

توسعه سامانه تخمین رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

سید علی عزیزی^۱، علی عباسی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول)

aabbasi@um.ac.ir

خلاصه

امروزه بسیاری از مناطق دنیا در معرض خطر وقوع خشکسالی و کمبود آب قرار دارند که تأثیرات مستقیمی بر کشاورزی این مناطق دارد. از عمده دلایل ناکارآمد بودن برنامه‌های اجرایی در ارتباط با مدیریت خشکسالی، پرهزینه بودن و کمبود اطلاعات به‌روز خشکسالی را می‌توان برشمرد. رطوبت خاک یکی از معیارهای اصلی در برنامه‌ریزی سازگاری با خشکسالی و انجام اقدامات لازم برای مدیریت خشکسالی و کشاورزی می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از تصاویر ماهواره SMAP و سنجنده MODIS، به تولید تصاویر رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی 1 km پرداخته شود.

کلمات کلیدی: رطوبت خاک، سنجش از دور، ماهواره SMAP، سنجنده MODIS، زبان برنامه نویسی R

۱. مقدمه

اتکای بیش از حد اقتصاد کشورهای در حال توسعه به کشاورزی و منابع طبیعی، ساکنان این کشورها را نسبت به تأثیرات ناشی از تغییر اقلیم بسیار آسیب‌پذیر نموده است. کشور ما، ایران نیز به‌طور جدی با این معضل روبروست. برنامه‌های کوتاه و بلندمدتی نیز برای کمتر کردن اثرات آن اجرا شده و یا در حال اجراست ولی متأسفانه چشم‌انداز روشنی برای مهار این معضل بزرگ در کشور قابل تصویر نیست. از عمده دلایلی که در این راستا برنامه‌های اجرایی کشور ما را با مشکل روبرو کرده است، عدم وجود داده‌های مورد نیاز و کافی در زمینه‌های مرتبط با کشاورزی می‌باشد، به همین دلیل ارائه راهکارهای کم‌هزینه و البته دارای اثرات قابل توجه در کوتاه‌مدت و بلندمدت در راستای سیاست‌های کلی دولت و توسعه پایدار بسیار مورد نیاز است. داده‌های مربوط به رطوبت خاک یکی از معیارهای اصلی در مدیریت کشاورزی و افزایش بازده محصولات کشاورزی می‌باشد.

اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از روش‌های درجا بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و از طرفی استفاده از این روش‌ها به‌منظور پایش رطوبت خاک در مقیاس‌های کوچک و محلی نظیر مزارع کشاورزی دقت بسیار بالایی داشته، اما برای مقیاس‌های بزرگتر به دلیل فراهم نبودن اطلاعات کافی و نیز صرف هزینه و زمان زیاد، مناسب نیستند، به‌علاوه به کارگیری این روش‌ها در مقیاس بزرگ بسیار مشکل می‌باشد. با توجه به توسعه صنعت ماهواره‌ای و سنجش از دور در سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های سنجش از دور (از قبیل داده‌های ماهواره SMAP^۱) ابزار بسیار مناسبی برای پایش و تخمین رطوبت خاک فراهم نموده است. استفاده از سنجش از دور علاوه بر رفع محدودیت‌های ذکر شده برای روش‌های درجا، می‌تواند باعث ایجاد پوشش مکانی وسیع و پیوستگی زمانی شده و سطح قابل قبولی از اطمینان را در مقایسه با اندازه‌گیری‌های درجا ارائه نماید. در پژوهش حاضر سعی شده است تا با استفاده از زبان برنامه نویسی R و نرم‌افزارهای ENVI و Panoply، داده‌های ماهواره‌ای دریافت شده و مورد تحلیل و پردازش قرار گیرند. اطلاعات رطوبت خاک تولید شده توسط این مدل با داده‌های زمینی موجود مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرند. بدیهی است اطلاعات تولید شده کمک شایانی به اصلاح برنامه کشاورزی و آبیاری خواهد نمود.

¹ Soil Moisture Active Passive

۱.۲ روش انجام پژوهش

به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای می‌توان از نرم افزارهایی همچون ArcGIS، ENVI و ERDAS IMAGINE و یا از زبان‌های برنامه‌نویسی همچون Python و R استفاده نمود. کتابخانه‌های نوشته شده موجود در این زبان‌های برنامه‌نویسی کار را برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای آسان تر می‌کنند.

