

ارزیابی مشاهدات دمای درخشندگی ماهواره مایکروویو SMOS در مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB

مژده جامعی^۱، محمد موسوی بایگی^{۲*}، امین علیزاده^۳ و پرویز ایران‌نژاد^۳

^۱دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲استاد هواشناسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳استاد، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳دانشیار، گروه فیزیک فضا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴)

چکیده

مأموریت اسموس (SMOS)، نخستین مأموریت ماهواره‌ای آژانس فضایی اروپا (ایسا) برای پایش جهانی رطوبت خاک، در سال ۲۰۰۹ آغاز شد. این ماهواره حامل اولین تابش‌سنج مایکروویو نوار-L است که دماهای درخشندگی چندزاویه‌ای با پوشش جهانی را در سطح زمین برآورد می‌کند. هدف پژوهش حاضر ارزیابی داده‌های دمای درخشندگی قطبش افقی (T_{B_H}) و قطبش قائم (T_{B_V}) محصولات قطبیده کامل چندزاویه‌ای ماهواره اسموس (MIR_SCLFIC) است. در این تحقیق داده‌های اسموس از طریق مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده در پنج ایستگاه هواشناسی در غرب و جنوب غرب کشور طی سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ ارزیابی شده است. شبیه‌سازی دماهای درخشندگی T_{B_H} و T_{B_V} با استفاده از مدل گسیل مایکروویو نوار-L از زیست‌کره (مدل L-MEB) در ایستگاه‌های مطالعاتی صورت گرفت که نتیجه آن دستیابی به پنج سری داده مرجع دمای درخشندگی برای ارزیابی مشاهدات اسموس بود. نتایج ارزیابی دماهای درخشندگی اسموس نشان داد که داده‌های اسموس در ایستگاه‌های اهواز، سرارود و سرابله دارای مقداری کم‌برآوردی و در ایستگاه‌های داراب و اکباتان مقداری بیش‌برآوردی هستند. تحلیل مقادیر RMSD مشخص کرد که داده‌های T_{B_H} اسموس در ایستگاه‌های اهواز، سرابله و داده‌های T_{B_V} اسموس در ایستگاه‌های اهواز، داراب و سرابله بیشترین دقت را دارند. همچنین کمترین مقادیر cRMSD داده‌های دمای درخشندگی T_{B_H} و T_{B_V} اسموس مربوط به ایستگاه‌های اهواز و داراب است. تحلیل ضرایب همبستگی بین مشاهدات اسموس و داده‌های شبیه‌سازی شده بیانگر همبستگی خوب ($R_{TB_H} = 0.8-0.9$ و $R_{TB_V} = 0.81-0.93$) بین داده‌ها در همه ایستگاه‌های مطالعاتی بود. در مجموع یافته‌های حاصل از این پژوهش اطلاعات با ارزشی در خصوص خطاها و عدم قطعیت‌های محصولات دمای درخشندگی اسموس در محدوده مطالعاتی ارائه داده که به‌عنوان یک تحقیق مرجع برای استفاده از محصولات رطوبت خاک اسموس در مطالعات هواشناسی و آب‌شناسی کاربرد دارند.

واژه‌های کلیدی: ماهواره اسموس، مایکروویو غیرفعال، دمای درخشندگی، نوار-L، مدل L-MEB

۱ مقدمه

رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین متغیرهای چرخه آب-شناختی است (کورنلسن و کولیالی، ۲۰۱۵) که در سال ۲۰۱۰ به‌عنوان یک متغیر ضروری اقلیمی شناخته شده است (سکرتاریات، ۲۰۰۹). رطوبت خاک نقش کلیدی در کاربری‌های علمی و عملی نظیر مدل‌سازی آب-شناختی، پیش‌بینی عددی وضع هوا (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۵)، پایش وقایع فرین مانند سیلاب و خشک‌سالی (مک‌نلی و همکاران، ۲۰۱۵؛ سچالی و همکاران، ۲۰۱۶)، مطالعات تغییر اقلیم (لروکس و همکاران، ۲۰۱۴) و مدیریت منابع آب (پان و همکاران، ۲۰۱۲) دارد.

در خصوص پایش جهانی رطوبت خاک، تابش‌سنجی میکروویو در بسامدهای پایین (نوار-L: ۱/۴ گیگاهرتز) فنی است که اخیراً برای برآورد جهانی رطوبت خاک سطحی با دقت مناسب توسعه‌یافته (کر و همکاران، ۲۰۰۱) و تابش‌سنجی نوار-L ثابت کرده که فناوری سنسجش از دور برای پایش رطوبت خاک در سطح زمین و در مقیاس جهانی بسیار امیدوارکننده است. از این‌رو بهبود برآورد داده‌های منطقه‌ای رطوبت خاک می‌تواند منجر به پیشرفت‌های قابل‌توجهی در پیش‌بینی‌های هواشناسی و آب‌شناسی شود. با توجه به دلایل مذکور، برخی از مأموریت‌های فضایی بر اساس تابش‌سنج‌های میکروویو نوار-L بر روی سکوه‌های ماهواره‌ای و با هدف برآورد کمی رطوبت خاک در مقیاس جهانی توسعه یافته‌اند (کر و همکاران، ۲۰۱۲). در این راستا مأموریت اسموس (SMOS) نخستین مأموریت ماهواره‌ای ایسا است که با هدف برآورد جهانی رطوبت خاک و شوری آب اقیانوس‌ها در سال ۲۰۰۹ با موفقیت آغاز شد و هم‌اکنون نیز در حال بهره‌برداری است.

ماهواره اسموس حامل اولین تابش‌سنج غیرفعال میکروویو نوار-L است که محصول دمای درخشندگی را در زوایای فرودی مختلف از سطح زمین ثبت می‌کند (کر

و همکاران، ۲۰۱۲؛ لروکس و همکاران، ۲۰۱۴). قابلیت اندازه‌گیری‌های چندزاویه‌ای اسموس در واقع یکی از ویژگی‌های متمایز این ماهواره است که این قابلیت امکان بازیابی پارامترهای دیگر به‌جز رطوبت خاک را ممکن ساخته است. درحالی‌که تابش‌سنج‌هایی مانند تابش‌سنج میکروویو AMSR، تابش‌سنج میکروویو چندکاناله SMMR و تابش‌سنج ماهواره SMAP در بهترین حالت یک اندازه‌گیری کامل قطبیده برای هر نقطه معین تولید می‌کنند (کر و همکاران، ۲۰۱۲). هدف اصلی اسموس ارائه نقشه‌های جهانی رطوبت خاک با دقت هدف $0.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ در نوار-L (بسامد ۱/۴ گیگاهرتز) است. در این ماهواره بازیابی داده رطوبت خاک از مشاهدات دمای درخشندگی اسموس بر این اساس است که دمای درخشندگی خاک بیشتر با محتوای رطوبتی خاک و از طریق ثابت دی‌الکتریک خاک تعیین می‌شود (الیاری و همکاران، ۲۰۱۷).

ثابت دی‌الکتریک یک عدد پیچیده است که بیانگر انتشار یک موج الکترومغناطیسی در یک ماده می‌باشد. وابستگی ثابت دی‌الکتریک خاک به افزایش مقدار آب به‌صورت کاهش بسامد میکروویو است. لذا در نوار-L، اختلاف بین ثابت دی‌الکتریک خاک خشک (۴-) و آب خالص (۸۰-) بسیار زیاد بوده و بنابراین، محتوای آب یک خاک می‌تواند از مشاهدات در این طول موج به دست آید (کر، ۲۰۰۷؛ میالون و همکاران، ۲۰۱۵).

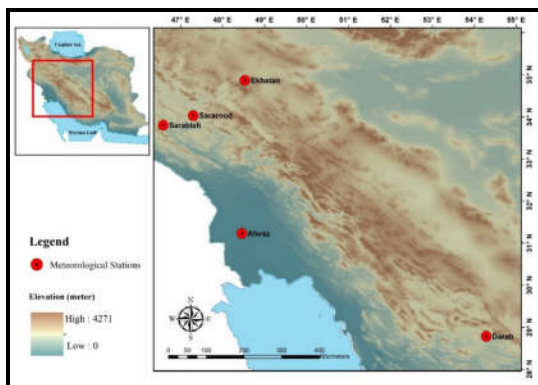
پردازش داده‌های دمای درخشندگی چندزاویه‌ای اسموس (محصولات LEVEL1) به داده‌های رطوبت خاک (محصولات LEVEL2 SM) با استفاده از یک الگوریتم بازیابی رطوبت خاک ماهواره اسموس صورت می‌پذیرد (کر و همکاران، ۲۰۱۲؛ لروکس و همکاران، ۲۰۱۴). الگوریتم بازیابی رطوبت خاک بر مبنای مقایسه مشاهدات دماهای درخشندگی چندزاویه‌ای نوار-L (با قطبش کامل در قاب آنتن) حاصل از تابش‌سنج اسموس،

بنابراین هدف پژوهش حاضر ارزیابی مشاهدات دماهای درخندگی از محصولات دمای درخندگی قطبیده کامل چندزاویه‌ای Level 1C اسموس (MIR_SCLF1C) در مقایسه با دماهای درخندگی شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB در غرب و جنوب غرب کشور می‌باشد.

