

جغرافیا و توسعه شماره ۳۷ زمستان ۱۳۹۳

وصول مقاله: ۱۳۹۰/۹/۱۴

تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۱۰/۶

صفحات: ۲۹-۴۰

ارزیابی دقت محصولات گسیل‌مندی سنجنده MODIS و ASTER با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی

مهدی بهرامی^۱، دکتر محمدرضا مباشری^۲، دکتر مجید رحیم‌زادگان^۳

چکیده

پهنه‌بندی گسیل‌مندی سطح یک نیاز مهم سنجش از دور حرارتی می‌باشد. با داشتن مقادیر دقیق گسیل‌مندی، می‌توان دمای سطح را به طور دقیق مشخص نمود که در بسیاری از مطالعات زیست‌محیطی، اقلیمی، و مدل‌های پیش‌بینی هوا کاربرد دارد. با توجه به اهمیت گسیل‌مندی سطح و دقت در برآورد آن، در این مطالعه به بررسی دقت در برآورد گسیل‌مندی برای دو سنجنده MODIS و ASTER پرداخته شده است. برای اعتبارسنجی و بررسی دقت این دو سنجنده از مقادیر گسیل‌مندی اندازه‌گیری شده زمینی و آزمایشگاهی در ۶ منطقه آمریکای شمالی مستخرج از نتایج دیگر محققان استفاده گردیده است. در این تحقیق، گسیل‌مندی سنجنده ASTER از روش TES و محصولات گسیل‌مندی MODIS از دو نسخه ۰۴۱ و ۰۰۵ استخراج گردید. سپس اختلاف مقادیر به دست آمده با مقادیر زمینی محاسبه و آنگاه دقت نتایج به دست آمده از دوسنجنده در دو باند ۸/۵ و ۱۱ میکرون برای تصاویر همزمان این دو سنجنده مقایسه شد. نتایج به دست آمده از تصاویر همزمان این دوسنجنده نشان می‌دهد که سنجنده ASTER در محدوده ۸/۵ میکرون و در تمامی مناطق مورد مطالعه به طور متوسط از دقت بالاتری به میزان ۴/۶٪ نسبت به MODIS برخوردار است. همچنین در محدوده ۱۱ میکرون، ASTER بطور متوسط در تمامی مناطق از دقتی در حدود ۰/۷٪ برخوردار بوده ولی سنجنده MODIS خطایی بالغ بر ۱/۲٪ را دارد. میزان خطا در سنجنده MODIS برای پوشش‌هایی که گسیل‌مندی واقعی آنها نسبتاً پایین باشد بیشتر نیز می‌گردد. در مجموع سنجنده ASTER نسبت به سنجنده MODIS نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد. توصیه می‌شود که از این یافته در زمان استفاده از گسیل‌مندی در مدل‌های هواشناسی و در دیگر کاربردهایی که نیازمند گسیل‌مندی دقیق است بهره‌برداری شود.

کلیدواژه‌ها: گسیل‌مندی، MODIS، ASTER، اندازه‌گیری زمینی، NAALSSED.

mehdi_bahramia00@yahoo.com

mobasheri@kntu.ac.ir

rahimzadegan@kntu.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (نویسنده مسؤل)

۳- استادیار منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مقدمه

سنجش از دور حرارتی شاخه‌ای از سنجش از دور است که در آن تابش‌های ساطع شده از سطح هدف، اندازه‌گیری می‌شود (علوی‌پناه، ۱۳۸۵: ۲۴۹). در طبیعت اغلب اجسام توان تابشی کمتری نسبت به جسم خود سیاه‌هم‌دمای دارند، در واقع توان تابشی یا همان گسیل‌مندی کمتری وابسته به خصوصیات ذاتی و درونی، آرایش اتمی و ساختار مولکولی مواد است و با نسبت تابش حرارتی یک جسم در دمای معلوم به تابش جسم سیاه هم‌دما با آن در یک طول موج معین تعریف می‌شود (مباشری، ۱۳۸۹: ۵۱؛ Jensen, 2000: 255). با داشتن مقادیر دقیق گسیل‌مندی، می‌توان دمای سطح را که در بسیاری از مطالعات زیست‌محیطی از جمله تعیین تنش و تعرق گیاه، تعیین ظرفیت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی مواد معدنی (Vaughan et al, 2005: 140-158)، مطالعه‌ی کیفیت هوا و دمای سطح دریاها و حتی در پیش‌بینی زلزله (علوی‌پناه، ۱۳۸۵: ۲۶۴) کاربرد دارد، بطور دقیق مشخص نمود. محصولات گسیل‌مندی و دمای سطح پارامترهای کلیدی مورد استفاده برای مطالعه دینامیک سطح، مدل‌های هواشناسی (Jin & Liang, 2006: 2867-288; Zhou et al, 2003: 4795) و تعامل سطح و جو می‌باشد. سال‌هاست که گسیل‌مندی و دمای سطح (LST & E) توسط سنجنده‌هایی از جمله AIRS^۱، MODIS (Susskind et al, 2003: 390-409) و ASTER^۲ (Wan, 2008: 59-74) و (Hulley et al, 2009: 1313-1318) برآورد می‌شود. البته محصولات این سنجنده‌ها اغلب دارای تفاوت‌هایی هستند که ناشی از تفاوت در قدرت تفکیک مکانی، طیفی و زمانی این سنجنده‌ها و همچنین الگوریتم‌های مورد استفاده هر یک می‌باشد. با توجه به اهمیت میزان دقت در گسیل‌مندی، اعتبارسنجی محصولات

گسیل‌مندی این سنجنده‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. جاکوب و همکارانش در سال ۲۰۰۴ مقایسه‌ای بین گسیل‌مندی به دست آمده از تصاویر MODIS و ASTER در باندهای مشترک ۸/۵ و ۱۱ میکرون این دو سنجنده با مطالعه بر روی بیابان‌های Chihuahuan در آمریکا و Savannah در آفریقا انجام دادند. در این رابطه برای محاسبه‌ی گسیل‌مندی ASTER از الگوریتم TES^۳ و برای MODIS از الگوریتم TISIE^۴ استفاده کردند. اختلاف مشاهده شده بین مقادیر گسیل‌مندی این دو سنجنده، در محدوده‌ی ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱۵ گزارش شده است.

