

ارائه یک الگوریتم پنجره مجزا نوین به منظور تخمین دمای سطح زمین از داده‌های ماهواره لندست-۸

یاسر جویباری مقدم^{۱*}، مهدی آخوندزاده^۲، محمد رضا سراجیان^۳

^۱ کارشناس ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

y.joibari@ut.ac.ir

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

makhonz@ut.ac.ir

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

sarajian@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۳، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۴)

چکیده

دمای سطح زمین و ضریب گسیل سطح دو شاخص مهم در مطالعات مربوط به سطح زمین هستند. این شاخص‌ها، از شاخص‌های مهم در زمینه‌های تخمین بودجه انرژی، ارزیابی پوشش‌های زمینی و مطالعه انتقال گرمایی می‌باشند. هدف اصلی این تحقیق ارائه الگوریتمی جهت تخمین ضریب گسیل سطح و دمای سطح زمین از تصاویر ماهواره لندست-۸ است. الگوریتم پیشنهادی جهت تعیین دمای سطح زمین، روش پنجره مجزا بر پایه‌ی باندهای ۱۰ و ۱۱ سنسور حرارتی ماهواره لندست-۸ می‌باشد و همچنین جهت تعیین ضریب گسیل روشی بر مبنای استفاده از شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) ارائه شده است. این تحقیق از دو مرحله اصلی تشکیل شده است: در مرحله اول با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده که بر اساس کتابخانه طیفی استر طراحی شدند، رگرسیون خطی بین ضریب گسیل سطح برای باندهای ۱۰ و ۱۱ ماهواره لندست-۸ با شاخص NDVI ایجاد شد. در مرحله دوم با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده که با استفاده از MODTRAN طراحی شدند، الگوریتمی پنجره مجزا برای محاسبه دمای سطح از داده‌های ماهواره لندست-۸ طراحی و ارائه شد. در پایان جهت ارزیابی روش پیشنهادی از سه مجموعه داده مستقل شبیه‌سازی شده، زمینی و ماهواره‌ای استفاده شد. نتایج ارزیابی با استفاده از این سه مجموعه به ترتیب خطای ریشه کمترین مربعات (RMSE) برابر با ۱/۲۱، ۱/۹۱ و ۱/۰۳ درجه را نشان دادند. بنابراین روش پیشنهادی، روشی مناسب و قابل قبول جهت تعیین دمای سطح زمین از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ می‌باشد.

واژگان کلیدی: ضریب گسیل سطح، دمای سطح زمین، پنجره مجزا، MODTRAN، لندست-۸

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

ماهواره لندست-۸ هشتمین ماهواره در سری ماهواره‌های آمریکایی لندست است که در ۱۱ فوریه سال ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. این ماهواره هفتمین ماهواره از این سری است که به طور موفقیت آمیز در مدار قرار گرفته است. این ماهواره پروژه مشترک سازمان زمین-شناسی آمریکا و سازمان فضایی این کشور است. لندست-۸ متشکل از دو سنسور OLI و TIRS است؛ که سنسور OLI این ماهواره دارای ۹ باند در محدوده‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز با طول موج کوتاه می‌باشد. سنسور TIRS آن مجهز به دو باند با طول موج‌های مرکزی ۱۰/۸۹۵ و ۱۲/۰۵ میکرومتر در محدوده مادون قرمز حرارتی است [۱]. تمایز عمده سنسور حرارتی این ماهواره با سایر ماهواره‌های مجموعه لندست، مجهز بودن آن به دو باند حرارتی است. همین ویژگی سبب شده که الگوریتم‌های پنجره مجزا^۱ برای لندست-۸ کارآمد باشند؛ و بر همین مبنا هدف اصلی این تحقیق ارائه الگوریتمی پنجره مجزا برای لندست-۸ تعریف شد.

دمای سطح زمین و ضریب گسیل سطح شاخص‌های مهمی در مطالعه مدل‌های تعادل انرژی در سطح زمین و بررسی فعل و انفعالات سطح زمین در مقیاس منطقه‌ای و جهانی هستند [۲]. ضریب گسیل سطح پارامتری است که توصیف کننده ویژگی‌های حرارتی یک جسم بوده و از ویژگی‌های ذاتی جسم بشمار می‌رود. دقت تعیین دمای سطح زمین وابسته به دقت تعیین این پارمتر می‌باشد. اطلاعات بدست آمده از دمای سطح زمین می‌تواند اطلاعات مفیدی در زمینه مطالعه پدیده‌های مختلف از جمله تجزیه و تحلیل جزایر حرارتی شهر، تشخیص آنومالی‌های حرارتی مربوط به زلزله، شناسایی منابع زمین گرمایی، پایش خشکسالی و آتش‌سوزی ارائه دهد [۲].

تا کنون روش‌های مختلفی جهت تعیین دمای سطح زمین ارائه شده‌اند که دو روش تک باندی و پنجره مجزا از سایر روش‌ها متداول‌تر می‌باشند.

در روش تک کاناله دمای سطح زمین با به کارگیری یک باند حرارتی تخمین زده می‌شود. این روش بر مبنا معادله انتقال تشعشعی و تقریب خطی از بسط سری تیلور

معادله پلانک استوار است. در روش تک باندی با فرض معلوم بودن ضریب گسیل و پروفیل‌های اتمسفری دما تخمین زده می‌شود. از مزایای مدل‌های تک باندی می‌توان به سادگی آن و کاربردی بودن روش برای داده‌هایی با تنها یک باند حرارتی اشاره کرد؛ اما نیاز به داشتن دانش اولیه از ضریب گسیل و پروفیل‌های اتمسفری دقیق از معایب این روش است. این روش اولین بار توسط Price در سال ۱۹۸۳ به کار گرفته شد [۳]. شکل‌های متفاوتی از این روش ارائه شدند که دو روش Qin و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۴] و روش JM&S که توسط Jimenez-Munoz و Sobrino در سال ۲۰۰۳ ارائه شد [۵] دارای اهمیت و کاربرد بیشتری در تخمین دمای سطح با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست می‌باشد.

