

توسعه الگوریتم‌های بهبودیافته برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با استفاده از داده ماهواره‌های نوری/حرارتی

الهه غفاری^۱، کامران داوری^{۲*}، علیرضا فرید حسینی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۱

چکیده

در این پژوهش، یک روش جدید ریزمقیاس‌سازی بر پایه داده ماهواره‌های نوری به منظور بهبود مقیاس مکانی رطوبت خاک ماهواره فعال-غیرفعال رطوبت خاک (SMAP) با استفاده از داده‌های مقیاس بالای ماهواره مرئی/فروسرخ MODIS معرفی شده است. این مدل برپایه رابطه خطی فیزیکی بین رطوبت خاک و انعکاس تغییر یافته طول موج کوتاه فروسرخ (STR) می‌باشد. مدل فیزیکی با مدل دوزنقه‌ای تجربی به منظور ارزیابی عملکرد STR به جای دمای سطح خاک مقایسه شد. در این مطالعه، داده‌های ماهواره‌های MODIS و SMAP از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ مورد استفاده قرار گرفتند و رطوبت خاک ریزمقیاس شده با استفاده از داده‌های زمینی ایستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک COSMOS واقع شده در ایالت آریزونا آمریکا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با وجود اینکه هر دو الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی مقادیر RMSE را کاهش دادند، الگوریتم فیزیکی بطور کلی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم تجربی نشان می‌دهد. هرچند، رطوبت خاک ریزمقیاس شده توسط الگوریتم‌ها، ضریب همبستگی (R) کمتری نسبت به رطوبت خاک اندازه‌گیری شده دارد، اما مقادیر RMSE از ۰/۰۳۲ رطوبت خاک SMAP تا ۰/۰۳ و ۰/۰۳۱ و همچنین مقادیر انحراف از معیار از ۰/۰۱۱ رطوبت خاک SMAP تا ۰/۰۱۶ و ۰/۰۰۷۶ به ترتیب برای الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی فیزیکی و تجربی بهبود می‌یابند. بطور کلی، نتایج نشان داد که الگوریتم ریزمقیاس‌سازی فیزیکی پیشنهاد شده به خوبی مقیاس مکانی بزرگ رطوبت خاک ماهواره SMAP را بهبود می‌بخشد و جایگزین کردن دمای سطح خاک با STR می‌تواند دیدگاه جدیدی را نسبت به علم ریزمقیاس‌سازی نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ریزمقیاس‌سازی، رطوبت خاک، سنجش از دور مایکروویو غیرفعال، مقیاس مکانی

مقدمه

گیرد (Hain et al. 2011). سنسورهای غیرفعال مایکروویو که بطور مستقیم با رطوبت خاک نزدیک سطح ارتباط دارند، یکی از روش‌های مناسب بازیابی رطوبت خاک به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات پارامترهای سطحی زمین می‌باشند (Liu et al. 2011). یکی از سنسورهای مایکروویو غیرفعال برای بازیابی رطوبت خاک ماهواره رطوبت خاک فعال-غیرفعال ناسا^۴ (SMAP) می‌باشد که از باند L رادار و رادیومتر برای بازیابی رطوبت خاک استفاده می‌کند. هدف اصلی ماهواره SMAP تهیه نقشه‌های رطوبت خاک در مقیاس مکانی متوسط (۹ کیلومتر) با ترکیب داده‌های رادیومتر (۳۶ کیلومتر) و رادار (۳ کیلومتر) بود (Entekhabi et al. 2010). به دلیل نقص فنی و از کارافتادن سیستم راداری، در حال حاضر ماهواره SMAP تنها قادر به فراهم کردن نقشه‌های رطوبت خاک در مقیاس‌های مکانی بزرگ

رطوبت خاک بدلیل نقش اصلی در کنترل آب، انرژی و شار کربن بین سطح زمین و اتمسفر، یک پارامتر اساسی در سیستم آب‌وهوایی محسوب می‌شود (McColl et al. 2017). با توسعه تکنولوژی سنجش از دور، نقشه‌های جهانی رطوبت خاک تهیه شده توسط ماهواره‌ها می‌تواند به عنوان یک منبع داده با ارزش مورد استفاده قرار

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: k.davary@gmail.com)

حرارتی و تاثیر آن بر صحت رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده پیشنهاد کردند (Stisen et al. 2008). هرچند، این روش ریزمقیاس‌سازی بهبود قابل ملاحظه‌ای بر بازیابی رطوبت خاک حاصله از ماهواره AMSR-E^{۱۲} نشان نداد. به عنوان جایگزین شاخص بازده تبخیری خاک، گروه دیگری از محققان شاخص رطوبت خاک نرمال‌شده^{۱۳} که نشان‌دهنده وضعیت رطوبت موجود در خاک است، در یک روش ریزمقیاس‌سازی نیمه تجربی به منظور ریزمقیاس کردن رطوبت خاک SMAP از مقیاس ۳۶ کیلومتر با استفاده از محصولات انعکاس سطحی خاک MODIS در باندهای نزدیک فرو سرخ و سرخ مورد استفاده قرار دادند (Chen et al. 2017). نتایج حاصله از انعکاس سطحی در الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی عملکرد خوبی را نشان داد. روش‌های قبلی ریزمقیاس‌سازی برای ماهواره‌هایی که قابلیت اندازه‌گیری باندهای نوری و حرارتی را دارند، کاربردی می‌باشد. قابل توجه است که چندین ماهواره از قبیل Sentinel-2 وجود دارند که فقط قابلیت اندازه‌گیری در باندهای نوری را دارا هستند. بنابراین استفاده از داده‌های نوری از قبیل انعکاس سطحی^{۱۴} به جای داده‌های حرارتی می‌تواند یک جایگزین نویدبخش به منظور دستیابی به مدل‌های ریزمقیاس‌سازی ساده باشد. از سوی دیگر، استفاده از داده‌های حرارتی از قبیل دمای سطحی خاک در روش‌های ریزمقیاس‌سازی دارای معایبی است که صحت این روش‌ها را کاهش می‌دهد (Jian et al. 2017). همان‌طور که می‌دانیم، دمای سطح خاک نه تنها به رطوبت خاک بلکه به پارامترهای جوی و محیطی از قبیل دمای هوای نزدیک به سطح، رطوبت و سرعت باد بستگی دارد (Mallick et al. 2009). بنابراین مدل‌های ریزمقیاس‌سازی مثلی حرارتی بسیار وقت‌گیر و از نظر محاسباتی نیازمند پارامترسازی منحصر بفرد برای هر مشاهده می‌باشند. اخیراً، یک مدل دوزنقه‌ای نوری جدید به منظور تهیه نقشه‌های رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel-2 معرفی گردید. این مدل از رابطه خطی بین رطوبت خاک و انعکاس تغییر یافته طول موج کوتاه فرو سرخ^{۱۵} (STR) نشأت می‌گیرد و تخمین‌های رطوبت خاک حجمی را با خطای ۵ درصد انجام می‌دهد (Sadeghi et al. 2017). از آنجایی که این مدل فیزیکی برپایه داده‌های نوری است، تنها نیازمند یک پارامترسازی کلی برای هر منطقه می‌باشد زیرا انعکاس سطحی به طور معنادار با تغییر پارامترهای جوی و محیطی، تغییر نمی‌کند. در این مطالعه از این مدل فیزیکی، برای نخستین بار به عنوان یک روش ریزمقیاس‌سازی استفاده گردید. بر اساس این دیدگاه، این مدل

