

تلفیق بازیابی‌های سنجنده‌ی AMSR2 با محصولات دورسنجی مودیس بمنظور برآورد رطوبت خاک با وضوح بالا

مائه فرخی^۱، حسین انصاری^{۲*}، علیرضا فریدحسینی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲

چکیده

رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین متغیرهای محیطی است و شناخت تغییرات مکانی و زمانی آن، بینش ارزشمندی را در فعالیتهای کشاورزی، مطالعات هیدرولوژیکی، مدل‌های آب و هوایی و نظارت بر محیط زیست به همراه دارد. در این پژوهش داده‌های رطوبت خاک سطحی حاصل از سنجنده AMSR2 مورد استفاده قرار گرفت و این داده‌ها با اندازه‌گیری‌های زمینی برای دشت رفسنجان، مقایسه گردید. این مقایسه بر اساس ارزیابی تفاوت بین داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده در شش ایستگاه، با استفاده از قدر مطلق میانگین خطا، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی انجام شد. نتایج کلی اعتبارسنجی نشان داد که در سه ایستگاه ۴، ۵ و ۶ اندازه‌گیری‌ها، مشابه تخمین رطوبت خاک AMSR2 رفتار می‌کند و همبستگی بالای ۷۰ درصد دارند و در ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ میزان همبستگی کم می‌باشد. برای دسترسی به نتایج بهتر از یک تکنیک ریزمقیاس‌سازی بر اساس یک معادله خطی که رطوبت خاک را به سه پارامتر سنجنده‌ی مودیس ارتباط می‌دهد و محصولات AMSR2 را به یک محصول ریزمقیاس‌شده تبدیل می‌نماید، استفاده گردید و عملکرد آن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ریزمقیاس‌سازی منجر به کاهش خطا و افزایش ضریب همبستگی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری گردید، بطوریکه در ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ مقادیر ضریب همبستگی بترتیب از ۰/۵۵۲، ۰/۲۳۷ و ۰/۸۶۴، ۰/۷ و ۰/۷۵۰ افزایش و مقادیر قدر مطلق میانگین خطا و جذر میانگین مربعات خطا کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس‌سازی، سنجش از دور، رفسنجان

مقدمه

مقادیر رطوبت خاک سه گزینه وجود دارد، که شامل اندازه‌گیری‌های زمینی، برآورد با مدل‌سازی و روش سنجش از دور می‌باشند (Holgate et al, 2016)، (Zhuo and Han, 2016)]. اندازه‌گیری زمینی معمولاً با تراکم بالا یا کم در شبکه‌ای از نقاط انجام می‌شود. میزان تراکم یک شبکه بر اساس میزان ابزار موجود، وسعت منطقه و هزینه‌ی پروژه تعیین می‌شود. از ابزارها و تکنیک‌های مختلفی برای اندازه‌گیری زمینی استفاده می‌شود. از جمله این دستگاه‌ها می‌توان به نوترون‌متر، انعکاس‌سنجی زمانی (TDR)، انعکاس‌سنجی فرکانسی، ظرفیت‌سنجی الکتریکی و پروب اندازه‌گیری عمقی رطوبت خاک اشاره نمود، که هر کدام مزایا و معایب مخصوص به خود را دارا می‌باشند. دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت بهتر است به گونه‌ای باشند که علاوه بر دقت و صحت بالا، سریع و آسان بوده و قابلیت ثبت حجم زیاد اطلاعات تولید شده، را نیز داشته باشد. دستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک REC-P55، که از حسگرها و دیتالاگر تشکیل شده است، قابلیت ثبت داده‌های رطوبت، دما و شوری خاک در بازه‌های زمانی مختلف را، با دقت خوبی فراهم می‌نماید (انصاری و

رطوبت خاک نقش مهمی در چرخه آبی طبیعت، مطالعات هیدرولوژیکی، فعالیتهای کشاورزی و پایش‌های محیط زیستی بر عهده دارد. سیستم‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی رطوبت، برای برنامه‌های کاربردی شامل کنترل سیل و ارزیابی خشکسالی، بسیار به تغییرات رطوبت حساس هستند (Soulis et al, 2015)، (Zhuo and Han, 2016)، (Peng et al, 2017)، (Kawaguchi and Yoshida, 2013)]. دسترسی به مقادیر دقیق زمانی-مکانی رطوبت خاک به کیفیت ابزارهای اندازه‌گیری، فرکانس بازیابی و مدیریت اطلاعات بستگی دارد (Djamai et al, 2016). بمنظور دستیابی به

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
- * - نویسنده مسئول: (Email: ansary@um.ac.ir)

محصولات مبتنی بر ماهواره در وضوح بزرگ در دسترس هستند (از ۳ کیلومتر تا ۴۰ کیلومتر که برای مقیاس کوچک هیدرولوژیکی، مدل سازی و برنامه های کاربردی کشاورزی مفید نیستند) و به دلیل کمبود دسترسی شبکه های زمینی، روند اعتبارسنجی محصولات مبتنی بر ماهواره بسیار محدود است [Zhuo and Han, 2016]، (Soulis et al, 2015)، (Ulaby et al, 1986)]. اخیراً، مطالعاتی بمنظور بهبود رطوبت خاک برآورد شده با استفاده از محصولات ماهواره ای، مبتنی بر الگوریتم هایی که رطوبت خاک را با متغیرهایی مانند پوشش گیاهی، دمای روشنائی، بارش و ... مرتبط می سازد، انجام گرفته است [Ulaby et al, 1986]، (Jackson et al, 2010)، (Yan et al, 2015)].

در این پژوهش به ارزیابی کیفیت داده های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 و انجام تکنیک ریزمقیاس سازی، برای این داده ها، بر اساس سه پارامتر سنجنده مودیس که شامل شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی^۶ (NDVI)، دمای سطح زمین^۷ (LST) و آلبیدو^۸، برای توصیف بهتر از چگونگی ارائه رطوبت سطحی خاک توسط ماهواره در هنگام عبور از منطقه مورد مطالعه (دشت رفسنجان)، پرداخته شده است. این مقایسه بر اساس ارزیابی تفاوت بین داده های ماهواره ای رطوبت خاک و داده های زمینی اندازه گیری شده می باشد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه، دشت رفسنجان می باشد. این دشت با وسعتی حدود ۵۶۲۲ کیلومتر مربع بین طول های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۸ دقیقه و عرض های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۱ دقیقه گسترده شده و بخشی از حوضه آبریز درجه ۲ کویر درانجیر-ساغند بوده است که این حوضه آبریز، بخشی از حوضه آبریز درجه ۱ فلات مرکزی ایران محسوب می گردد (شکل ۱). دشت رفسنجان توسط دو رشته کوه موازی شمال شرقی و جنوب غربی احاطه گردیده است.