اشموگ و اوگاوا در سال ۲۰۰۵ با اعمال الگوریتم TES بر روی تصاویر اخذ شده سنجنده ASTER از منطقه علفزار Jornada و منطقه White Sands با پوشش گچ، واقع در New Mexico آمریکا به اختلاف ۰/۰۲ بین مقادیر به دست آمده و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط رادیومتر CIMEL312 برای ۵ باند حرارتی رسیدند.

هالی و هوک در سال ۲۰۰۹ مقایسه‌ای بین نسخه‌های متفاوت ارائه شده از محصولات گسیل‌مندی سنجنده MODIS (MOD11B1) در دوره‌ی زمانی (Jul-Sep2004) با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی شن‌های بیابان Namib در کشور Namibia واقع در جنوب قاره آفریقا انجام دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که میانگین اختلاف‌های گسیل‌مندی MODIS و مقادیر آزمایشگاهی در باندهای ۲۹، ۳۱ و ۳۲ MODIS برای نسخه‌های ۴، ۴/۱ و ۵ به ترتیب برابر با ۱/۰۶، ۰/۶۵ و ۱/۹۳ درصد در طول دوره‌ی زمانی بوده و بیشینه اختلاف گزارش شده، در باند ۲۹ MODIS است که برای هر سه نسخه به ترتیب برابر با ۴/۱، ۲/۹۶ و ۸/۶۴ درصد برآورد گردیده است.

- 1-Land Surface Temperature and Emissivity
- 2-Atmospheric Infrared Sounder
- 3-Moderate-Resolution Imaging Spectrometer
- 4-Advanced Spaceborne Thermal Emission&Reflection Radiometer

- 5-Temperature Emissivity Separation
- 6-Temperature -Independent Spectral Indices of Emissivity

اعتبارسنجی و بررسی دقت این دو سنجنده از مقادیر گسیل‌مندی اندازه‌گیری شده زمینی و آزمایشگاهی استفاده گردیده است. این مطالعه نشان خواهد داد که محصولات گسیل‌مندی MODIS که بطور رایگان در اختیار عموم قرار دارد، تا چه حد می‌تواند قابل اعتماد باشد.

مناطق مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

برای انجام این تحقیق نیاز به مقادیر زمینی و آزمایشگاهی گسیل‌مندی بود. در این رابطه مناطقی مورد مطالعه قرار گرفت که در آن اندازه‌گیری‌های زمینی انجام شده و اطلاعات مربوط به آن قابل دسترس باشد. برای این منظور منطقه‌ی مورد مطالعه در امریکای شمالی انتخاب شد. هالی و هوک در سال ۲۰۰۹ کلیه تصاویر قابل استفاده سنجنده ASTER در امریکای شمالی را در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ جمع‌آوری کرده و متوسط گسیل‌مندی به دست آمده در طول این سال‌ها را برای هر ۵ باند حرارتی ASTER به همراه متوسط دمای سطح در گریدهای ۱۰۰ متری در سرتاسر امریکای شمالی به دست آوردند و در نهایت یک پایگاه داده از گسیل‌مندی سنجنده ASTER در سراسر امریکای شمالی (NAALSED)^۲ ایجاد کردند. هوک و هالی برای ارزیابی دقت داده‌های این پایگاه و مقایسه آنها با مقادیر زمینی، چندین منطقه‌ی مناسب را برای ارزیابی دقت کار خود مورد بررسی قرار دادند بطوری که در محیط آزمایشگاهی از نمونه‌های برداشت شده از این مناطق بیابانی تغییرناپذیر^۳ با پوشش شنی، گسیل‌مندی را در طول موج‌هایی در محدوده ۲/۵ تا ۱۵ میکرون محاسبه کردند. اندازه‌گیری‌های زمینی در اواخر بهار و اوایل تابستان سال ۲۰۰۸ در چندین مرحله نمونه‌برداری در محدوده‌ی یک کیلومتر مربع برای هر منطقه انجام شد.

سابل و همکاران در سال ۲۰۰۹ گسیل‌مندی سنجنده ASTER را در مناطقی از جمله، دریاچه Tahoe و دریای Salton در California، دره Railroad در Nevada و جزیره Hawaii با مقادیر آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. برای این کار با اعمال الگوریتم TES بر روی تصاویر جمع‌آوری شده در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ از سنجنده ASTER به دقت‌هایی در محدوده ± 0.15 در مناطق مورد مطالعه رسیدند. هالی و هوک در سال ۲۰۰۹، از مجموعه تصاویر سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ با اعمال الگوریتم TES یک پایگاه داده از گسیل‌مندی سنجنده ASTER در امریکای شمالی به دست آوردند و نتایج خود را با اندازه‌گیری‌های زمینی و آزمایشگاهی در ۹ منطقه از امریکا ارزیابی کردند. نتیجه به دست آمده نشان داد که میانگین اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر ASTER برای ۹ منطقه در ۵ باند حرارتی ASTER حدود 0.16 (۱/۶٪) است که این اختلاف می‌تواند خطایی به اندازه ۱ درجه کلوین در برآورد دمای سطح (در محدوده‌ی ۳۰۰ درجه کلوین) ایجاد کند.

بارتو و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی دقت سنجنده ASTER در ۵ باند حرارتی با اندازه‌گیری میدانی و به کارگیری پروفایل‌های محلی برای اصلاح جو، در منطقه هموار و بدون پوشش گیاهی Volcanic واقع در جزیره Tenerife با پوشش مواد مذاب آتشفشانی شامل Silicon Dioxide (SiO₂) در کشور اسپانیا پرداختند. نتایج حاصله از اعمال الگوریتم TES بر روی تصاویر اخذ شده از منطقه در سال ۲۰۰۸ حاکی از RMSD^۱ برابر با ۰/۰۰۲ برای باندهای ۱۳ و ۱۴ و ۰/۰۱۵ برای باندهای ۱۱ و ۱۰ بود. با توجه به موارد و کاربردهای بیان شده در مورد گسیل‌مندی سطح و دقت در برآورد آن، در این مطالعه به بررسی دقت در برآورد گسیل‌مندی برای دو سنجنده MODIS و ASTER بطور همزمان پرداخته شده است و برای

2-North American ASTER Land Surface Emissivity Database
3-Invariant

1-Root-Mean-Square Difference

این ۶ منطقه با نام‌های White Sands، Great Sands، Kelso و Algodones، Little Sahara، Stovepipe wells که برای این تحقیق جهت مطالعه در نظر گرفته شده نشان داده شده است (Hook & Hulley, 2009: 1313-1338).