می‌باشد. بنابراین، استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌سازی مکانی^۱ رطوبت خاک برای کاربردهای هیدرومتروئولوژیکی، کشاورزی و منطقه‌ای ضروری می‌باشند (Das et al. 2011).

در مقایسه با سنجش از دور مایکروویو غیرفعال^۲، سنسورهای حرارتی/نوری^۳ دارای توانایی بازیابی رطوبت خاک سطحی در مقیاس مکانی کوچک‌تر هستند. هرچند، داده‌های ماهواره‌های حرارتی حساسیت زیادی نسبت به پارامترهای محیطی از قبیل شرایط هواشناسی و پوشش گیاهی دارند. همچنین، اندازه‌گیری‌های ماهواره‌های حرارتی/نوری تحت تاثیر وجود ابر و گردوغبار قرار می‌گیرند (Adegoke and Carleton, 2002).

روش‌های زیادی جهت ادغام مشاهدات مایکروویو و داده‌های حرارتی/نوری برپایه مفهوم مثلث^۴ (کارلسون و همکاران، ۱۹۹۴) یا دوزنقه^۵ (موران و همکاران، ۱۹۹۴) که ارتباط بین پارامترهای مرئی/فروسرخ نسبت به وضعیت رطوبت خاک را نشان می‌دهند، پیشنهاد شده‌اند (Petroopoulos et al. 2009). بطور کلی، دو روش برای ترکیب داده‌های مایکروویو و حرارتی/نوری وجود دارد: تجربی (چوهان و همکاران، ۲۰۰۳) و فیزیکی (مرلین و همکاران، ۲۰۰۸). محققان زیادی از مفهوم مثلث بر مبنای داده‌های حرارتی از قبیل دمای سطح خاک و شاخص گیاهی تفاوت نرمال‌شده^۶ (NDVI) به عنوان روش ریزمقیاس‌سازی استفاده کرده‌اند. یک معادله خطی ساده به منظور ریزمقیاس کردن رطوبت خاک سنسور SSM/I^۷ با استفاده از داده‌های دمای سطح خاک اندازه‌گیری شده توسط AVHRR^۸ در مقیاس ۱ کیلومتر اجرا شد (Chauhan et al. 2003). مزیت این روش حداقل استفاده از داده‌های فرعی برای ریزمقیاس‌سازی می‌باشد. الگوریتم دیگری برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده ماهواره SMOS^۹ به مقیاس ۱ کیلومتر با استفاده از مفهوم مثلث ارائه شد (Piles et al. 2011). در این الگوریتم، اضافه کردن دمای روشنایی^{۱۰} برای تخمین بهتر نقشه‌های رطوبت خاک در مقیاس کوچک پیشنهاد شد. همچنین، این محققین استفاده از مشاهدات MODIS^{۱۱} را به جای سایر ماهواره‌های نوری پیشنهاد کردند. گروه دیگری از محققان، تغییرات دمای سطح خاک با گذر زمان را به عنوان راه‌حلی برای کاهش خطای میانگین داده‌های

- 1- Spatial downscaling methods
- 2- Passive microwave remote sensing
- 3- Optical/Thermal sensors
- 4- Triangle concept
- 5- Trapezoid concept
- 6- Normalized Difference Vegetation Index
- 7- Special Sensor Microwave Imager
- 8- Advanced Very High Resolution Radiometer
- 9- Soil Moisture and Ocean Salinity
- 10- Brightness Temperature
- 11- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

12- Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System Sensor

13- Normalized Soil Moisture Index

14- Surface Reflectance

15- Shortwave Inferred Transformed Reflectance

اندازه‌گیری میانگین رطوبت خاک برپایه شبیه‌سازی جابجایی نوترون بر روی محدوده یک دایره به شعاع ۳۳۰ متر تا عمق ۵۰ سانتی‌متر هستند. بدین‌صورت COSMOS توانایی ثبت داده رطوبت خاک در مقیاس میانگین بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده نقطه‌ای و داده‌های ثبت‌شده توسط ماهواره‌ها را دارا هستند (Zreda et al. 2012). محدوده زمینی اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط COSMOS تقریباً معادل یک پیکسل MODIS (۱ کیلومتر) است که این امر باعث می‌شود داده‌های COSMOS به‌عنوان یک گزینه برتر برای ارزیابی الگوریتم‌های تخمینی رطوبت خاک از داده‌های MODIS باشد. در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی بهتر رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده، داده‌های زمینی ثبت‌شده در نزدیکترین زمان به گذر ماهواره SMAP مورد استفاده قرار گرفتند.

داده‌های ماهواره (MODIS و SMAP)

ماهواره فعال-غیرفعال رطوبت خاک SMAP توسط سازمان فضایی ناسا در ۳۱ ژانویه ۲۰۱۵ به‌منظور تهیه نقشه‌های رطوبت خاک با دقت ۰/۰۴ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و مقیاس زمانی ۲ تا ۳ روز پرتاب شد. محصول رطوبت خاک مورد استفاده در این پژوهش $L3_SM_P$ ، رطوبت خاک بازبایی‌شده از باند L با فرکانس ۱/۴۱ گیگاهرتز رادیومتر SMAP در مقیاس ۳۶ کیلومتر EASE2 grid می‌باشد.

ماهواره Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer که به اختصار MODIS شناخته می‌شود، دارای مقیاس زمانی ۱ تا ۲ روز و ۳۶ باند می‌باشد. در این تحقیق، ورژن ۶ داده‌های مودیس در تقریباً پوشش بدون ابر شامل: (۱) دمای سطح خاک^۲، (۲) انعکاس سطح خاک^۳ و (۳) NDVI مورد استفاده قرار گرفتند. باندهای سرخ (باند ۱ مودیس) و نزدیک فرو سرخ (باند ۲ مودیس) برای محاسبه NDVI و همچنین باند ۷ مودیس به‌عنوان انعکاس سطح خاک مورد استفاده قرار گرفتند.

