شده است.

$$\varepsilon_r(\theta, \varphi) = 1 - \rho(\theta, \varphi) \quad [3]$$

از آنجایی که اکثر عوارض معمولی زمین از قانون کیرشهوف (۲۵) تبعیت می کنند، این مفهوم حتی برای سطوح ناهمگن نیز صدق می کند. تعریف دوم ضریب گسیل e-emissivity است که به عنوان نسبت کل تشعشع از سطح جسم طبیعی به تابش جسم سیاه زمانی که پیکسل های غیرهمدمای توزیع دمایی برابر هستند تعریف می شود. بدیهی است که گسیل الکتریکی تحت تأثیر توزیع دما و همچنین خواص عناصر مختلف است. تعریف سوم ضریب گسیل a-emissivity است. سطوح خاکستری غیرهمدمای مانند سطوح خاکستری رفتار نمی کنند. برای حل این مشکل، ضریب گسیل a-emissivity به عنوان راهی برای ثابت نگه داشتن تابع پلانک ارائه شد. برای اینکه تعریف دمای سطح زمین مستقل از زاویه دید و طول موج باشد، یک ضریب افزایشی تابش a ایجاد شده توسط سطح غیرهمدمای گسیل r اضافه می شود. شایان ذکر است که همه تعاریف گسیلمندی فوق الذکر

دارای پارامترهای غیرقابل اندازه‌گیری از طریق داده‌های سنجش از دور هستند، زیرا دمای سطح زمین و گسیلمندی عوارض سطح زمین منحصراً از یک تشعشع منفرد منتشر شده توسط یک سطح ناهمگن، تعریف می‌شوند. در واقع، چندین راه برای تعریف دو پارامتر دمای سطح زمین و گسیلمندی عوارض سطح زمین از یک معادله وجود دارد. این تعریف فقط نشان می‌دهد که پارامترهای ارائه شده در فضا قابل اندازه‌گیری هستند. این معیار ضریب گسیل r را برای سطوح ناهمگن برای دمای سطح زمین و بازیابی و گسیلمندی از اندازه‌گیری‌های فضایی را توصیه می‌کند (۱۵). از نقطه نظر سنجش از دور، ضریب گسیل هر باند طیفی را می‌توان با ترکیب ضریب گسیل طیفی با تابع پاسخ طیفی آن باند کانال‌های حرارتی تعریف کرد. از آنجایی که تغییرات گسیلمندی در هر باند طیفی i تقریباً مستقل از دمای سطح زمین است (مقدار اختلاف انتشار با و بدون استفاده از معادله پلانک $\Delta \varepsilon$ ، کمتر از 10^{-4} است)، گسیلمندی هر باند طیفی ε_i بصورت معادله ۴ بر اساس تابع پاسخ طیفی هر باند تعریف و محاسبه می‌کنند.

$$\varepsilon_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \times R_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda} \quad [۴]$$

که λ نشان‌دهنده طول موج بر حسب متر است، $R_i(\lambda)$ به درصد و بیانگر تابع پاسخ طیفی هر باند حرارتی در کانال حرارتی i است و ε_{λ} ضریب گسیل طیفی سطوح مختلف اجسام است که ممکن است با اندازه‌گیری‌های میدانی یا آزمایشگاهی تعیین شود، و λ_1 و λ_2 طول موج‌های عرض طیفی هر باند حرارتی بر حسب میکرومتر، $d\lambda$ 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. این فرمول طیفی در معادله ۴ در واقع مطابق با سطوح هم‌دمای همگن است. اولین بار ون دی گریند و اوو (۳۶) 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 به صورت معادله ۵ گزارش کردند.

$$\varepsilon = a + b \ln(NDVI) \quad [۳]$$

در این معادله a و b ضرایب ثابت بوده و از آنالیز رگرسیون بدست می‌آیند. در مطالعات توسط ون دی گریند و اوو (۳۶) نشان داده شد که این روش وابسته به منطقه مورد مطالعه است و این بدان معنی است که ضرایب a و b نمی‌تواند در یک منطقه محاسبه و در منطقه دیگری مورد استفاده قرار گیرد. پس از آن، والور و کازلس (۳۴) یک روش تئوری بر اساس شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده پیشنهاد دادند که اثر ساختار هندسی پوشش گیاهی (Cavity effect) در تخمین ضریب گسیل را در نظر گرفتند (معادله ۶). 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 (۱۰). با توجه به پیچیدگی روش پیشنهاد شده توسط والور و کازلس (۳۴)، یک روش حد آستانه بر اساس شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده توسط (۲۹) پیشنهاد شد. آنها پیچیدگی مدل قبلی را کاهش دادند و برآورد گسیلمندی سطح را فرموله کردند. در روش پیشنهادی (۲۹) فرض می‌شود که (۱) سطح تنها از ترکیب خاک و پوشش گیاهی تشکیل شده است، (۲) ضریب گسیل خاک بایر می‌تواند به صورت خطی با استفاده از بازتاب سطح در باند قرمز توصیف شود، و (۳) ضریب گسیل بصورت خطی با در نظر گرفتن شاخص کسری از پوشش گیاهی (Fraction of vegetation index) در یک پیکسل تغییر می‌کند. بنابراین، ضریب گسیل باند حرارتی i 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.

$$\varepsilon_i = \begin{cases} a_i + b_i \times \rho_{red}, & (NDVI) < (NDVI)_{soil} \\ \varepsilon_{veg,i} \times p_v + \varepsilon_{soil,i} \times (1 - p_v) + d\varepsilon_i, & (NDVI)_{soil} < (NDVI) < (NDVI)_{veg} \\ \varepsilon_{veg,i} + d\varepsilon_i, & (NDVI) > (NDVI)_{veg} \end{cases} \quad [6]$$

که در آن i اشاره به باندهای حرارتی، a_i و b_i ضریب رگرسیون وابسته به باندهای حرارتی می باشد، ρ_{red} انعکاس سطح مربوط به باند قرمز و $NDVI_{soil}$ و $NDVI_{veg}$ به ترتیب مقدار شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده مربوط به خاک بایر و پوشش گیاهی متراکم می باشند که می توان مقادیر آنها را از هیستوگرام کل تصویر بدست آورد (۲۸)، p_v شاخص کسر پوشش گیاهی، ε_{veg} و ε_{soil} به ترتیب ضریب گسیل پوشش گیاهی و خاک بایر می باشند. هر دو آنها را می‌توان با اندازه‌گیری زمینی (۲۳ و ۲۴) و یا از یک پایگاه داده ضریب گسیل (۱) به دست آورد، $d\varepsilon_i$ اثر متوسط ساختار هندسی پوشش گیاهی است که می‌تواند مقادیر ۰/۰۲ و بالاتر را از شبیه‌سازی عددی داشته باشد (۳۴). به دلیل سادگی آن، این روش در حال حاضر برای سنجنده‌های مختلف با دسترسی به داده طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک اعمال می‌شود (۱۸، ۲۹ و ۳۱). شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده مورد استفاده در معادله ۶، بصورت معادله ۷ محاسبه می‌گردد.