داده های رطوبت خاک مبتنی بر سنجنده AMSR2

سیستم ماهواره ای GCOM-W1 در تاریخ ۱۷ ماه می ۲۰۱۲ برای جمع آوری پارامترهای ژئوفیزیکی مختلف و مشاهده تغییر در گردش آب راه اندازی شد (Kawaguchi, 2013). سیستم GCOM-W1 دارای سنجنده AMSR2 است که امواج رادیومتری منتشر شده از زمین را بازبانی می کند. داده های مورد استفاده برای برآورد رطوبت خاک در وضوح مکانی زیاد، بصورت جهانی با یک مقدار میانگین از

حسن پور، ۱۳۹۴). با استفاده از سیستم های مدل سازی، رطوبت خاک می تواند در رزولوشن های مختلف مکانی و زمانی شبیه سازی شود (Holgate et al, 2016). کیفیت شبیه سازی به دقت داده های اندازه گیری شده، در محلی که به عنوان پایگاه داده، مورد استفاده قرار گرفته و همچنین اجرای مناسب یک فرآیند اعتبارسنجی و بهینه سازی، وابسته است [Holgate et al, 2016]، (Anderson, 1985)]. انواع مختلفی از سیستم های مدل سازی برای شبیه سازی رطوبت خاک برای مواردی مانند حسابداری رطوبت خاک، مدل بیلان آبی رطوبت خاک، مدل ظرفیت نفوذپذیری متغیر (VIC) وجود دارد. شبیه سازی می تواند بسته به هدف پروژه برای قدرت تفکیک های مختلف مکانی و زمانی انجام شود. کمبود داده های رطوبتی اندازه گیری شده، عدم قطعیت داده ها و ساختار مدل، بطور مستقیم ساختار شبیه سازی، اعتبارسنجی و بهینه سازی مدل رطوبتی خاک را تحت تأثیر قرار خواهد داد [Liang et al, 1994]، (Raney et al, 2015)، (Dumedah et al, 2017)].

پیشرفت های تکنولوژیک اخیر، امکان استفاده از تکنیک های سنجنش از دور، در اندازه گیری رطوبت خاک را فراهم ساخته است. تکنیک های سنجنش از دور برای برآورد رطوبت خاک شامل روش های نوری، مادون قرمز حرارتی و مایکروویو فعال و غیرفعال هستند که هر کدام نقاط ضعف و قوت خود را دارند. روش های سنجنش از دور مبتنی بر امواج مایکروویو تکنیک های مؤثری برای برآورد رطوبت خاک در قدرت تفکیک های زمانی و مکانی مختلف می باشند (Jensen, 1999). محصولات ماهواره ای رطوبت خاک توسط سنجنده های ماهواره ای در مقیاس جهانی ارائه می شوند، مانند ماهواره SMAP^۱ ارائه شده توسط ناسا (<https://smap.jpl.nasa.gov/>)، از آژانس فضایی اروپا (http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS)، رادیومتر پیشرفته AMSR-E^۲ از آژانس اکتشاف فضایی ژاپن (JAXA)^۳ (<https://nsidc.org/data/amsre>) و AMSR-2^۴ از ناسا (<https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/>) و از JAXA (http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/) قابل دسترس می باشند. مزیت این محصولات رطوبت خاک ماهواره سنجنش از دور، در دسترس بودن اندازه گیری ها بصورت یک وضوح پیوسته زمانی-مکانی در مقیاس جهانی می باشد. با این وجود، در حال حاضر،

- 1- Soil Moisture Active Passive
- 2- Soil Moisture and Ocean Salinity
- 3- Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System
- 4- Japan Aerospace Exploration Agency
- 5- Advanced Microwave Scanning Radiometer 2

6-Normalized Difference of Vegetation Index
7- Land Surface Temperature
8- albedo

(۱۶ مدار در روز) از شمال به سمت جنوب کره زمین برود، جمع‌آوری داده‌ها برای کل زمین روزانه یا هر دو روز انجام می‌شود. محصولات مودیس مورد استفاده، شامل شاخص تفاضل‌نرمال‌شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI)، دمای سطح زمین (LST) و آلبیدو در وضوح ۱ کیلومتر در فرمت HDF4 از سیستم اطلاعاتی و داده‌های EOS^۶ (EOSDIS) از طریق تارنمای (<https://search.earthdata.nasa.gov>) برای منطقه‌ی مورد مطالعه دریافت شد و از آن‌ها به منظور کاهش مقیاس رطوبت خاک با وضوح ۲۵ کیلومتر سنجندهی AMSR2 به وضوح ۱ کیلومتر رطوبت خاک، استفاده گردید.

در این مطالعه، محصولات مودیس شامل LST (MYD11A1) از ماهواره آکوا برای برآورد یک کیلومتری دمای سطح زمین، داده‌های NDVI از دو مجموعه داده ۱۶ روزهی MYD13A2 (ماهواره آکوا) و MOD13A2 (ماهواره ترا)، برای ایجاد لایه‌های ۸ روزهی NDVI استفاده گردید. آلبیدوی سطحی (α) از ترکیب باندهای ۱ تا ۷ (α_1 تا α_7) سنجندهی مودیس (MOD09A1) بصورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Liang et al, 1999):

$$\alpha = 0.3973\alpha_1 + 0.23821\alpha_2 + 0.3484\alpha_3 + 0.265\alpha_4 + 0.1604\alpha_5 - 0.0138\alpha_6 + 0.0682\alpha_7 + 0.0036 \quad (1)$$

نمونه‌ای از پارامترهای آلبیدو، دمای سطح زمین و NDVI برای روز ۹۷/۱/۱۰ در منطقه‌ی رفسنجان در شکل ۴ ارائه شده است.