برای انجام تحقیق حاضر، طبق مکاتباتی که با این پژوهشگران صورت گرفت، اطلاعات گسیل‌مندی زمینی و آزمایشگاهی مربوط به ۶ منطقه بیابانی از آدرس <ftp://pyramidlake.jpl.nasa.gov> دریافت گردید. در جدول ۱ برخی از خصوصیات و ویژگی‌های سطحی

جدول ۱: خصوصیات اصلی هر منطقه‌ی مورد مطالعه شامل موقعیت، مساحت، ارتفاع، شیب، اندازه ذرات، نوع مواد تشکیل‌دهنده و متوسط شاخص NDVI^۱ هر منطقه

نام منطقه و موقعیت آن	مساحت منطقه (کیلومتر مربع)	ارتفاع از سطح دریا	ماکزیمم اختلاف ارتفاع موجود در منطقه	ماکزیمم شیب موجود در منطقه	اندازه نسبی ذرات تشکیل‌دهنده منطقه	ماده اصلی پوشش منطقه	متوسط شاخص NDVI در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۰
White Sands (32.89° N, 106.33° W)	704	1216	10	4%	Fine sands	gypsum	0.1
Great Sands (37.77° N, 105.54° W)	104	2560	230	29%	Medium to coarse sand	quartz, potassium, feldspar	0.11
Kelso (34.91° N 115.73° W)	115	800	195	17%	Medium sand	quartz, potassium, feldspar	0.09
Stovepipe Wells (36.62° N, 117.11° W)	7.7	-12	40	24%	Medium sand	quartz, plagioclase feldspar, potassium feldspar	0.05
Algodones (32.95° N, 115.07° W)	720	94	80	20%	Medium to coarse sand	quartz	0.09
Little Sahara/Lynndyl (39.7° N 112.39° W)	575	1560	200	28%	Fine sand	quartz, plagioclase feldspar, pyroxene	0.09

مآخذ: Hook & Hulley, 2009

این ۶ منطقه استفاده شده است. مقادیر گسیل‌مندی سنجنده ASTER و MODIS (Terra) از تصاویری مربوط به سنجنده ASTER و همزمان با آن تصاویر MODIS و محصولات گسیل‌مندی آن استخراج می‌شود که این تصاویر برای ۶ روز متفاوت از آدرس <https://lpdaac.usgs.gov/> برای مناطق مورد نظر جمع‌آوری گردید. برای انتخاب تصاویر، می‌بایست از شرایط جوی حاکم بر روزهای انتخاب تصویر اطلاعات

انتخاب مناطقی با تغییرات اندک گسیل‌مندی در طول دوره‌ی زمانی مورد نظر و همچنین خالص بودن منطقه مورد مطالعه از لحاظ نوع پوشش، اهمیت خاصی در ارزیابی و اعتبارسنجی سنجنده‌های مورد مطالعه دارد. با توجه به پایین بودن شاخص NDVI در مناطق ۶گانه جدول ۱، ملاحظه می‌شود که مناطق انتخاب شده با پوشش شنی، مناطق مناسبی برای ارزیابی دقت می‌باشند. برای ارزیابی و اعتبارسنجی دو سنجنده مورد نظر از مقادیر اندازه‌گیری زمینی گسیل‌مندی در

1- Normalized Difference Vegetation Index

سطح، سرعت باد، رادیانس خورشید و میزان بارندگی می‌باشد. جدول ۲ تاریخ تصاویر و ایستگاه‌های هواشناسی هر منطقه را مشخص می‌کند.

دقیق داشت. برای این منظور برای هر منطقه از اطلاعات مربوط به نزدیکترین ایستگاه هواشناسی از آدرس <http://www.ncdc.noaa.gov/crn> استفاده شد که این اطلاعات شامل روند تغییرات دمای هوا، دمای

جدول ۲: تاریخ وساعت اخذ تصاویر و ایستگاه‌های هواشناسی و موقعیت آنها

موقعیت ایستگاه هواشناسی	ایستگاه هواشناسی	تاریخ محصولات گسیل‌مندی MODIS	درصد حضور ابر در تصویر ASTER	تاریخ تصویر ASTER	منطقه‌ی مورد مطالعه
(32.614° - 106.74°)	NM Las Cruces 20 N	2008/05/24 17:55 GMT	0	2008/05/24 17:51:03 GMT	White Sands
(37.864° - 103.82°)	CO La Junta 17 WSW	2008/09/04 17:55 GMT	0	2008/09/04 17:55:47 GMT	Great Sands
(33.439° - 117.19°) (34.414° - 119.88°)	CA Fallbrook 5 NE & CA Santa Barbara 11 W	2008/09/14 18:30 GMT	0	2008/09/14 18:33:45 GMT	Kelso
(36.602° - 117.14°)	CA Stovepipe Wells 1 SW	2008/04/30 18:35 GMT	0	2008/04/30 18:39:17 GMT	Stovepipe Wells
(33.439° - 117.19°)	CA Fallbrook 5 NE	2008/09/23 18:25 GMT	0	2008/09/23 18:28:08 GMT	Algodones
(39.011° - 114.209°)	NVBaker5W	2008/08/22 18:25 GMT	0	2008/08/22 18:26:14 GMT	Little Sahara/Lyndyl

مأخذ: Hook, Halll, 2009

ارزیابی دقت و مقایسه‌ی تصاویر همزمان دو سنجنده در این مناطق می‌باشد.