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad [7]$$

که در آن ρ_{nir} و ρ_{red} به ترتیب بازتاب سطح در باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز می‌باشد و شاخص کسر پوشش گیاهی بصورت معادله (۸) محاسبه می‌گردد (۲۹ و ۳۴).

$$p_v = \left(\frac{(NDVI) - (NDVI)_{min}}{(NDVI)_{max} - (NDVI)_{min}} \right)^2 \quad [8]$$

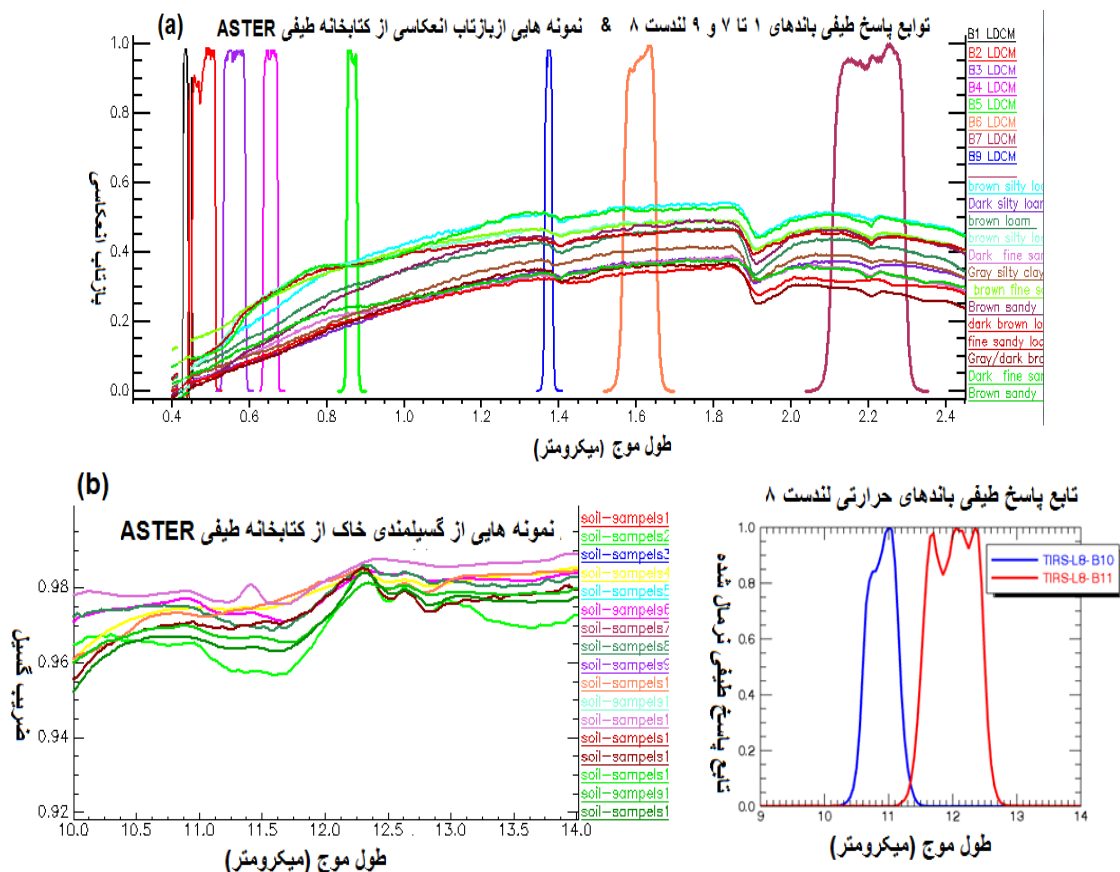
در این معادله $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ بیانگر حداقل و حداکثر شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده در تصویر می‌باشند. با این حال، مشکل اصلی با این روش‌ها، گسستگی مقادیر ضرایب گسیل در مرزهای سه تابع

محاسبه گسیلمندی (معادله ۶) و قابل استفاده نبودن برای سطوح مانند آب، یخ، برف، و سنگ می‌باشند (۳۱). علاوه بر این، نیاز به آگاهی اولیه از ضرایب گسیل خاک و پوشش گیاهی را دارد و تعیین ضریب گسیل خاک ممکن است منبع اصلی خطا در این روش‌ها باشد (۱۰). با توجه به مشکلات و محدودیت روش‌های برآورد گسیلمندی سطح بر اساس شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده که در بخش مقدمه ذکر گردید. در این تحقیق، با در نظر گرفتن اختلاف در قدرت تفکیک طیفی، تابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی، محدوده طول موج باندهای حرارتی و طول موج موثر باندها که گسیلمندی سطح با تغییر این پارامترها تغییر می‌یابند، یک روش ترکیبی از داده‌های سنجش از دور و کتابخانه طیفی جهت برآورد گسیلمندی سطح بر روی داده‌های لندست ۸ پیشنهاد گردیده است. برای این منظور، روش پیشنهادی با توجه به ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی یا ترکیب آنها در هر پیکسل و با در نظر گرفتن مقدار شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده در هر پیکسل ارائه شده است. خلاصه روش پیشنهادی، دارای مراحل زیر است: در مرحله اول، داده‌های تحقیق پیش پردازش شده و تصحیح توپوگرافی و اتمسفری بر روی آنها انجام گرفت. در مرحله دوم، ابتدا از نسخه ۲/۰ کتابخانه طیفی سنجنده استر، طیف‌های انواع خاک بایر و پوشش گیاهی متراکم استخراج گردید و سپس با در نظر گرفتن توابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی و انعکاسی لندست ۸، گسیلمندی کانال‌های حرارتی و بازتاب انعکاس عوارض سطح زمین شبیه‌سازی گردید. در مرحله سوم، بر اساس مقدار شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده مدل‌های پیشنهادی تعیین گردیدند. در مرحله چهارم، از روی بازتاب باندهای انعکاسی تصویر لندست ۸، شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده محاسبه و مدل‌های بهبود یافته پیشنهادی بر روی آن اجرا گردید و برای مناطق آبی ماسک شده نیز با ادغام کردن ضریب گسیل سه نوع آب (آب شیرین، آب دریا و آب کف دریا) با تابع پاسخ طیفی باندهای ۱۰ و ۱۱ حرارتی لندست ۸، مقدار ثابت ضریب گسیل آب به ترتیب ۰/۹۹۰۹ و ۰/۹۸۶۱ برای باندهای حرارتی محاسبه و به مناطق آبی ماسک شده، اختصاص داده شد، این مقادیر ضریب گسیل با استفاده از کتابخانه طیفی استر محاسبه گردید.