در پژوهش حاضر سعی شده است تا با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R به پردازش و تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شود. بدین منظور از کتابخانه‌های متنوعی (همچون [1] smapr، [2] MODIS¹ و [3] rts) که برای این منظور وجود دارند، استفاده شده است.

یکی از داده‌های تولید شده توسط ماهواره SMAP، اطلاعات مربوط به رطوبت سطحی خاک (در عمق ۵ سانتی متر) می‌باشد. این داده‌ها در زمان فعلی با دو قدرت تفکیک مکانی 36 km و 9 km در دسترس می‌باشند. با توجه به اینکه افزایش قدرت تفکیک مکانی داده‌های رطوبت خاک باعث استفاده بهتر و دقیق تر از این داده‌ها در سطح مزارع و زمین‌های کشاورزی کوچک خواهد شد، به همین منظور در این پژوهش سعی شده است تا به تغییر قدرت تفکیک مکانی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP از مقدار 9 km به 1 km پرداخته شود. در این راستا پژوهش‌های متعددی توسط افراد مختلفی صورت گرفته است.

در پژوهش انجام گرفته توسط Montzka و همکاران [4]، داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP از قدرت تفکیک مکانی 36 km به 1 km تغییر یافته‌اند و برای این منظور از ظرفیت زراعی (FC²) به عنوان نماینده‌ای از ناهمگونی رطوبت خاک، استفاده شده است. نتایج پژوهش آن‌ها نیز توسط داده‌های اندازه گیری شده زمینی در کشورهای آلمان و اسپانیا در سال ۲۰۱۶ مورد صحت سنجی قرار گرفته‌اند. مطالعات دیگری همچون Abbaszadeh و همکاران [5]، Fang و همکاران [6]، Colliander و همکاران [7]، Knipper و همکاران [8]، Zhao و همکاران [9] و Le Tu [10] در جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های ماهواره SMAP انجام شده است که از نتایج نسبتاً خوبی برخوردار بوده‌اند.

با توجه به روش‌های استفاده شده توسط سایر پژوهشگران به منظور تغییر قدرت تفکیک مکانی داده‌های رطوبت سطحی خاک ماهواره SMAP از 9 km به 1 km، تلاش گردید تا در این پژوهش با انجام ۱۴ مدل رگرسیون بین داده‌های رطوبت سطحی خاک ماهواره SMAP و داده‌های شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI³)، دمای سطح زمین (LST⁴) و تبخیر و تعرق (ET⁵) سنجنده MODIS، مدلی که از نتایج نسبتاً بهتری نسبت به سایر مدل‌ها به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت سطحی خاک ماهواره SMAP برخوردار بود، انتخاب گردد. مدل انتخاب شده به صورت رابطه‌ی (۱) می‌باشد که در آن پارامترهای SSM، L و N به ترتیب رطوبت سطحی خاک (Surface Soil Moisture)، دمای سطح زمین (LST) و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و پارامترهای a، b، c، d، e، f، g و h ضرایب ثابت مدل می‌باشند که از طریق انجام رگرسیون بین داده‌های مذکور بدست می‌آیند.

$$SSM = a + (b \times L) + (c \times N) + (d \times L \times N) + (e \times L^2) + (f \times N^2) + (g \times L^3) + (h \times N^3) \quad (1)$$

به منظور تغییر قدرت تفکیک مکانی داده‌های رطوبت سطحی خاک ماهواره SMAP از مقدار 9 km به 1 km، ابتدا بایستی قدرت تفکیک مکانی داده‌های شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی و دمای سطح زمین سنجنده MODIS را از مقدار 1 km به 9 km تغییر داده که انجام این کار از طریق دستور projectRaster (که یکی از توابع کتابخانه‌ی raster [11] در زبان برنامه‌نویسی R می‌باشد)، صورت می‌پذیرد. در ادامه بایستی با توجه به رابطه (۱) و دستورهای مربوطه در زبان برنامه‌نویسی R، بین داده‌های رطوبت سطحی خاک و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی و دمای سطح زمین (که همگی آن‌ها دارای قدرت تفکیک مکانی 9 km می‌باشند)، به انجام رگرسیون پرداخته تا ضرایب ثابت رابطه (۱) بدست آیند. پس از آنکه ضرایب ثابت معادله بدست آمدند، بایستی با قراردادن مقادیر این ضرایب در رابطه (۱) و اعمال این رابطه بر روی داده‌های شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی و دمای سطح زمین که دارای قدرت تفکیک مکانی 1 km می‌باشند، داده مربوط به رطوبت سطحی خاک با قدرت تفکیک مکانی 1 km را بدست آورد.