مقایسه AMSR2 با محصولات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده

مقایسه‌ی بین محصولات رطوبت خاک AMSR2 با وضوح ۲۵ کیلومتر و داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده در طی دوره‌ی مورد مطالعه برای منطقه انجام گردید. از داده‌های رطوبت خاک باند X سنجندهی AMSR2 استفاده گردید. ارتباط بین مقادیر مشاهداتی رطوبت خاک سنجندهی AMSR2 و مقادیر اندازه‌گیری شده در محل، با محاسبه‌ی مقادیر قدر مطلق میانگین خطا^۷ (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا^۸ (RMSE) و ضریب همبستگی^۹ (R) برای نقاط اندازه‌گیری شده بر اساس معادلات ۲ تا ۴ در ذیل تحلیل گردید، که در آن $\theta_{i,s}$ مقادیر زمینی رطوبت خاک، $\theta_{i,g}$ مقادیر ماهواره‌ای رطوبت خاک، e_i اختلاف بین مقادیر زمینی و ماهواره‌ای رطوبت خاک و N تعداد روزهای مورد بررسی می‌باشند.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |\theta_{i,g} - \theta_{i,s}|}{N} \quad (2)$$

وضوح زمانی دو روزه برآورد شده است [Kawaguchi, (2013), (Hihara and Okuro, 2015)]. مقادیر ارائه شده‌ی رطوبت خاک با استفاده از مدل بازیابی پارامتر زمین (LPRM) برآورد می‌شود و بر مبنای مدل انتقال تابشی، که رطوبت خاک و عمق نوری پوشش گیاهی را بازیابی می‌کند، می‌باشد. محصول رطوبت خاک ارائه شده توسط AMSR2 را می‌توان از مرکز تحقیقات مشاهدات زمین^۲ (EORC) در تارنمای JAXA (داده‌ها در فرمت HDF5) و یا از طریق ناسا (داده‌ها در فرمت netCDF4) بازیابی نمود. داده‌ها بصورت قرائت روز و شب، بشکل نقشه‌ی جهانی (در وضوح ۱۰ کیلومتر و ۲۵ کیلومتر)، بر مبنای روزانه یا ماهانه، قابل دانلود می‌باشند. در این پژوهش، در محدوده‌ی زمانی از روز ۲۸ شهریور ۱۳۹۶ تا ۱۲ خرداد ۱۳۹۷، داده‌های رطوبت خاک AMSR2 بصورت جهانی و روزانه با وضوح ۲۵ کیلومتر، مورد بازیابی و تحلیل قرار گرفت. با استفاده از مختصات جغرافیایی منطقه‌ی رفسنجان، داده‌های رطوبت خاک AMSR2، برای این منطقه بدست آمد. به عنوان نمونه داده‌های رطوبت خاک برای ۴ روز در شکل ۲ ارائه شده است.

داده‌های رطوبت خاک بر اساس اندازه‌گیری های زمینی

در این پژوهش، بمنظور دستیابی به مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در منطقه رفسنجان، حسگرهای اندازه‌گیری رطوبت خاک REC-P55 انتخاب و در شش محل (ایستگاه) از دشت رفسنجان نصب گردیدند و دستگاه دیتالاگر بطور مداوم، ولتاژ دما و رطوبت خاک را ثبت می‌نمود. حسگرها از قبل کالیبره شده و معادلات رطوبتی خاک‌ها برای هر حسگر با روش وزنی در آزمایشگاه حاصل گردید. در این تحقیق داده‌های رطوبت لایه‌ی سطحی خاک در زمان گذر ماهواره در هر محل، مورد تحلیل قرار گرفت. سعی بر این بود محل‌های انتخابی برای اندازه‌گیری زمینی حتی‌الامکان به نقطه‌ی وسط پیکسل‌های ۲۵ کیلومتری که ماهواره اندازه‌گیری می‌کند، نزدیک باشند. شش محل اندازه‌گیری در شکل ۳ ارائه شده است.

پارامترهای سنجندهی مودیس

سنجندهی مودیس بر روی ماهواره‌های ترا^۳ و آکوا^۴ در دسامبر ۱۹۹۹ و می ۲۰۰۲ راه‌اندازی شد و به جمع‌آوری داده‌ها می‌پردازد. این سیستم‌های ماهواره‌ای بخشی از سیستم مشاهداتی زمین مرکز بین‌المللی ناسا^۵ (EOS) است. هر دو سیستم در مسیر دایره‌ای مدار قطبی گردش می‌کنند، سیستم بگونه‌ای تنظیم شده که هر ۹۹ دقیقه

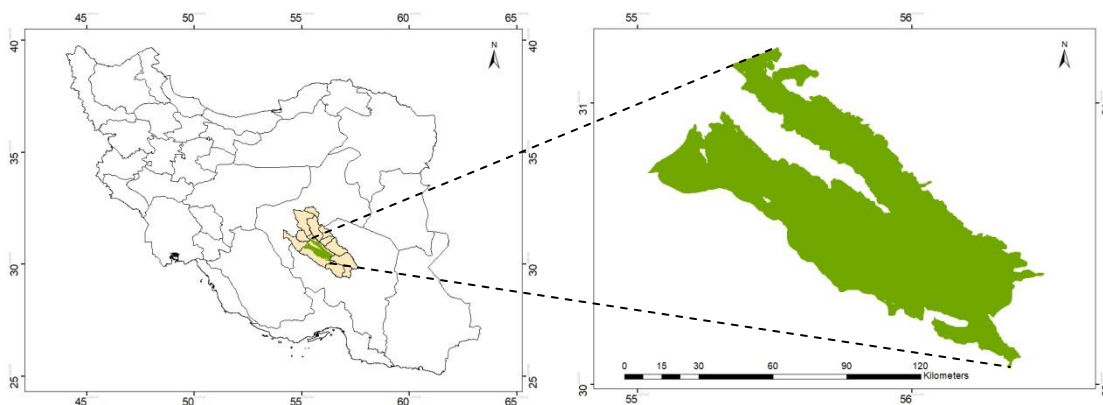
6- EOS Data and Information System
7 Mean Absolute Error
8 Root Mean Square Error
9 Correlation Coefficient

1- Land Parameter Retrieval Model
2- Earth Observation Research Center
3-Terra
4- Aqua
5- Earth Observing System