روش پنجره مجزا بر مبنای تلفیق دو باند حرارتی استوار هست در واقع این روش با استفاده از تلفیق باندهای حرارتی مجاور سعی در کاهش تأثیرات اتمسفری دارد. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز این روش به پروفیل اتمسفری دقیق و همچنین کارآمدی روش برای تمامی سنسورها با حداقل دو باند حرارتی اشاره کرد. وابستگی این روش به اطلاع از ضریب گسیل و وابستگی ضرایب هر مدل به نوع منطقه را می‌توان از محدودیت‌های این روش دانست. این روش اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط Aiding و Kauth ارائه شد [۶]. شکل‌های مختلفی از این روش ارائه شده است که می‌توان برای مطالعه بیشتر به [۷] رجوع کرد.

در دو روش فوق ضریب گسیل به عنوان پارامتر معلوم فرض می‌شود. که تعیین این پارامتر با توجه به اینکه معادله انتقال تشعشعی سنجنده‌ای با N باند حرارتی دارای N معادله و N+1 مجهول (دما و ضریب گسیل هر باند) می‌باشد، مشکل است. تخمین ضریب گسیل از تصاویر ماهواره‌ای به عنوان یک مساله فرومعیین می‌باشد برای حل این مساله روش‌هایی ارائه شده است که برخی از آنها مبتنی بر حل همزمان ضریب گسیل و دما می‌باشد مانند روش جداسازی ضریب گسیل و دما (TES) [۸] و روش روز/شب [۹]؛ گروه دیگری از روش‌ها مبتنی بر تخمین ضریب گسیل و سپس استفاده از این پارامتر بعنوان پارامتر معلوم در سایر روش‌هاست که عبارتند از روش طبقه‌بندی [۱۰]، روش شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده [۱۱]، روش تقریب رادیانس باندها [۱۲]، روش جسم خاکستری [۱۳]، روش

^۱ Split-Window

شاخص طیفی مستقل از دما [۱۴]، روش نرمال سازی ضریب گسیل [۱۵]، روش گسیل مندی آلفا [۱۶] و روش گسیل-مندی مدل [۱۷] برای مطالعه جزئیات بیشتر این روش ها می توان به [۱۸] مراجعه کرد.

الگوریتم جداسازی ضریب گسیل و دما در سال ۱۹۹۸ در تیم سنجنده استر طراحی و توسعه یافت و با اعمال تغییراتی برای سایر سنجنده ها استفاده گردید این الگوریتم در واقع تلفیق سه الگوریتم ضریب گسیل نرمال شده، روش نسبت طیفی و روش گسیل مندی حداقل و حداکثر است. این روش بر پایه ایجاد یک رگرسیون تجربی بین اختلاف ضریب گسیل با ضریب گسیل میانگین پنج باند حرارتی استوار است و با استفاده از تکرار، به طور همزمان پارامترهای ضریب گسیل سطح و دمای سطح را تعیین می کند [۸].

اساس روش شب و روز بر ثابت فرض کردن ضریب گسیل در طول زمان به شرط تغییر نکردن پارامترهای محیطی استوار است. در این روش با فرض ثابت ماندن پارامترهای محیطی، از منطقه دو تصویر حرارتی اخذ می شود و در نتیجه یک معادله جدید برای ضریب گسیل ایجاد شده حال برای هر باند حرارتی هر تصویر یک معادله بر اساس تابع انتقال تشعشعی می توان نوشت. هر معادله ۲ مجهول ضریب گسیل و دما را دارد که با فرض ثابت ماندن ضریب گسیل می توان یک معادله به معادلات اضافه کرد. با حل همزمان معادلات به تعداد مجهولات یک عدد اضافه می شود در حالی که تعداد معادلات دو برابر می گردد؛ و در نتیجه معادله قابل حل می شود. ضعف عمده این روش نیاز به دقت بالا در ثبت هندسی مکانی و رادیومتریکی دو تصویر نسبت به یکدیگر است. که بر روی دقت نتایج حاصله تأثیر زیاد می گذارد [۹].

مطالعه در زمینه تعیین دمای سطح از داده های ماهواره لندست-۸ توسط Rozenstein و همکاران و همچنین Jimenez-Munoz و همکاران انجام گرفته است. Rozenstein و همکاران در سال ۲۰۱۴ الگوریتم پنجره مجزایی با فرض وجود رابطه خطی بین دمای سطح زمین و دمای درختسنگی باندهای ۱۰ و ۱۱ ارائه کردند [۱۹]. Jimenez-Munoz و همکاران در سال ۲۰۱۴ الگوریتم تک کاناله و پنجره مجزایی برپایه الگوریتم JM&S که پیش تر توسط Sobrino و همکاران برای ماهواره لندست-۵ ارائه شده بود ارائه کردند [۲۰] به عبارت دیگر آنها الگوریتم پیشنهادی برای لندست-۵ را برای لندست-۸ تعمیم دادند.

با توجه به این که در مطالعات انجام شده تنها از داده های شبیه سازی شده برای محاسبه و ارزیابی استفاده شده است و همچنین با توجه به حساسیت دمای سطح زمین و ضرایب روش پنجره مجزا به نوع منطقه از یک سو و از سوی دیگر انجام و آنالیز این مطالعات در محدوده ای خارج از ایران و همچنین وابستگی این روش ها به اطلاعاتی نظیر بخار آب که از داده های خام لندست-۸ قابل اندازه گیری نمی باشد. در این مقاله سعی شده است که روشی مستقل از اطلاعات جانبی و در محدوده ایران برای تخمین دمای سطح از ماهواره لندست-۸ ارائه شود.

لازم به ذکر است در روش های ارائه شده برای ماهواره لندست-۸ تاکنون ضریب گسیل بعنوان پارمتر معلوم فرض شده است اما در این پژوهش روشی جهت تخمین ضریب گسیل سطح ارائه شده است. تمایز پژوهش های انجام شده نسبت به سایر پژوهش های مشابه را می توان در نوع الگوریتم پنجره مجزا، ضرایب الگوریتم، عدم نیاز به اطلاعات جانبی، تخمین ضریب گسیل و ارزیابی روش با استفاده از داده های ماهواره ای و زمینی دانست علاوه بر این پژوهشی در این زمینه در محدوده کشور ایران تاکنون برای ماهواره لندست-۸ در تعیین دمای سطح انجام نشده است.