¹ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

² Field Capacity

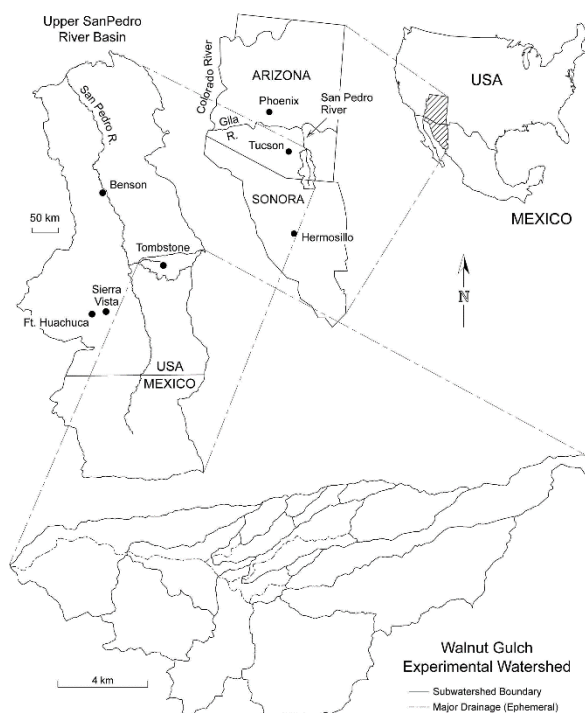
³ Normalized Difference Vegetation Index

⁴ Land Surface Temperature

⁵ Evapotranspiration

۲.۲ صحت سنجی مدل

باتوجه به اینکه آژانس فضایی آمریکا (NASA) به منظور صحت سنجی داده‌های رطوبت سطحی خاک تولید شده توسط ماهواره SMAP، اقدام به اندازه‌گیری زمینی رطوبت خاک و ثبت داده‌های مربوطه از تاریخ دوم تا هجدهم آگوست سال ۲۰۱۵ میلادی در منطقه‌ای در جنوب شرقی ایالت آریزونا (به نام Walnut Gulch Experimental Watershed (WGEW)) کرده است و همچنین باتوجه به در دسترس بودن آسان و رایگان این داده‌ها در سایت [12] National Snow and Ice Data Center، این منطقه به منظور صحت سنجی مدل انتخاب گردید (شکل ۱). این برنامه آزمایشی که توسط آژانس فضایی آمریکا (NASA) در منطقه یاد شده اجرا گردیده است، با نام "SMAPVEX15" شناخته می‌شود [13].



شکل ۱ - منطقه مورد مطالعه [13]

۳.۲ داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر عبارتند از: ۱. رطوبت سطحی خاک ماهواره SMAP ۲. شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) سنجنده MODIS ۳. دمای سطح زمین (LST) سنجنده MODIS.

به منظور دانلود داده‌های ماهواره SMAP، می‌توان از سایت‌های [12] National Snow and Ice Data Center، [14] Earthdata و [15] EOSDIS Worldview و به منظور دانلود داده‌های سنجنده MODIS نیز می‌توان از سایت‌های [14] Earthdata و [15] EOSDIS Worldview استفاده نمود.