محدوده زمانی مورد مطالعه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ انتخاب شد. جدول ۱ مجموعه داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. تعداد تصاویر مورد استفاده در روزهای همپوشانی داده‌های ماهواره‌های (ascending/descending) SMAP و MODIS (Terra/Aqua) شامل ۲۹۰ تصویر می‌باشد.

پیشرفته می‌تواند یک مسیر جدید برای الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک معرفی نماید.

در این تحقیق، مدل دوزنقه‌ای نوری پیشنهادشده توسط صادقی و همکاران (۲۰۱۷) برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک ماهواره SMAP از مقیاس ۳۶ کیلومتری به مقیاس ۱ کیلومتری MODIS استفاده گردید. اثر جایگزینی دمای سطح خاک مورد استفاده در مدل‌های مثلثی مرسوم با STR نیز مورد بررسی قرار گرفت. این روش ریزمقیاس‌سازی یک مدل ساده مستقل از داده‌های زمینی و تنها برپایه مشاهدات ماهواره‌ای می‌باشد که دارای مزیت‌های بیشتری نسبت به مدل‌های مثلثی تجربی مرسوم است.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، قسمتی از ایالت آریزونا آمریکا شامل ۹۰ پیکسل ماهواره SMAP و ۴ ایستگاه ثبت رطوبت خاک COSMOS^۱ به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید (شکل ۱). این منطقه به دلیل در دسترس بودن داده‌های رطوبت خاک در مدت مورد مطالعه انتخاب شده است.

۴ ایستگاه COSMOS واقع شده در جنوب شرقی آریزونا که برای این پژوهش انتخاب شده‌اند به نام‌های Lucky، Kendall، Santa Rita Mesquite و Santa Rita Creosote Hills شناخته می‌شوند. ایستگاه‌های Lucky Hills و Kendall در حوضه آبریز آزمایشی Walnut Gulch واقع شده‌اند. پوشش گیاهی ایستگاه Kendall اغلب چمن و بوته‌های پراکنده می‌باشد (A. et al. 2007)، در حالی که پوشش گیاهی ایستگاه Lucky Hills اغلب چمنزار و درختچه می‌باشد (Ritchie et al. 2005). آب‌وهوای حوضه آبریز Walnut Gulch نیمه‌خشک با میانگین دمای سالانه ۱۷٫۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین سالانه بارندگی معادل ۳۵۰ میلی‌متر و بافت خاک عمدتاً لوم شنی است. ایستگاه‌های Santa Rita Mesquite و Santa Rita Creosote در منطقه آزمایشی Santa Rita واقع شده‌اند. منطقه آزمایشی Santa Rita با پوشش گیاهی بوته‌ای و آب‌وهوای نیمه‌خشک با میانگین بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر و بافت خاک لوم شنی می‌باشد (Zreda et al. 2012).

داده‌های رطوبت خاک زمینی اندازه‌گیری شده توسط

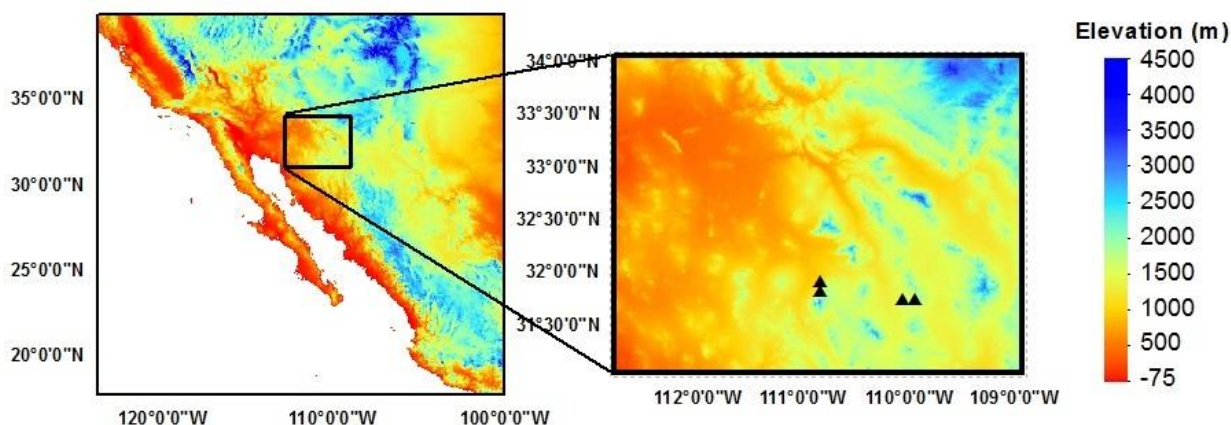
COSMOS سنسورهای

به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی، مشاهدات COSMOS به‌عنوان منبع اصلی داده رطوبت خاک زمینی مورد استفاده قرار گرفت. پروپ‌های COSMOS دارای قابلیت

2- Land Surface Temperature

3- Surface Reflectance

1- Cosmic-ray Soil Moisture Observing System



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در ایالت آریزونا و ویژگی‌های توپوگرافی استخراج شده از داده‌های توپوگرافی جهانی (Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30)). ایستگاه‌های COSMOS با علامت (▲) نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- جزئیات داده‌های رطوبت خاک زمینی و اندازه‌گیری شده توسط ماهواره

عنوان داده	نام اختصاری	مقیاس زمانی	مقیاس مکانی	واحد
رطوبت خاک SMAP	L3_SM_P	۲ روز	۳۶ کیلومتر	سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب
دمای سطح خاک MODIS	MOD11A1-MYD11A1	روزانه	۱ کیلومتر	درجه کلوین
انعکاس سطحی MODIS	MOD09GA-MYD09GA	روزانه	۱ کیلومتر	-
NDVI-MODIS	NDVI	روزانه	۱ کیلومتر	-
رطوبت خاک COSMOS	SM12H	ساعتی	۱~ کیلومتر	سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب
بارش	-	روزانه	-	میلیمتر بر روز

مقدار رطوبت خاک نرمال شده (θ_N) به صورت یک الگوریتم ریزمقیاس‌سازی تعریف شد تا با استفاده از داده‌های دمای سطح خاک و NDVI مودیس، رطوبت خاک SMAP را از مقیاس بزرگ به مقیاس کوچک تبدیل کند:

$$\theta_{DS} = \theta_{SMAP} \left(\frac{\theta_N}{\overline{\theta_N}} \right) \quad (1)$$

$$\theta_N = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} \quad (2)$$

که در آن، θ_{DS} و θ_{SMAP} به ترتیب رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده در مقیاس ۱ کیلومتر (پیکسل مودیس) و رطوبت خاک در مقیاس بزرگ SMAP (۳۶ کیلومتر) می‌باشند. θ_N رطوبت خاک نرمال شده با استفاده از حداقل رطوبت خاک در خاک خشک (θ_d) و حداکثر رطوبت خاک در خاک مرطوب (θ_w) و $\overline{\theta_N}$ معادل میانگین رطوبت خاک نرمال شده در پیکسل بزرگ مقیاس SMAP (۳۶ کیلومتر) می‌باشند.