در این تحقیق، الگوریتمی نوین جهت تخمین ضریب گسیل و دمای سطح زمین با استفاده از داده های ماهواره لندست-۸ ارائه شده است. الگوریتم ارائه شده نیاز به داده های جانبی ندارد. در ابتدا با استفاده از داده های شبیه سازی شده از کتابخانه طیفی استر رابطه ای بین ضریب گسیل سطح و شاخص NDVI ارائه شد و در مرحله دوم الگوریتم پنجره مجزایی به همراه ضرایب جهانی با استفاده از داده های شبیه سازی شده از نرم افزار MODTRAN جهت تخمین دمای سطح زمین از داده های لندست-۸ ارائه گردید. در نهایت الگوریتم پیشنهادی با استفاده از سه مجموعه داده زمینی، شبیه سازی شده و ماهواره ای مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- داده های مورد مطالعه

۲-۱- داده های شبیه سازی شده طیفی

در این بخش با استفاده از داده های کتابخانه طیفی استر (ASL, <http://speclib.jpl.nasa.gov>) و دانشگاه

تگزاس (VSL, <http://spectrallibrary.utep.edu>) داده‌های مربوط به پاسخ طیفی باندهای لندست-۸ با به کار گیری معادله ۱ مقادیر رادیانس برای باندهای لندست-۸ شبیه سازی شد.

$$L_{(a_{\min}, a_{\max})}^{sim} = \frac{\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} L_{\lambda} R_{\lambda} d\lambda}{\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} R_{\lambda} d\lambda} \quad (1)$$

در این رابطه L رادیانس شبیه‌سازی شده، R تابع پاسخ طیفی و $a_{\min}$ ، $a_{\max}$ به ترتیب طول موج ابتدایی و انتهایی مربوط به باند مورد نظر هستند. لازم به ذکر است برای تبدیل بازتابش دو باند ۱۰ و ۱۱ به ضریب گسیل از قانون کیرشهف ($\epsilon = 1 - \tau$) استفاده شد.

جدول ۱ برخی از ویژگی‌های این داده‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های داده‌های شبیه سازی شده طیفی

نوع پوشش	تعداد	کلاس	کتابخانه طیفی
خاک	۳۵	Alfisol (8 samples), Aridisol (8 samples), Entisol (3 samples), Inceptisol (7 samples), Mollisol (9 samples)	ASL
سنگ	۳۰	Metamorphic, Igneous, sedimentary (10 samples)	ASL
گیاه	۱۱	Grass (2 samples), Leaf (5 samples), bark (3 samples), Tree	ASL-VSL
آب، برف و یخ	۶	Water, Ice, Frost, Snow (3 samples)	ASL
داده تست	۵۰	به صورت تصادفی	ASL-VSL

استفاده شد.

جدول ۲ برخی از ویژگی‌های این داده‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های داده شبیه سازی شده براساس MODTRAN

نام	روش	محدوده دمایی	محدوده ضریب گسیل	تعداد	زاویه دید	پروفایل اتمسفری
SD ₁	Plank's law	۲۶۵-۳۳۰	۰/۹۹۸-۰/۹۱۲	۵۰۰	۰	-----
SD ₂	MODTRAN	۲۶۰-۳۱۰	۰/۹۹۸-۰/۹۱۲	۳۶۴۵۰	۰	15 atmospheric profiles for each model (TRO, MLS, MLW, SAS, USS, SAW)
SD ₃	MODTRAN	۲۶۰-۳۱۰	۰/۹۹۸-۰/۹۱۲	۲۴۳۰۰	۰	10 atmospheric profiles for each model (TRO, MLS, MLW, SAS, USS, SAW)

ناحیه ی مشخص تقسیم بندی شد و در هر ناحیه داده‌های دمایی زمینی در تعدادی نقطه اندازه‌گیری شدند. ناحیه با فاصله حداقل ۵ کیلومتر از همدیگر قرار داشتند و اولین سایت حدود ۱۰ کیلومتری شهر ورامین قرار داشت.

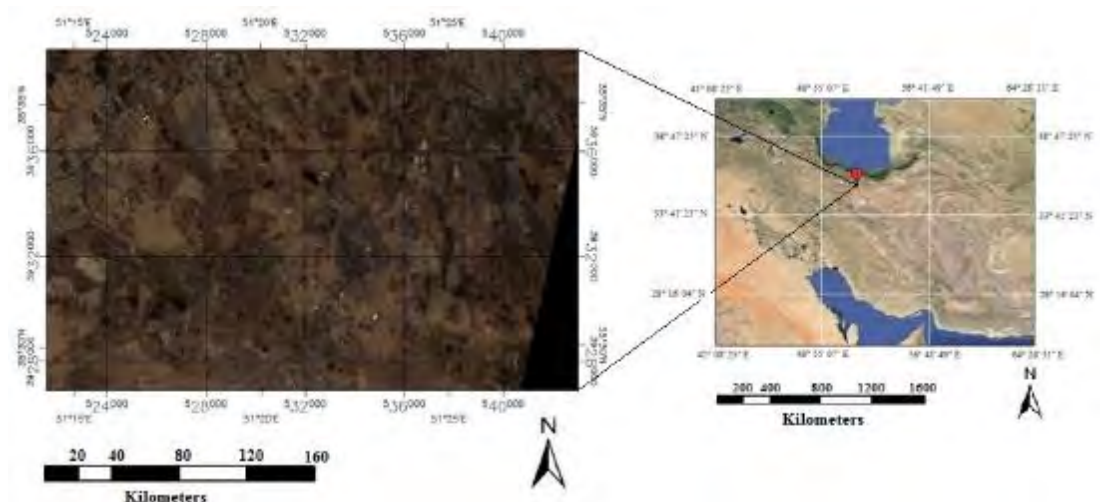
۲-۳- داده‌های زمینی دمای سطح

در تاریخ اول تیر ۱۳۹۳ مجموعه داده زمینی از منطقه‌ای در جنوب تهران تهیه گردید که برای ارزیابی هرچه بهتر روش پیشنهادی بکار گرفته شد. منطقه اندازه‌گیری به پنج