ماهواره SMAP علاوه بر داده‌های رطوبت سطحی خاک با قدرت تفکیک مکانی 9 km، دارای داده‌های دیگری همچون رطوبت خاک در ناحیه ریشه (در عمق ۱۰۰ سانتی متر) نیز می‌باشد. داده مورد استفاده در پژوهش حاضر یکی از محصولات سطح ۴ (Level 4) این ماهواره بوده که با نام اختصاری "SPL4SMAU" شناخته می‌شود. به منظور دانلود خود کار داده‌های مختلف ماهواره SMAP (باتوجه به اطلاعاتی همچون نام اختصاری، تاریخ و نسخه (Version) داده مورد نظر) و همچنین به منظور استخراج داده مورد نیاز از فایل HDF مربوطه و پردازش آن، می‌توان از کتابخانه‌های موجود در زبان برنامه‌نویسی R (همچون [1] smapr)، استفاده نمود.

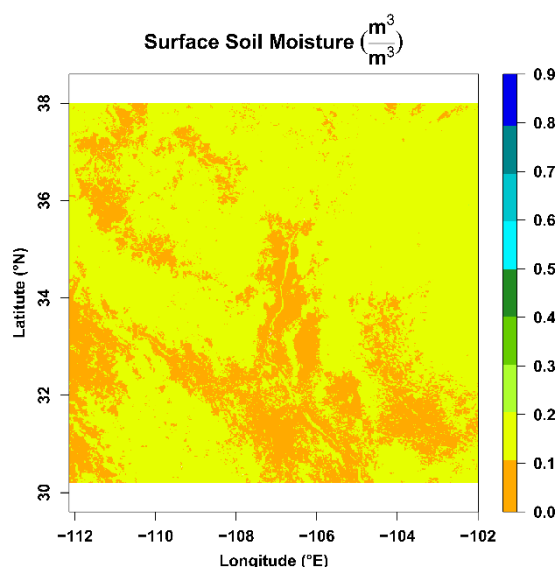
سنجنده MODIS دارای داده‌های متنوعی می‌باشد. در پژوهش حاضر از داده‌های شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) (با نام اختصاری "MYD13A2") و دمای سطح زمین (LST) (با نام اختصاری "MYD11A1") که دارای قدرت تفکیک مکانی 1 km و قدرت تفکیک

زمانی به ترتیب ۱۶ و ۱ روزه می‌باشند، استفاده گردیده است. به منظور دانلود خودکار داده‌های سنجنده MODIS (باتوجه به اطلاعاتی همچون نام اختصاری، تاریخ، نسخه (Version)، شماره فریم افقی (Horizontal Tile Number) و شماره فریم عمودی (Vertical Tile Number) داده مورد نظر) و همچنین به منظور استخراج داده مورد نیاز از فایل HDF5 مربوطه و پردازش آن، می‌توان از کتابخانه‌های موجود در زبان برنامه‌نویسی R (همچون [3] rts) استفاده نمود.

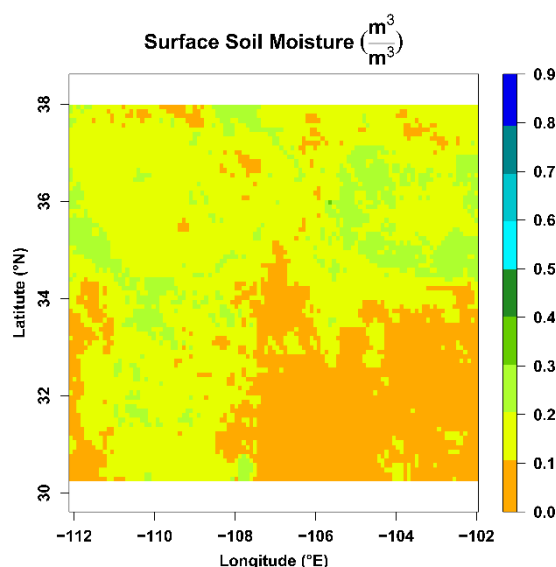
۳. نتایج و بحث

۱.۳ خروجی مدل

در این قسمت از مقاله به عنوان نمونه برای تاریخ ۱۳ آگوست سال ۲۰۱۵ میلادی و برای منطقه مورد مطالعه، تصویر رطوبت سطحی خاک ماهواره SMAP با قدرت تفکیک مکانی ۹ km (شکل ۲) و همچنین تصویر رطوبت سطحی خاک حاصل از مدل استفاده شده در پژوهش حاضر که دارای قدرت تفکیک مکانی ۱ km (شکل ۳) می‌باشد، آورده شده‌اند:



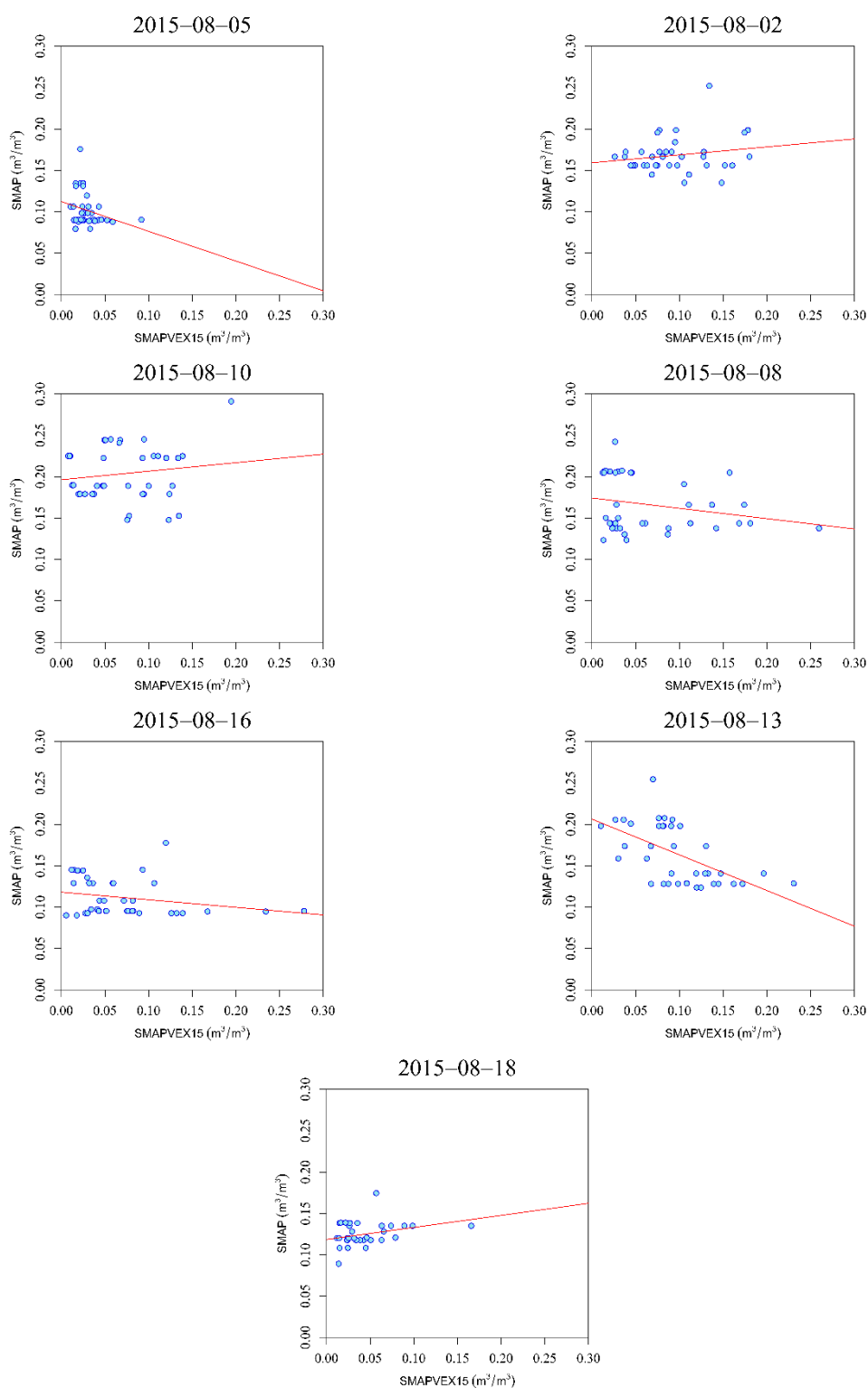
شکل ۳- رطوبت سطحی خاک با قدرت تفکیک مکانی ۱ km