۲ روش تحقیق

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش ارزیابی مشاهدات دمای درخندگی اسموس در پنج ایستگاه هواشناسی سازمان هواشناسی کشور که بیشتر در بخش‌هایی از غرب و جنوب غرب ایران قرار گرفته‌اند صورت پذیرفته است. این ایستگاه‌ها دارای آمار نسبتاً کامل در دوره آماری منتخب (سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) می‌باشند. موقعیت مکانی ایستگاه‌ها در شکل ۱ و مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی منتخب.

۲-۲ ماهواره اسموس

ماهواره اسموس در ۲ نوامبر ۲۰۰۹ توسط ایسا با هدف پایش جهانی رطوبت سطحی خاک پرتاب شد. این ماهواره حامل اولین تابش سنج غیرفعال تصویربرداری مایکروویو با روزنه ترکیبی (MIRAS) دو بعدی نواری L- است که دریافت کننده تابش‌های گسیل شده از سطح زمین

با داده‌های دمای درخندگی شبیه‌سازی شده با مدل انتقال تابش L-MEB است (کر، ۲۰۰۷؛ میالون و همکاران، ۲۰۱۵). لذا برای استفاده کاربردی از محصولات سطح دو رطوبت خاک اسموس (MIR_SMUDP2) نیاز است که ارزیابی مشاهدات دمای درخندگی اسموس از طریق مقایسه با داده‌های دمای درخندگی شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB صورت پذیرد.

مطالعات متعددی در خصوص ارزیابی محصولات رطوبت خاک اسموس انجام شده (الیاری و همکاران، ۲۰۱۴ (الف)؛ الیاری و همکاران، ۲۰۱۴ (ب)؛ الیبتار و همکاران، ۲۰۱۲؛ کولو و همکاران، ۲۰۱۲؛ دلایمیکو و همکاران، ۲۰۱۲ و ویگنرون و همکاران، ۲۰۱۲) و نتایج حاصل از این تحقیقات مشخص کرده است که اسموس در مقایسه با دیگر سنجنده‌های فعال و غیرفعال، قابلیت بالاتری در ارزیابی رطوبت خاک در مقیاس جهانی و محلی دارد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی (سازمان هواشناسی کشور).

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	تعداد روزهای مورد بررسی
اهواز	48.77	31.23	12	105
داراب	54.28	28.78	1098	50
اکباتان	48.53	34.87	1370	45
سرابله	46.58	33.80	1030	142
سرارود	47.30	34.03	1361. 7	101

نظر به اهمیت وجود داده‌های رطوبت خاک در مقیاس گسترده برای کاربرد در مدل‌های هواشناسی و آب‌شناسی در ایران و با توجه به قابلیت‌های بالای ماهواره اسموس در برآورد جهانی رطوبت خاک، نیاز است برای استفاده کاربردی از محصولات این ماهواره در کشور ابتدا مشاهدات دمای درخندگی آن مورد ارزیابی قرار گیرند.

در این پژوهش از محصولات سری خشکی Level 1C، محصول دمای درخشندگی چندزاویه‌ای قطبیده کامل (MIR_SCLFIC) مورد بررسی قرار گرفته است. این داده‌ها در نقاط شبکه ISEA-4H9 با تفکیک حدود ۱۵ کیلومتر ساماندهی شده‌اند. بلوک داده‌های دودویی محصول MIR_SCLFIC شامل دو مجموعه داده اندازه-گیری شده است. مجموعه اول شامل فهرستی از تصاویر لحظه‌ای و اطلاعات مربوط در نوار جاروب ماهواره می‌باشد. مجموعه دوم شامل فهرستی از داده‌های دمای درخشندگی و زوایای فرودی آنها در هر نقطه شبکه و همچنین اطلاعات ژئوفیزیکی مربوط به آنهاست که توسط تابش‌سنج ماهواره (MIRAS) دریافت می‌شوند (کر و همکاران، ۲۰۱۰؛ لدوک‌لبالور و همکاران، ۲۰۱۵).

۲-۴ مدل انتقال تابشی L-MEB برای شبیه‌سازی

دمای درخشندگی

مدل انتقال تابشی L-MEB به‌طور اختصاصی برای شبیه‌سازی گسیل میکروویو نوار-L در سطح زمین توسعه داده شده است. این مدل نتیجه مطالعات گسترده و جامع در زمینه روش‌های مختلف مدل‌سازی میکروویو غیرفعال می‌باشد که با هدف دقیق بودن و ساده بودن برای استفاده در مقیاس جهانی تهیه شده است (ویگنرون و همکاران، ۲۰۰۷).

مدل L-MEB در واقع مدلی مرجع برای شبیه‌سازی دماهای درخشندگی اسموس است (ویگنرون و همکاران، ۲۰۰۷؛ ویگنرون و همکاران، ۲۰۱۱) که بر اساس مدل انتقال تابشی ساده شده مرتبه صفر بوده و در مطالعات پیشین روش تاو-امگا نامیده می‌شد. معادله اصلی L-MEB به‌صورت رابطه (۱) تعریف شده است (ویگنرون و همکاران، ۲۰۰۷؛ گرت و همکاران، ۲۰۰۷):

$$T_B(\theta, P) = e_s T_s \gamma + (1 - \omega)(1 - \gamma) T_c + (1 - \omega)(1 - \gamma) T_c (1 - e_s) \gamma, \quad (1)$$

در بسامد ۱/۴ گیگاهرتز (نوار-L میکروویو، ۲۱ سانتی‌متر) است و با رطوبت خاک در چند سانتی‌متری سطح خاک (۵ سانتی‌متری) و با شوری سطحی اقیانوس‌ها مرتبط می‌باشد.

این تابش‌سنج Y-شکل با سه بازوی ۴/۵ متری، تصاویر دماهای درخشندگی چند زاویه‌ای (قطبیده دوگانه یا قطبیده کامل) را در زوایای فرودی بین صفر تا ۶۵ درجه از سطح زمین و با پوشش جهانی تولید می‌کند. این تصاویر خام با استفاده از الگوریتم‌های بازیابی رطوبت خاک اسموس، محصولات رطوبت سطحی خاک و نقشه‌های جهانی رطوبت سطح خاک را با دقت $3 \text{ m}^3 / 0.4 \text{ m}^3$ ، تفکیک مکانی به‌طور متوسط ۴۳ کیلومتر در میدان دید (۳۵ کیلومتر در مرکز میدان دید) و گام زمانی ۳ روز بازیابی می‌نمایند (کر و همکاران، ۲۰۱۲؛ کر و همکاران، ۲۰۱۰). ماهواره اسموس چندین سری محصولات مختلف دارد که در این مطالعه ارزیابی محصولات دمای درخشندگی SMOS Level 1C (MIR_SCLFIC) انجام می‌گردد.

۲-۳ خصوصیات محصولات دمای درخشندگی

SMOS Level 1C (MIR_SCLFIC)

اسموس دو سری محصول Level 1C دارد: محصولات خشکی‌ها برای بازیابی رطوبت خاک و محصولات دریا که برای بازیابی شوری سطحی دریاها استفاده می‌شوند. محصولات Level 1C شامل دماهای درخشندگی چندزاویه‌ای در بالای جو بوده و به دو صورت قطبیده کامل و قطبیده دوگانه موجود هستند (کر و همکاران، ۲۰۱۲). شبکه گسسته جهانی (DGG) محصولات زمین مرجع شده Level 1C، از سامانه شبکه مساحت‌های مساوی به نام ISEA 4H9 با سلول‌های شش‌وجهی شکل استفاده می‌کند که فاصله بین گره‌های آن حدود ۱۵ کیلومتر است (پینوری و همکاران، ۲۰۰۸).