روش تحقیق

مراحل انجام این تحقیق شامل، تهیه داده‌های مورد نیاز، آماده‌سازی تصاویر سنجنده MODIS و ASTER، محاسبه‌ی گسیل‌مندی سنجنده ASTER و MODIS در باندهای حرارتی و مقایسه با مقادیر زمینی بوده است. سپس به مقایسه‌ی دقت گسیل‌مندی ASTER و MODIS در باندهای مشترک و تجزیه و تحلیل نتایج پرداخته شده است.

- استخراج گسیل‌مندی از تصاویر سنجنده ASTER - سنجنده ASTER که در دسامبر سال ۱۹۹۹ بر روی ماهواره Terra به فضا پرتاب، دارای ۵ باند حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر است. مشاهدات مربوط

در انتخاب این تصاویر سعی بر این بوده است که تا حد ممکن تصاویری انتخاب گردد که اولاً درصد حضور ابر در تصویر ASTER صفر باشد ثانیاً جوی پایدار داشته باشیم و ثالثاً تا حد ممکن بارندگی در حداقل یک هفته قبل از گذر ماهواره رخ نداده باشد. که بدین منظور در هنگام انتخاب تصاویر از <http://glovis.usgs.gov> تصاویر با درصد پوشش ابر صفر انتخاب گردید. برای اطمینان از وجود جو پایدار و عدم بارندگی در منطقه قبل از گذر ماهواره، از اطلاعات ایستگاه‌های ذکر شده استفاده گردید. به طور کلی در این تحقیق مقادیر زمینی را از طریق مکاتبه با محققان امریکایی به دست آورده و سپس تصاویر دو سنجنده از هر منطقه جمع‌آوری گردید. در واقع تفاوت این تحقیق با تحقیقات صورت گرفته توسط آقایان هوک و هالی اضافه نمودن سنجنده MODIS برای

$$L_{g,j} = LS_j - L_{j\text{atm}} \uparrow \tau_j \quad \text{رابطه ۳:}$$

تابش‌هایی که توسط سنجنده دریافت می‌شوند باید نسبت به تأثیرات جوی تصحیح شوند تا تابش گسیل یافته واقعی سطح (L_j) به دست آید.

$$L_j = L_{g,j} - \varepsilon_j L_{j\text{sky}} \downarrow \quad \text{رابطه ۴:}$$

روش TES وابسته به تابش واقعی زمین است که در آنجا T و ε با یکدیگر ترکیب شده‌اند بنابراین برای سنجنده ASTER با ۵ باند حرارتی ۶ مجهول وجود خواهد داشت، که شامل ۵ گسیل‌مندی و یک دمای سطح است. الگوریتم TES از مدل NEM استفاده می‌کند که در آن ابتدا یک مقدار اولیه گسیل‌مندی (ε_{max}) برابر با ۰/۹۸۵ به منظور محاسبه دما در معادله معکوس پلانک قرار داده می‌شود. بیشینه دمای محاسبه شده از معادله معکوس پلانک که از تابش ۵ کانال حرارتی ASTER به دست آمد، به عنوان دمای مورد استفاده در مدل NEM در نظر گرفته می‌شود. برآورد اولیه از T و ε_j در مدل Ratio مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مرحله گسیل‌مندی نسبی از نسبت گسیل‌مندی‌های NEM به مقدار متوسط آنها محاسبه می‌شوند. طیف گسیل‌مندی نسبی، شکل گسیل‌مندی واقعی را حفظ کرده ولی دامنه‌ی آن را تغییر می‌دهد. برای بازیابی و بهبود دامنه و تبدیل آن به مقیاس گسیل‌مندی واقعی، مدل اختلاف بیشینه کمینه^۲ (MMD) به کار برده می‌شود و در نهایت گسیل‌مندی در ۵ باند حرارتی به همراه دمای سطح به دست می‌آید.

در این تحقیق الگوریتم TES را بر روی تصاویر دانلود شده اعمال کرده و گسیل‌مندی در ۵ باند حرارتی به همراه دمای سطح محاسبه گردید. با توجه به اینکه موقعیت جغرافیایی نمونه‌های برداشت شده

به گسیل‌مندی سطح در ۵ باند حرارتی ۱۰ تا ۱۴ با مراکز باندهایی به ترتیب ۸/۳، ۸/۶، ۹/۱، ۱۰/۶ و ۱۱/۳ میکرون انجام می‌شود. تصاویر اخذ شده برای سنجنده ASTER در این تحقیق به صورت Level-1B می‌باشد. برای این سطح از تصویر تصحیح رادیومتریکی و هندسی صورت گرفته است. قبل از محاسبه گسیل‌مندی و دما برای تصویر ASTER نیاز به تصحیح جوی باندهای حرارتی است که در این تحقیق برای انجام تصحیح جوی در این باندها از تصحیح جوی باندهای حرارتی مبتنی بر روش تصحیح نسبی استفاده گردید.

– اعمال الگوریتم TES^۱

الگوریتم TES توسط گلیسپی و همکارانش در (۱۹۹۸) طراحی شده است. بر اساس این الگوریتم، تابشی که سنجنده در باند حرارتی j دریافت می‌کند از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

رابطه ۱:

$$LS_j = \varepsilon_j L_{j\text{BBT}} + 1 - \varepsilon_j L_{j\text{sky}} \downarrow \tau_j + L_{j\text{atm}} \uparrow$$

در اینجا ε_j گسیل‌مندی سطح در طول موج j و $L_{j\text{BBT}}(T)$ چگالی شار تابش طیفی راستایی جسم سیاه در دمای سطح T و $L_{j\text{sky}} \downarrow$ تابش جوی رو به پایین، τ_j قابلیت عبور جوی، $L_{j\text{atm}} \uparrow$ رادیانس مسیر یا تابش جوی مسیر که در جهت سنجنده گسیل می‌شود و LS_j تابش طیفی دریافت شده توسط سنجنده است. جمله داخل براکت در معادله فوق بیان‌کننده‌ی میزان تابش در سطح زمین یا تابش خروجی زمین است.

رابطه ۲:

$$L_{g,j} = \varepsilon_j L_{j\text{BBT}} + 1 - \varepsilon_j L_{j\text{sky}} \downarrow$$

در صورتی که پارامترهای جوی τ_j و $L_{j\text{atm}} \uparrow$ معلوم باشند عبارت فوق را می‌توان از تابش دریافت شده توسط سنجنده محاسبه کرد.