می‌توان فرض کرد که یک رابطه معکوس خطی بین رطوبت خاک سطح و دمای سطح خاک وجود دارد:

$$\frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{LST_d - LST}{LST_d - LST_w} \quad (3)$$

الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی^۱

الگوریتم تجربی^۲

روش دوزنقه/مثلث بر پایه فضای ترسیمی نقطه‌ای با استفاده از دمای سطح خاک و شاخص گیاهی استخراج شده از داده‌های ماهواره‌های نوری و حرارتی در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با سنجش از دور پارامترهای سطح از قبیل رطوبت خاک، تبخیر-تعرق سطحی و دمای سطح خاک مورد استفاده قرار گرفته است (Petropoulos et al. 2009). تعدادی از این پژوهش‌ها از فضای مثلث/دوزنقه دمای سطح خاک-شاخص پوشش گیاهی برای تخمین رطوبت خاک استفاده کرده‌اند. مدل دوزنقه نوری/حرارتی شامل فضای مابین دمای سطح خاک-شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده بر مبنای توزیع پیکسل ماهواره برای یک منطقه خاص می‌باشد. اولین الگوریتم ریزمقیاس‌سازی مورد استفاده در این پژوهش برپایه یک الگوریتم تجربی به عنوان یک مدل حرارتی/نوری که قابلیت تخمین رطوبت خاک را داراست، می‌باشد. رابطه خطی بین رطوبت خاک و

- 1- Downscaling algorithm
- 2- Empirical algorithm

خاک خشک (θ_d) و حداکثر رطوبت خاک در خاک مرطوب (θ_w) می‌باشند. در واقع، این پارامترها انعکاس تبدیل‌یافته فرو سرخ طول موج کوتاه در خاک خشک و خاک مرطوب می‌باشند که از فضای دوزنقه بین انعکاس تبدیل‌یافته فرو سرخ طول موج کوتاه- شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده NDVI بدست می‌آیند. همچنین، رابطه بین انعکاس تبدیل‌یافته فرو سرخ طول موج کوتاه و انعکاس فرو سرخ طول موج کوتاه که از دقت بالایی برخوردار است، برطبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$STR = \frac{(1-R_{SWIR})^2}{2R_{SWIR}} \quad (9)$$

جایی که، R_{SWIR} انعکاس سطحی در باند فروسرخ طول موج کوتاه می‌باشد که معادل باند ۷ مودیس است.

ضرایب STR_d و STR_w شیب و عرض از مبدا لبه‌های خشک و تر فضای دوزنقه‌ای با در نظر گرفتن مقادیر NDVI هستند. قابل توجه است که برای اجرای این الگوریتم فیزیکی تنها یک پارامترسازی کلی برای هر منطقه لازم است که این امر منجر به توسعه یک روش ریزمقیاس‌سازی ساده و کاربردی می‌شود. این ضرایب از معادلات زیر قابل محاسبه هستند:

$$STR_d = slope_d * NDVI + intercept_d \quad (10)$$

$$STR_w = slope_w * NDVI + intercept_w \quad (11)$$

با استفاده از این ضرایب، رطوبت نرمال‌شده θ_N برای اجرا در الگوریتم ریزمقیاس‌سازی فیزیکی (معادله ۷) بدست خواهد آمد.

نتایج و بحث

پارامترسازی الگوریتم‌ها^۳

الگوریتم‌های تجربی و فیزیکی برپایه توزیع پیکسل^۴ درون فضای LST-NDVI و STR-NDVI پارامترسازی شدند. پارامترهای لبه خشک و تر^۵ به وسیله بازرسی بصری فضای دوزنقه‌ای از طریق در نظر گرفتن خطوط مستقیم بر لبه‌های فضای دوزنقه که اکثریت پیکسل‌ها را شامل شود، تعیین شدند. در این پژوهش، بازرسی بصری^۶ توزیع پیکسل‌ها نسبت به سایر روش‌ها از جمله روش رگرسیون خطی انتخاب شد. این روش به دلیل حذف پیکسل‌های مافوق‌اشباع و نادیده گرفتن داده‌های پرت از صحت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است (Carlson, 2013). برای ساختن یک شکل بهینه از فضای مثلث/دوزنقه، استفاده از سری زمانی داده‌ها در منطقه مورد مطالعه یا انتخاب دامنه گسترده‌ای از داده‌های LST-NDVI و STR-NDVI، نیاز است، زیرا بیشترین محدودیت مفهوم فضای

که در آن، LST_d و LST_w دمای سطح خاک در خاک خشک و مرطوب هستند که از فضای دوزنقه دمای سطح خاک- شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده NDVI بدست می‌آیند. ضرایب LST_d و LST_w شیب و عرض از مبدا لبه‌های خشک و تر فضای دوزنقه‌ای هستند که با در نظر گرفتن مقادیر NDVI برای هر روز و منطقه مشخص با استفاده از معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$LST_d = slope_d * NDVI + intercept_d \quad (4)$$

$$LST_w = slope_w * NDVI + intercept_w \quad (5)$$

θ_N با استفاده از ضرایب بدست‌آمده از معادلات (۴) و (۵) بدست آمد تا در الگوریتم ریزمقیاس‌سازی تجربی (معادله ۱) برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک در مقیاس کوچک اجرا شود. شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده NDVI از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}} \quad (6)$$

که در آن، R_{NIR} انعکاس باند فروسرخ و R_{red} انعکاس باند قرمز می‌باشند.