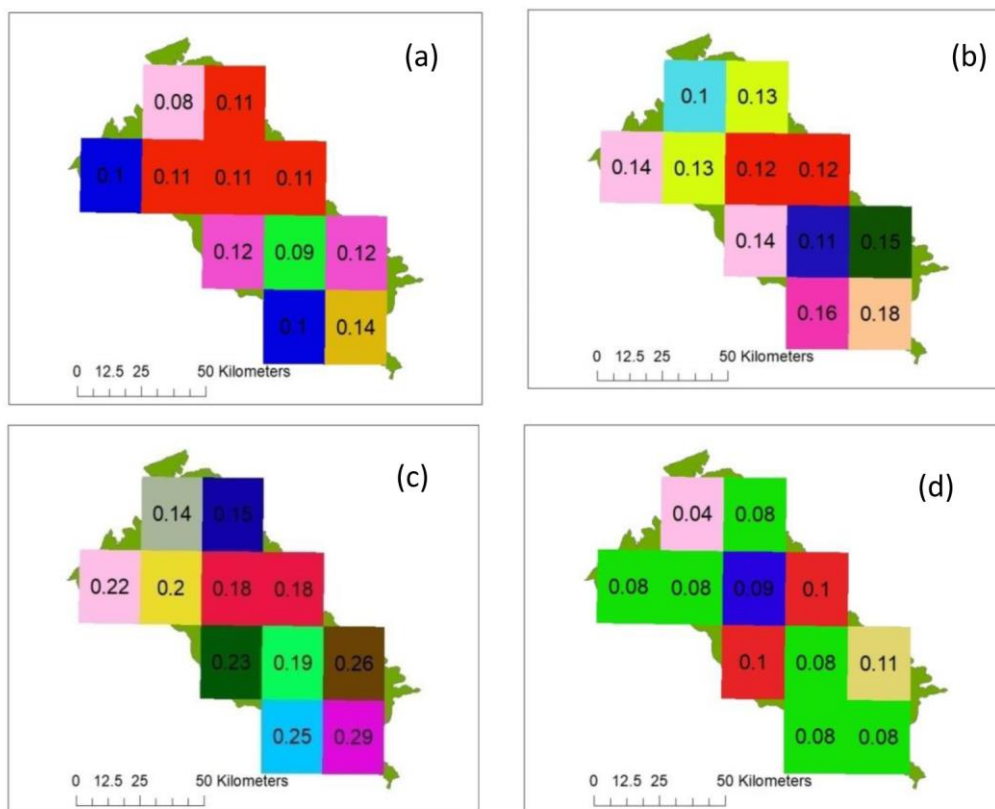
مقادیر ضریب همبستگی (R) محاسبه شده در معادله ۴، بین ۰ تا ۱ می باشد که مقادیر $R \geq 0.7$ به عنوان برآوردی رضایت بخش در نظر گرفته شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \theta_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\theta_{i,C} - \theta_{i,S}]^2}{N}} \quad (3)$$

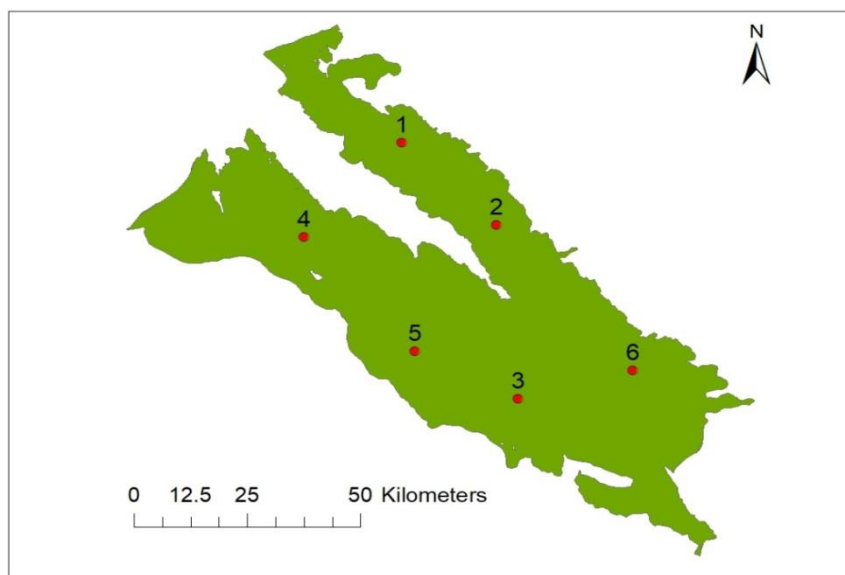
$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N (\theta_{i,C} \times \theta_{i,S}) - (\sum_{i=1}^N \theta_{i,C}) \times (\sum_{i=1}^N \theta_{i,S})}{\sqrt{[N(\sum_{i=1}^N \theta_{i,C}^2) - (\sum_{i=1}^N \theta_{i,C})^2] \times [N(\sum_{i=1}^N \theta_{i,S}^2) - (\sum_{i=1}^N \theta_{i,S})^2]}} \quad (4)$$



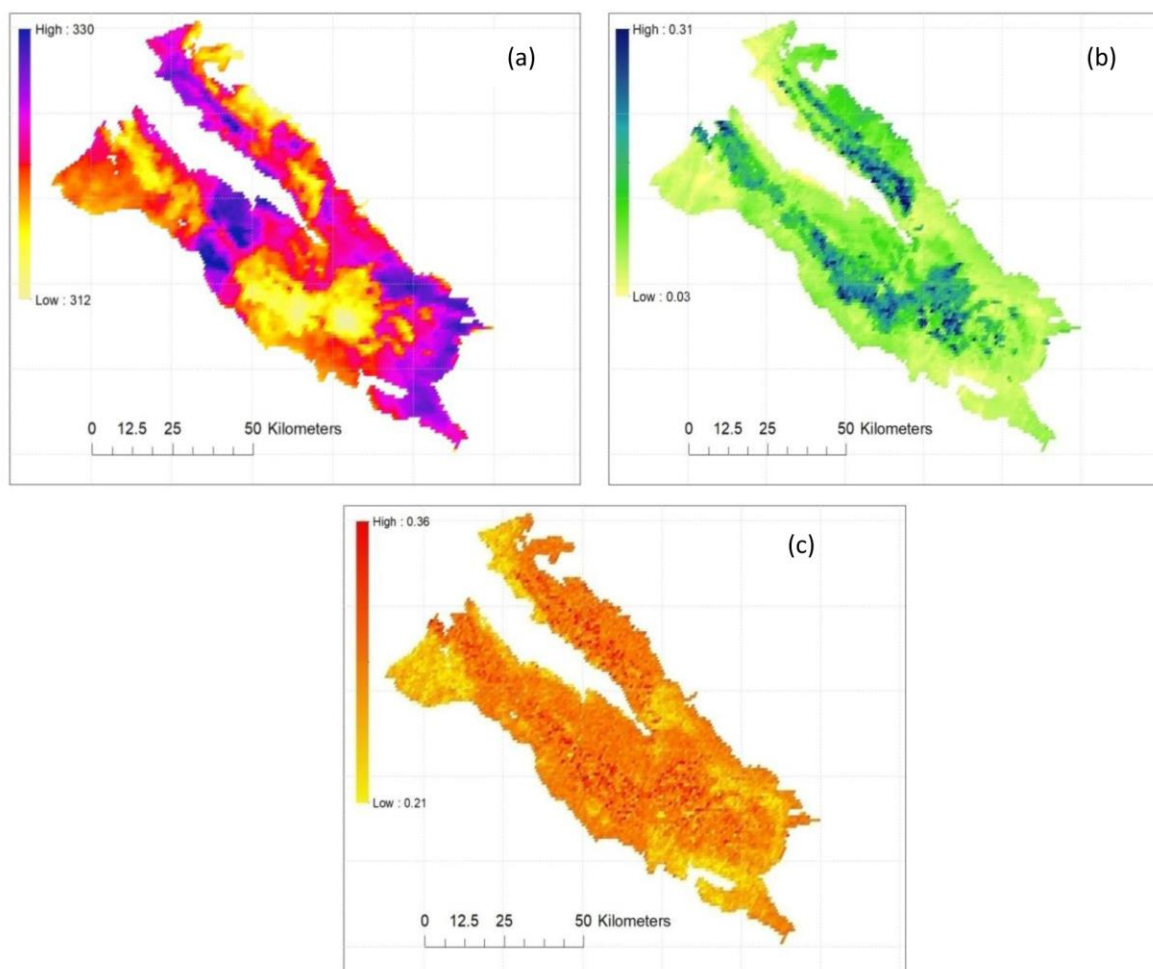
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت رفسنجان