این تغییرها شامل بهبود در دقت محصولات ورودی (MOD02, MOD03, MOD07, MOD10 and MOD35) برای محاسبه‌ی گسیل‌مندی و همچنین الگوریتم محاسبه گسیل‌مندی می‌باشد که هدف آن بهبود در پوشش مکانی و پایداری در محصولات گسیل‌مندی و دمای سطح است. نسخه ۰۴۱ یک نسخه میانی می‌باشد که تفاوت آن با نسخه ۰۰۵ در میزان بهبود الگوریتم محاسبه گسیل‌مندی می‌باشد. MODIS محصولات گسیل‌مندی را از سال ۲۰۰۷ به بعد تنها در دو نسخه ۰۴۱ و ۰۰۵ ارائه می‌دهد MOD11-L2 شامل گسیل‌مندی باند ۳۱ و ۳۲ و دمای سطح در پیکسل‌های ۱ کیلومتری برای هر دو نسخه می‌باشد در حالی که MOD11-B1 شامل گسیل‌مندی باندهای ۳۱، ۲۹، ۲۲، ۲۰ و ۳۲ در پیکسل‌های ۶ و ۵ کیلومتری به ترتیب در نسخه‌های ۰۰۵ و ۰۴۱ است. الگوریتم برآورد گسیل‌مندی و دمای سطح برای MOD11-L2, MOD11-B1 به ترتیب مبتنی بر روش جفت روز و شب^۱ و روش پنجره مجزا^۲ (SW) می‌باشد. در ادامه در مناطق مورد مطالعه، پیکسلی که نزدیکترین موقعیت به مناطق مورد مطالعه دارد تعیین شد و گسیل‌مندی در باندهای متفاوت و قدرت تفکیک مکانی متفاوت در دو نسخه استخراج می‌گردد. نتایج به دست آمده در بخش بعد با واقعیت زمینی مقایسه خواهد گردید.

تجزیه و تحلیل نتایج

- بررسی دقت گسیل‌مندی مستخرج از ASTER در شکل ۱ مقایسه گسیل‌مندی به دست آمده از تصاویر اخذ شده در ۵ باند حرارتی توسط اعمال الگوریتم TES بر روی تصاویر ASTER با مقادیر زمینی مطابق با ۵ باند حرارتی، برای ۶ منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است.

محدوده‌ی حدود ۱ کیلومتری (۱۱×۱۱) پیکسل (ASTER) را شامل می‌گردد، برای به دست آوردن گسیل‌مندی این نمونه‌ها از تصاویر ASTER، پیکسل‌هایی که موقعیت داده شده را پوشش می‌دهد، انتخاب گردید و گسیل‌مندی متوسط برای این پیکسل‌ها در هر باند محاسبه شد. برای رسیدن به دقت بهتر از بین پیکسل‌ها، پیکسلی انتخاب گردید که در فضای اقلیدسی مطابق با رابطه ۵ مقادیر گسیل‌مندی آن نزدیک به مقادیر زمینی باشد.

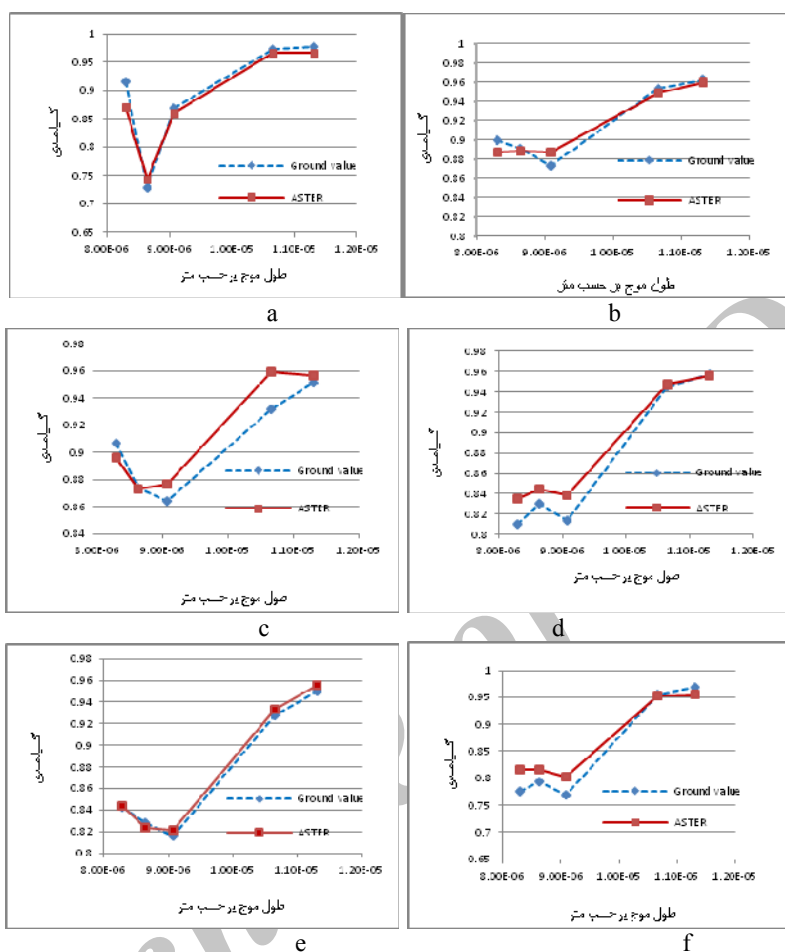
رابطه ۵:

$$RMSD_n = j=15(\epsilon_{jg} - \epsilon_{jn})25$$

که در این رابطه j برابر شماره باندهای سنجنده ASTER و ϵ_{jg} مقدار گسیل‌مندی زمینی در باند j است. $N=1,2,\dots,400$ شماره پیکسل و ϵ_{jn} گسیل‌مندی پیکسل n ام در باند j ام است. $RMSD_n$ نشان‌دهنده‌ی فاصله گسیل‌مندی پیکسل n ام با مقدار زمینی در فضای اقلیدسی می‌باشد. پیکسل مورد نظر ما پیکسلی است که کمترین، $RMSD$ را داشته باشد. نتایج به دست آمده در ادامه ارائه خواهد شد.