روش‌های مدل‌سازی فیزیکی و نیمه‌تجربی، توسعه یافته است که جزئیات این روش‌ها در مقاله ویگنرون و همکاران (۲۰۱۷) ارائه شده‌اند. پارامترهای ورودی اصلی این مدل‌های ترکیبی دی‌الکتریک عبارتند از رطوبت خاک ($m^3 m^{-3}$)، دمای خاک مؤثر و اطلاعات مربوط به خصوصیات بافت خاک (درصد شن و رس خاک)، چگالی است (ویگنرون و همکاران، ۲۰۱۷). محاسبه دمای مؤثر خاک (T_G) برای شبیه‌سازی دمای درخشندگی از خاک (T_{GP} رابطه ۲)، با توجه به گرادیان‌های قائم دما و رطوبت است، رابطه (۴) یک روش ساده محاسبه دمای مؤثر خاک T_G می‌باشد:

$$T_G = T_{soil_depth} + C_t (T_{soil_surf} - T_{soil_depth}), \quad (4)$$

که T_{soil_depth} دمای عمق خاک (۵۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری)، T_{soil_surf} دمای سطح (صفر تا ۵ سانتی‌متری) و پارامتر C_t که به‌عنوان تابعی از نوار بسامد محاسبه شده است ($C_t = 0.246/L$ در نوار - L) (ویگنرون و همکاران، ۲۰۱۷).

در این مطالعه برای شبیه‌سازی دمای درخشندگی در ایستگاه‌های مطالعاتی از توابع متلب مدل L-MEB توسعه داده شده توسط ویگنرون و همکاران استفاده شد. توابع متلب L-MEB در واقع مدل کاربردی L-MEB است که با استفاده از آن می‌توان دماهای درخشندگی T_{Bv} و T_{Bh} را در زوایای فرودی صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه شبیه‌سازی کرد. به‌طور کلی سیگنال سنجنده‌های مایکروویو تحت تأثیر زاویه فرودی است، به‌طوری‌که با افزایش زاویه فرودی حساسیت سنجنده به رطوبت خاک کاهش می‌یابد. درحالی‌که در زوایای فرودی پایین‌تر، اثرات تضعیف‌کنندگی پوشش گیاهی و اثر زبری سطح به حداقل می‌رسد؛ بنابراین زوایای فرودی پایین‌تر برای سنجش رطوبت خاک مناسب هستند (اولبی و همکاران، ۱۹۸۶). از سوی دیگر هنگامی‌که زوایای فرودی متعددی

که T_B دمای درخشندگی وابسته به زاویه فرودی (θ) و قطبش (P) است و از حاصل جمع گسیل خاک (بخش اول)، گسیل کانوپی (بخش دوم) و گسیل کانوپی بازتاب شده توسط خاک و تضعیف شده توسط کانوپی (بخش سوم) به دست می‌آید. اندیس‌های 's' و 'c' به ترتیب بیانگر خاک و کانوپی هستند و T دمای ترمودینامیک، e گسیلندگی، ω سپیدایی پراکندگی از کانوپی و متغیر γ بیانگر تراکسیلندگی (نسبت انرژی تابشی عبور کرده از یک جسم به تابش فرودی بر آن) کانوپی است (گرن و همکاران، ۲۰۰۷).

اما در این پژوهش محدوده مطالعاتی دارای شرایط خاک لخت و پوشش گیاهی کم است، لذا معادلات مدل‌سازی دمای درخشندگی برای خاک لخت و پوشش گیاهی کم نیز در ادامه ارائه شده‌اند.

دمای درخشندگی خاک (T_{GP}) تابعی از گسیلندگی خاک (e_{GP}) و دمای مؤثر خاک (T_G) است که می‌تواند به‌صورت رابطه زیر نوشته شود (ویگنرون و همکاران، ۲۰۱۷).

$$T_{GP}(\theta) = e_{GP}(\theta) \cdot T_G, \quad (2)$$

که اندیس P بیانگر قطبش ($P=V$ ، قائم و $P=H$ ، افقی)، اندیس G بیانگر زمین و θ زاویه فرودی است. T_G دمای مؤثر خاک (به‌طور کلی فرض می‌شود که مستقل از قطبش باشد) است و گسیلندگی خاک است که می‌تواند از بازتابندگی خاک Γ_{GP} به‌صورت زیر محاسبه شود:

$$e_{GP}(\theta) = 1 - \Gamma_{GP}(\theta), \quad (3)$$

در شرایط سطوح هموار (بدون زبری سطح)، بازتابندگی خاک هموار Γ_{GP} می‌تواند از ضرایب فرسل به‌عنوان تابعی از ثابت دی‌الکتریک مؤثر خاک (ϵ_G) و زاویه فرودی (θ) محاسبه شود. مدل‌های متعددی برای محاسبه ϵ_G از رطوبت خاک حجمی، با استفاده از

های اندازه‌گیری شده در شبکه ایستگاه‌های خودکار و ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی سازمان هواشناسی کشور (طی دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۲) برای ورودی مدل L-MEB استفاده شده است.

- اندازه‌گیری‌های مستقیم رطوبت خاک در عمق ۵ سانتی‌متری ($m^3 m^{-3}$)
- دمای سطحی خاک (K)
- دمای خاک در عمق ۵ و ۵۰ سانتی‌متری (K)
- داده‌های بافت خاک شامل: درصد شن و رس خاک، وزن مخصوص ظاهری خاک (g/cm^3)
- بارش ۲۴ ساعته (mm)
- زوایای فرودی که از محصولات MIR_SCLF1C ماهواره اسموس استخراج می‌شوند.

به‌منظور هم‌مکان (کولوکیشن) کردن داده‌های دمای درخشندگی ماهواره با داده‌های شبیه‌سازی‌شده، اطلاعات مکانی و زمانی برداشت داده از ایستگاه‌های مطالعاتی به شرح زیر نیاز است:

- مشخصات مکانی برداشت داده‌ها (طول و عرض جغرافیایی محل)
- زمان برداشت داده‌ها (سال، ماه، روز و ساعت)
- پس از بررسی کمی و کیفی تمامی داده‌های ایستگاه‌های منتخب در سال‌های مطالعاتی، روزی که اندازه‌گیری رطوبت خاک در ایستگاه انجام شده و بارش در طول ۲۴ ساعت گذشته رخ داده بود آن مشاهدات از تحلیل‌ها حذف گردید. آنگاه برای هر ایستگاه یک فایل ورودی مدل شامل همه داده‌های فوق با فرمت واحد تهیه شد. مشخصات ایستگاه‌های منتخب و تعداد روزهای مورد بررسی هر ایستگاه در جدول ۱ آمده است.

۲-۵-۲ داده‌های دمای درخشندگی ماهواره‌ای

در این پژوهش مشاهدات دمای درخشندگی TB_v و TB_h اسموس، از محصولات MIR_SCLF1C نسخه ۵۰۵ در

وجود داشته باشد، معادلات انتقال تابشی در زوایای فرودی پایین‌تر محاسبات دمای درخشندگی را با دقت بالاتری انجام می‌دهند. لذا در این مطالعه برای افزایش دقت و بهبود شبیه‌سازی دمای درخشندگی، بر اساس اصل فوق تغییراتی در کدهای توابع متلب L-MEB اعمال شد تا مدل قادر به شبیه‌سازی دماهای درخشندگی در پایین‌ترین زاویه فرودی داده‌های اسموس باشد. برای این منظور مدل ارزیابی به‌نحوی تهیه شده که کم‌ترین زاویه فرودی را از محصولات MIR_SCLF1C استخراج کند و به‌عنوان ورودی برای شبیه‌سازی‌های دمای درخشندگی در توابع L-MEB استفاده نماید.

۲-۵ ارزیابی دماهای درخشندگی اسموس با

داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB

در تحقیق حاضر ارزیابی دماهای درخشندگی محصولات MIR_SCLF1C ماهواره اسموس از طریق مقایسه با دماهای درخشندگی شبیه‌سازی‌شده با مدل L-MEB در پنج ایستگاه هواشناسی سازمان هواشناسی کشور طی دوره ۲۰۱۳-۲۰۱۲ انجام شد. در ادامه مراحل مختلف فرآیند ارزیابی داده‌های دمای درخشندگی تشریح شده است.