الگوریتم فیزیکی^۱

مدل دوزنقه‌ای نوری^۲ یک روش جدید را معرفی می‌کند که در آن، پارامتر دمای سطحی خاک در الگوریتم تجربی به وسیله پارامتر انعکاس تبدیل‌یافته فرو سرخ طول موج کوتاه جایگزین می‌شود. پارامتر انعکاس تبدیل‌یافته فرو سرخ طول موج کوتاه با رطوبت خاک موجود در خاک در دامنه طول موج نوری، رابطه خطی فیزیکی با دقت بالا دارد. این الگوریتم تنها نیازمند یک کالیبراسیون در کل زمان مورد مطالعه برای یک منطقه خاص برپایه توزیع پیکسل بین فضای دوزنقه‌ای انعکاس تبدیل‌یافته فرو سرخ طول موج کوتاه- شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده می‌باشد. در این پژوهش، یک روش جدید ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک در مقیاس کوچک بصورت زیر تعریف شده است:

$$\theta_{DS} = \theta_{SMAP} \left(\frac{\theta_N}{\theta_N} \right) \quad (7)$$

پارامترهای معادله قبلا توضیح داده شده‌اند. برپایه این الگوریتم فیزیکی، یک رابطه خطی بین رطوبت خاک سطحی و پارامتر انعکاس تبدیل‌یافته فرو سرخ طول موج کوتاه بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{STR - STR_d}{STR_w - STR_d} \quad (8)$$

که در آن، STR انعکاس تبدیل‌یافته فرو سرخ طول موج کوتاه و STR_d و STR_w به ترتیب مقادیر STR در حداقل رطوبت خاک در

3- Algorithms Parametrization

4- Pixel distribution

5- Wet and dry edges parameters

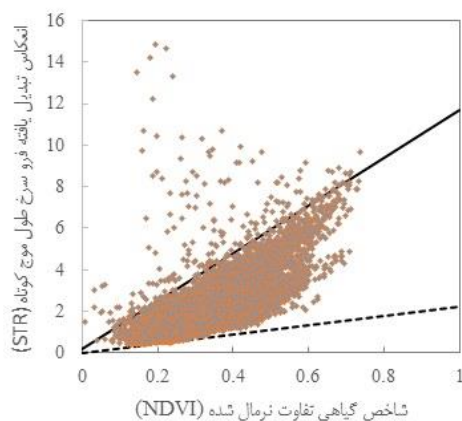
6- Visual inspection

1- Physical algorithm

2- Optical Trapezoid Model

موجود در شرایطی چون بارندگی شدید یا وجود آب‌های سطحی، مقدار رطوبت نرمال شده θ_N برای پیکسل‌هایی که مقادیر انعکاس تبدیل یافته فرو سرخ طول موج کوتاه (STR) بیشتر از انعکاس تبدیل یافته فرو سرخ طول موج کوتاه در خاک مرطوب (STR_W) باشد، معادل یک در نظر گرفته شد. همانطور که کارلسون و همکاران (۲۰۱۳) نیز پیشنهاد کردند که پیکسل‌های فوق‌اشباع موجود در فضای LST-NDVI، نادیده گرفته شوند.

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، لبه‌های دوزنقه الگوریتم فیزیکی برای هر دو لبه خشک و تر دارای شیب مثبت بدست آمد. شیب مثبت نشان‌دهنده این است که انعکاس تبدیل یافته فرو سرخ طول موج کوتاه و NDVI برای مناطق با پوشش گیاهی متراکم بیشتر است. با استفاده از این پارامترها، θ_N برای هر مقدار از فضای LST-NDVI و STR-NDVI قابل محاسبه است.



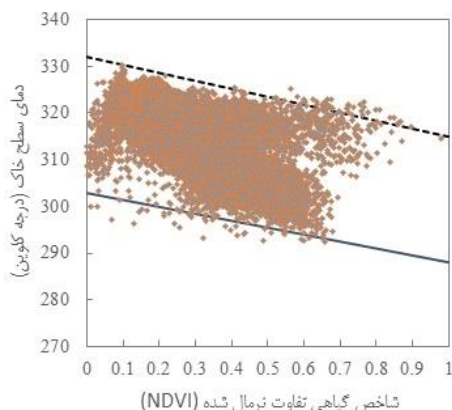
شکل ۳ - توزیع پیکسل درون فضای STR-NDVI برای تمامی تصاویر مودیس

نقشه‌های رطوبت خاک

یک نمونه از کاربرد الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی برای یکی از روزهای انتخابی (۲۰۱۷/۰۴/۲۰) در شکل ۴ نشان داده شده است. بطور کلی، نقشه‌های رطوبت خاک نشان می‌دهند که الگوی مکانی الگوریتم‌ها تقریباً یکسان است و هر دو الگوریتم به خوبی رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده را نمایش می‌دهند. به عبارت دیگر، تنوع مکانی رطوبت خاک به دست آمده از الگوریتم‌های تجربی و فیزیکی ریزمقیاس‌سازی در مقایسه با رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط SMAP بیشتر است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، جزئیات مکانی به عنوان مثال در مناطق با ارتفاع بیشتر در قسمت شمال شرقی نقشه که دارای بارندگی و پوشش گیاهی بیشتر نسبت به سایر مناطق است، کاملاً قابل تشخیص است. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم فیزیکی توانایی بیشتری در نشان دادن جزئیات مکانی رطوبت خاک را داراست.

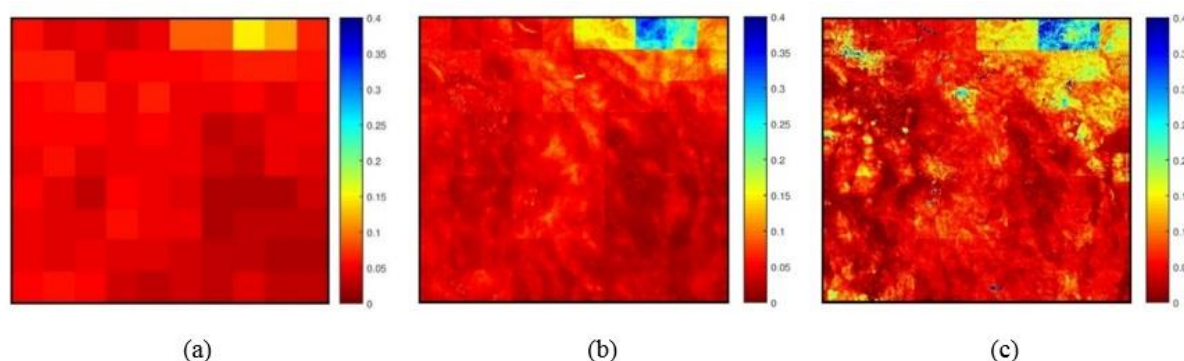
مثلاً/دوزنقه این است که تشخیص شکل مناسب مثلثی/دوزنقه‌ای در توزیع پیکسل نیازمند تعداد زیاد نقطه با طیف گسترده‌ای از رطوبت خاک و پوشش گیاهی می‌باشد (Carlson, 2007). بنابراین، به منظور دستیابی به صحت بیشتر تخمین ضرایب الگوریتم‌ها، داده‌های بیشتری در سری زمانی از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ در نظر گرفته شدند.