۲-۲- داده‌های شبیه سازی شده دمایی با استفاده از نرم افزار MODTRAN

در این بخش سه مجموعه داده مستقل شبیه‌سازی شده شامل دمای درخشندگی، دمای سطح زمین، ضریب گسیل سطح و پارامترهای اتمسفری (رادیانس رو به بالا، رادیانس رو به پایین و ضریب شفافیت) باندهای حرارتی ساخته شدند. یک مجموعه داده جهت کالیبراسیون الگوریتم پنجره مجزا استفاده شد و دو مجموعه داده دیگر جهت ارزیابی روش استفاده شدند. برای طراحی این مجموعه داده‌ها دمای درخشندگی براساس معادله انتقال تشعشعی با استفاده از عکس قانون پلانک تعیین گردید. دمای سطح زمین براساس مقدار دمای لایه اول اتمسفر (T_0) با در نظر گرفتن چهار حالت (T_0 ، T_0+10 ، T_0+5 ، T_0) تعیین شد. مقادیر ضریب گسیل براساس داده‌های طراحی شده در مرحله ۲-۱ تعیین شدند و در نهایت جهت تعیین مقادیر پارامترهای اتمسفری از نرم افزار MODTRAN 4 و به کارگیری پروفایل‌های اتمسفری استاندارد شامل:

Tropical (TRO)
Mid-latitude summer (MLS)
Mid-latitude winter (MLW)
Sub-arctic summer (SAS)
U.S standard (USS)
Sub-arctic winter (SAW)



شکل ۱- تصویر منطقه اخذ داده زمینی



شکل ۲- پوشش زمینی منطقه اخذ داده زمینی

استفاده شد. که سرعت باد حدود ۱ متر بر ثانیه و رطوبت هوا در حدود ۷ درصد بود.

۴-۲- مجموعه داده ماهواره‌ای

با توجه به اهمیت موضوع مقایسه داده‌های سنجیده‌های مختلف با یکدیگر و همچنین توانایی محصولات به‌دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای در اعتبار سنجی یکدیگر، مجموعه داده ماهواره‌ای ایجاد گردید. این مجموعه شامل داده‌های استر، لندست-۷ و لندست-۸ می‌باشد. این داده‌ها با اختلاف زمانی ۱۵ دقیقه از منطقه‌ای در ارگان آمریکا تهیه گردیده‌اند. لازم به‌ذکر است این منطقه تنها منطقه‌ای بود که تصاویر این ماهواره‌ها باهم هم‌پوشانی زمانی داشتند. این داده‌ها با استفاده از نرم افزار Envi 4.8 رجیستر شدند و با استفاده از همین نرم افزار تصحیح اتمسفری شدند. شکل ۳ نشان دهنده تصاویر این مجموعه داده از منطقه مذکور می‌باشد.

نحوه اندازه‌گیری به این صورت بود که در چهار سایت با استفاده از دماسنج جیوه‌ای اندازه‌گیری‌ها انجام شدند و در یک سایت علاوه بر دماسنج جیوه‌ای، یک دستگاه ترمومتر هم بکار گرفته شد. لازم به‌ذکر است که قبل از اندازه‌گیری‌های زمینی دماسنج‌های مورد استفاده نسبت به هم و با استفاده از ظرف آب و یخ کالیبره شدند. نحوه بکارگیری دماسنج جهت قرائت دما به شرح زیر بود.

در مناطق با خاک لخت دماسنج در عمق یک میلی-متری خاک قرار می‌گرفت و در تماس با سطح خاک قرار داشت بعد از حدود ۳ تا ۴ دقیقه دمای آن قرائت می‌گردید. در مناطق گیاهی دماسنج در تماس با سطح برگ و ساقه قرار می‌گرفت و سپس قرائت انجام می‌گردید. زمان‌بندی قرائت به این صورت بود که از یک ساعت قبل از زمان عبور ماهواره تا یک ساعت بعد از آن جمع‌آوری داده ادامه داشت و مهمترین داده، داده مربوط به زمان عبور ماهواره بود که برای ارزیابی از این داده استفاده شد. جهت بررسی شرایط هوایی از یک دستگاه بادسنج و رطوبت سنج

توان تفکیک رادیومتری، طیفی و مکانی بالا پوشش داده و خود دارای سه سنجنده به نام‌های NIR، SWIR و TIR با توان تفکیک‌های به ترتیب ۱۵، ۳۰ و ۹۰ متر است هر تصویر استر منطقه‌ای به وسعت ۶۰×۶۰ کیلومتر را می‌پوشاند. نقشه دمایی بدست آمده از این سنجنده، یکی از محصولات دمایی معتبر در سنجش از دور به حساب می‌آید.

۳- تعیین ضریب گسیل برای لندست-۸

۳-۱- تعیین حد آستانه

Li و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از هشت مجموعه داده‌ی نمونه در پوشش‌های زمینی مختلف نشان دادند، همبستگی بالایی بین شاخص NDVI بدست آمده از لندست-۷ و لندست-۸ وجود دارد و این همبستگی در حدود ۹۶٪ است؛ و بر همین اساس رگرسیون خطی به شکل معادله ۱ ارائه کردند [۲۱]:

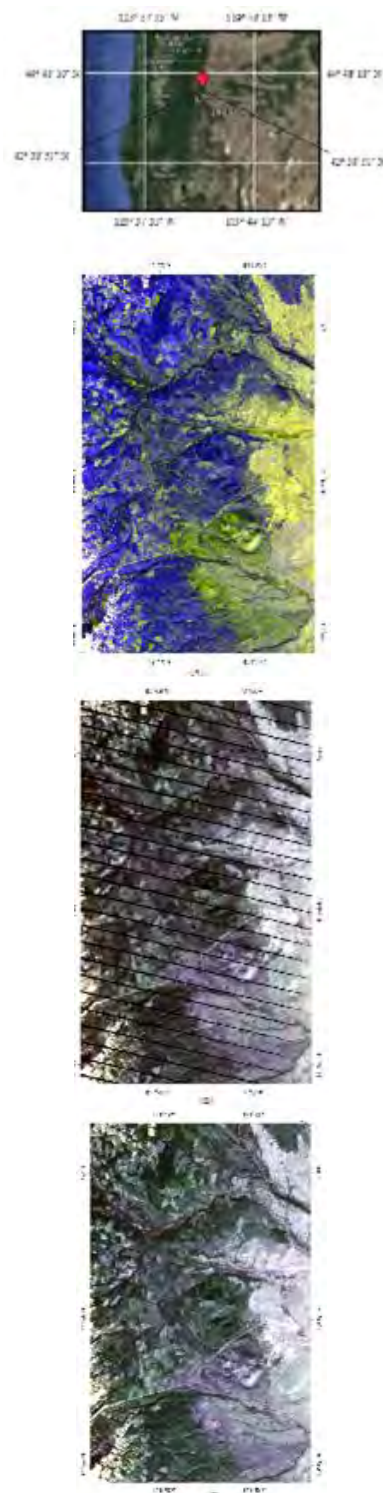
$$NDVI_{OLI} = A \times NDVI_{ETM+} + B \quad (1)$$

در رابطه فوق A برابر ۰/۹۷۹۹۸ و B برابر ۰/۰۷۵۹۲ هستند.

با توجه به حد آستانه‌های ارائه شده برای تفکیک داده‌های ماهواره‌ای لندست-۷ به سه کلاس خاک ($NDVI < 0.2$)، گیاه ($0.2 < NDVI < 0.5$) و تقریباً گیاهی که توسط Sobrino و همکاران ارائه شد می‌توان حد آستانه‌های ۰/۲۷ برای حد بالای کلاس خاک و حد آستانه ۰/۵۶ را برای حد پایین کلاس گیاه با توجه به رابطه ۱ برای تفکیک داده‌های ماهواره لندست-۸ در نظر گرفت.

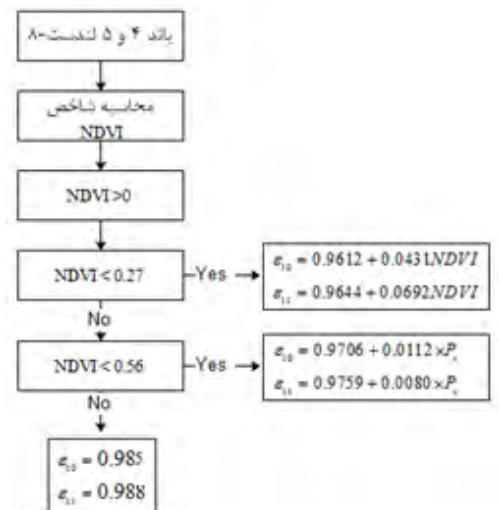
۳-۲- تعیین ضریب گسیل برای کلاس‌های مختلف

در این بخش با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده رگرسیون خطی بین ضریب گسیل باند ۱۰ و ۱۱ با مقدار NDVI برای سه کلاس خاک، گیاه و مخلوط خاک و گیاه انجام گرفت.



شکل ۳- به ترتیب از بالا به پایین الف) تصویر استر ب) تصویر لندست-۷ ج) تصویر لندست-۸

سنجنده استر یک تصویربردار پیشرفته چند طیفی روی سکوی Terra متعلق به ناسا است که در دسامبر سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد. این سنجنده حاصل تلاش مشترک بین ناسا و ژاپن بوده و یک ناحیه طیفی وسیع شامل ۱۴ باند از محدوده مرئی تا مادون قرمز حرارتی با



شکل ۴- الگوریتم پیشنهادی جهت تخمین ضریب گسیل از ماهواره لندست-۸

الگوریتم پیشنهادی با استفاده از داده‌های تست که در بخش ۱-۲ توضیح داده شدند مورد ارزیابی قرار گرفت که میزان RMSE برای باند ۱۰ برابر ۰/۰۰۷ و برای باند ۱۱ برابر مقدار ۰/۰۰۹ می‌باشد.

۴- تعیین دمای سطح برای لندست-۸

۴-۱- الگوریتم پنجره مجزا

روش‌های پنجره مجزا با استفاده از تلفیق باندهای حرارتی مجاور سعی در کاهش تاثیرات اتمسفری دارند و بر همین مبنا طراحی شده‌اند [۲۳]. بعبارت دیگر روش‌های پنجره مجزا براساس اختلاف جذب بین دو باند حرارتی مجاور در محدوده ۱۰ تا ۱۲/۵ میکرومتر بر مبنای خطی‌سازی معادله انتقال تشعشعی برحسب دما یا طول موج عمل می‌کنند. این الگوریتم‌ها مقدار دمای سطح زمین را از طریق تلفیق خطی دمای درخشندگی در دو باند حرارتی تخمین می‌زنند.

شکل عمومی این الگوریتم‌ها به شکل رابطه ۴ است.

$$LST = a_0 + a_1 T_i + a_2 (T_i - T_j) \quad (4)$$

a_k ضرایب این روش هستند که به تابع پاسخ طیفی باندها، ضریب گسیل باندها، بخار آب اتمسفر و زاویه زینتی بستگی دارد. به عبارت دیگر [۲۴]:

۳-۲-۱- تعیین ضریب گسیل برای کلاس خاک

در این مرحله رگرسیون بین شاخص NDVI و ضریب گسیل برای کلاس خاک انجام شد. نتایج این رگرسیون در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است در فرآیند رگرسیون برخی از نمونه‌ها که دارای همبستگی غیر قابل قبولی با شاخص NDVI بودند حذف شدند. جدول ۱ نشان می‌دهد رگرسیون انجام شده دارای خطای انحراف معیار در حدود ۰/۰۰۲ است که مقدار مناسبی برای ضریب گسیل می‌باشد.