۲-۵-۱ ورودی‌های مورد نیاز مدل L-MEB

به‌طورکلی مدل L-MEB برای شبیه‌سازی دماهای درخشندگی بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای ژئوفیزیکی (رطوبت خاک، دمای خاک، دمای سطح خاک)، پارامترهای استاتیکی (بافت خاک که از طریق کسر شن و رس توصیف می‌شود) و پارامترهای توصیف‌کننده انتقال تابشی استفاده می‌شود (مونترکا و همکاران، ۲۰۱۳). همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد در این تحقیق توابع متلب مدل L-MEB برای شبیه‌سازی دمای درخشندگی در ایستگاه‌های مطالعاتی استفاده می‌شوند که به داده‌های زیر به‌عنوان ورودی‌های مدل نیاز دارند. در این پژوهش داده-

مشاهدات سنجنده‌های مختلف با یکدیگر و مشاهدات سنجنده‌ها با داده‌های زمینی به کار برده می‌شود (هول، ۲۰۱۲). در این تحقیق کولوکیشن داده‌های MIR_SCLF1C با خروجی‌های مدل L-MEB از نظر زمانی و مکانی صورت پذیرفت.

۲-۵-۵ تبدیل داده‌های دمای درخشندگی اسموس از آنتن مرجع (XY) به زمین مرجع (HV)
تابش‌سنج اسموس (MIRAS) مشاهدات دمای درخشندگی MIR_SCLF1C را در بالای جو و در چارچوب آنتن مرجع برآورد می‌کند. درحالی‌که مدل L-MEB، دماهای درخشندگی را در بالای جو و در چارچوب زمین مرجع شبیه‌سازی می‌نماید. لذا برای ارزیابی داده‌های دمای درخشندگی MIR_SCLF1C نیاز است که داده‌های اسموس از سطح آنتن به سطح زمین تبدیل شوند. با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده توسط مرکز مطالعات فضایی زیست‌کره (CESBIO) و زوایای چرخش فارادی و چرخش هندسی، چرخش داده‌های دمای درخشندگی اسموس از آنتن مرجع (XY) به زمین مرجع (HV) صورت پذیرفت (بیرچر و همکاران، ۲۰۱۲؛ لدوک‌لبالور و همکاران، ۲۰۱۵). این الگوریتم به صورت یک تابع متلب در مدل ارزیابی داده‌های دمای درخشندگی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. خروجی‌های الگوریتم مذکور، داده‌های دمای درخشندگی TB_v و TB_h از محصول MIR_SCLF1C بودند که در نهایت با داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB مقایسه شدند.

۲-۶ معیارهای آماری ارزیابی

به منظور ارزیابی داده‌های دمای درخشندگی اسموس و داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل، از معیارهای آماری مختلف و نمودار تیلور استفاده شد. جهت بررسی نزدیکی

سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ بررسی شد. این داده‌ها در نقاط شبکه ISEA-4H9 با تفکیک حدود ۱۵ کیلومتر ساماندهی شده‌اند و هر نقطه‌ای از شبکه شامل چندین سری داده دمای درخشندگی چند زاویه‌ای قطبیده کامل (در بالای جو، در قاب آنتن مرجع)، زوایای فرودی آنها و پارامترهای ژئوفیزیکی مربوط است. برای ارزیابی مشاهدات دمای درخشندگی اسموس، داده‌هایی بررسی شدند که از نظر زمانی منطبق با روزهای دارای داده در ایستگاه‌های مطالعاتی (جدول ۱) باشند. تطبیق زمانی و مکانی داده ماهواره و داده مدل پس از باز کردن محصولات اسموس و استخراج اطلاعات از آنها صورت پذیرفت.

۲-۵-۳ خواندن محصولات MIR_SCLF1C و استخراج داده دمای درخشندگی

برای ارزیابی دماهای درخشندگی ماهواره اسموس نیاز است که داده‌های دمای درخشندگی، زوایای فرودی، چرخش هندسی، چرخش فارادی و پارامترهای دیگری نظیر مشخصات تصویر و گذر ماهواره (تاریخ و زمان شروع و خاتمه تصویربرداری، مختصات مکانی و...) از بلوک داده‌های دودویی محصولات MIR_SCLF1C استخراج شود. بدین منظور از کدهای متلب اسموس که توسط محققان ایسا تحت سیستم عامل لینوکس توسعه داده شده‌اند، برای خواندن محصولات اسموس و استخراج پارامترهای مورد نیاز استفاده شد.

۲-۵-۴ کولوکیشن (هم‌زمانی - هم‌مکانی کردن) داده‌های ماهواره با مدل L-MEB

یک روش معمول در تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی در سنجش‌ازدور، کولوکیشن (هم‌زمانی - هم‌مکانی کردن) بین مجموعه داده‌های مختلف است. کولوکیشن برای مشاهدات سنجنده‌های هوابرد با خروجی مدل‌ها،

اختلاف ریشه میانگین مربعات متمرکز شده (cRMSD) (بیرچر و همکاران، ۲۰۱۲) و میانگین خطای اریبی یا

$$cRMSD^2 = \sigma_{TB_{L-MEB}}^2 + \sigma_{TB_{SMOS}}^2 - 2 * \sigma_{TB_{L-MEB}} * \sigma_{TB_{SMOS}} * R, \quad (9)$$

$$\sigma_{TB_{SMOS}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (TB_{SMOS_i} - \overline{TB_{SMOS}})^2, \quad (10)$$

$$\sigma_{TB_{L-MEB}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (TB_{L-MEB_i} - \overline{TB_{L-MEB}})^2. \quad (11)$$

۳ نتایج و بحث

۳-۱ مدل ارزیابی دمای درخشندگی اسموس

فرآیند ارزیابی مشاهدات دماهای درخشندگی اسموس MIR_SCLFIC بر اساس الگوریتم تعریف شده تحقیق، مرحله به مرحله انجام شد. در این فرآیند مراحل خواندن محصولات MIR_SCLFIC، هم‌زمانی - هم‌مکانی کردن داده‌های ماهواره با داده‌های زمینی، استخراج دماهای درخشندگی از محصولات اسموس و تبدیل آنها از آنتن مرجع (XY) به زمین مرجع (HV)، و همچنین شبیه‌سازی دماهای درخشندگی با استفاده از توابع متلب مدل L-MEB، هر یک از این مراحل به صورت توابع متلب کد نویسی شده و در نهایت مدل یکپارچه‌ای برای ارزیابی و مقایسه داده‌های دمای درخشندگی ماهواره با داده شبیه‌سازی شده تحت سیستم عامل لینوکس برای انجام این تحقیق به دست آمد. مدل مذکور برای پنج ایستگاه منتخب اجرا و در نهایت خروجی مدل L-MEB و داده‌های اسموس متناظر با آنها برای ارزیابی ذخیره شدند که الگوریتم مدل ارزیابی در شکل ۲ ارائه شده است.

۳-۲ نتایج شبیه‌سازی دمای درخشندگی

در این پژوهش شبیه‌سازی دماهای درخشندگی از سطح زمین (گسیل میکروویو نواری L از سطح زمین) با استفاده از مدل انتقال تابشی L-MEB و مجموعه‌ای از متغیرهای

و دقت دو مجموعه داده ماهواره‌ای و مدل‌سازی شده، سنجه‌های اختلاف ریشه میانگین مربعات (RMSD)، بایاس (MBE) به کار برده شدند. برای بررسی ماهیت ارتباط بین دو سری داده نیز از ضریب همبستگی پیرسون (R) استفاده شد (الیاری و همکاران، ۲۰۱۴، الف). معادلات این سنجه‌ها در ادامه آمده‌اند که در آنها TB_{L-MEB} و TB_{SMOS} به ترتیب دمای درخشندگی اسموس و دمای درخشندگی شبیه‌سازی شده و N تعداد روزهای مورد بررسی می‌باشند.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (TB_{L-MEB_i} - TB_{SMOS_i})^2}{N}}, \quad (5)$$

$$cRMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{(TB_{L-MEB_i} - \overline{TB_{L-MEB}})^2}{N} - \frac{(TB_{SMOS_i} - \overline{TB_{SMOS}})^2}{N} \right]}{N}}, \quad (6)$$