۲-۳-۱- تعیین گسیلمندی مناطق حاوی خاک بایر

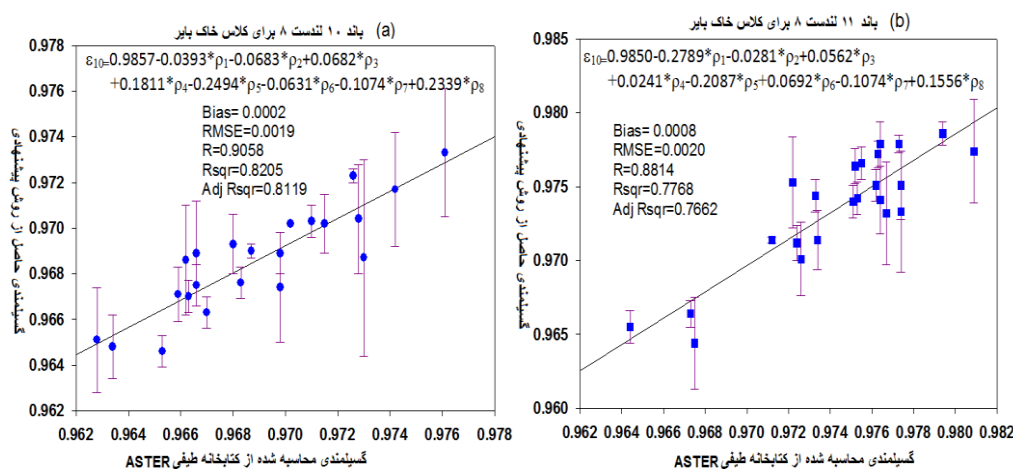
در صورتی که، مقدار شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده در پیکسل کمتر از ۰/۲ باشد، می‌توان به عنوان خاک بایر در نظر گرفت (۲۳). در این مورد، چند نمونه طیف خاک بایر از پایگاه داده کتابخانه طیفی استر برای شبیه سازی باندهای انعکاسی ۱ تا ۷ و ۹ لندست ۸ و گسیلمندی باندهای حرارتی (باند ۱۰ و ۱۱) با در نظر گرفتن توابع پاسخ طیفی آنها استفاده گردید. طیف‌های خاک انتخاب شده که تفاوت محسوسی با اکثریت انواع خاک نداشتند، در این تحقیق استفاده شدند. در مجموع، ۲۳ نمونه با ۲۳ نوع مختلف خاک، از جمله لوم رسی، لومی سیلتی، لوم شنی، لومی شن و ماسه، نظایر آن در این مطالعه استفاده شدند. شکل (۳a و ۳b)، به ترتیب

نمونه‌ای از طیف های مورد استفاده و توابع پاسخ طیفی باندهای انعکاسی و حرارتی لندست ۸ را نشان می‌دهد. از آنجایی که تغییرات ضریب گسیل سطح تقریباً مستقل از دمای سطح است لذا ضریب گسیل عوارض سطح با در نظر گرفتن تابع پاسخ طیفی سنجنده حرارتی لندست ۸ از معادله ۴ محاسبه می‌گردد. برای محاسبه ضریب گسیل طیفی عوارض سطح زمین از کتابخانه طیفی استر در رنج طول موج ۰/۴ تا ۱۴ میکرومتر استفاده شد (۱ و ۲۰). 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 (۳۰).



شکل (۳): نمونه‌ای از طیف‌های خاک بایر و توابع پاسخ طیفی لندست ۸، (a) باندهای انعکاسی، (b) باندهای حرارتی
Figure (3): Example of bare soil spectra and Landsat 8 spectral response functions, (a) reflective bands, (b) thermal bands

به دلیل تغییرات زیاد گسیلمندی انواع خاک در اثر عواملی نظیر رنگ خاک، رطوبت موجود آن، موادآلی تشکیل دهنده خاک، بافت خاک، اندازه ذرات خاک و غیره، تعداد خیلی زیادی از انواع خاک در کتابخانه طیفی اندازه گیری شده و موجود است. از بین این تعداد، در این تحقیق نظر بر اینکه استان فارس خاک حاصلخیز دارد و مطابق با برداشت نمونه های خاک توسط جهاد کشاورزی استان فارس عمدتاً ترکیبی از سه عنصر حاصلخیزی خاک (رس، سیلت و ماسه) بوده و لذا بر این اساس در مجموع، ۲۳ نمونه با ۲۳ نوع مختلف خاک، از ترکیبات مختلف از این سه عنصر خاک از کتابخانه طیفی انتخاب و بر اساس آن رابطه ۹ شکل گرفت. لازم به ذکر است که همچنین معادله ۴ می تواند برای نمونه های مختلف یک نوع کلاس هم مثل انواع خاک بکار رود. لذا اگر این رابطه را بر روی انواع طیف خاک در کتابخانه طیفی بکار ببرید همانطوری که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقادیر متفاوت گسیلمندی برای انواع خاک بدست می آید.



شکل (۴): مقایسه مقادیر گسیلمندی حاصل از کتابخانه طیفی و روش پیشنهادی برای خاک بایر در باندهای حرارتی لندست ۸. (a) باند ۱۰، (b) باند ۱۱

Figure (4): Comparison of emissivity values from spectral library and proposed method for bare soil in Landsat 8 thermal bands, (a) band 10, (b) band 11

در نتیجه، برای خاک های بایر رابطه بین ضریب گسیل باندهای حرارتی به دست آمده و مقادیر بازتاب ۸ باند انعکاسی روابط آماری از طریق رگرسیون خطی چندگانه به صورت معادله ۹ برآورد گردید.

$$\varepsilon_{\text{soil,proposed},i} = a_{i0} + \sum_{j=1}^8 a_{ij} \times \rho_j \quad ; (i = 10, 11) \quad [9]$$

در این معادله، $\varepsilon_{\text{soil},i}$ بیانگر ضریب گسیل باندهای حرارتی برای خاک های بایر در هر پیکسل است، a_{ij} و a_{i0} ضرایب رگرسیون برای باند i (باندهای ۱۰ و ۱۱ لندست ۸) هستند، ρ_j بازتاب باندهای انعکاسی (باندهای ۱ تا

۷ و ۹) لندست ۸ می باشد. جدول (۱) ضرایب رگرسیون معادله (۶) را نشان می دهد. در این جدول ضرایب a_1 تا a_7 متناظر با باندهای انعکاسی ۱ تا ۷ لندست ۸ و ضریب a_8 مربوط به باند ۹ این سنجنده می باشد.

جدول (۱): ضرایب رگرسیون a_0 تا a_8 برای تخمین گسیلمندی مناطق خاک بایر برای باندهای حرارتی لندست ۸
Table (1): Regression coefficients a_0 to a_8 for estimating the emissivity of bare soil areas for Landsat 8 thermal bands

باند	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
۱۰	۰/۹۸۵۷	-۰/۰۳۹۳	-۰/۰۶۸۳	۰/۰۶۸۲	۰/۱۸۱۱	-۰/۲۴۹۴	-۰/۰۶۳۱	-۰/۱۲۴۲	۰/۲۳۳۹
۱۱	۰/۹۸۵۰	-۰/۲۷۸۹	-۰/۰۲۸۱	۰/۰۵۶۲	۰/۰۲۴۱	-۰/۲۰۸۷	۰/۰۶۹۲	-۰/۱۰۷۴	۰/۱۵۵۶

نحوه محاسبه ضرایب رگرسیون معادله ۹ به این صورت است که پارامتر گسیلمندی نمونه خاک در سمت چپ معادله (۹)، با استفاده از معادله ۴ و از ادغام تابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی لندست ۸ با مقادیر گسیلمندی نمونه خاک حاصل از کتابخانه طیفی، در رنج طول موج موثر آن باند حرارتی بدست می آید. به عبارتی، معادله ۴ فرم دیگری از میانگین وزن دار از گسیلمندی هر نمونه طیف کتابخانه ای انتخابی است که مقدار تابع پاسخ طیفی هر باند حرارتی، نقش وزن را در هر طول موج بازی می کنند. با توجه به اینکه تابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی و رنج طول موج موثر آنها (λ_1 تا λ_2) متفاوت می باشد لذا به ازای هر نمونه گسیلمندی خاک انتخاب شده دو مقدار مجزا گسیلمندی برای باندهای حرارتی بدست می آید. همچنین با توجه به شکل a_3 میانگین وزن دار مقادیر انعکاس نمونه های طیفی انتخاب شده متناظر خاک (ρ_j)، در ۸ باند انعکاسی لندست ۸ محاسبه گردید که توابع پاسخ طیفی در هر طول موج نقش وزن را دارند. برای هر نمونه طیفی ۸ مقدار، به تعداد باندهای انعکاسی مورد استفاده، مقادیر انعکاس سطح خاک بدست می آید که این مقادیر برای هر دو باند حرارتی یکسان بوده و از کتابخانه طیفی مورد استفاده در این تحقیق، بدست می آیند. در نتیجه با در نظر گرفتن تمامی نمونه های طیفی انتخاب شده یک سیستم معادلات خطی به صورت معادله ۱۰ برای هر باند حرارتی حاصل می گردد.