۳-۲-۲- تعیین ضریب گسیل برای کلاس مخلوط خاک و گیاه

در این قسمت از مدل ارائه شده توسط Sobrino در سال ۱۹۹۰ [۲۲] برای مناطق مخلوط خاک و گیاه استفاده گردید. در واقع در این کلاس بین دو کلاس خاک و گیاه براساس وزنی منحصربفرد درونیابی انجام شد. این مدل به شکل معادله ۳ است.

$$\varepsilon_i = (\varepsilon_{v,i} - \varepsilon_{s,i}) \times \left[\frac{NDVI - Th_{soil}}{Th_{vegetation} - Th_{soil}} \right]^2 + \varepsilon_{s,i} \quad (3)$$

در رابطه فوق $Th_{vegetation}$ حد آستانه NDVI برای کلاس گیاه یعنی ۰/۵۶ و Th_{soil} حد آستانه NDVI برای کلاس خاک و برابر ۰/۲۷ می‌باشد. ε_s ضریب گسیل کلاس خاک است که مقدار آن را برابر با میانگین تمامی نمونه‌های شبیه‌سازی شده در کلاس خاک یعنی برابر ۰/۹۷۰۶ و ۰/۹۷۵۹ برای باند ۱۰ و ۱۱ در نظر گرفته شد. ε_v ضریب گسیل برای کلاس گیاه برابر میانگین این کلاس یعنی ۰/۹۸۱ و ۰/۹۸۳ برای باند ۱۰ و ۱۱ در نظر گرفته شد.

۳-۲-۳- تعیین ضریب گسیل برای کلاس گیاه

برای مواد گیاهی با توجه به تغییرات ناچیز ضریب گسیل برای داده‌های شبیه‌سازی شده، مقداری ثابت انتخاب گردیده است. این مقادیر ثابت بر اساس میانگین ضریب گسیل این باندها انتخاب شدند که به ترتیب برابر ۰/۹۸۵ و ۰/۹۸۸ برای باند ۱۰ و ۱۱ می‌باشند.

شکل ۴ الگوریتم روش پیشنهادی برای تعیین ضریب گسیل از تصاویر ماهواره لندست-۸ را نشان می‌دهد.

$$a_k = f_k(g_i, g_j, \varepsilon_i, \varepsilon_j, WV, VZA) \quad (5)$$

g تابع پاسخ طیفی، ε ضریب گسیل، WV بخار آب اتمسفر و VZA زاویه زنیته می‌باشند. دقت روش‌های پنجره مجزا در تعیین دمای سطح زمین به دقت تعیین ضرایب بستگی دارد. تعیین این ضرایب از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی و مقایسه آن با مقادیر سنجنده و یا از طریق شبیه‌سازی داده‌های ماهواره‌ای و پارامترهای اتمسفری تعیین می‌شوند. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز این روش به پروفیل اتمسفری دقیق و همچنین کارآمدی روش برای تمامی سنسورها با حداقل دو باند حرارتی اشاره کرد. وابستگی این روش به اطلاع از ضریب گسیل و همچنین تعیین ضرایب هر مدل برای هر منطقه را می‌توان از محدودیت‌های این روش دانست. در دهه‌های اخیر الگوریتم‌های پنجره مجزا متفاوتی ارائه شده است که تفاوت آن‌ها در تعیین پارامترها و تابع رابطه ۵ می‌باشند. الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق براساس الگوریتم ارائه شده توسط بکر و لی به شکل رابطه ۴ با ضرایب رابطه ۶ طراحی شد [۴]: (a_0) ضریب ثابت است.

$$a_k = A_{0,k} + A_{1,k} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_{2,k} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \quad (6)$$

در رابطه ۶، ε ضریب گسیل میانگین باند ۱۰ و ۱۱ و $\Delta\varepsilon$ اختلاف ضریب گسیل در این دو باند است.

۴-۲- تعیین ضرایب الگوریتم پنجره مجزا

در این قسمت داده‌های شبیه‌سازی شده، براساس نرم-افزار MODTRAN با استفاده از تابع پاسخ طیفی باندهای لندست-۸، طیف مواد گوناگون و داده‌های پروفایل‌های اتمسفری گوناگون به عنوان ورودی نرم‌افزار، طراحی شدند.

داده‌های شبیه‌سازی شده در تمامی حالت اتمسفری شبیه‌سازی شدند. سپس از طریق روش کمترین مربعات با

استفاده از این داده‌های شبیه‌سازی طراحی شده ضرایب تعیین گردید (مقادیر A). به طور کلی می‌توان مراحل تعیین مقادیر را به صورت زیر بیان کرد:
(الف) طراحی داده‌های شبیه‌سازی شده
(ب) طراحی ماتریس مشاهدات (Y) که مقادیر دمای سطح زمین می‌باشد:

$$Y = LST \text{ derived from simulate datasets} \quad (7)$$

(ج) طراحی ماتریس مجهولات (X) که مقادیر مجهول در رابطه ۶ می‌باشند:

$$X^T = [a_0 \quad A_{01} \quad A_{11} \quad A_{12} \quad A_{02} \quad A_{12} \quad A_{22}] \quad (8)$$

(د) طراحی ماتریس ضرایب (A) که مقادیر معلوم در رابطه ۶ هستند:

$$A = \begin{bmatrix} P & Q \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & T_{10} & \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} T & \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} T \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Q = \begin{bmatrix} (T_{10} - T_{11}) & \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} (T_{10} - T_{11}) & \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} (T_{10} - T_{11}) \end{bmatrix}$$

(ه) تعیین ضرایب از طریق سرشکنی کمترین مربعات:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (10)$$

نتایج این قسمت در جدول ۲ آورده شده است؛ و الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق در رابطه ۱۱ ارائه شده است.

$$LST = 6.874 + \left(0.974 + 0.193 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + 0.301 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) T_{10} \quad (11)$$

$$+ \left(2.384 - 13.192 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + 25.113 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) (T_{10} - T_{11})$$

جدول ۲- ضرایب پیشنهادی

ضرایب مدل	a_0	A_{01}	A_{11}	A_{12}	A_{02}	A_{12}	A_{22}
مقدار	۶/۸۷۴	۰/۹۷۴	۰/۱۹۳	-۰/۳۰۷	۲/۳۴۸	-۱۳/۱۹۲	۲۵/۱۱۳

۴-۳- آنالیز حساسیت

جهت بررسی توزیع، تاثیر و نقش پارامترهای موجود در روش پیشنهادی در تعیین دمای سطح، آنالیز حساسیت در این قسمت انجام گرفت. با توجه به رابطه پیشنهادی در این تحقیق (رابطه ۱۱) و قانون انتشار خطاها می‌توان رابطه زیر را برای خطای دمای سطح نوشت:

$$E_{LST} = \sqrt{\delta_{alg}^2 + \delta_{LSE}^2 + \delta_{NEAT}^2} \quad (12)$$