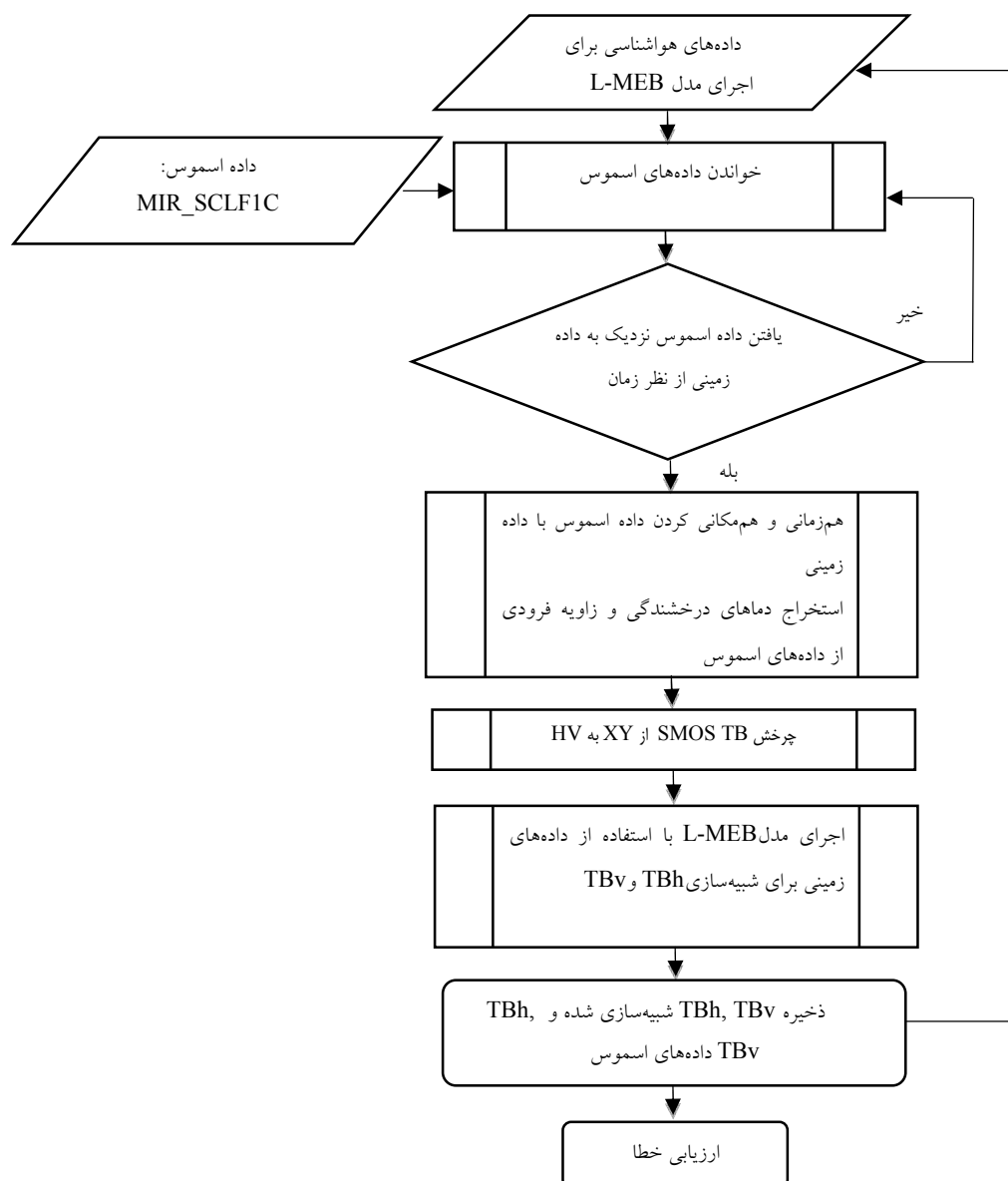
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (TB_{L-MEB_i} - TB_{SMOS_i})}{N}, \quad (7)$$

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(TB_{L-MEB_i} - \overline{TB_{L-MEB}})^2}{\sigma_{TB_{L-MEB}}^2} * \frac{(TB_{SMOS_i} - \overline{TB_{SMOS}})^2}{\sigma_{TB_{SMOS}}^2} \right]}{1}, \quad (8)$$

برای بررسی شباهت بین دو سری داده، از نمودار تیلور برای ترسیم سه سنجه آماری ضریب همبستگی (R)، اختلاف ریشه میانگین مربعات متمرکز شده (cRMSD) و انحراف معیار (σ) در یک نمودار دو بعدی استفاده شد. موقعیت داده‌های اسموس روی نمودار تیلور بر اساس مقدار R، cRMSD آن با داده‌های شبیه‌سازی شده و نیز انحراف معیار داده اسموس مشخص می‌شود (تیلور، ۲۰۰۱). رابطه بین سه سنجه آماری در نمودار تیلور به صورت رابطه (۹) است.

استخراج شدند. خروجی حاصل از اجرای مدل L-MEB، پنج سری داده دمای درخشندگی شبیه‌سازی شده TB_h و TB_v در ایستگاه‌های مطالعاتی طی دوره آماری منتخب بود که از این داده‌ها به‌عنوان سری داده مرجع دمای درخشندگی برای ارزیابی مشاهدات اسموس در محدوده تحقیقاتی استفاده شد.

ژئوفیزیکی، پارامترهای استاتیکی و پارامترهای توصیف‌کننده انتقال تابشی انجام شد. داده‌های ژئوفیزیکی و استاتیکی مورد نیاز مدل از ایستگاه‌های منتخب جمع-آوری و به‌صورت فایل‌های ورودی در مدل ارزیابی دمای درخشندگی وارد شد. پارامترهای توصیف‌کننده انتقال تابشی نیز از مشاهدات دمای درخشندگی اسموس



شکل ۲. الگوریتم مدل ارزیابی دمای درخشندگی اسموس.

جدول ۲. نتایج مقایسه داده‌های T_{Bh} اسموس با داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB

نام ایستگاه	RMSD	cRMSD	R	BIAS	انحراف معیار $T_{Bh}(K)$	
	$T_{Bh}(K)$	$T_{Bh}(K)$	T_{Bh}	$T_{Bh}(K)$	SMOS	Simulate
اهواز	9.78	5.34	0.90	-1.63	12.17	8.85
سرارود	10.63	10.32	0.83	-5.57	29.38	26.01
سرابله	9.81	9.67	0.82	-8.23	22.12	19.64
داراب	12.24	8.54	0.83	3.00	15.32	7.20
اکباتان	13.56	9.85	0.80	8.25	16.12	5.26

جدول ۳. نتایج مقایسه داده‌های T_{Bv} اسموس با داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB

نام ایستگاه	RMSD	cRMSD	R	BIAS	انحراف معیار $T_{Bv}(K)$	
	$T_{Bv}(K)$	$T_{Bv}(K)$	T_{Bv}	$T_{Bv}(K)$	SMOS	Simulate
اهواز	10.23	5.67	0.93	-3.24	23.32	17.3
سرارود	12.18	11.45	0.86	-4.9	34.96	25.84
سرابله	10.9	11.17	0.9	-4.37	25.64	21.45
داراب	10.24	5.9	0.82	5.85	9.88	5.28
اکباتان	14.22	7.09	0.81	9.75	12.1	3.39

T_{Bh} اسموس در ایستگاه‌های اهواز، سرارود و سرابله به ترتیب با مقادیر میانگین اریبی $۱/۶۳ - ۵/۵۷ - ۸/۲۳$ کلونین دارای مقداری کم‌برآوردی هستند. درحالی‌که در ایستگاه‌های داراب و اکباتان با داشتن مقادیر میانگین اریبی ۳ و $۸/۲۵$ کلونین، سری داده‌های T_{Bh} اسموس مقداری کم‌برآوردی داشتند. بر اساس نتایج به دست آمده از جدول ۳، اختلاف ریشه میانگین مربعات (RMSD) دماهای درخشندگی T_{Bv} ماهواره و T_{Bv} شبیه‌سازی شده بین $۱۰/۲۳$ تا $۱۴/۲۲$ کلونین متغیر بوده و کمترین RMSD و یا به عبارتی بیشترین دقت دماهای درخشندگی ماهواره مربوط به ایستگاه اهواز و کمترین دقت مربوط به ایستگاه اکباتان است. ارزیابی مقادیر اریبی در این جدول بیانگر آن است که داده‌های T_{Bv} اسموس در ایستگاه‌های اهواز، سرارود و سرابله به ترتیب با مقادیر منفی اریبی $-۳/۲۴$ ، $-۴/۹$ و $-۴/۳۷$ کلونین مقداری بیش‌برآوردی، و در ایستگاه‌های داراب و اکباتان با مقادیر مثبت اریبی $۵/۸۵$ و $۹/۷۵$ کلونین دارای مقداری کم‌برآوردی در داده‌های

۳-۳ نتایج مقایسه دماهای درخشندگی اسموس با داده‌های شبیه‌سازی شده

برای ارزیابی مشاهدات دمای درخشندگی اسموس، پس از استخراج داده‌های دمای درخشندگی از محصول MIR_SCLF1C، تبدیل دمای درخشندگی اسموس از آنتن مرجع (XY) به زمین مرجع (HV) با استفاده از الگوریتم‌های مربوطه صورت پذیرفت. آنگاه مقایسه بین سری داده‌های دمای درخشندگی T_{Bh} و T_{Bv} اسموس و سری داده‌های T_{Bh} و T_{Bv} شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB انجام شد. در جدول‌های ۲ و ۳ نتایج ارزیابی این مقایسه‌ها با استفاده از معیارهای آماری مختلف ارائه شده است.