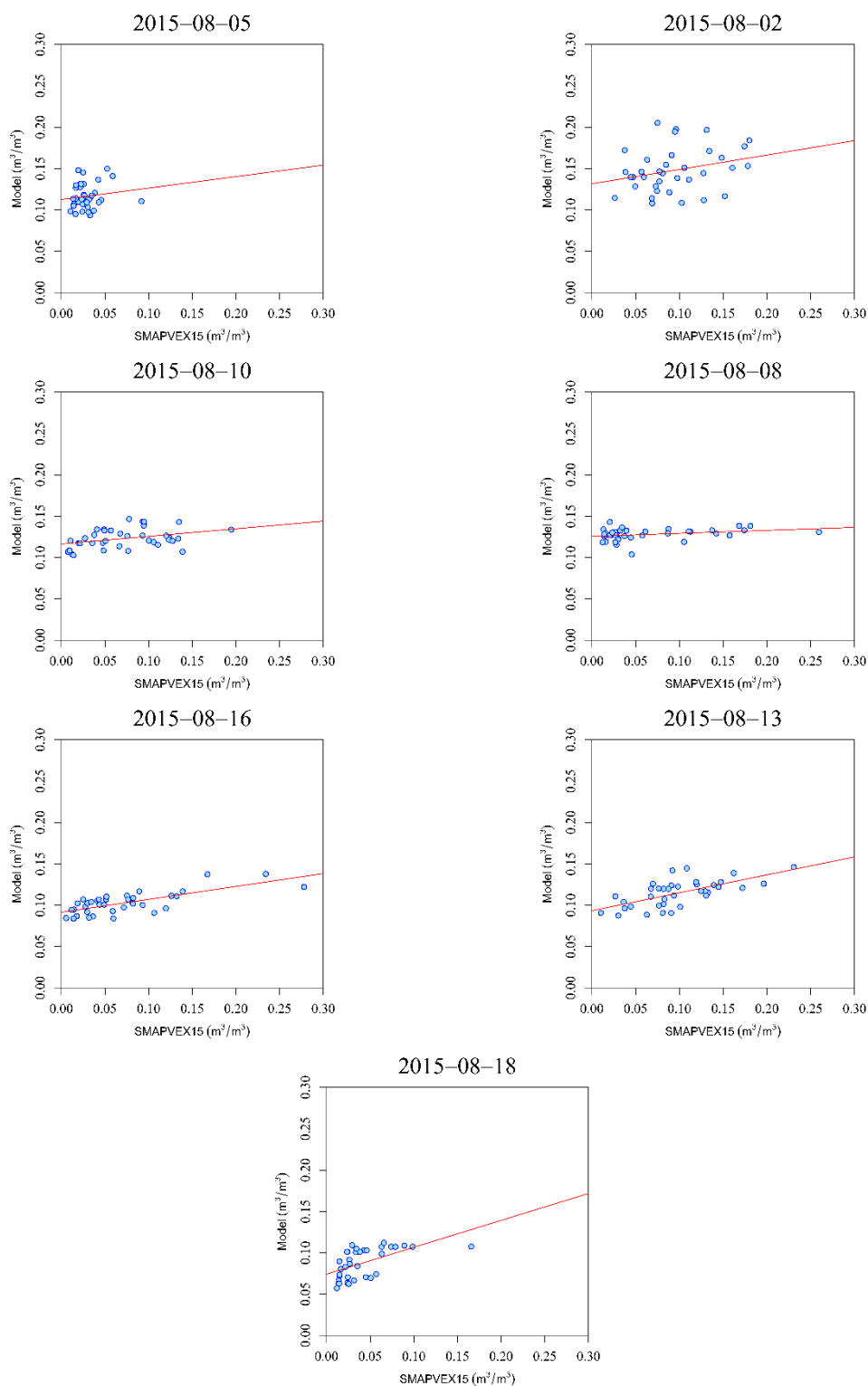
شکل ۲- رطوبت سطحی خاک با قدرت تفکیک مکانی ۹ km

۲.۳ نمودارهای صحت‌سنجی پژوهش

در این قسمت از مقاله به ارائه نمودارهای صحت‌سنجی مربوط به تصاویر اصلی رطوبت سطحی خاک ماهواره SMAP (دارای قدرت تفکیک مکانی ۹ km) و همچنین نمودارهای صحت‌سنجی مربوط به تصاویر رطوبت سطحی خاک تولید شده توسط مدل استفاده شده در این پژوهش (دارای قدرت تفکیک مکانی ۱ km) خواهیم پرداخت. این نمودارها برای تاریخ‌های دوم، پنجم، هشتم، دهم، سیزدهم، شانزدهم و هجدهم ماه آگوست سال ۲۰۱۵ میلادی تهیه شده و در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده‌اند. شکل ۴ مربوط به صحت‌سنجی داده‌های اصلی ماهواره SMAP و شکل ۵ مربوط به صحت‌سنجی داده‌های تولید شده توسط مدل در تاریخ‌های ذکر شده می‌باشد.