- استخراج گسیل‌مندی از تصاویر سنجنده MODIS برای استخراج گسیل‌مندی در مناطق مورد نظر، محصولات گسیل‌مندی (MOD11-L2 MOD11-B1) این سنجنده به همراه محصولات دیگر مانند MOD35 و MOD03 مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً محصولات گسیل‌مندی این سنجنده در سه نسخه ۰۴۱، ۰۰۴ و ۰۰۵ ارائه می‌گردد که تفاوت این سه نسخه در نحوه‌ی برآورد گسیل‌مندی می‌باشد. هشت تغییر جدید برای تولید محصولات گسیل‌مندی و دمای سطح از نسخه ۰۰۴ به نسخه ۰۰۵ صورت گرفته است (Wan, 2008: 59-74).

1- Day and Night Pair
2- Split Window



شکل ۱: مقایسه گسیل‌مندی به دست آمده از تصویر ASTER و مقادیر زمینی در ۵ باند حرارتی برای ۶ منطقه‌ی مورد مطالعه
 a-White Sands b- Stovepipe c- Little Sahara d- Great Sands e-Kelso f- Algodones
 مأخذ: بهرامی، ۱۳۹۰

جدول ۳: اختلاف گسیل‌مندی ASTER و مقادیر زمینی

ASTER minus Ground Value(%)						
Region	band10	band11	band12	band13	band14	mean
White Sands	-۴/۷	۱/۶	-۰/۸	-۰/۵	-۱/۰	۱/۷
Great Sands	-۱/۱	-۰/۱	۱/۳	۲/۷	۰/۶	۱/۲
Stovepipe Wells	-۱/۳	-۰/۳	۱/۳	-۰/۵	-۰/۳	۰/۷
Kelso	۰/۱	-۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۴
Algodones	۱/۴	۲/۳	۳/۴	-۰/۱	-۱/۲	۲/۲
Little Sahara	۲/۵	۱/۵	۲/۵	۰/۳	-۰/۱	۱/۴

مأخذ: بهرامی، ۱۳۹۰

با مقادیر زمینی در ۵ باند حرارتی بین ۰/۴ تا ۲/۲ درصد مناطق مختلف می‌باشد.

- بررسی دقت گسیل‌مندی MODIS

در جدول ۴ اختلاف بین گسیل‌مندی MODIS و مقادیر زمینی در باندهای ۳۱ و ۲۹ (برای تصاویر همزمان با ASTER) آمده است.

در جدول ۳ مقدار اختلاف بین گسیل‌مندی مقادیر زمینی و گسیل‌مندی به دست آمده توسط سنجنده ASTER در ۵ باند حرارتی برای ۶ منطقه دیده می‌شود. نتایج به دست آمده در جدول ۳ نشان می‌دهد که سنجنده ASTER دارای دقت مناسبی در برآورد میزان گسیل‌مندی است. همانطور که ملاحظه می‌شود، میزان میانگین قدر مطلق اختلاف نتایج به دست آمده

جدول ۴: اختلاف گسیل‌مندی MODIS و مقادیر زمینی

MODIS minus Ground value (%)						
Region	band31:1k m:v005	band31:1k m:v041	band31:6k m:v005	band31:5k m:v041	band29:6k m:v005	band29:5k m:v041
White Sands	۰/۱	۰/۱	۰/۸	۱/۴	۲۲/۶	۸
Great Sands	۲/۲	۲/۲	۴	۴	۱۰/۶	۱۰/۴
Stovepipe Wells	۰/۶	۰/۶	۱/۲	-۱/۶	۳/۷	۲/۹
Kelso	۲/۷	۲/۷	۴/۱	۰/۵	۱۱	۴
Algodones	۰/۵	۰/۳	۰/۳	-۴/۱	۵/۱	۲/۹
Little Sahara	۱/۷	۱/۵	۳/۱	-۱/۱	۱۴/۸	۵/۸
mean	۱/۳	۱/۲۳	۲/۲۵	۲/۱۱	۱۱/۳	۵/۶۷

مأخذ: بهرامی، ۱۳۹۰

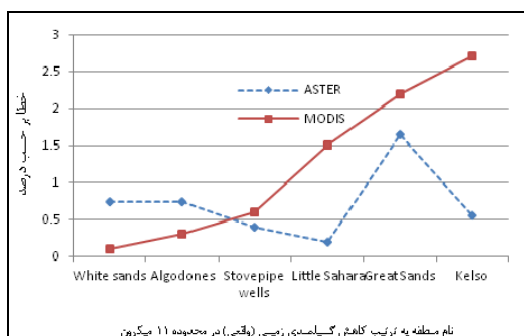
مقایسه گسیل‌مندی تصاویر همزمان MODIS و ASTER همانطور که در جدول ۲ نشان داده شد تصاویر اخذشده‌ی MODIS و ASTER با فاصله زمانی ۱ دقیقه اخذ شده‌اند، که این امر حاکی از یکسان بودن شرایط جوی برای هر دو سنجنده بوده و قابلیت مقایسه گسیل‌مندی این دو سنجنده در باندهای مشترک را فراهم می‌سازد. همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود باند ۲۹ MODIS مطابق با باند ۱۱ ASTER و باند ۳۱ MODIS دارای همپوشانی با باندهای ۱۳ و ۱۴ ASTER می‌باشد.

با دقت در جدول ۴ ملاحظه می‌شود که بطور کلی نتایج در نسخه ۰/۴۱ نسبت به نسخه ۰/۰۵ از دقت بالاتری برخوردار است. این برتری دقت در پیکسل‌های ۱ کیلومتری کمتر و در پیکسل‌های ۵ کیلومتری به خصوص در باند ۲۹ مشهودتر می‌باشد. بطور کلی ملاحظه می‌گردد که محصولات MODIS در باند ۳۱ و در قالب پیکسل‌های ۱ کیلومتری نسبت به پیکسل‌های ۵ و ۶ کیلومتری از دقت بالاتری برخوردار است که دلیل این امر افزایش احتمال وجود پیکسل‌های مختلط در اندازه‌های ۵ و ۶ کیلومتری و همچنین تفاوت در الگوریتم برآورد گسیل‌مندی می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه شفافیت جو در باند ۳۱ نسبت به باند ۲۹ بیشتر است به نظر می‌رسد که نتایج بهتر باند ۳۱ نسبت به باند ۲۹ قابل توجیه است.