شکل ۲- مقادیر رطوبت خاک (cm³/cm³) حاصل از AMSR2 برای روزهای ۹۶/۸/۲۳، (a) ۹۶/۹/۲۷، (b) ۹۶/۱۱/۶، (c) ۹۷/۱/۱۰، (d)



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک در دشت رفسنجان



شکل ۴- محصولات مودیس در مقیاس ۱ کیلومتر: (a) LST، (b) NDVI و (c) آلبدو

LST و V نشان دهنده‌ی NDVI است. این پارامترها با یک مدل رگرسیون خطی چندگانه محاسبه می‌شوند که، مقادیر مشخصه‌های فیزیکی را با رطوبت خاک تخمین زده شده با وضوح زیاد مقایسه می‌کند. هر پارامتر برای مطابقت با وضوح ۲۵ کیلومتری AMSR2 به مقیاس بالاتر انتقال داده می‌شود. در این مطالعه، انتقال به مقیاس بالاتر^۲ به شرح ذیل انجام شد:

$$V_{25km} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m V_{ij}}{mn}, \quad T_{25km} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m T_{ij}}{mn},$$

$$A_{25km} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m A_{ij}}{mn} \quad (۷)$$

که در آن، ۲۵ کیلومتر، مقیاسی است که پارامترهای فیزیکی به آن افزایش یافته‌اند، m و n به ترتیب، تعداد ستون و سطر از شبکه‌ای با مقیاس ۱ کیلومتر درون پیکسل ۲۵ کیلومتری می‌باشند.

نتایج و بحث

مقایسه داده‌های AMSR2 با رطوبت خاک اندازه‌گیری شده
 بمنظور دستیابی به مقادیر رطوبت خاک، داده‌های سنجنده AMSR2 با وضوح ۲۵ کیلومتر، برای دشت رفسنجان استفاده شدند. این داده‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، توسط حسگرهای اندازه‌گیری رطوبت خاک REC-P55، مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۶، مقادیر درصد رطوبت بدست آمده توسط سنجنده AMSR2 و درصد رطوبت اندازه‌گیری شده در شش ایستگاه را برای روزهای مشخصی، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در ایستگاه ۲، اختلاف بیشتری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک وجود داشت. پیکسل دربرگیرنده‌ی ایستگاه ۲، از نظر پوشش گیاهی بطور غالب شامل اراضی بدون پوشش بوده که فقط بخش کمی از آن دارای پوشش گیاهی می‌باشد. همچنین حسگرهای اندازه‌گیری رطوبت خاک در این پیکسل (محل ایستگاه ۲)، در بخش دارای پوشش گیاهی، واقع شده بودند که رطوبت خاک در این بخش، نسبت به اراضی فاقد پوشش بالاتر می‌باشد. از طرفی هم ماهواره، میانگین رطوبت خاک در هر پیکسل که تقریباً معادل رطوبت نقطه‌ی وسط پیکسل می‌باشد را قرائت می‌نماید. لذا می‌توان چنین برداشت نمود که، علت اختلاف زیاد بین مقادیر رطوبت حاصل از ماهواره و اندازه‌گیری در ایستگاه ۲، تأثیرپذیر از عدم یکنواختی پوشش گیاهی پیکسل ماهواره‌ای و همچنین فاصله‌ی زیاد محل اندازه‌گیری، تا نقطه‌ی وسط پیکسل می‌باشد.

ارتباط بین مقادیر مشاهداتی رطوبت خاک سنجنده‌ی AMSR2 و مقادیر اندازه‌گیری شده در محل، با محاسبه‌ی مقادیر قدر مطلق میانگین خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب

ریزمقیاس‌سازی داده‌های رطوبت خاک AMSR2

از آنجا که رطوبت خاک در منطقه، تحت تأثیر عواملی چون نوع خاک، استفاده از زمین، درجه‌ی حرارت خاک، بارش روزانه، مناطق غیرقابل نفوذ و تراکم پوشش گیاهی، به میزان قابل توجهی با کیلومتر متفاوت است، بنابراین انتظار می‌رود که هر میانگین از مقدار ۲۵ کیلومتری رطوبت خاک نتواند نمایشی از سطح پوشش باشد. بطور کلی ایده اصلی از ریزمقیاس‌سازی، ایجاد یک همبستگی آماری یا یک مدل فیزیکی بین رطوبت خاک بزرگ‌مقیاس و متغیرهای کمکی ریزمقیاس تأثیرگذار بر رطوبت خاک می‌باشد، که تفاوت در روش ریزمقیاس‌سازی، بر اساس نوع داده‌های ورودی و مشخصات مدل مقیاس شده (فیزیکی، آماری) می‌باشد. از جمله ویژگی‌های تأثیرگذار بر رطوبت خاک می‌توان به توپوگرافی، بافت خاک و خصوصیات پوشش گیاهی اشاره نمود، که این پارامترها در برخی از مطالعات، برای مقیاس‌های کوچک، در فرآیند ریزمقیاس‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند [Busch et al, 2012]، [Coleman and Niemann, 2013]، [Ranney et al, 2015]. از آنجا که، ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک و ویژگی‌های مبتنی بر توپوگرافی و بافت خاک، عموماً نیازمند مشاهدات گسترده‌ای است، لذا همین مسئله کاربرد این روش ریزمقیاس‌سازی را در مقیاس‌های بزرگ (به علت عدم وجود یا کمبود داده‌های اندازه‌گیری) محدود می‌نماید. لذا در این پژوهش از یک تکنیک ریزمقیاس‌سازی، با استفاده از پارامترهای سنجنده‌ی مودیس برای تصحیح محصول رطوبت خاک با وضوح ۲۵ کیلومتر به یک کیلومتر استفاده گردید. این روش، از یک معادله‌ی خطی ساده، براساس پارامترهای محاسبه شده با مدل رگرسیونی، که مبتنی بر سه ویژگی فیزیکی شامل آلبیدو، LST و NDVI با رزولوشن ۱ کیلومتر از سنجنده مودیس می‌باشند، استفاده می‌کند. معادله ۵ روش ریزمقیاس‌سازی را با این سه پارامتر مودیس نشان می‌دهد (Chauhan et al, 2003).