شکل ۴ - نمودارهای صحت‌سنجی داده‌های اصلی ماهواره SMAP در تاریخ‌های مذکور



شکل ۵ - نمودارهای صحت‌سنجی داده‌های تولید شده توسط مدل در تاریخ‌های مذکور

۳.۳ نتایج آماری پژوهش

در این قسمت از مقاله به ارائه‌ی نتایج آماری حاصل از صحت‌سنجی مدل خواهیم پرداخت. معیارهای آماری استفاده شده در پژوهش حاضر شامل خطای میانگین مطلق (MAE)، خطای میانگین مربعات (MSE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) می‌باشند که در جدول ۱ آورده شده‌اند. همچنین در این پژوهش با انجام تقریبی کالیبراسیون از طریق انجام یک رگرسیون خطی برای کل روزهای پژوهش بین داده‌های مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی، ضرابی بدست آمدند که با اعمال این ضرایب و اصلاح تصاویر تولید شده توسط مدل، تصاویر جدیدی به وجود آمدند که نتایج آماری این مدل اصلاح شده نیز در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نتایج آماری پژوهش شامل مقادیر MAE، MSE، RMSE و R^2

تاریخ	نتایج آماری برای تصاویر اصلی (9 km)	نتایج آماری برای تصاویر تولید شده توسط مدل (9 km)	نتایج آماری برای تصاویر اصلاح شده مدل (9 km)
08/02/2015	MAE: 0.0754 MSE: 0.0073 RMSE: 0.0853 R^2 : 0.0342	MAE: 0.0583 MSE: 0.0047 RMSE: 0.0683 R^2 : 0.0753	MAE: 0.0343 MSE: 0.0017 RMSE: 0.0415 R^2 : 0.0753
08/05/2015	MAE: 0.0726 MSE: 0.0060 RMSE: 0.0777 R^2 : 0.0747	MAE: 0.0874 MSE: 0.0080 RMSE: 0.0896 R^2 : 0.0196	MAE: 0.0396 MSE: 0.0018 RMSE: 0.0422 R^2 : 0.0196
08/08/2015	MAE: 0.1106 MSE: 0.0157 RMSE: 0.1253 R^2 : 0.0547	MAE: 0.0776 MSE: 0.0073 RMSE: 0.0856 R^2 : 0.0936	MAE: 0.0523 MSE: 0.0036 RMSE: 0.0603 R^2 : 0.0936
08/10/2015	MAE: 0.1311 MSE: 0.0199 RMSE: 0.1410 R^2 : 0.0204	MAE: 0.0565 MSE: 0.0043 RMSE: 0.0659 R^2 : 0.1308	MAE: 0.0360 MSE: 0.0018 RMSE: 0.0427 R^2 : 0.1308
08/13/2015	MAE: 0.0800 MSE: 0.0096 RMSE: 0.0981 R^2 : 0.3373	MAE: 0.0348 MSE: 0.0018 RMSE: 0.0419 R^2 : 0.4245	MAE: 0.0399 MSE: 0.0027 RMSE: 0.0515 R^2 : 0.4245
08/16/2015	MAE: 0.0677 MSE: 0.0063 RMSE: 0.0791 R^2 : 0.0593	MAE: 0.0516 MSE: 0.0035 RMSE: 0.0596 R^2 : 0.5231	MAE: 0.0373 MSE: 0.0030 RMSE: 0.0544 R^2 : 0.5231
08/18/2015	MAE: 0.0848 MSE: 0.0078 RMSE: 0.0882 R^2 : 0.1027	MAE: 0.0495 MSE: 0.0028 RMSE: 0.0528 R^2 : 0.3269	MAE: 0.0183 MSE: 0.0007 RMSE: 0.0257 R^2 : 0.3269
کل ۷ روز	MAE: 0.0890 MSE: 0.0104 RMSE: 0.1020 R^2 : 0.0199	MAE: 0.0595 MSE: 0.0047 RMSE: 0.0682 R^2 : 0.1642	MAE: 0.0370 MSE: 0.0022 RMSE: 0.0468 R^2 : 0.1642