$$AX + a_0 = \varepsilon_i \quad \text{or} \quad \begin{bmatrix} X \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ a_0 \end{bmatrix} = \varepsilon_i \quad [10]$$

که در آن i بیانگر باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱ لندست ۸، ماتریس ضرایب معلوم A دارای سطرهایی با مقادیر انعکاس نمونه های طیفی محاسبه شده خاک از کتابخانه طیفی (ρ_j) و به تعداد نمونه های خاک انتخاب شده و ستون هایی آن به تعداد یکی بیشتر از باندهای انعکاسی مورد استفاده می باشد، بردار X بیانگر ضرایب رگرسیون مجهول a_1 تا a_8 می باشد و ε_i مقادیر گسیلمندی نمونه خاک های انتخابی است که با ادغام توابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی بدست می آید. بردار X به همراه a_0 از حل معادله ۱۰ با روش کمترین مربعات بدست می آید.

چون بردار ε_i برای باندهای حرارتی متفاوت است لذا ضرایب رگرسیون مجزا (بردار X) همانند جدول ۱ برای باندهای حرارتی محاسبه می‌گردد. میزان خطا و بایاس برآورد ضرایب رگرسیون در شکل ۴ نشان شده است.

۲-۳-۲- تعیین گسیلمندی در مناطق با پوشش گیاهی متراکم

پیکسل‌هایی که در تصویر دارای مقدار شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده بیشتر از ۰/۵ (معادل با مقدار کسر شاخص گیاهی $p_v = 1$) باشند، می‌توان به عنوان پوشش گیاهی کامل یا متراکم در نظر گرفت. نسخه ۲/۰ از کتابخانه طیفی سنجنده ASTER، تلفیقی از بیش از ۲۴۰۰ طیف از مواد طبیعی و بشرساخت است. همانطوریکه قبلاً ذکر شد، این کتابخانه طیفی شامل داده‌ها از سه کتابخانه طیفی دیگر: کتابخانه طیفی دانشگاه جانز هاپکینز، کتابخانه طیفی آزمایشگاه نیروی محرکه جت و کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده می‌باشد. کتابخانه طیفی آزمایشگاه نیروی محرکه جت و کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده تنها شامل طیف‌های انعکاسی هستند، در حالی که کتابخانه طیفی دانشگاه جانز هاپکینز هر دو طیف بازتاب انعکاسی و ضریب گسیل را برای انواع پدیده‌های مختلف سطح فراهم می‌کند. بنابراین، با توجه به نقشه کاربری منطقه مورد مطالعه، چندین نوع از طیف‌های پوشش گیاهی نظیر چمن سبز، مرتع، علف خشک، جنگل‌های برگریز، سرو کوهی، پهن برگ، و سوزنی برگ ارائه شده توسط کتابخانه طیفی دانشگاه جانز هاپکینز برای شبیه‌سازی بازتاب انعکاس باندهای ۵ و ۴ لندست ۸ قبل از محاسبه شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده با استفاده از معادله ۷ مورد استفاده قرار گرفت. ضریب گسیل باندهای حرارتی (باند ۱۰ و ۱۱) لندست ۸، با ترکیب طیف‌های پوشش گیاهی با توابع پاسخ طیفی آن کانال‌ها به دست آمد. در نتیجه، دو رابطه آماری با توجه به رابطه همبستگی بین باندهای حرارتی و شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده به صورت معادله ۱۱ بدست آمد.

$$\varepsilon_{veg,i} = b_{0i} + b_{1i} \times (NDVI) \quad ; \quad (i = 10, 11) \quad [11]$$

در این معادله $\varepsilon_{veg,i}$ نشان‌دهنده ضریب گسیل باندی حرارتی برای هر پیکسلی که پوشش گیاهی متراکم می‌باشد، b_{0i} و b_{1i} ضرایب رگرسیون برای کانال i (۱۰ و ۱۱) و $NDVI$ شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده می‌باشد. جدول ۲ ضرایب رگرسیون معادله ۱۱ را نشان می‌دهد. ضرایب رگرسیون در جدول ۲ نیز مشابه با روشی که برای محاسبه ضرایب معادله (۱۰) گفته شد، بدست می‌آید. با این تفاوت که ابتدا برای هر نمونه طیف پوشش گیاهی انتخاب شده، مقادیر انعکاس در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک از کتابخانه طیفی محاسبه و مقدار اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده با استفاده از معادله ۷ محاسبه گردید. سپس مقدار گسیلمندی متناظر آن نمونه پوشش گیاهی، از ادغام مقدار گسیلمندی کتابخانه‌ای آن نمونه با تابع پاسخ طیفی

باندهای حرارتی لندست ۸ در رنج طول موج موثر آن باند حرارتی همانند روش قبل از معادله ۹ بدست می آید. با توجه به متفاوت بودن تابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی، به ازای هر نمونه گسیلمندی پوشش گیاهی انتخاب شده دو مقدار مجزا گسیلمندی برای باندهای حرارتی بدست می آید. در نتیجه سیستم معادلات خطی همانند معادله ۱۱ تشکیل و ضرایب مجهول با حل کمترین مربعات بدست می آید.

جدول (۲): ضرایب رگرسیون b_0 و b_1 جهت برآورد گسیلمندی مناطق پوشش گیاهی برای باندهای حرارتی لندست ۸
Table (2): Regression coefficients b_0 and b_1 to estimate the emissivity of vegetation areas for Landsat 8 thermal bands

باند	b_0	b_1	R^2
۱۰	۰/۸۸۷۴	۰/۱۱۶۹	۰/۹۶۴۰
۱۱	۰/۸۹۶۶	۰/۱۰۷۴	۰/۹۵۸۰

R^2 مربع ضریب همبستگی است

۳-۳- تعیین گسیلمندی در مناطق با ترکیبی از پوشش گیاهی و خاک

هنگامی که مقدار شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده پیکسل بین ۰/۲ و ۰/۵ قرار داشته باشد، آن پیکسل مخلوطی از خاک بایر و پوشش گیاهی است. در این مورد، گسیلمندی با توجه به نسبت سهم خاک به پوشش گیاهی از معادله ۱۲ محاسبه می گردد (۲۳).