$$\theta_s = \sum_{i=0}^{i=n} \sum_{j=0}^{j=n} \sum_{k=0}^{k=n} a_{ijk} V^i T^j A^k \quad (۵)$$

با در نظر گرفتن تعداد متغیرهای توضیحی (n) برابر ۱، معادله به شکل معادله‌ی ۶ می‌شود:

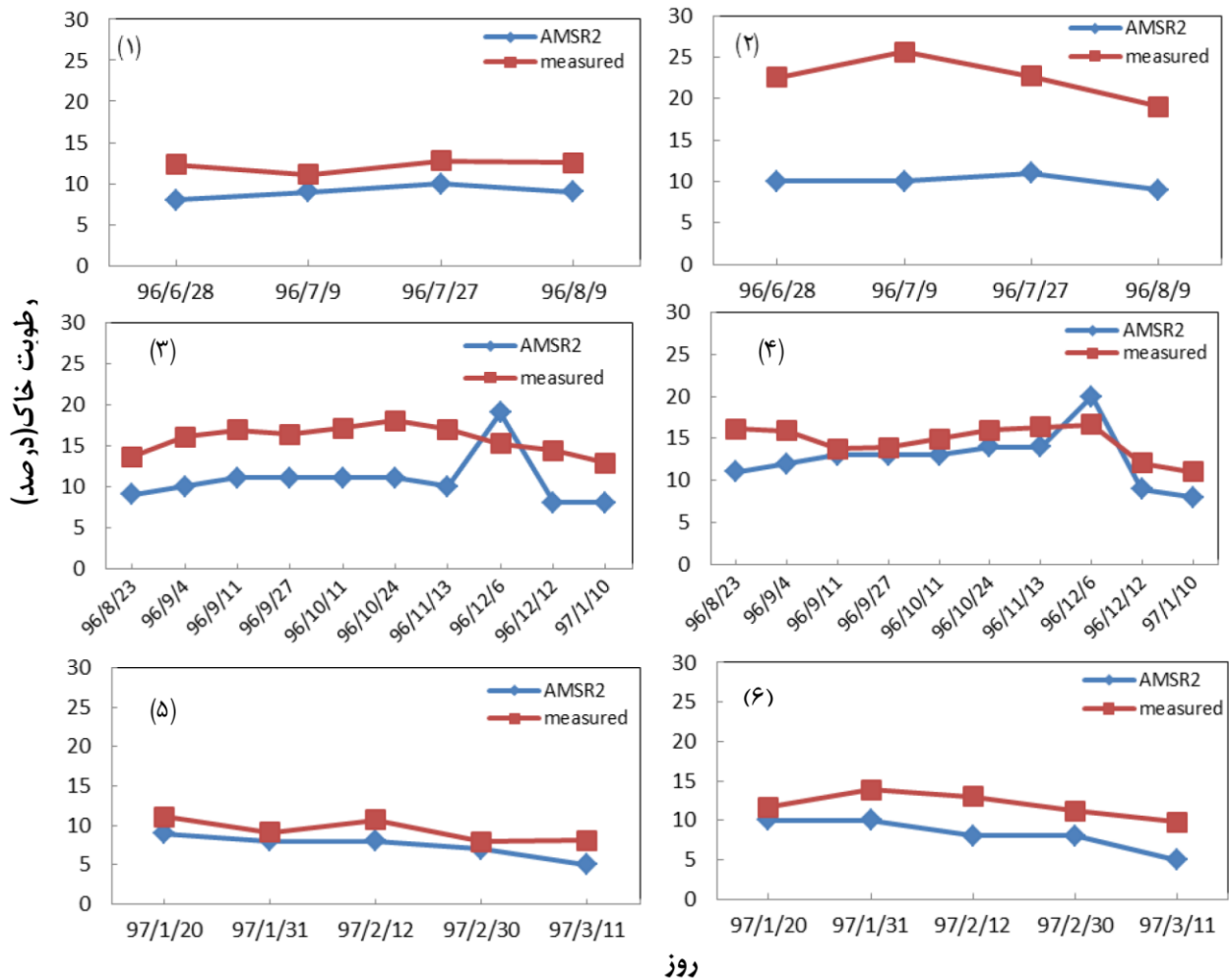
$$\theta_s = a_{000}A + a_{100}T + a_{010}V + a_{110}TA + a_{101}VA + a_{011}VT \quad (۶)$$

که در آن، θ_s مقدار رطوبت خاک ریزمقیاس شده، پارامترهای a_{ijk} ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک ریزمقیاس شده و محصولات رطوبت خاک ماهواره‌ای بزرگ مقیاس می‌باشند. A آلبیدو، T مقدار

و ۰/۷۵۴). که این نتایج می تواند تحت تاثیر فواصل ایستگاه ها از نقطه مرکزی هر پیکسل اندازه گیری رطوبت توسط ماهواره، باشد. بطوریکه در ایستگاه های ۴ و ۵ با فاصله ۲/۱ و ۱/۹۷ از مرکز پیکسل بهترین نتایج (کمترین میزان خطا و بیشترین همبستگی) حاصل گردید. از طرفی با بررسی نقشه پوشش گیاهی و کاربری اراضی منطقه دیده شد که پوشش گیاهی در دو پیکسل حاوی ایستگاه های ۴ و ۵ یکنواخت تر بود(در این دو پیکسل پوشش گیاهی غالب، شامل زراعت آبی و باغ های پسته می باشند) و همچنین این دو ایستگاه در نقاطی که از نظر پوشش گیاهی مشابه با پوشش گیاهی غالب پیکسل بود، قرار داشتند که این موارد بر برتری نتایج بدست آمده در ایستگاه ها اثرگذار بودند.

همبستگی (R) انجام گردید. نتایج مربوط به محاسبه مقادیر MAE، RMSE و R بین داده های ماهواره ای و داده های اندازه گیری شده و مقدار فاصله هر ایستگاه از مرکز پیکسل اندازه گیری شده توسط ماهواره در جدول ۱ ارائه گردیده است.