بر اساس نتایج جدول ۲، اختلاف ریشه میانگین مربعات (RMSD) دماهای درخشندگی T_{Bh} اسموس و T_{Bh} شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB بین $۹/۷۸$ تا $۱۳/۵۶$ کلونین متغیر بود و در ایستگاه اهواز مشاهدات دماهای درخشندگی اسموس با بیشترین دقت را داشتند. بررسی مقادیر اریبی در جدول ۲ بیانگر آن بود که مشاهدات

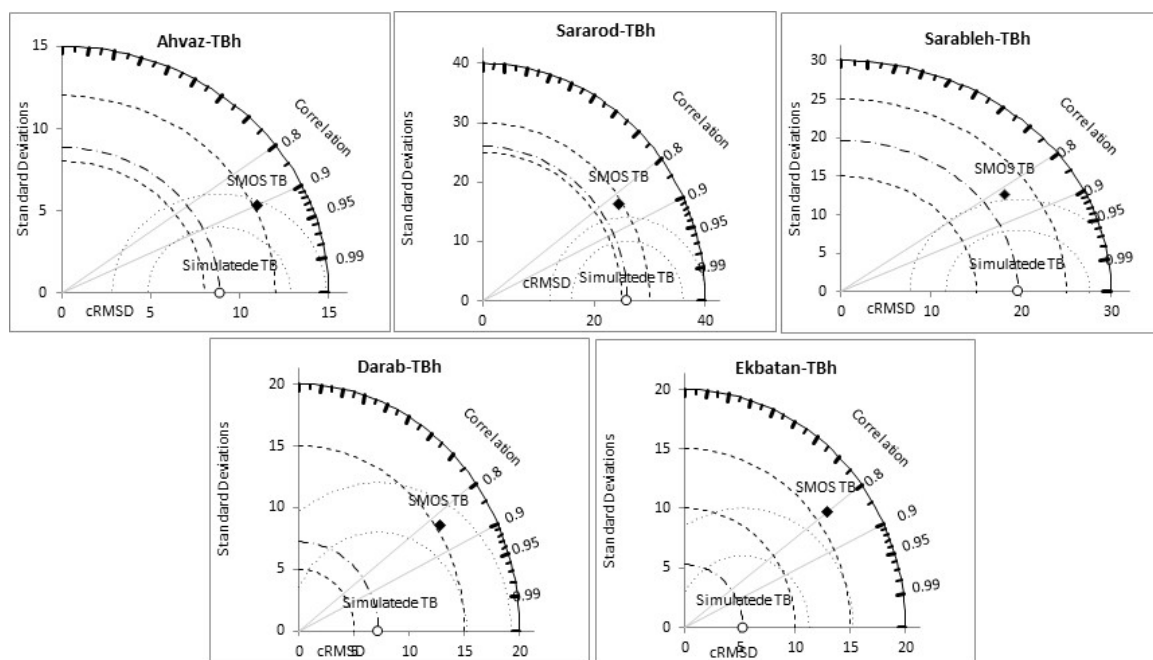
ماهواره‌ای و سری داده‌های شبیه‌سازی شده در ایستگاه-های مطالعاتی بین ۰/۹ تا ۰/۸ است. بالاترین همبستگی بین دو سری داده مربوط به ایستگاه اهواز و کمترین همبستگی در ایستگاه اکباتان می‌باشد. بررسی انحراف معیار دو سری داده در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که در ایستگاه‌های سرابله، اهواز و سرارود کمترین و در ایستگاه اکباتان بیشترین اختلاف انحراف معیار بین سری داده-های TB_h اساموس و داده‌های شبیه‌سازی شده وجود دارد. همچنین کمترین و بیشترین cRMSD به ترتیب با مقادیر ۵/۳۴ و ۱۰/۳۲ کلونین مربوط به داده‌های ایستگاه‌های اهواز و سرارود بوده است.

بررسی نمودارهای تیلور دمای درخشندگی TB_v (شکل ۴)، بیانگر آن است که داده‌های ماهواره و شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های مورد بررسی ضریب همبستگی (R) بالایی داشته (بین ۰/۹۳ تا ۰/۸۱) و در ایستگاه اهواز بالاترین ضریب همبستگی مشاهده می‌شود. بر اساس این نمودارها مشخص شد که در ایستگاه‌های سرابله، داراب و اهواز کمترین و در ایستگاه اکباتان

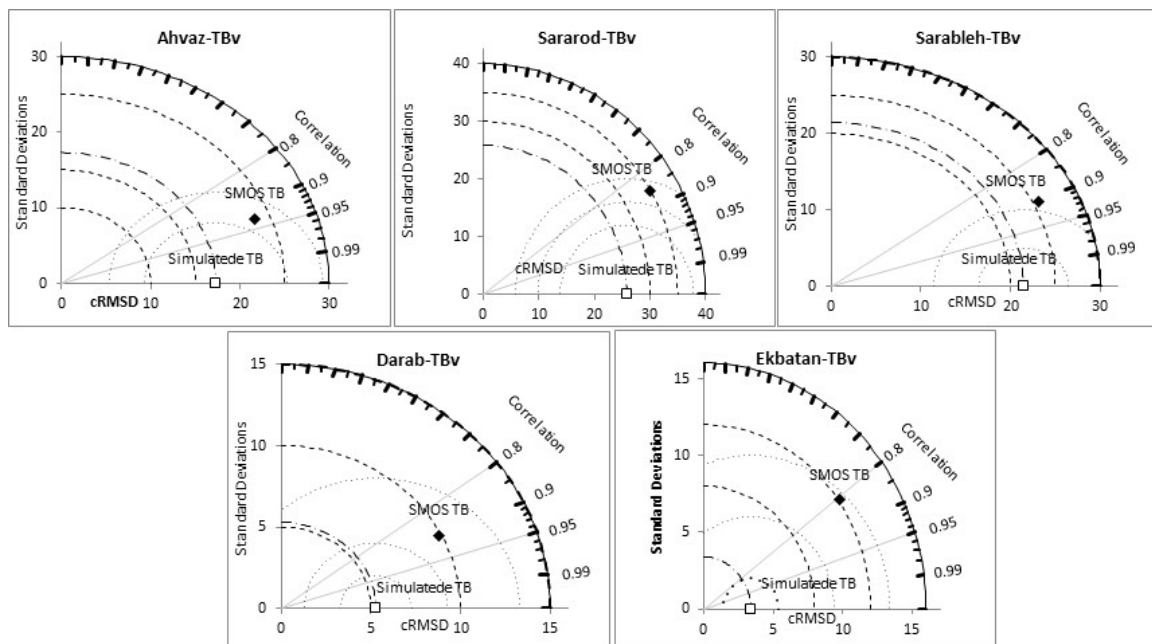
دمای درخشندگی TB_v اساموس هستند. یافته‌های حاصل از ارزیابی دماهای درخشندگی اساموس (TB_v و TB_h) در مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده با نتایج مطالعه سلنز و همکاران (۲۰۱۲) که ریشه میانگین مربعات خطای حدود ۱۲ تا ۱۶ کلونین را برای داده‌های دمای درخشندگی اساموس در مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB مطلوب نتیجه‌گیری کرده‌اند، تطابق دارد.

از نمودارهای تیلور (شکل‌های ۳ و ۴) جهت بررسی تطابق داده‌های دمای درخشندگی اساموس (SMOS TB) با داده‌های شبیه‌سازی (Simulate TB) استفاده شده است. در این نمودارها ضریب همبستگی به شکل شعاع‌های دایره روی قوس اصلی نشان داده می‌شود، مقادیر انحراف معیار دو سری داده به صورت فواصل شعاعی از مبدأ نمودار است و cRMSD به صورت نیم‌دایره‌های خط‌چین نسبت به مقدار شبیه‌سازی شده روی محور Xها نشان داده شده‌اند (تیلور، ۲۰۰۱).

بر اساس نمودارهای تیلور داده‌های TB_h (شکل ۳)، ضریب همبستگی پیرسون (R) بین سری مشاهدات TB_h



شکل ۳. نمودارهای تیلور نشان‌دهنده دقت داده‌های TB_h اساموس در مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده.