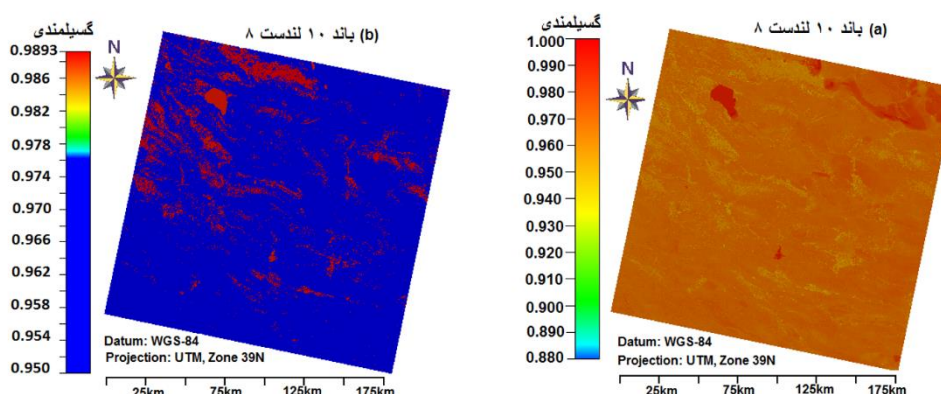
$$\varepsilon_{mix,proposed,i} = \varepsilon_{soil,proposed,i} + (\varepsilon_{veg,i} - \varepsilon_{soil,proposed,i}) \times p_v \quad ; (i = 10,11) \quad [12]$$

در این معادله، $\varepsilon_{mix,proposed}$ گسیلمندی ترکیب پوشش گیاهی و خاک، ε_{veg} و $\varepsilon_{soil,proposed}$ به ترتیب ضرایب گسیل خاک بایر و پوشش گیاهی متراکم، p_v کسری از شاخص پوشش گیاهی که از معادله ۸ محاسبه می شود و C_i اثر ساختار هندسی سطوح طبیعی و بازتاب های داخلی پوشش گیاهی که از معادله ۱۳ قابل محاسبه است. تفاوت معادله ۱۲ مورد استفاده در این تحقیق با روش قبلی (۲۳) در این است که ضرایب گسیل خاک بایر و پوشش گیاهی متراکم در روش پیشنهادی مطالعه جاری به ترتیب از معادلات ۹ و ۱۱ محاسبه می گردد که بصورت تابعی از بازتاب باندهای انعکاسی و شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده می باشد، در حالیکه در روش (۲۳) مقادیر ثابت برای آنها در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

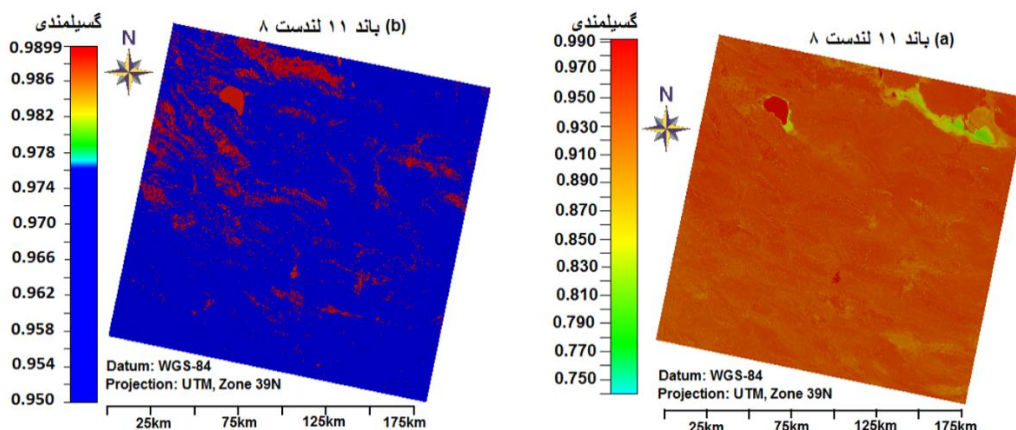
نتایج روش پیشنهادی که نقشه گسیلمندی سطح بود بر روی داده های حرارتی لندست ۸، در شکل (۵) و (۶) نشان داده شده است و همچنین گسیلمندی حاصل با روش قبلی (۲۸) مقایسه گردیده است. تفاوت جزئی که

در شکل ۵a و ۵b در گسیلمندی سطح در برخی مناطق وجود دارد، ناشی از متفاوت بودن توابع پاسخ طیفی و طول موج موثر بین دو باند حرارتی است که گسیلمندی سطح وابسته به آنهاست.



شکل (۵): مقایسه گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی و روش اولیه (۲۸)، در باند ۱۰ لندست ۸، (a) روش پیشنهادی، (b) روش اولیه

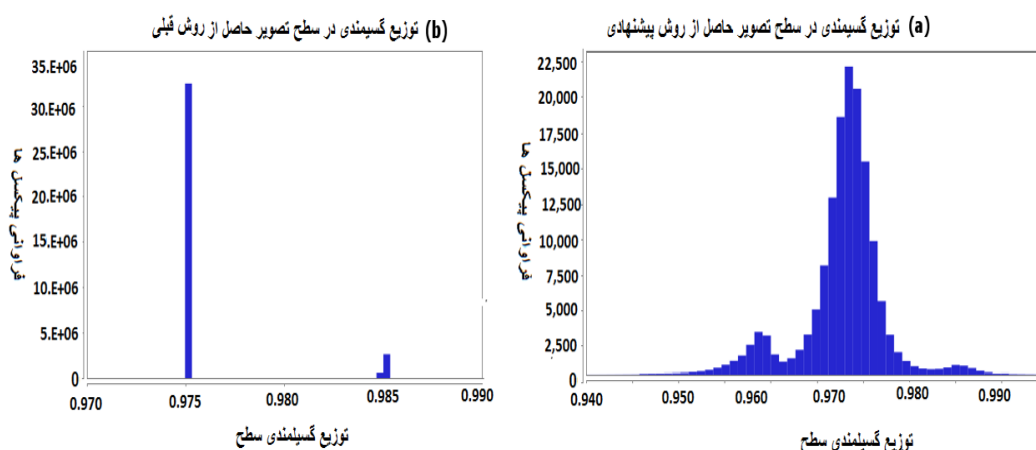
Figure (5): Comparison of emissivities from the proposed method and the primary method (28), in the 10-band Landsat 8 band, (a) the proposed method, (b) the primary method



شکل (۶): مقایسه گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی و روش اولیه (۲۸)، در باند ۱۱ لندست ۸، (a) روش پیشنهادی، (b) روش اولیه

Figure (6): Comparison of emissivities from the proposed method and the primary method (28), in the 11-band Landsat 8 band, (a) the proposed method, (b) the primary method

نتایج روش ترکیبی پیشنهادی، گسیلمندی سطح را به صورت تابعی از بازتاب باندهای انعکاسی در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۲/۲۹ میکرومتر محاسبه کرده و گسیلمندی سطح در هر پیکسیل متناسب با بازتاب انعکاسی مقدار گسیلمندی خاص خود را دارد که متفاوت از پیکسیل های مجاورش است. در حالی که در روش قبلی برای گروهی از پیکسل ها که در یک گروه شاخص گیاهی طبقه بندی می شدند، مقادیر ثابتی از ضریب گسیل به آنها تعلق می گرفت و گسیلمندی سطح به صورت مقدار ثابت و گسسته در هر منطقه ای از تصویر محاسبه می گردید. همچنین روش ترکیبی پیشنهادی رابطه ضعیف بین گسیلمندی و بازتاب فقط باند قرمز در روش های قبلی را بدلیل استفاده از بازتاب همه باندهای انعکاسی تقویت می نماید. در روش ترکیبی پیشنهادی این تحقیق، برای مناطق آبی ماسک شده نیز با ادغام کردن ضریب گسیل سه نوع آب (آب شیرین، آب دریا و آب کف دریا) با تابع پاسخ طیفی باندهای ۱۰ و ۱۱ حرارتی لندست ۸، مقدار ثابت ضریب گسیل آب به ترتیب ۰/۹۹۰۹ و ۰/۹۸۶۱ برای باندهای حرارتی محاسبه و به مناطق آبی ماسک شده، اختصاص داده شد، این مقادیر ضریب گسیل با استفاده از کتابخانه طیفی ASTER محاسبه گردید. همچنین مقایسه، توزیع گسیلمندی سطح با روش قبلی، نتایج حاصل از این روش ها در شکل های (۷a و ۷b) نشان داده شده است.