توزیع داده‌ها درون فضای دوزنقه‌ای LST-NDVI برای روز ۲۰۱۷/۰۴/۲۰ در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، پارامترسازی مدل برای الگوریتم تجربی برای هر تاریخ مشخص بطور جداگانه انجام شد زیرا دمای سطح خاک علاوه بر رطوبت خاک، به فاکتورهای محیطی نیز بستگی دارد. بر این اساس، برای الگوریتم تجربی امکان پارامترسازی کلی وجود ندارد. نتایج نشان داد که فضای دوزنقه‌ای LST-NDVI برای تمام روزها تقریباً مشابه و دارای شیب منفی در لبه‌های خشک و تر می‌باشد. دلیل منفی بودن شیب‌های پلیگون این است که پوشش گیاهی عمدتاً خنک‌تر از خاک خشک می‌باشد که این امر باعث می‌شود شیب لبه‌ها با افزایش NDVI به سمت دمای کمتر تمایل داشته باشد.



شکل ۲ - توزیع داده‌ها درون فضای دوزنقه‌ای LST-NDVI برای روز ۲۰۱۷/۰۴/۲۰

شکل ۳ توزیع پیکسل درون فضای STR-NDVI را برای تمامی تصاویر مودیس نشان می‌دهد. توانایی پارامترسازی کلی الگوریتم فیزیکی نشان‌دهنده این است که این الگوریتم مستقل از زمان عمل می‌کند. بنابراین می‌تواند به عنوان یک مدل موثر برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک باشد. قابل توجه است که رابطه بین رطوبت خاک و پارامتر انعکاس تبدیل یافته فرو سرخ طول موج کوتاه برای خاک‌های با رطوبت فوق‌اشباع معتبر نمی‌باشد، به دلیل اینکه با به اشباع رسیدن خاک، رطوبت خاک ثابت می‌ماند درحالی‌که پارامتر انعکاس تبدیل یافته فرو سرخ طول موج کوتاه همچنان افزایش خواهد یافت. در این پژوهش، به منظور فیلتر کردن پیکسل‌های فوق‌اشباع



شکل ۴ - نقشه‌های رطوبت خاک برای منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۲۰/۰۴/۱۳۹۷ (a) رطوبت خاک اندازه‌گیری شده (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) توسط SMAP در مقیاس ۳۶ کیلومتر، (b) رطوبت خاک ریزمقیاس شده (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) توسط الگوریتم تجربی در مقیاس ۱ کیلومتر و (c) رطوبت خاک ریزمقیاس شده (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) توسط الگوریتم فیزیکی در مقیاس ۱ کیلومتر

به COSMOS می‌باشد.

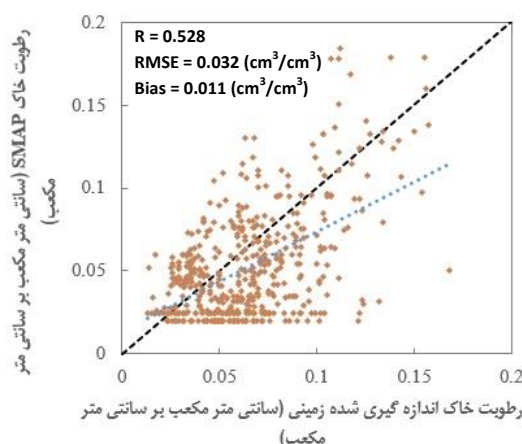
شکل ۶ مقایسه بین رطوبت خاک SMAP و COSMOS با استفاده از الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی تجربی و فیزیکی را در مقیاس مکانی ۱ کیلومتر برای تمامی روزهای انتخابی نشان می‌دهد. بادر نظر گرفتن این نکته که هدف اصلی ماهواره SMAP تهیه نقشه‌های رطوبت خاک با دقت معادل 0.04 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب است، نتایج حاصل از محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا بین رطوبت خاک ریزمقیاس شده با استفاده از الگوریتم‌های به کار گرفته شده در این پژوهش و داده‌های زمینی نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک را با دقت بهتر از ماهواره تخمین می‌زنند. با این وجود، رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط SMAP بیشترین ضریب همبستگی (0.53) را با داده‌های رطوبت خاک زمینی COSMOS داراست که همان‌طور که قبلاً گفته شد، این امر به دلیل حساسیت بیشتر سیگنال‌های مایکروویو با فرکانس پایین (باند L) نسبت به سیگنال‌های نوری می‌باشد. علاوه بر این، هرچند الگوریتم ریزمقیاس‌سازی تجربی در رطوبت‌های بالا، مقدار رطوبت خاک را بهتر تخمین می‌زند ولی بطور کلی، الگوریتم فیزیکی در تخمین رطوبت خاک تاحدودی بهتر عمل می‌کند. مقادیر ضریب همبستگی و همچنین ریشه میانگین مربعات خطا بین رطوبت خاک ریزمقیاس شده با استفاده از الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی و داده‌های زمینی به ترتیب معادل 0.479 و 0.03 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برای الگوریتم فیزیکی و 0.464 و 0.031 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برای الگوریتم تجربی حاصل شد. پراکندگی پوشش گیاهی و خاک خشک موجود در منطقه مورد مطالعه باعث کمتر شدن دقت الگوریتم تجربی نسبت به الگوریتم فیزیکی می‌شود، به دلیل اینکه رابطه بین رطوبت و دمای سطح خاک عمدتاً بصورت غیرخطی برای خاک‌های خشک می‌باشد.

ارزیابی صحت الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی

با در نظر گرفتن مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط سایت‌های COSMOS در بازه زمانی مورد مطالعه، تغییرات رطوبت خاک از صفر سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب در شرایط کاملاً خشک تا 0.4 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب در روزهای بارانی و شرایط بسیار مرطوب می‌باشد. به دلیل اینکه منطقه مورد مطالعه در شرایط آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک با بارندگی محدود واقع شده است و همچنین بافت خاک این منطقه از نوع درشت‌بافت با زهکشی مناسب است، رطوبت خاک در شرایط مرطوب مقادیر زیادی را شامل نمی‌شود. با این وجود، این مقادیر رطوبت خاک دارای تغییرات مناسب برای ارزیابی الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی می‌باشند.