نتایج نشان داد که در بیشتر موارد با کاهش مقادیر MAE و RMSE مقدار ضریب همبستگی (R) افزایش یافت. بر اساس جدول ۱ بیشترین مقادیر قدر مطلق میانگین خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای ایستگاه ۲ بدست آمد و همچنین مقادیر ضریب همبستگی (R) در ایستگاه های ۱، ۲ و ۳ پایین برآورد شد (بترتیب ۰/۲۹۵، ۰/۵۵۲ و ۰/۲۳۷). در ایستگاه های ۴، ۵ و ۶ ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه گیری و داده های ماهواره ای رطوبت خاک مقادیری قابل قبول بدست آمد (بترتیب ۰/۷۲۵، ۰/۷۹۱ و



شکل ۵- مقادیر درصد رطوبت بدست آمده توسط ماهواره (AMSR2) و درصد رطوبت اندازه گیری شده (measured) در ایستگاه های (۱)، (۲)، (۳)، (۴)، (۵) و (۶).

جدول ۱- مقادیر فاصله از مرکز پیکسل قدرمطلق میانگین خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) بین داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک

| ایستگاه | فاصله (کیلومتر) | خطای مطلق متوسط (MAE) | ریشه دوم میانگین خطا (RMSE) | ضریب همبستگی (R) |
|---------|-----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| ۱ | ۵.۸۴ | ۰.۰۳۲ | ۰.۰۳۳ | ۰.۲۵۹ |
| ۲ | ۸.۴۶ | ۰.۱۲۵ | ۰.۱۲۷ | ۰.۵۵۲ |
| ۳ | ۹.۷۳ | ۰.۰۵۷ | ۰.۰۵۸ | ۰.۲۳۷ |
| ۴ | ۲.۱۰ | ۰.۰۲۶ | ۰.۰۲۹ | ۰.۷۲۵ |
| ۵ | ۱.۹۷ | ۰.۰۲۵ | ۰.۰۲۷ | ۰.۷۹۱ |
| ۶ | ۲.۵۸ | ۰.۰۳۷ | ۰.۰۳۹ | ۰.۷۵۴ |

حاصل گردید:

$$\theta_s = 62.44 + 12.91A - 1.8 \times 10^{-8}V - 0.142T + 0.177TV - 0.183TA \quad (۸)$$

که در آن، θ_s رطوبت ریزمقیاس شده، A آلبیدو، T دمای سطح زمین، V شاخص تفاضل نرمال شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI) می‌باشد. مدل رگرسیونی با مقدار $R^2 = ۰/۶۰$ ، p-value و آزمون آماری F قابل قبول بدست آمد (p-value < ۰/۰۵، $۲/۵ \times ۱۰^{-۲۷۷}$ ، SignF =). این نتایج نشان داد، که این مدل، مناسب برای تخمین رطوبت خاک می‌باشد.

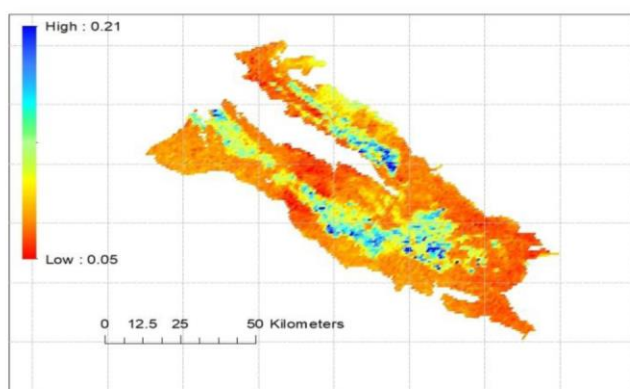
در شکل ۶، یک نمونه از مقادیر ریزمقیاس شده رطوبت خاک AMSR2 دشت رفسنجان را با استفاده از پارامترهای آلبیدو، دمای سطح زمین و NDVI ارائه شده است.

مقایسه بین مقادیر ریزمقیاس شده AMSR2 با استفاده از پارامترهای مودیس و داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک را با محاسبه مقادیر قدر مطلق میانگین خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) در جدول ۲ ارائه شده است.

در حالی که در ایستگاه ۲، پوشش گیاهی این ایستگاه، با پوشش غالب منطقه واقع شده در پیکسل متفاوت بود (الگوی کشت غالب این پیکسل شامل مراتع کم تراکم و اراضی بدون پوشش می‌باشد) که این مورد بجز عامل فاصله، بر افزایش مقادیر خطا و کاهش ضریب همبستگی در این ایستگاه مؤثر بوده است. لذا می‌توان بیان نمود که، فاصله ایستگاه از نقطه وسط پیکسل و همچنین میزان یکنواختی پیکسل از نظر پوشش گیاهی و کاربری اراضی، بر اختلاف بین مقادیر رطوبت خاک حاصله از ماهواره و اندازه‌گیری شده و مقادیر خطاهای بدست آمده تأثیرگذار می‌باشند.

۲۰۳ ریزمقیاس سازی داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک

تکنیک ریزمقیاس سازی مورد استفاده، براساس پارامترهای سنجنده مودیس انجام گردید. محصول ۲۵ کیلومتری رطوبت خاک AMSR2، با استفاده از یک معادله‌ی خطی ساده بین محصولات سنجنده مودیس (آلبیدو، دمای سطح زمین و شاخص تفاضل نرمال شده‌ی پوشش گیاهی) مقیاس آن به ۱ کیلومتر کاهش یافت. معادله‌ی ریزمقیاس سازی برای داده‌های AMSR2 بصورت زیر



شکل ۶- نمونه‌ای از مقادیر رطوبت خاک ریزمقیاس شده AMSR2 (cm^3/cm^3) دشت رفسنجان را با استفاده از پارامترهای سنجنده مودیس

جدول ۲- مقادیر فاصله از مرکز پیکسل، قدر مطلق میانگین خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) بین داده های ماهواره ای ریزمقیاس شده و داده های اندازه گیری شده رطوبت خاک

| ایستگاه فاصله (کیلومتر) | خطای مطلق متوسط (MAE) | ریشه دوم میانگین خطا (RMSE) | ضریب همبستگی (R) |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| ۱ | ۰.۱۲ | ۰.۱۵ | ۰.۸۶۴ |
| ۲ | ۰.۲۶ | ۰.۳۰ | ۰.۷۰۰ |
| ۳ | ۰.۱۶ | ۰.۲۰ | ۰.۷۵۰ |
| ۴ | ۰.۱۶ | ۰.۲۰ | ۰.۷۰۴ |
| ۵ | ۰.۲۲ | ۰.۲۴ | ۰.۷۸۶ |
| ۶ | ۰.۲۴ | ۰.۲۸ | ۰.۷۱۴ |

نتایج نشان داد که، ریزمقیاس سازی با استفاده از پارامترهای سنجنده مودیس منجر به کاهش خطاها و افزایش ضریب همبستگی شد و نتایج بدست آمده رطوبت سطح خاک، بویژه برای ایستگاه هایی که در فاصله بیشتری از مرکز پیکسل واقع شده بودند، بهبود یافت. بطوریکه در ایستگاه های ۱، ۲ و ۳ مقادیر ضریب همبستگی بترتیب از ۰/۲۹۵، ۰/۵۵۲ و ۰/۲۳۷ به ۰/۸۶۴، ۰/۷ و ۰/۷۵۰ افزایش یافت. لذا می توان چنین اظهار داشت، که روش ریزمقیاس سازی با استفاده از پارامترهای سنجنده مودیس تطابق مناسب تری با داده های اندازه گیری شده برقرار نمود.