در این رابطه δ_{alg} خطای ناشی از برازش الگوریتم پیشنهادی بر داده‌های شبیه سازی شده، δ_{NEAT} خطای مربوط به باند حرارتی و δ_{LSE} خطای مربوط به ضریب گسیل می‌باشد که از روابط زیر قابل محاسبه هستند.

$$\delta_{NEAT} = \sqrt{\left(\frac{\partial LST}{\partial T_{10}} E(T_{10})\right)^2 + \left(\frac{\partial LST}{\partial T_{11}} E(T_{11})\right)^2} \quad (13)$$

$$\delta_{LSE} = \sqrt{\left(\frac{\partial LST}{\partial \epsilon_{10}} E(LSE_{10})\right)^2 + \left(\frac{\partial LST}{\partial \epsilon_{11}} E(LSE_{11})\right)^2} \quad (14)$$

در روابط بالا مقدار $E(T_i)$ برابر 0.4 کلین و $E(LSE)$ برابر 0.1 در نظر گرفته شد. با استفاده از مجموعه داده SD_3 در شرایط مختلف آنالیز حساسیت انجام شد و میانگین این خطاها محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت الگوریتم پیشنهادی

جملات (Terms)	تابع کلی
$\delta_{alg} = 0.64$ $\delta_{NEAT} = 1/55$ $\delta_{LSE} = 2/13$	$\Delta LST = 2/73$

۵- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش الگوریتم پنجره مجزا پیشنهادی برای سه مجموعه داده شبیه سازی شده، زمینی (میدانی) و ماهواره‌ای پیاده سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است در مورد داده‌های حقیقی (زمینی و ماهواره‌ای) از الگوریتم پیشنهادی در بخش سوم این پژوهش جهت تعیین ضریب گسیل استفاده شد. همچنین با توجه به مشکلاتی که در بحث کالیبراسیون حرارتی باند ۱۱

ماهواره لندست-۸ توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا اعلام شده قسمتی از خطای تعیین دما که از طریق داده‌های حقیقی به دست آمده ناشی از خطایی مربوط به ضریب گسیل و کالیبراسیون می‌باشد.

عموما، استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده اولین مرحله در بررسی و آنالیز الگوریتم‌های جدید به حساب می‌آید و به همین منظور روش پیشنهادی با استفاده از این داده‌ها ارزیابی شد. دو مجموعه داده SD_1 و SD_3 برای ارزیابی الگوریتم استفاده شدند نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که خطای RMSE برای داده شبیه‌سازی شده براساس قانون پلانک برابر $1/13$ و برای داده شبیه سازی شده با استفاده از نرم افزار MODTRAN در حدود $1/21$ می‌باشد. این نتایج مشابه سایر پژوهش‌های انجام شده می‌باشد با این تفاوت که الگوریتم پیشنهادی این پژوهش وابستگی به داده‌های جانبی ندارد. و در نتیجه مقداری قابل قبول و مناسب می‌باشد.

بخش مهمی از آنالیزهای سنجش از دوری مربوط به داده‌های حقیقی می‌باشد که در این پژوهش سعی شده است به طور کامل این موضوع با به کارگیری دو مجموعه داده میدانی و ماهواره‌ای پوشش داده شود. مجموعه دیگری که برای ارزیابی و آنالیز الگوریتم‌های پیشنهادی انتخاب شد مجموعه داده زمینی بود که این مجموعه شامل پنج سایت و در برگیرنده پوشش‌های گیاهی، خاکی و مخلوط گیاه و خاک بود که نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که خطای RMSE برای این داده برابر $1/91$ می‌باشد. انحراف معیار و میانگین خطا به ترتیب برابر $1/89$ و 0.27 درجه می‌باشند. مقدار خطای بدست آمده در این قسمت با توجه به اینکه در برگیرنده خطای کاربر و خطای ناشی از کالیبراسیون حرارتی می‌باشد مقدار قابل قبولی است و همچنین با توجه موارد فوق و اینکه مقدار میانگین خطا پایین است می‌توان گفت این روش تقریبا بدون بایاس است.

مجموعه داده ماهواره‌ای مجموعه دیگری بود که برای ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شد. در بسیاری از تحقیقات سنجش از دوری ارزیابی و آنالیز براساس مقایسه بین دو محصول ماهواره‌ای انجام می‌شود. علاوه بر این مقایسه دمای بدست آمده بین دو ماهواره‌ای توانایی‌های این ماهواره‌ها در تعیین این پارامتر را نیز مشخص می‌کند. در این مرحله تصویر دمایی استر با استفاده از الگوریتم

۶- نتیجه گیری

دمای سطح زمین و ضریب گسیل سطح از پارامترهای مهم در مطالعه مدل‌های تعادل انرژی در مقیاس منطقه‌ای جهانی می‌باشند. تصاویر سنجنش از دور به دلیل پوشش وسیع و به هنگام بودن، ابزار مناسبی جهت تهیه نقشه‌های ضریب گسیل سطح و دمای سطح می‌باشند. با توجه به پرتاب ماهواره لندست - ۸ در سال ۲۰۱۳ و مجهز بودن این سنجنده به دو باند حرارتی از یک سو و از سوی دیگر قدرت تفکیک مکانی مناسب این ماهواره، می‌توان گفت داده‌های این ماهواره برای تهیه نقشه‌های ضریب گسیل سطح و دمای سطح مناسب می‌باشند.

در این تحقیق روشی بر مبنای شاخص گیاهی NDVI برای تعیین ضریب گسیل سطح و الگوریتمی پنجره مجزا جهت تعیین دمای سطح از داده‌های ماهواره لندست-۸ ارائه شد. روش ارائه شده با استفاده از سه مجموعه داده شبیه‌سازی شده، زمینی و ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی با استفاده از این سه مجموعه به ترتیب خطای RMSE برابر با ۱/۲۱، ۱/۹۱ و ۱/۰۳ درجه را نشان دادند. بنابراین روش پیشنهادی، روشی مناسب و در عین حال ساده (عدم نیاز به داده جانبی) جهت تعیین دمای سطح زمین از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ می‌باشد. و می‌تواند با توجه به کمبود پژوهش در زمینه‌ی تهیه نقشه دمای سطح و ضریب گسیل سطح برای ماهواره لندست-۸ در این زمینه راه گشا باشد.