شکل ۴. نمودارهای تیلور نشان‌دهنده دقت داده‌های TB_v اسموس در مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده.

توصیف‌کننده انتقال تابشی مورد نیاز انجام شد. نتیجه حاصل از اجرای این مدل، دستیابی به پنج سری داده شبیه‌سازی شده TB_v و TB_h در ایستگاه‌های مطالعاتی طی دوره آماری منتخب بود که این نتایج به‌عنوان داده مرجع دمای درخشندگی برای ارزیابی مشاهدات اسموس در محدوده مطالعاتی به کار برده شدند.

نتایج مقایسه داده‌های دمای درخشندگی اسموس و داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل L-MEB نشان داد که داده‌های اسموس در ایستگاه‌های اهواز، سرارود و سرابله دارای مقداری بیش‌برآوردی و در ایستگاه‌های داراب و اکباتان مقداری کم‌برآوردی دارند. بررسی نتایج آماره RMSD مشخص کرد که داده‌های TB_h اسموس در ایستگاه‌های اهواز، سرابله و داده‌های TB_v اسموس در ایستگاه‌های اهواز، داراب و سرابله دارای بیشترین دقت می‌باشند.

در این پژوهش با استفاده از نمودارهای تیلور شباهت بین داده‌های دمای درخشندگی اسموس و داده‌های

بیشترین اختلاف انحراف معیار بین داده‌های TB_v اسموس و داده‌های شبیه‌سازی شده وجود دارد. کمترین cRMSD بین سری داده‌های ماهواره‌ای و شبیه‌سازی شده با مقادیر ۵/۹ و ۵/۶۷ کلون به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های اهواز و داراب است.

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارزیابی داده‌های دمای درخشندگی TB_h و TB_v از محصولات قطبیده کامل چند زاویه‌ای ماهواره اسموس (MIR_SCLF1C) از طریق مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده در پنج ایستگاه هواشناسی طی سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۲ انجام شد. فرآیند ارزیابی مشاهدات دمای درخشندگی اسموس بر مبنای الگوریتم ارائه شده در تحقیق حاضر (شکل ۲) صورت پذیرفت.

شبیه‌سازی دماهای درخشندگی با استفاده از مدل انتقال تابشی L-MEB (ویگنرون و همکاران، ۲۰۰۷) و متغیرهای ژئوفیزیکی، پارامترهای استاتیکی و پارامترهای

منابع

- Al-Yaari, A., Wigneron, J. P., Ducharne, A., Kerr, Y., De Rosnay, P., De Jeu, R., Govind, A., Al Bitar, A., Albergel, C., and Munoz-Sabater, J., 2014a, Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates: Remote Sensing of Environment, **149**, 181-195.(a)
- Al-Yaari, A., Wigneron, J. P., Ducharne, A., Kerr, Y., Wagner, W., De Lannoy, G., Reichle, R., Al Bitar, A., Dorigo, W., and Richaume, P., 2014b, Global-scale comparison of passive (SMOS) and active (ASCAT) satellite based microwave soil moisture retrievals with soil moisture simulations (MERRA-Land): Remote Sensing of Environment, **152**, 614-626.(b)
- Al-Yaari, A., Wigneron, J. P., Kerr, Y., Rodriguez-Fernandez, N., O'Neill, P., Jackson, T., De Lannoy, G., Al Bitar, A., Mialon, A., and Richaume, P., 2017, Evaluating soil moisture retrievals from ESA's SMOS and NASA's SMAP brightness temperature datasets: Remote Sensing of Environment, **193**, 257-273.
- Al Bitar, A., Leroux, D., Kerr, Y. H., Merlin, O., Richaume, P., Sahoo, A., and Wood, E. F., 2012, Evaluation of SMOS soil moisture products over continental US using the SCAN/SNOTEL network: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **50** (5), 1572-1586.
- Bircher, S., Balling, J. E., Skou, N., and Kerr, Y. H., 2012, Validation of SMOS brightness temperatures during the HOBE airborne campaign, Western Denmark: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **50** (5), 1468-1482.
- Collow, T. W., Robock, A., Basara, J. B., and Illston, B. G., 2012, Evaluation of SMOS retrievals of soil moisture over the central United States with currently available in situ observations: Journal of Geophysical Research, Atmospheres, **117**, D09113.
- Dall'Amico, J. T., Schlenz, F., Loew, A., and Mauser, W., 2012, First Results of SMOS Soil Moisture Validation in the Upper Danube Catchment: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **50**, 1507-1516.
- Grant, J. P., Wigneron, J. P., Van de Griend, A. A., Guglielmetti, M., Saleh, K., and Schwank, M., 2007, Calibration of L-MEB
- شبه‌سازی شده از نظر ضریب همبستگی، cRMSD و انحراف معیار آنها کمی شد. بر اساس این نمودارها مشخص شد که در همه ایستگاه‌های مطالعاتی همبستگی خوبی ($R_{TBh} = 0.8-0.9$ و $R_{TBv} = 0.81-0.93$) بین مشاهدات ماهواره و داده‌های شبه‌سازی شده وجود دارد. کمترین مقادیر cRMSD داده‌های اسموس مربوط به ایستگاه‌های اهواز ($TB_h = 5/34k$ ، $TB_v = 5/67$) و داراب ($TB_h = 8/54k$ و $TB_v = 5/9$) است. بررسی نمودارهای تیلور نشان داد که انحراف معیار داده‌های دمای درخشندگی TB_h اسموس در ایستگاه‌های سرابله، اهواز و سرارود و داده‌های TB_v اسموس در ایستگاه‌های سرابله، داراب و اهواز به انحراف معیار داده‌های شبه‌سازی شده نزدیک‌تر از سایر ایستگاه‌ها هستند. در مجموع با توجه به نتایج ارزیابی داده‌های دمای درخشندگی اسموس، چنین استنباط می‌شود که در ایستگاه‌های اهواز، داراب و سرابله این داده‌ها در مقایسه با داده‌های شبه‌سازی شده با مدل L-MEB از دقت مناسب‌تری برخوردار هستند. نتایج حاصل از این پژوهش اطلاعاتی در خصوص خطاها و عدم قطعیت‌های داده‌های دمای درخشندگی اسموس در محدوده مطالعاتی ارائه داده که می‌تواند مرجع و پایه‌ای برای استفاده کاربردی از محصولات رطوبت خاک اسموس (MIR_SMUDP2) در مدل‌سازی‌های آب‌شناختی و پیش‌بینی عددی وضع هوا باشد.

تشکر

نگارندگان مقاله از آژانس فضایی اروپا به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های ماهواره اسموس، همچنین از دانشگاه مرلند آمریکا به دلیل فراهم آوردن زمینه انجام این طرح در مرکز علوم زمین (ESSIC) این دانشگاه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