شکل ۵ رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط SMAP در منطقه مورد مطالعه در برابر داده‌های زمینی رطوبت خاک ثبت شده توسط سایت‌های COSMOS را برای همه روزهای انتخابی نشان می‌دهد. ارزیابی آنالیزهای آماری نشان می‌دهد که رطوبت خاک SMAP دارای ضریب همبستگی 0.53 ^۱ و ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) معادل 0.032 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب در مقایسه با رطوبت خاک COSMOS می‌باشد. صحت بالای این محاسبات به این دلیل است که ماهواره SMAP از باند L به عنوان طول موج مایکروویو با فرکانس پایین استفاده می‌کند. باند L نسبت به اندازه‌گیری رطوبت خاک بسیار حساس است و تخمین‌های دقیقی از رطوبت خاک ارائه می‌دهد. همچنین نتایج حاصله از محاسبه اریبی^۳ نشان می‌دهد که SMAP رطوبت خاک را بیشتر از مقدار میانگین تخمین می‌زند که این امر به دلیل عمق نفوذ کوچک‌تر SMAP نسبت

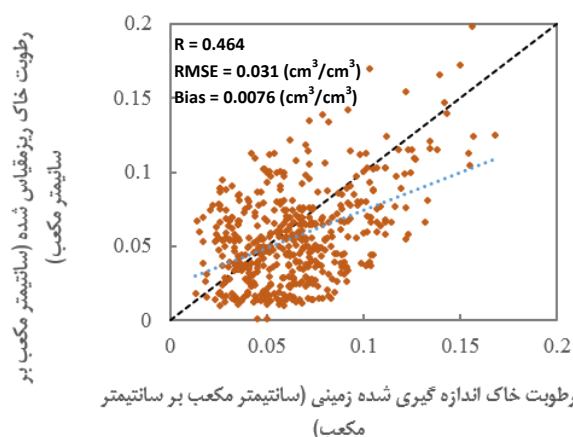
- 1- Correlation Coefficient
- 2- Root Mean Square Error
- 3- Bias



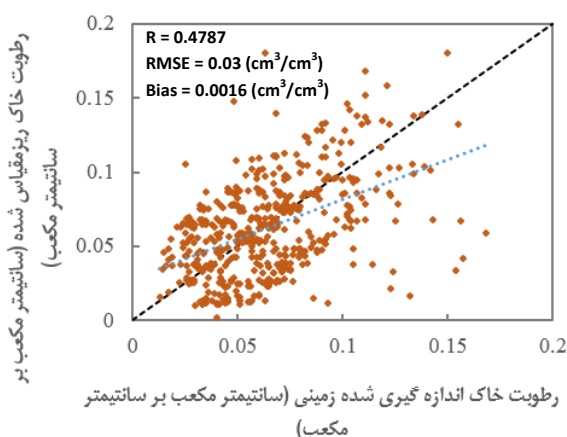
شکل ۵- رطوبت خاک اندازه گیری شده توسط SMAP در منطقه مورد مطالعه در برابر داده های زمینی رطوبت خاک ثبت شده توسط سایت های COSMOS

مقادیر انحراف معیار دارای اختلاف معنادار نیستند که این امر به دلیل حذف نقاط مافوق اشباع رطوبت خاک در محاسبات و همچنین استفاده از تصاویر بدون ابر MODIS می باشد.

از سوی دیگر، رطوبت خاک ارتباط قوی تری با پارامتر انعکاس تبدیل یافته فرو سرخ طول موج کوتاه (STR) نسبت به دمای سطح خاک دارد. همچنین ارزیابی آریبی نشان می دهد که هر دو الگوریتم ها مقادیر رطوبت خاک را بیشتر از مقدار میانگین تخمین زده اند. هر چند،



(a)



(b)

شکل ۶- مقایسه بین رطوبت خاک SMAP و COSMOS با استفاده از الگوریتم های ریزمقیاس سازی (a) تجربی و (b) فیزیکی در مقیاس مکانی ۱ کیلومتر برای تمامی روزهای انتخابی

رطوبت خاک SMAP استفاده کردند. نتایج حاصل از ضریب همبستگی و RMSE پژوهش آن ها به ترتیب معادل ۰/۳۸ و ۰/۰۴ سانتیمتر مکعب بر سانتیمتر مکعب به دست آمده است که نشان دهنده عملکرد بهتر روش فیزیکی به کار گرفته شده در این پژوهش می باشد. همچنین، کنیپر و همکاران (۲۰۱۷)، از روش تجربی مشابه با روش

نتایج این بخش را می توان با نتایج پژوهش های مشابه در استفاده از الگوریتم های تجربی و فیزیکی به منظور ریزمقیاس سازی رطوبت خاک ماهواره SMAP، مقایسه کرد. از جمله، چن و همکاران (۲۰۱۷) از یک روش فیزیکی برپایه استفاده از داده های نوری دمای سطح خاک و انعکاس سطحی ماهواره MODIS برای ریزمقیاس سازی

and Soil Moisture from Satellite Imagery. *Sensors*, 7, 1612

Carlson, T.N. 2013. Triangle Models and Misconceptions. *International Journal of Remote Sensing Applications*, 3, 155-158

Carlson, T.N., Gillies, R.R., & Perry, E.M. 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9, 161-173

Chauhan, N.S., Miller, S., & Ardanuy, P. 2003. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 4599-4622

Chen, N., He, Y., & Zhang, X. 2017. NIR-Red Spectra-Based Disaggregation of SMAP Soil Moisture to 250 m Resolution Based on OzNet in Southeastern Australia. *Remote Sensing*, 9, 51

Das, N., Entekhabi, D., & G. Njoku, E. 2011. An Algorithm for Merging SMAP Radiometer and Radar Data for High-Resolution Soil-Moisture Retrieval .

Entekhabi, D., G. Njoku, E., E. O'Neill, P., Kellogg, K.H., Crow, W., Edelstein, W.N., Entin, J., D. Goodman, S., J. Jackson, T., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J., D. Koster, R., Martin, N., McDonald, K., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J., & van Zyl, J. 2010. The Soil Moisture Active and Passive (SMAP) mission .

Hain, C.R., Crow, W.T., Mecikalski, J.R., Anderson, M.C., & Holmes, T. 2011. An intercomparison of available soil moisture estimates from thermal infrared and passive microwave remote sensing and land surface modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116

Jian, P., Alexander, L., Olivier, M., & C., V.N.E. 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 55, 341-366

Knipper, K., Hogue, T., Franz, K., & Scott, R. 2017. Downscaling SMAP and SMOS soil moisture with moderate-resolution imaging spectroradiometer visible and infrared products over southern Arizona. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11, 026021

Liu, Y.Y., Parinussa, R., A. Dorigo, W., de Jeu, R., Wagner, W., van Dijk, A., McCabe, M., & Evans, J. 2011. Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals.