شکل (۷): مقایسه حالت ناپیوستگی گسیلمندی سطح در باند ۱۰ حرارتی لندست ۸، (a) روش پیشنهادی، (b) روش اولیه (۲۸)

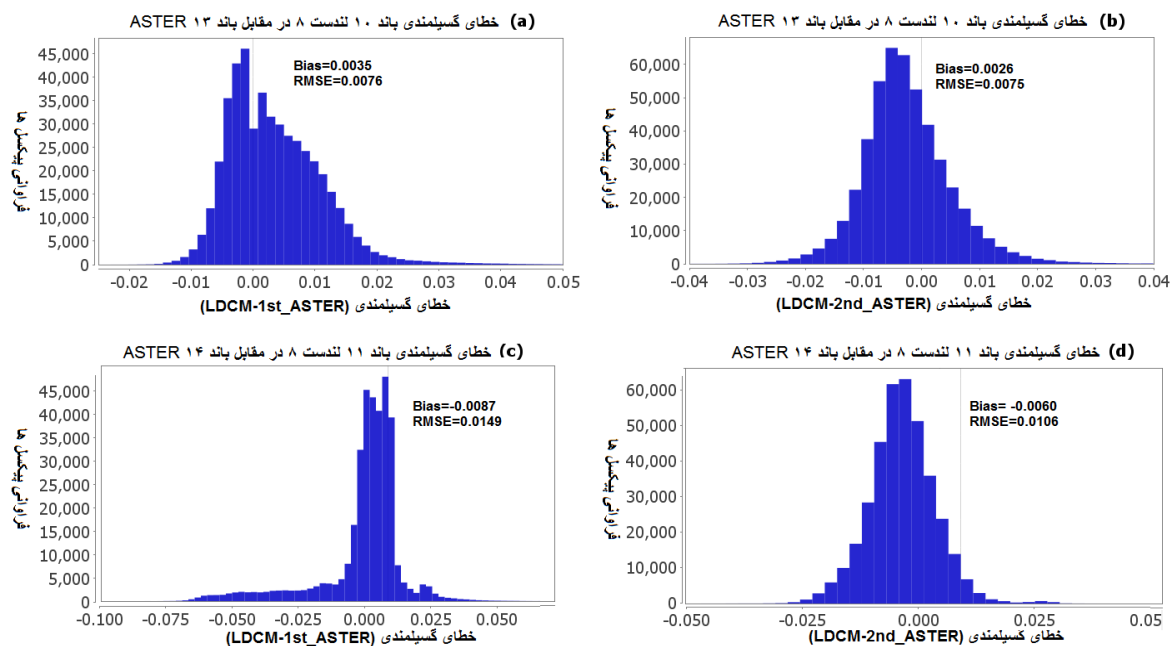
Figure (7): Comparison of the surface emissivity discontinuity in the Landsat 10 thermal band 8, (a) the proposed method, b) the primary method (28)

با مقایسه شکل های ۷a و ۷b که به ترتیب گسیلمندی سطح را در روش پیشنهادی و روش قبلی، نشان می دهد می توان دید که در روش قبلی، گسیلمندی سطح بصورت مقدار ثابت و گسسته در هر منطقه ای از تصویر است

که غالب آن برای مناطق ترکیب پوشش گیاهی و خاک است، در حالیکه در روش پیشنهادی برای این مناطق بصورت تابعی از بازتاب باندهای انعکاسی تصحیح اتمسفری شده می‌باشد. به عبارت دیگر، هر پیکسل متناسب با بازتاب انعکاسی اش مقدار گسیلمندی خاص خود را دارد که متفاوت از پیکسل‌های مجاورش است. در حالی که در روش قبلی برای گروهی از پیکسل‌ها که در یک گروه شاخص گیاهی (مناطق خاک بایر، پوشش گیاهی متراکم، و یا ترکیبی از پوشش گیاهی و خاک) طبقه‌بندی می‌شدند و مقادیر ثابتی از ضریب گسیل به آنها تعلق می‌گرفت. لذا توزیع گسیلمندی در سطح تصویر دارای مقادیر ثابت و حالت گسستگی وجود دارد. در مقابل، در روش پیشنهادی چون گسیلمندی بصورت تابعی از انعکاس سطح تعریف می‌گردد، لذا برا هر پیکسل متناسب با رادیانس انعکاسی باندهای انعکاسی محاسبه می‌شود که متفاوت از پیکسل‌های مجاور است، در نتیجه توزیع گسیلمندی در سطح تصویر حالت پیوستگی دارد.

۳-۱- اعتبارسنجی گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی

بطور کلی، دو روش مختلف برای اعتبارسنجی گسیلمندی سطح بازیابی شده از داده‌های ماهواره‌ای وجود دارد (۱۸ و ۳۳). اولین روش مشهور به روش مستقیم بوده که در این روش به طور مستقیم گسیلمندی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای را با اندازه‌گیری‌های زمینی ضریب گسیل عوارض مختلف سطح مقایسه می‌کنند. با توجه به تفاوت بودن شرایط و قدرت تفکیک مکانی بین سنجنده‌های ماهواره‌ای و زمینی، این روش را با چالش‌هایی مواجه است. دومین روش اعتبارسنجی، روش غیرمستقیم بوده که در این روش گسیلمندی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای یک سنجنده را با محصولات گسیلمندی سایر سنجنده‌های متناظر (از نظر قدرت تفکیک طیفی و مکانی) و یا مدل‌های شبیه‌سازی، مقایسه و ارزیابی می‌کنند. در این تحقیق، برای اعتبارسنجی گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی، از روش دوم اعتبارسنجی استفاده شده است. در مطالعاتی (۸) نشان داد که محصول گسیلمندی سنجنده استر که حاصل الگوریتم جداسازی دما/گسیلمندی است، در توافق کیفی با اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی است. لذا برای ارزیابی و صحت‌سنجی گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی دو فریم از محصول گسیلمندی استر به تاریخ ۱۹ آوریل ۲۰۲۱ از منطقه مورد مطالعه گردید. محصول گسیلمندی استر در قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر بوده و از روی داده‌های زمینی گسیلمندی تصحیح شده، بدست آمده است. در این تحقیق، گسیلمندی حاصل از باندهای ۱۰ و ۱۱ حرارتی سنجنده لندست ۸ با باندهای حرارتی متناظر یعنی باندهای ۱۳ و ۱۴ استر مقایسه گردید. شکل (abcd) مقایسه و اعتبارسنجی گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی در باندهای حرارتی لندست ۸ (باند ۱۰ و ۱۱) را با دو محصول گسیلمندی متناظر استر (باند ۱۳ و ۱۴) نشان می‌دهد.