- Remotely Sensed Soil Moisture: *Journal of Hydrometeorology*, **16**, 295-305.
- Mialon, A., Richaume, P., Leroux, D., Bircher, S., Bitar, A. A., Pellarin, T., Wigneron, J. P., and Kerr, Y. H., 2015, Comparison of Dobson and Mironov Dielectric Models in the SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **53**(6), 3084-3094.
- Montzka, C., Bogena, H. R., Weihermüller, L., Jonard, F., Bouzinac, C., Kainulainen, J., Balling, J. E., Loew, A., Amico, J. T., Rouhe, E., Vanderborght, J., and Vereecken, H., 2013, Brightness Temperature and Soil Moisture Validation at Different Scales During the SMOS Validation Campaign in the Rur and Erft Catchments, Germany, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **51**(3), 1728-1743.
- Pan, M., Sahoo, a. K., Wood, E. F., Al Bitar, A., Leroux, D., and Kerr, Y. H., 2012, An Initial Assessment of SMOS Derived Soil Moisture over the Continental United States: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **5**(5), 1448-1457.
- Pinori, S., Crapolicchio, R., and Mecklenburg, S., 2008, Preparing the ESA-SMOS (soil moisture and ocean salinity) mission-overview of the user data products and data distribution strategy: *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, MICRORAD 2008*.
- Schalie, R. V. D., Kerr, Y. H., Wigneron, J. P., Rodríguez-Fernández, N. J., Al-Yaari, A., and Jeu, R. A. M. D., 2016, Global SMOS Soil Moisture Retrievals from The Land Parameter Retrieval Model: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **45**, 125-134.
- Schlenz, F., Dall'Amico, J. T., Loew, A., and Mauser, W., 2012, Uncertainty Assessment of the SMOS Validation in Upper Danube Catchment: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **50**, 1517-1529.
- Secretariat, G. C. O. S., 2009, Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 Update).
- Taylor, K. E., 2001, Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram: *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, **106**(D7), 7183-7192.
- for soil moisture retrieval over forests: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007*.
- Holl, G., 2012, Microwave and infrared remote sensing of ice clouds: measurements and radiative transfer simulations: (Licentiate thesis), Luleå University of Technology.
- Kerr, Y. H., 2007, Soil moisture from space, Where are we?: *Hydrogeology Journal*, **15**(1), 117-120.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Richaume, P., Wigneron, J. P., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A., Al Bitar, A., Cabot, F., Gruhier, C., and Juglea, S. E., 2012, The SMOS soil moisture retrieval algorithm: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **50** (5), 1384-1403.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Delwart, S., Cabot, F. O., Boutin, J., Escorihuela, M. J., Font, J., Reul, N., and Gruhier, C., 2010, The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle: *Proceedings of the IEEE*, **98** (5), 666-687.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Martinuzzi, J. M., Font, J., and Berger, M., 2001, Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**(8), 1729-1735.
- Kornelsen, K. C., and Coulibaly, P., 2015, Reducing multiplicative bias of satellite soil moisture retrievals: *Remote Sensing of Environment*, **165**, 109-122.
- Leduc-leballeur, M., Picard, G., Mialon, A., Arnaud, L., Lefebvre, E., Possenti, P., and Kerr, Y., 2015, Modeling L-Band Brightness Temperature at Dome C in Antarctica and Comparison With SMOS Observations: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **53**(7), 4022-4032.
- Leroux, D. J., Kerr, Y. H., Bitar, A. A., Bindlish, R., Member, S., Jackson, T. J., Berthelot, B., and Portet, G., 2014, Comparison Between SMOS, VUA, ASCAT, and ECMWF Soil Moisture Products Over Four Watersheds in U.S.: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **52**(3), 1562-1571.
- McNally, A., Husak, G. J., Brown, M., Carroll, M., Funk, C., Yatheendradas, S., Arsenault, K., Peters-Lidard, C., and Verdin, J. P., 2015, Calculating Crop Water Requirement Satisfaction in the West Africa Sahel with

- Description and calibration against experimental data sets over crop fields: *Remote Sensing of Environment*, **107**(4), 639-655.
- Wigneron, J.-P., Schwank, M., Baeza, E. L., Kerr, Y., Novello, N., Millan, C., Moisy, C., Richaume, P., Mialon, A., and Al Bitar, A., 2012, First evaluation of the simultaneous SMOS and ELBARA-II observations in the Mediterranean region: *Remote Sensing of Environment*, **124**, 26-37.
- Zeng, J., Li, Z., Chen, Q., Bi, H., Qiu, J., and Zou, P., 2015, Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations: *Remote Sensing of Environment*, **163**, 91-110.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K., 1986, *Microwave remote sensing active and passive-volume III, from theory to applications*: Massachusetts, Artech House.
- Wigneron, J. P., Chanzy, A., Kerr, Y. H., Lawrence, H., Shi, J., Escorihuela, M. J., Mironov, V., Mialon, A., Demontoux, F., and De Rosnay, P., 2011, Evaluating an improved parameterization of the soil emission in L-MEB: *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, **49**(4), 1177-1189.
- Wigneron, J. P., Kerr, Y., Waldteufel, P., Saleh, K., Escorihuela, M. J., Richaume, P., Ferrazzoli, P., De Rosnay, P., Gurney, R., and Calvet, J. C., 2007, L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model:

Evaluation of brightness temperatures observations from SMOS microwave satellite in comparison with L-MEB model simulations data

Mozhdeh Jamei¹, Mohammad Mousavi Baygi^{2*}, Amin Alizadeh³, and Parviz Irannejad⁴

¹Ph. D. Student of Agrometeorology, Ferdowsi University Of Mashhad, Mashhad, Iran

²Professor in Meteorology, Water Engineering Department, Ferdowsi University Of Mashhad, Mashhad, Iran

³Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University Of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴Associate Professor, Space Physics Department, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 26 July 2017, Accepted: 03 February 2018)

Summary

The European Space Agency (ESA's) Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) satellite mission was launched in November 2009. SMOS carries the first L-band (1.4 GHz) 2-D synthetic aperture microwave radiometer that produces multi-angular dual polarized (or fully polarized) brightness temperature. The objective of SMOS mission is to provide global surface soil moisture maps over the land surfaces with an accuracy of $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. The SMOS soil moisture retrieval algorithm was developed, which processes Level 1C products (multi-angular brightness temperatures) to Level 2 SM products (soil moisture maps). This algorithm is based on the comparison between the brightness temperatures from SMOS and the simulated brightness temperatures data (simulated TB) using L-MEB model. Thus, the evaluation of SMOS brightness temperatures is a necessary step before using of Level 2 Soil Moisture products. Therefore, the objective of this research is to evaluate the horizontal and vertical full polarized brightness temperatures data (T_{B_h} , T_{B_v}) from the SMOS MIR_SCLF1C products at the five meteorological stations in the west and southwest of Iran. Evaluation of SMOS brightness temperature data (SMOS TB) was done through a comparison between the SMOS TB and simulated TB from the L-MEB model. The SMOS MIR_SCLF1C (Level 1C Full Polarization Land Science measurements) products, which were provided through the ESA, contains the multi-angular brightness temperatures at the top of the atmosphere in the antenna polarization reference frame. In this study, the MIR_SCLF1C products, version 505 for the period 2012-2013 were evaluated. The ESA's SMOS Matlab codes on Linux was used to reading and deriving TB, Incidence angles, Geometric and Faraday rotations and other required data from MIR_SCLF1C products.

The L-MEB (L-band Microwave Emission of the Biosphere) model is the radiative transfer model, which has been specifically developed to simulate the L-band microwave emission (brightness temperature) over land surfaces. In this research, the simulation of TB (T_{B_h} , T_{B_v}) at the five meteorological stations was carried out using L-MEB model (MATLAB function) and ground-based measurements. The model was simulated TB at the Earth's surface reference. Therefore, SMOS TB data was projected from the antenna reference frame to the Earth's surface reference frame using an algorithm provided by the CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère) team. Four statistical metrics and Taylor diagram were used for the evaluation of results; the Root Mean Squared Difference (RMSD), the centered Root Mean Square Difference (cRMSD), the Mean Bias Error or bias and the correlation coefficient (R). The Taylor diagrams are used to represent three statistical metrics (R, cRMSD and standard deviation) on two dimensional plots to graphically describing how closely SMOS TB matches simulated TB.

Based on the research algorithm, the Evaluation model for the SMOS brightness temperatures data (T_{B_h} , T_{B_v}) was obtained. The Evaluation model was run for five metrological stations and simulated TB data from L-MEB model and SMOS BT from the MIR_SCLF1C product was saved as the output of the model to evaluation.

The results of the comparison between the SMOS T_{B_h} , T_{B_v} data and simulated T_{B_h} , T_{B_v} show that SMOS TB have an underestimation at Ahvaz, Sararod, Sarableh stations, whereas an overestimation of the SMOS BT was detected at Darab, Ekbatan stations. According to RMSD results, the SMOS T_{B_h} data at Ahvaz, Sarableh stations and the SMOS T_{B_v} data at Ahvaz, Darab, Sarableh stations have the highest accuracy.

The Taylor diagrams shows the strong correlation ($R_{TB_h} = 0.8-0.9$ and $R_{TB_v} = 0.81-0.93$) between the SMOS TB and simulated TB data at all stations. Besides, the lowest value of the cRMSD of the SMOS TB data was obtained at Ahvaz ($T_{B_h} = 5.34$, $T_{B_v} = 5.67$ K) and Darab stations ($T_{B_h} = 8.54$, $T_{B_v} = 5.9$ K). In addition, these diagrams indicate that the standard deviation of SMOS T_{B_h} data at Sarableh, Ahvaz, Sararod stations and SMOS T_{B_v} data at Sarableh, Darab, Ahvaz stations are closer to the simulated TB data than other stations. Overall, the findings of this paper give valuable information about the uncertainties and errors of SMOS brightness temperatures data (MIR_SCLF1C) in the study area. Therefore, this research could be as a reference for using the SMOS soil moisture products (Level 2 Soil Moisture) in hydrology and meteorology studies in Iran.

Keywords: SMOS satellite, passive microwave, L- Band, brightness temperatures, L-MEB model

*Corresponding author:

mousavib@um.ac.ir