برای مقایسه دیگر باندهای مشترک این دو سنجنده با توجه به اینکه باند ۳۱ MODIS (۱۱ میکرون) دارای همپوشانی با باندهای ۱۳ و ۱۴ ASTER می‌باشد، لازم است تا میانگین قدر مطلق اختلاف گسیل مندی رابطه ۶ محاسبه گردد و با اختلاف گسیل مندی MODIS با مقدار زمینی را در ۲ باند ۱۳ و ۱۴ مطابق با مقدار زمینی در باند ۳۱ مقایسه گردد.

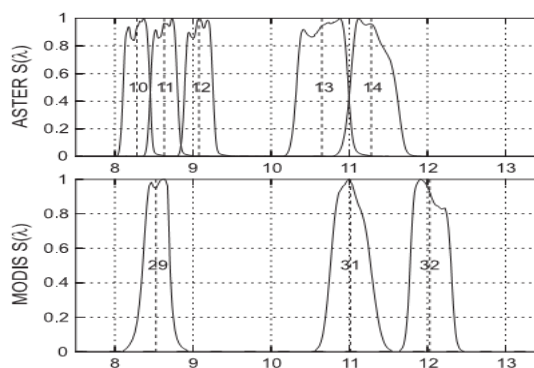
$$Sm = (S_{13} + S_{14}) / 2 \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن S_{13} و S_{14} به ترتیب اختلاف گسیل مندی ASTER با مقدار زمینی در باند ۱۳ و ۱۴ می‌باشد. در شکل ۴ مقایسه‌ای بین دقت (v041:1km) MODIS و ASTER در این محدوده (۱۱ میکرون) صورت می‌گیرد.



شکل ۴ میزان اختلاف گسیل مندی MODIS و ASTER با مقدار زمینی در محدوده‌ی مشترک ۱۱ میکرون
مأخذ: بهرامی، ۱۳۹۰

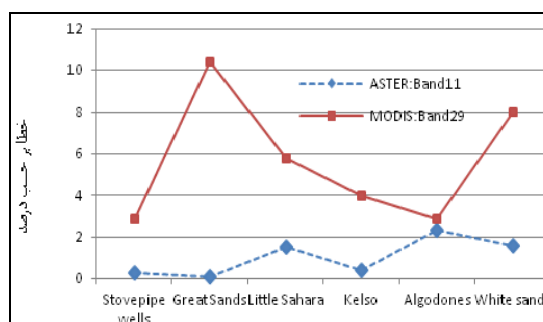
با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود در محدوده‌ی ۱۱ میکرون سنجنده ASTER دارای دقت مناسبی در کل مناطق می‌باشد. اما سنجنده MODIS دارای نوسان زیادی در دقت می‌باشد و میزان خطای MODIS با کاهش گسیل مندی واقعی (زمینی) به شدت افزایش می‌یابد. متوسط دقت به دست آمده در کل مناطق برای سنجنده ASTER و MODIS به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۱/۲ درصد به دست آمده است.



شکل ۲: باندهای حرارتی سنجنده MODIS و ASTER

مأخذ: Jacob, 2004

در شکل ۳ میزان اختلاف گسیل مندی برآورد شده توسط سنجنده MODIS در باند ۲۹ نسخه ۰۴۱ با مقدار زمینی و همچنین اختلاف گسیل مندی برآورد شده توسط سنجنده ASTER در باند ۱۱ با مقدار زمینی نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌گردد که در تمامی مناطق، نتایج باند ۱۱ سنجنده ASTER به مراتب نسبت به باند ۲۹ MODIS از دقت بالاتری برخوردار است بطوری که متوسط دقت برای کل مناطق در این محدوده برای سنجنده ASTER و MODIS به ترتیب برابر با ۱/۰۳ و ۵/۶۷ درصد می‌باشد. البته این نکته حائز اهمیت است که گسیل مندی MODIS در باند ۲۹، تنها در پیکسل‌های ۵ و ۶ کیلومتری ارائه می‌شود.



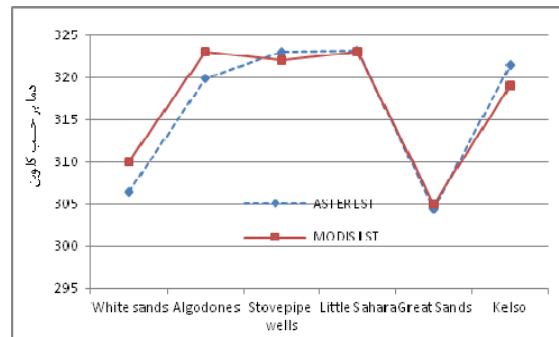
شکل ۳: میزان اختلاف گسیل مندی MODIS و ASTER با مقدار