۴. نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج حاصل از صحت‌سنجی داده‌های اصلی ماهواره SMAP (با قدرت تفکیک مکانی 9 km) و همچنین صحت‌سنجی داده‌های تولید شده توسط مدل (با قدرت تفکیک مکانی 1 km) با داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی (SMAPVEX15)، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های حاصل از مدل استفاده شده در این پژوهش از نتایج بهتری نسبت به داده‌های اصلی ماهواره برخوردار می‌باشند. در عین حال مدل استفاده شده قابلیت تغییر قدرت تفکیک مکانی از 9 km به 1 km را دارا بوده و از این نظر برای استفاده در مقیاس‌های کوچکتر در جهت مدیریت کشاورزی و خشکسالی بهتر می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد می‌توان باتوجه به شرایط و خصوصیات هر منطقه و یافتن روشی به منظور کالیبره کردن داده‌های مدل باتوجه به داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی در آن منطقه‌ی خاص، داده‌های تولید شده توسط مدل را اصلاح کرده و به نتایج مناسب‌تری دست یافت.

1. Joseph, M.; Oakley, M.; Schira, Z. smapr: Acquisition and Processing of NASA Soil Moisture Active-Passive (SMAP) Data. R package version 0.1.2. 2018.
2. Mattiuzzi, M.; Detsch, F. MODIS: Acquisition and Processing of MODIS Products. R package version 1.1.6. 2019.
3. Naimi, B. rts: Raster Time Series Analysis. R package version 1.0-45. 2018.
4. Montzka, C.; Rötzer, K.; Bogen, H.; Sanchez, N.; Vereecken, H. A New Soil Moisture Downscaling Approach for SMAP, SMOS, and ASCAT by Predicting Sub-Grid Variability. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 427.
5. Abbaszadeh, P.; Moradkhani, H.; Zhan, X. Downscaling SMAP Radiometer Soil Moisture Over the CONUS Using an Ensemble Learning Method. *Water Resour. Res.* **2019**, *55*, 324–344.
6. Fang, B.; Lakshmi, V.; Bindlish, R.; Jackson, T.J. Downscaling of SMAP Soil Moisture Using Land Surface Temperature and Vegetation Data. *Vadose Zo. J.* **2018**, *17*.
7. Colliander, A.; Fisher, J.B.; Halverson, G.; Merlin, O.; Misra, S.; Bindlish, R.; Jackson, T.J.; Yueh, S. Spatial Downscaling of SMAP Soil Moisture Using MODIS Land Surface Temperature and NDVI During SMAPVEX15. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2017**, *14*, 2107–2111.
8. Knipper, K.R.; Hogue, T.S.; Franz, K.J.; Scott, R.L. Downscaling SMAP and SMOS soil moisture with moderate-resolution imaging spectroradiometer visible and infrared products over southern Arizona. *J. Appl. Remote Sens.* **2017**, *11*, 026021.
9. Zhao, W.; Sánchez, N.; Lu, H.; Li, A. A spatial downscaling approach for the SMAP passive surface soil moisture product using random forest regression. *J. Hydrol.* **2018**, *563*, 1009–1024.
10. Tu, L. Downscaling SMAP Soil Moisture Data Using MODIS Data, Louisiana State University, 2019.
11. Hijmans, R.J. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.6-7. 2017.
12. National Snow and Ice Data Center Available online: <https://nsidc.org/>.
13. Soil Moisture Active Passive Validation Experiment 2015 (SMAPVEX15) Available online: <https://smap.jpl.nasa.gov/science/validation/fieldcampaigns/SMAPVEX15/>.
14. Earthdata Available online: <https://earthdata.nasa.gov/>.
15. EOSDIS Worldview Available online: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.