شکل (۸): مقایسه و اعتبارسنجی گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی در باندهای حرارتی لندست ۸ با دو محصول گسیلمندی متناظر استر، (a) و (b) به ترتیب خطای گسیلمندی سطح در باند حرارتی ۱۰ لندست ۸ در مقابل باند ۱۳ تصویر بررسی اول و دوم استر، (c) و (d) به ترتیب خطای گسیلمندی سطح در باند حرارتی ۱۱ لندست ۸ در مقابل باند ۱۴ تصویر بررسی اول و دوم استر

Figure (8): Comparison and validation of emissivity from the proposed method in Landsat 8 thermal bands with two corresponding ASTER emissivity products, a) and (b) surface emissivity error in Landsat 10 thermal band 10 versus 13th bands ASTER, respectively. (C) and (d) surface emissivity error in the thermal band 11 of Landsat 8 versus the band 14 ASTER of the first and second product of the ASTER, respectively

این نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی قادر است با دقت کمتر از ۰/۸ درصد (۰/۰۰۸) در هر دو تصویر بررسی شده با در نظر گرفتن پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا، گسیلمندی سطح را در باند ۱۰ حرارتی لندست ۸ برآورد نماید. این مقدار خطا در باند حرارتی ۱۱ لندست ۸ کمی بیشتر از ۱ درصد که به ترتیب ۱۹/۴۹ و ۱/۰۶ درصد در تصویر بررسی اول و دوم محاسبه گردید که بیشتر از باند ۱۰ می باشد. خطای بیشتر در باند حرارتی ۱۱ می تواند در اثر اختلاف نسبتاً زیاد در تابع پاسخ طیفی و رنج طیفی و طول موج موثر بین باند ۱۱ (۱۱/۵ تا ۱۲/۵ میکرومتر) لندست ۸ و باند ۱۴ (۱۰/۹۵ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر) استر باشد.

۴- نتیجه گیری

پارامتر گسیلمندی سطح، یکی از مهم ترین ویژگی ذاتی مواد و پدیده های سطح زمین است، لذا نه تنها برآورد این پارامتر برای به دست آوردن دمای سطح زمین ضروری است بلکه آن اطلاعات مفیدی برای زمین شناسی و مطالعات زیست محیطی، نقشه های معدنی فراهم می کند و یکی از مهم ترین پارامترهای ورودی برای مدل های آب و هوا، محیط زیست و بیولوژیکی است. اهمیت برآورد پارامتر گسیلمندی تا اندازه ای ارزشمند است که یک پروژه بزرگ در موسسه فناوری کالیفرنیا توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی ناسا، آزمایشگاه نیروی محرکه جت، انجام شد. برای رسیدن به چنین محصول ارزشمند، ناسا در طول ۱۵ سال با استفاده از میلیون ها تصویرسنجده استر مجموعه پایگاه داده های مختلف، گسیلمندی را تولید کردند. در این تحقیق، یک رویکرد جدید برآورد گسیلمندی سطح بر اساس روش ترکیبی از داده های سنجش از دور و کتابخانه طیفی برای باندهای حرارتی لندست ۸ پیشنهاد گردیده است که برای هر سنجنده اپتیکی قابل اجراست. جهت تخمین دقیق تر گسیلمندی برای مناطق خاک بایر، گسیلمندی سطح به صورت تابعی از بازتاب باندهای انعکاسی در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۲/۲۹ میکرومتر محاسبه شده است. کارایی و اثربخشی روش پیشنهادی، به صورت عملی بر روی تصویری از لندست ۸ اجرا گردید و گسیلمندی حاصل با دو محصول گسیلمندی استر مقایسه و صحت سنجی شد. نتایج نشان داد که گسیلمندی سطح در هر پیکسیل متناسب با بازتاب انعکاسی اش مقدار گسیلمندی خاص خود را دارد که متفاوت از پیکسیل های مجاورش است در حالیکه در روش قبلی برای گروهی از پیکسل ها که در یک گروه (مناطق خاک بایر، پوشش گیاهی متراکم، و یا ترکیبی از پوشش گیاهی و خاک) طبقه بندی می شدند، مقادیر ثابتی از ضریب گسیل به آنها تعلق می گرفت و گسیلمندی سطح به صورت مقدار ثابت و گسسته در هر منطقه ای از تصویر محاسبه می گردید. همچنین، ارزیابی میزان خطاهای نتایج روش پیشنهادی با دو تصویر از محصول گسیلمندی سنجنده استر انجام گرفت و نشان داد که خطای گسیلمندی حاصل از روش پیشنهادی در باند ۱۰ حرارتی لندست ۸ در مقایسه با محصول گسیلمندی متناظر تصویر بررسی اول و دوم استر به ترتیب دارای خطای ۰/۷۶٪ و ۰/۷۵٪ با در نظر گرفتن پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا می باشد، همچنین این خطا در باند ۱۱ حرارتی به ترتیب دارای مقدار ۱/۴۹٪ و ۱/۰۶٪ محاسبه گردید. خطای بیشتر در باند حرارتی ۱۱ می تواند مربوط به اختلاف نسبتاً زیاد در تابع پاسخ طیفی و رنج طیفی و طول موج موثر بین باند ۱۱ (۱۱/۵ تا ۱۲/۵ میکرومتر) لندست ۸ و باند ۱۴ (۱۰/۹۵ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر) استر باشد. علیرغم اینکه در مناطق خاک بایر تغییرات گسیلمندی زیاد بوده و در روش های قبلی مقدار ثابت ضریب گسیل برای چنین مناطقی اختصاص می دادند که دقت کمتری داشت و با عدم قطعیت زیادی همراه بود، زیرا گسیلمندی خاک با بافت، رنگ، رطوبت و سایر اجزاء فیزیکی و شیمیایی آن تغییر می کند. در مقابل، در روش پیشنهادی که از

بازتاب باندهای انعکاسی استفاده می کند، اغلب خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در آن منعکس می شود و در محاسبه گسیلمندی سطح دخالت داده می شود. بنابراین، برخلاف روش های قبلی، روش پیشنهادی نه تنها با دقت بهتری گسیلمندی سطح را به صورت تابعی از بازتاب انعکاسی عوارض مختلف سطح تخمین می زند، بلکه توابع پاسخ طیفی باندهای حرارتی و انعکاسی را در برآورد گسیلمندی سطح مد نظر قرار می دهد. همچنین، روش پیشنهادی رابطه ضعیف بین گسیلمندی و بازتاب فقط باند قرمز در روش های قبلی را بدلیل استفاده از بازتاب همه باندهای انعکاسی تقویت می نماید و بر روی اغلب سنجنده ها قابل اجراست. لذا بر این اساس روش پیشنهادی تخمین دقیق تری از گسیلمندی سطح را برآورد می نماید، با این حال، شایسته است که روش پیشنهادی بر روی داده های سنجنده های مختلف و مناطق مختلف تست و بررسی گردد.