Mallick, K., Bhattacharya, B.K., & Patel, N.K. 2009. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on

تجربی استفاده شده در این پژوهش به منظور ریزمقیاس سازی رطوبت خاک ماهواره SMAP با استفاده از مشاهدات دمای خاک سطحی و شاخص گیاهی ماهواره MODIS استفاده کردند. طبق نتایج آن‌ها، مقادیر ضریب همبستگی و RMSE به ترتیب معادل ۰/۶۲ و ۰/۰۳۶ سانتیمترمکعب بر سانتیمترمکعب به دست آمد. هرچند، بین میزان ضریب همبستگی این دو روش تفاوت وجود دارد ولی مقادیر RMSE نشان دهنده بهبود نسبی مدل تجربی استفاده شده در این مقاله می باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، یک الگوریتم فیزیکی به منظور بهبود مقیاس مکانی رطوبت خاک ماهواره SMAP با استفاده از داده های ماهواره MODIS مورد استفاده قرار گرفت. اساس این الگوریتم برپایه جایگزینی پارامتر انعکاس تبدیل یافته فرو سرخ طول موج کوتاه (STR) به جای دمای سطح خاک (LST) در روش مثلث تجربی می باشد. مزیت استفاده از این روش ریزمقیاس سازی این است که این روش برای ماهواره هایی چون Sentinel 2 که فقط دارای باند نوری هستند کاربردی است و همچنین این الگوریتم، توانایی پارامترسازی کلی برای یک منطقه خاص را داراست. در این پژوهش، نقشه های رطوبت خاک ریزمقیاس شده SMAP با استفاده از الگوریتم فیزیکی در مقیاس ۱ کیلومتری به دست آمد و با رطوبت خاک اندازه گیری شده زمینی مقایسه شد. نتایج حاصل از کاربرد این الگوریتم فیزیکی برای تهیه نقشه های ریزمقیاس شده رطوبت خاک SMAP در منطقه خشک و نیمه خشک آریزونا نشان دهنده عملکرد خوب الگوریتم و توانایی آن در ریزمقیاس سازی رطوبت خاک می باشد. همچنین، نتایج این الگوریتم با الگوریتم ریزمقیاس سازی تجربی مقایسه گردید. نتایج این مقایسه نشان داد که به طور کلی، الگوریتم فیزیکی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم تجربی نشان می دهد و می توان این الگوریتم فیزیکی را به عنوان یک روش جدید، ساده و کاربردی به منظور ریزمقیاس سازی رطوبت خاک در نظر گرفت.

منابع

- A., N.M., H., N.M., J., S.J., G., R.K., & R., S.J. 2007. Sediment yields from unit-source semiarid watersheds at Walnut Gulch. *Water Resources Research*, 43
- Adegoke, J.O., & Carleton, A.M. 2002. Relations between Soil Moisture and Satellite Vegetation Indices in the U.S. Corn Belt. *Journal of Hydrometeorology*, 3, 395-405
- Carlson, T. 2007. An Overview of the "Triangle Method" for Estimating Surface Evapotranspiration

- Panciera, R., Rüdiger, C., H. Kerr, Y., & Walker, J. 2011. Downscaling SMOS-derived soil moisture using MODIS Visible/Infrared data .
- Ritchie, J.C., Nearing, M.A., Nichols, M.H., & Ritchie, C.A. 2005. Patterns of Soil Erosion and Redeposition on Lucky Hills Watershed, Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona. CATENA, 61, 122-130
- Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., & Jones, S.B. 2017. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. Remote Sensing of Environment, 198, 52-68
- Stisen, S., Sandholt, I., Nørgaard, A., Fensholt, R., & Jensen, K.H. 2008. Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration — Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. Remote Sensing of Environment, 112, 1242-1255
- Zreda, M., Shuttleworth, W., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., & Rosolem, R. 2012. COSMOS: the COsmic-ray soil moisture observing system.
- surface temperature and NDVI .Agricultural and Forest Meteorology, 149, 1327-1342
- McColl, K.A., Alemohammad, S.H., Akbar, R., Konings, A.G., Yueh, S., & Entekhabi, D. 2017. The global distribution and dynamics of surface soil moisture. Nature Geoscience, 10, 100
- Merlin, O., Chehbouni, A., Walker, J.P., Panciera, R., & Kerr, Y.H. 2008. A Simple Method to Disaggregate Passive Microwave-Based Soil Moisture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46, 786-796
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., & Vidal, A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sensing of Environment, 49, 246-263
- Petropoulos, G., Carlson, T.N., Wooster, M.J., & Islam, S. 2009. A review of Ts/VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 33, 224-250
- Piles, M., Camps, A., Vall-llossera, M., Corbella, I.,

Development of Improved Algorithms for Downscaling SMAP-Derived Soil Moisture Using Visible/Inferred satellite observations

E. Ghafari¹, K. Davary^{*2}, A. Faridhosseini³

Received: Oct.14, 2019

Accepted: Jan.31, 2020

Abstract

In this research, a new downscaling method was proposed to improve the spatial resolution of Soil Moisture Active Passive (SMAP) soil moisture estimates with the use of higher resolution from the visible/infrared satellite (MODIS). The model relies on a physical linear relationship between the soil moisture content and shortwave infrared transformed reflectance (STR). Finally, the physical downscaling model was compared against the traditional empirical triangle method to evaluate the performance of using STR in place of land surface temperature (LST). In this study, MODIS and SMAP satellites observations from 2015 to 2018 were used and the evaluation of the downscaled soil moisture was undertaken at the COSMOS sites in Arizona. Results show that while both downscaling algorithms have decreased Root Mean Square Error (RMSE) values, the performance of physical algorithm generally is better than empirical. However, the spatial correlation (R) values decreased using downscaling algorithms, but the RMSE values improved from 0.032 of SMAP soil moisture to 0.3 and 0.031 for the physical and empirical downscaling algorithms, respectively. Also the values of bias improved from 0.011 of SMAP soil moisture to 0.0016 and 0.0076 for the physical and empirical downscaling algorithms, respectively. In conclusion, the result show the proposed physical downscaling algorithm nicely improves the limited spatial variability of SMAP soil moisture and replacing LST with STR can yield a new insight on the downscaling issues.

Keywords: Downscaling algorithm, Soil moisture, Passive microwave remote sensing, Spatial resolution

1- Ph.D. Student Department of Water Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: k.davary@gmail.com)