زمینی در محدوده‌ی مشترک ۸/۵ میکرون

مأخذ: بهرامی، ۱۳۹۰

برتری ناشی از بالاتر بودن قدرت تفکیک مکانی ASTER نسبت به MODIS و همچنین نحوه‌ی برآورد گسیل‌مندی آن می‌باشد. در محدوده‌ی مشترک ۱۱ میکرون نیز برتری نسبی ASTER نسبت به MODIS دیده می‌شود. با توجه به اینکه کمترین و بیشترین گسیل‌مندی زمینی در محدوده ۱۱ میکرون با مقادیر ۰/۹۳۹ و ۰/۹۷۴ به ترتیب متعلق به مناطق Kelso و White Sands است، آنچه که از نتایج شکل‌های ۴ برمی‌آید اینست که سنجنده MODIS در مناطقی که گسیل‌مندی آن پایین است دقت پایینی دارد. بالا بودن دقت MODIS در منطقه White Sands علاوه بر بالا بودن گسیل‌مندی زمینی آن در محدوده‌ی ۱۱ میکرون می‌تواند ناشی از کم بودن تغییرات ارتفاعی این منطقه با توجه به جدول ۱ باشد. با توجه به بالا بودن محدوده‌ی مقادیر گسیل‌مندی در محصولات MODIS در باند ۳۱ (۱۱ میکرون) می‌توان ادعا کرد که در مناطقی با گسیل‌مندی واقعی کمتر از ۰/۹۳۹ خطای برآورد گسیل‌مندی توسط MODIS به مراتب بیشتر شود و نتایج غیر قابل اعتمادی ارائه دهد. با عنایت به کل نتایج به دست آمده می‌توان گفت که در مجموع نتایج ASTER نسبت به MODIS به واقعیت زمینی نزدیکتر است. با توجه به اینکه مناطقی که مورد مطالعه قرار گرفت، یکنواخت و خالص و بدون پوشش گیاهی هستند، می‌توان نتیجه گرفت که MODIS به علت داشتن پیکسل‌های بزرگتر نسبت به ASTER در مناطقی که از لحاظ پوششی یکنواخت نباشد احتمال وجود پیکسل مختلط در آن بیشتر بوده و در نتیجه دقت برآورد گسیل‌مندی آن کمتر از نتایج گزارش شده نیز گردد. با توجه به این مطالب می‌توان ادعا کرد که برای استفاده گسیل‌مندی در کاربردهای مختلف در تمامی دنیا از جمله در کشورمان می‌توان از

در شکل ۵ دمای به دست آمده از سطح توسط هر دو سنجنده ملاحظه می‌گردد. با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌گردد که بیشینه اختلاف بین دمای گزارش شده از دوسنجنده در حدود ۴ درجه و در منطقه White Sands می‌باشد.



شکل ۵: مقایسه دمای سطح محاسبه شده توسط ASTER و MODIS از تصاویر همزمان این دو سنجنده
مأخذ: بهرامی، ۱۳۹۰

نتیجه

با توجه به اهمیت دقت گسیل‌مندی برای استفاده در کاربردهای مختلف به عنوان یک پارامتر تعیین‌کننده، انتخاب و تعیین سنجنده مناسب با دقت بالا اهمیت خاصی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود که محصولات MODIS بطور کلی در نسخه ۰۴۱ عملکرد بهتری نسبت به نسخه ۰۰۵ آن دارد که این نتیجه مشابه با نتایج هالی و هاک در سال ۲۰۰۹ است. همچنین در بین محصولات نسخه ۰۴۱ نیز، محصولات ۱ کیلومتری آن به علت کمتر بودن احتمال پیکسل مختلط در آن نسبت به محصولات ۵ کیلومتری عملکرد بهتری دارد. از طرفی سنجنده ASTER با دقتی بین ۰/۴ تا ۲/۲ درصد در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی عملکرد مناسبی دارد. در مقایسه تصاویر گسیل‌مندی این دوسنجنده در محدوده‌ی مشترک ۸/۵ میکرون، برتری دقت ASTER نسبت به MODIS بطور وضوح دیده می‌شود، که این

- Jacob, F., Petitcolin, F., Schmugge, T., Vermoted, E. French, A., Ogawa, K (2004). Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors. *Remote Sensing of Environment*. 90.
- Gillespie, A., 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 Transaction on Geoscince & Remote Sencing*. 36.
- Sabol, Jr, D. E., Gillespie, A. R., Abbott, E., Yamada, G (2009). Field validation of the ASTER Temperature – Emissivity Separation algorithm. *Remote Sensing of Environment*. 113.
- Vaughan, R. G., Hook, S. J., Calvin, W. M., Taranik, J. V (2005). Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images, *Remote Sensing of Environment*. 99.
- Jensen, J. R (2000). *Remote Sensing of The Environment, An Resource Perspective*
- Susskind, J., Barnet, C. D & Blaisdell, J. M (2003). Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2).
- Jin, M. L & Liang, S. L (2006). An improved land surface emissivity parameter for land surface models using global remote sensing observations. *Journal of Climate*, 19 (12).
- Zhou, L., Dickinson, R. E., Tian, Y., Jin, M., Ogawa, K., Yu, H., et al (2003). A sensitivity study of climate and energy balance simulations with use of satellite-derived emissivity data over Northern Africa and the Arabian Peninsula. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108(D24).
- Wan, Z (2008). New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products, *Remote Sensing of Environment* 112.
- Barreto, A., Arbelo, M., Hernandez-Leal, P. A., Casillas, N. C (2010). Evaluation of Surface Temperature and Emissivity Derived from ASTER Data: A Case Study Using Ground-Based Measurements at a Volcanic Site, *American Meteorological Society, Vol 17*.
- Schmugge, T., Ogawa, K (2005). Validation of Emissivity Estimates from ASTER & MODIS Data, *IEEE Transaction on Geoscince and Remote Sencing*.

ASTER برای پهنه‌بندی گسیل‌مندی استفاده کرد چرا که هم دارای دقت بهتری در برآورد گسیل‌مندی است و هم قدرت تفکیک مکانی بالاتری نسبت به MODIS دارد.

تشکر و قدردانی

این نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از مؤسسه California Institute of Technology, Pasadena, (CA, USA) و همچنین آقای هالی و گلین و همکارانشان به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات مربوط به اندازه گیری های زمینی گسیل‌مندی که در متن ذکر شده است، تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

- علوی پناه، کاظم (۱۳۸۵). کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک)، انتشارات دانشگاه تهران. چاپ دوم.
- مباشری، محمدرضا (۱۳۸۹). مبانی فیزیک در سنجش از دور و فناوری ماهواره. انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. ویرایش دوم.
- بهرامی، مهدی (۱۳۹۰). ارزیابی دقت محصولات گسیل‌مندی سنجنده MODIS و ASTER با استفاده از داده‌های هواشناسی و اندازه‌گیری میدانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر مباشری. دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی.
- 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*. 07.
- Hulley, G. C., 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.
- Wan, Z., Li, Z. L (1997). A physics-based algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Transaction on Geoscince and Remote Sencing*. 35.