۵-منابع

- 1-Baldrige, A., Hook, S., Grove, C., & Rivera, G. (2009). The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113(4), 711-715. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.007>
- 2-Barducci, A., & Pippi, I. (1996). Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the grey body emissivity" method. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE*, 34(3): 681-695 .doi: <https://doi.org/10.1109/36.499748>.
- 3-Boonmee, M. (2007). Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval from Thermal Infrared Hyperspectral Imagery. Rochester Institute of Technology, PHD Thesis .doi: <https://doi.org/10.1117/12.665899>.
- 4-Coll, C., Valor, E., Caselles, V., & Niclòs, R. (2003). Adjusted Normalized Emissivity Method for surface temperature and emissivity retrieval from optical and thermal infrared remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 108. doi: <https://doi.org/10.1029/2003JD003688>
- 5-Gillespie, A.R., Rokugawa, S., Hook, S.J., Matsunaga, T., & Kahle, A.B. (1999). Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4. ATBD contract NAS53137-NASA .doi: <https://doi.org/10020538704>.
- 6-Huang, C., Townshend, J.R., Liang, S., Kalluri, S.N., & DeFries, R.S. (2002). Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution. *Remote Sensing of Environment*, 80(2): 203-212. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00298-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00298-X).
- 7-Hulley, G., Hook S., E. Abbott, N. Malakar, T. Islam, M. Abrams (2015). The ASTER Global Emissivity Database (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100 meter spatial resolution, In G.R. Letters. doi:<https://doi.org/10.1002/2015GL065564>.
- 8-Hulley, G.C., Hook, S.J., & Baldrige, A.M. (2009). Validation of the North American ASTER Land Surface Emissivity Database (NAALSED) version 2.0 using pseudo-invariant sand dune sites. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2224-2233. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.005>.
- 9-Jiang, J.-x., Liu, Q.-h., & Li, H. (2012). A modified NDVI threshold method for estimating LSE from FY3A/VIRR data. Paper presented at the 2nd International Conference on Remote Sensing, *Environment and Transportation Engineering (RSETE)*, Nanjing, Jiangsu, China, 01-03 Jun. doi:<https://doi.org/10.1109/RSETE.2012.6260355>.
- 10-Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Gillespie, A., Sabol, D., & Gustafson, W.T. (2006). Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 103(4), 474-487. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.04.012>.
- 11-Kahle, A.B., Madura, D.P., & Soha, J.M. (1980). Middle infrared multispectral aircraft scanner data: Analysis for geological applications. *Applied Optics*, 19(14): 2279-2290.

- doi: <https://doi.org/10.1364/AO.19.002279>.
- 12-Kaiser, G., & Schneider, W. (2008). Estimation of sensor point spread function by spatial subpixel analysis. *International Journal of remote sensing*, 29(7): 2137-2155.
doi:<https://doi.org/10.1080/01431160701395310>.
- 13-Kirchhoff, G. (1860). G. Kirchhoff, Ann. Phys. 185, 275.
- 14-Knight, E.J., & Kvaran, G. (2014). Landsat-8 operational land imager design, *Characterization and performance. Remote Sensing*, 6(11): 10286-10305.
doi: <https://doi.org/10.3390/rs61110286>.
- 15-Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Sobrino, J.A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131: 14-37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>.
- 16-Li, Z.-L., Wu, H., Wang, N., Qiu, S., Sobrino, J.A., Wan, Z., Yan, G. (2013). Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of remote sensing*, 34(9-10): 3084-3127. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716540>.
- 17-Ma, X.L., Wan, Z., Moeller, C.C., Menzel, W.P., & Gumley, L.E. (2002). Simultaneous retrieval of atmospheric profiles, land-surface temperature, and surface emissivity from Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer thermal infrared data: Extension of a two-step physical algorithm. *Applied optics*, 41(5), 909-924 .
doi: <https://doi.org/10.1364/AO.41.000909>.
- 18-Momeni, M., & 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.005>.
- 19-Oltra-Carrió, R., Sobrino, J., Franch, B., & Nerry, F. (2012). Land surface emissivity retrieval from airborne sensor over urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 123: 298-305.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.007>.
- 20-Quan, W., Chen, H., Han, X., Liu, Y., & 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. doi: <https://doi.org/10.1007/s13351-012-0208-y>.
- 21-Realmutto, V. (1990). Separating the effects of temperature and emissivity: Emissivity spectrum normalization. Paper presented at the Proc. 2nd TIMS Workshop. doi: <https://doi.org/10025572484>.
- 22-Richter, R., & Schlöpfer, D. (2014). Atmospheric/topographic correction for satellite imagery. Technical report, DLR-German Aerospace Center, Germany.
- 23-Rubio, E., Caselles, V., & Badenas, C. (1997). Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8–14, μm Wave band: Analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, 59(3): 490-521. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00123-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00123-X).

- 24-Rubio, E., Caselles, V., Coll, C., Valour, E., & Sospedra, F. (2003). Thermal-infrared emissivities of natural surfaces: improvements on the experimental set-up and new measurements. *International journal of remote sensing*, 24(24): 5379-5390.
doi: <https://doi.org/10.1080/0143116031000102412>.
- 25-Salisbury, J.W., & D'Aria, D.M. (1992). Emissivity of terrestrial materials in the 8–14 μm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*, 42(2): 83-106.
doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90092-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90092-X).
- 26-Schowengerdt, R.A. (2006). Remote sensing: models and methods for image processing: Academic press.
- 27-Seemann, S.W., Borbas, E.E., Knuteson, R.O., Stephenson, G.R., & Huang, H.-L. (2008). Development of a global infrared land surface emissivity database for application to clear sky sounding retrievals from multispectral satellite radiance measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1): 108-123.
doi:<https://doi.org/10.1175/2007JAMC1590.1>.
- 28-Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., Sòria, G., Gómez, M., Ortiz, A. B., Romaguera, M., Atitar, M. (2008). Thermal remote sensing in the framework of the SEN2FLEX project: field measurements, airborne data and applications. *International journal of remote sensing*, 29(17-18): 4961-4991. doi: <https://doi.org/10.1080/01431160802036516>.
- 29-Sobrino, J., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International journal of remote sensing*, 21(2): 353-366.
doi: <https://doi.org/10.1080/014311600210876>.
- 30-Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 434-440. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>.
- 31-Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Sòria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Martínez, P. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2): 316-327.
doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834>.
- 32-Tang, B.-H., Shao, K., Li, Z.-L., Wu, H., & Tang, R. (2015). An improved NDVI-based threshold method for estimating l and surface emissivity using MODIS satellite data. *International journal of remote sensing* (ahead-of-print), 1-15.
doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1040132>.
- 33-Tang, H., & Li, Z.-L. (2014). Future Development and Perspectives Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared (pp. 257-279): Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-42027-6_8.
- 34-Valor, E., & 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. doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9).

- 35-Valor, E., Coll, C., Caselles, V., & Niclos, R. (2003). The Adjusted Normalized Emissivity Method (ANEM) for land surface temperature and emissivity recovery. Paper presented at the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings. IGARSS'03. 2003. doi:[https://doi.org/ 10.1109/IGARSS.2003.1294692](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294692).
- 36-Van de Griend, A., & 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 .doi: <https://doi.org/10.1080/01431169308904400>.
- 37-Walawender, J.P., Hajto, M.J., & Iwaniuk, P. (2012). A new ArcGIS toolset for automated mapping of land surface temperature with the use of LANDSAT satellite data. Paper presented at the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich, Germany, July 22-27. doi:[https://doi.org/ 10.1109/IGARSS.2012.6350405](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350405).
- 38-Wan, Z., & Li, Z.-L. (1997). A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4): 980-996. doi: <https://doi.org/10.1109/36.602541>.
- 39-Wang, H., & Ellis, E.C. (2005). Image misregistration error in change measurements. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(9): 1037-1044. doi: [https://doi.org/ 10.14358/PERS.71.9.1037](https://doi.org/10.14358/PERS.71.9.1037).
- 40-Wang, N., Li, Z.-L., Tang, B.-H., Zeng, F., & Li, C. (2013). 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. doi: [https://doi.org/ 10.1080/01431161.2012.716536](https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716536).