TES، تصویر دمایی لندست-۸ با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و تصویر دمایی لندست-۷ با روش تک کاناله JM&S بدست آمدند و باهم مقایسه شدند. دلیل استفاده از این روش‌ها، مطالعات پیشین مولفین این مقاله است که با بررسی‌های انجام داده دقت این روش‌ها را نسبت به سایر روش‌ها بهتر ارزیابی کرده‌اند. در گام اول تصویر دمای استر به عنوان داده مرجع در نظر گرفته شد و اختلاف بین دمای بدست آمده از روش پیشنهادی با داده مرجع (داده دمایی استر) برای ۱۰۰۰۰ پیکسل (گرید ۱۰۰*۱۰۰) محاسبه شد که خطای RMSE آن برابر ۰/۹۱ درجه بود. با فرض اینکه خطای محصول دمایی استر ۰/۵ باشد می‌توان RMSE برابر ۱/۰۳ در نظر گرفت. در گام بعد تصویر دمایی لندست-۷ به عنوان داده مرجع در نظر گرفته شد و دماها با هم مقایسه شدند که خطایی در حدود ۱/۲۵ به دست آمد که با توجه به اینکه این سنجنده دارای یک باند حرارتی می‌باشد این مقدار قابل قبول است. جدول ۵ نتایج ارزیابی‌های انجام شده در این قسمت را نشان می‌دهد.

جدول ۵- نتایج ارزیابی الگوریتم پیشنهادی با مجموعه داده

داده مرجع	خطا	
	انحراف معیار	میانگین
داده شبیه سازی شده	۱/۲۰	-۰/۰۵
داده زمینی	۱/۸۹	۰/۲۷
نقشه حرارتی استر	۰/۹۰	-۰/۰۹
نقشه حرارتی لندست-۷	۱/۲۴	۰/۲۱

مراجع

- [1] J. R. Irons, J. L. Dwyer, and J. A. Barsi, (2012) "The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity ission," Remote Sens. Environ., vol. 122, pp. 11-21.
- [2] Wan, Z. (1999). "MODIS Land Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Documentation", Version 3.3, URL: [http:// www.icess.ucsb.edu/modis/atbd-mod-11.pdf](http://www.icess.ucsb.edu/modis/atbd-mod-11.pdf).
- [3] Price J. C. (1983). "Estimating Surface Temperatures from Satellite Thermal Infrared Data--A Simple Formulation for the Atmospheric Effect", Remote Sens. Environ, 13, pp. 353-361.

- [4] Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P., (2001). "A mono-algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region". *International Journal of Remote Sensing* 22 (18), 583–594
- [5] Jimenez-Munoz, J.C., Sobrino, J.A., (2003). "A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data". *Journal of Geophysical Research* 108, 1.
- [6] Anding D., Kauth R. (1970). "Estimation of Sea Surface Temperature from Space". *Remote Sens. Environ.* 1, pp. 217-220.
- [7] Z.-L. Li, B.-H. Tang, H. Wu, H. Ren, G. Yan, Z. Wan, I. F. Trigo, and J. A. Sobrino, "Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives," *Remote Sens. Environ.*, vol. 131, pp. 14–37, Apr. 2013.
- [8] Gillespie, A. R.; Rokugawa, S.; Matsunaga, T.; Cothorn, J. S.; Hook, S.; Kahle, A. B. (1998). "A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1113–1126.
- [9] 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, 980–996.
- [10] Snyder, W. C.; Wan, Z.; Zhang, Y.; Feng, Y. Z (1998). "Classification based emissivity for land surface temperature measurement from space", *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2753–2774.
- [11] Van de Griend, A. A., Owe M. (1993). "On the relationship between thermal emissivity and 21 the normalized difference vegetation index for natural surfaces", *International Journal of 22 Remote Sensing*, 14:1119–1131.
- [12] Barducci, A., and I. Pippi. 1996. "Temperature and Emissivity Retrieval from Remotely Sensed Images Using the 'Grey Body Emissivity' Method." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34: 681–95.
- [13] Kahle, A. B., D. P. Madura, and J. M. Soha. 1980. "Middle Infrared Multispectral Aircraft Scanner Data: Analysis for Geological Applications." *Applied Optics* 19: 2279–90.
- [14] Becker, F.; Li, Z. L (1990). "Temperature-independent spectral indices in TIR bands", *Remote Sensing of Environment*, 32, 17–33.
- [15] Kealy, P. S.; Hook, S. J (1993). "Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31, 1155–1164.
- [16] Kealy, P. S.; Hook, S. J (1993). "Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31, 1155–1164.
- [17] Liang, S., (2000). "Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces". Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 534 p.
- [18] Z.-L. Li, H. Wu, N. Wang, S. Qiu, J. A. Sobrino, Z. Wan, B.-H. Tang, and G. Yan, "Land surface emissivity retrieval from satellite data," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 34, no. 9/10, pp. 3084–3127, 2013.
- [19] Li P, Jiang L, Feng Z (2014). "Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors", *Remote Sensing*, 6(1), 310-329.
- [20] Sobrino, J. A.; Jiménez-Muñoz, J. C.; Paolini, L (2004). "Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5". *Remote Sensing of Environment*, 90, 434–440.
- [21] McMillin, L. M. (1975). "Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorptions", *Journal of Geophysical Research*, 80, 5113–5117.
- [22] Li, Z. -L., Tang, B. -H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., et al. (2013). "Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives", *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37.

- [23] Jiménez-Muñoz, J. C.; Sobrino, J. A (2010). "Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature retrieval from Low-Resolution Thermal Infrared Sensors", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 5, 806–809.
- [24] Baldrige, A. M.; Hook, S.J.; Grove, C.I.; Rivera, G (2009). "The ASTER Spectral Library Version 2.0", Remote Sensing of Environment, 113, 711-715.