نتیجه گیری

تنوع مکانی رطوبت سطح خاک، تحت تأثیر تعاملات پیچیده بین متغیرهای مختلف محیطی (مانند بافت و ساختار خاک، ویژگی های توپوگرافی، الگوهای پوشش زمین و اثرات هواشناسی و...) می باشد. روش های اندازه گیری رطوبت خاک با ابزارهای زمینی، به اندازه گیری رطوبت در مقیاس نقطه ای می پردازند و این اندازه گیری ها، مقادیر رطوبت را برای مناطق مجاور محل اندازه گیری، به دلیل ناهمگونی زیاد مکانی رطوبت خاک در طیف وسیعی از مقیاس ها، نشان نمی دهند. علاوه بر این، استخراج رطوبت سطح خاک به مقیاس های بزرگ، بر اساس اندازه گیری های زمینی، از طریق روش های زمین آماری، بدلیل ناهمگونی های مکانی زیادی که وجود دارد، روش مناسبی نمی باشد. از طرف دیگر در حوزه های بزرگ زیادی، هنوز شبکه های مشاهداتی رطوبت خاک بطور متراکم وجود ندارند. بنابراین، همچنان چالشی برای اندازه گیری رطوبت سطح خاک در مقیاس های مختلف با استفاده از ابزارهای زمینی موجود است. لذا روش های سنجش از دور مبتنی بر امواج مایکروویو، برای بازیابی رطوبت خاک مناسب می باشند که می توان از آن برای برآورد رطوبت خاک در مقیاس های مختلف در یک زمان معین استفاده کرد.

مقایسه محصولات رطوبت خاک سنجندهی مایکروویو AMSR2

با وضوح ۲۵ کیلومتر، با مقادیر اندازه گیری شده در دشت رفسنجان انجام گردید. نتایج کلی اعتبارسنجی نشان داد که، در ایستگاه های ۴، ۵ و ۶، اندازه گیری ها مشابه تخمین رطوبت خاک AMSR2 رفتار کرده و همبستگی بالای ۷۰ درصد وجود داشت. در حالی که در ایستگاه های ۱، ۲ و ۳ میزان همبستگی کم بود. که بجز عامل فاصله ایستگاه از مرکز پیکسل اندازه گیری شده توسط ماهواره، عواملی مانند تغییرات در تراکم پوشش گیاهی، نحوه ی استفاده از زمین، توپوگرافی، بارش و خواص خاک در منطقه، بر میزان همبستگی بین داده ها با مقیاس درشت و اندازه گیری های زمینی تأثیرگذار است. لازم است، برای داشتن اعتبارسنجی قوی تر، داده های بیشتری در داخل پیکسل ۲۵ کیلومتر برداشت شده و مورد بررسی قرار گیرند.

از آنجا که که محصولات رطوبتی حاصل از سنجنده های ماهواره ای دارای قدرت تفکیک پایینی هستند، لذا ریزمقیاس سازی داده های رطوبت خاک، برای بسیاری از برنامه های هیدرولوژیکی و کشاورزی منطقه نیاز است. بطور کلی ایده اصلی از ریزمقیاس سازی، ایجاد یک همبستگی آماری یا یک مدل فیزیکی بین رطوبت خاک بزرگ مقیاس و متغیرهای کمکی ریزمقیاس است. در برخی از پژوهش ها، ریزمقیاس سازی بر اساس ویژگی هایی مانند توپوگرافی، بافت خاک و پوشش گیاهی، انجام شده است. ولی از آنجا که، ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک و ویژگی های مبتنی بر توپوگرافی و بافت خاک، عموماً نیازمند مشاهدات گسترده ای است، لذا همین مسئله کاربرد این روش ها را در مقیاس های بزرگ (به علت عدم وجود یا کمبود داده های اندازه گیری) محدود می نماید. از آنجا که داده های سنجنده مودیس، همواره بصورت جهانی و روزانه با وضوح ۱ کیلومتر موجود می باشند، روش ریزمقیاس سازی براساس پارامترهای این سنجنده روشی مناسب جهت ریزمقیاس سازی داده های رطوبت خاک می باشد.

در این پژوهش، نتایج حاصل از ریزمقیاس سازی براساس پارامترهای مودیس، نشان داد که روش ریزمقیاس سازی با استفاده از

- Approach. *Int. J. Remote Sens.* vol. 24, no. 22. pp. 4599–4622.
- Djamai, N., Magagi, R., Goïta, K., Merlin, O., Kerr, Y., and Roy, A., 2016. A combination of DISPATCH downscaling algorithm with CLASS land surface scheme for soil moisture estimation at fine scale during cloudy days. *Remote Sens. Environ.* vol. 184. pp. 1–14.
- Dumedah, G. and Walker, J. P., 2017. Assessment of model behavior and acceptable forcing data uncertainty in the context of land surface soil moisture estimation. *Adv. Water Resour.* vol. 101. pp. 23–36.
- Elachi, C., 1987. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing.* Wiley Interscience.
- Hihara, T., Kubota, M., and Okuro, A., 2015. Evaluation of sea surface temperature and wind speed observed by GCOM-W1/AMSR2 using in situ data and global products. *Remote Sens. Environ.* vol. 164. pp. 170–178.
- Holgate, C. M., De Jeu, R. A. M., van Dijk, A. I. J. M., Liu, Y. Y., Renzullo, L. J., ... Briggs, P. R., 2016. Comparison of remotely sensed and modelled soil moisture data sets across Australia. *Remote Sens. Environ.* vol. 186. pp. 479–500.
- 2012, e-Handbook of Statistical Methods. NIST/SEMATECH.
- Jackson, T. J., Cosh, M. H., Bindlish, R., Starks, P. J., Bosch, D. D., ... Du, J., 2010. Validation of Advanced Microwave Scanning Radiometer Soil Moisture Products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* vol. 48, no. 12. pp. 4256–4272.
- Jensen, J. R., 1999. *Remote Sensing of the Environment – An Earth Resource Perspective.* Pearson.
- Kawaguchi, M., and Yoshida, T., 2013. Regular Observation by Global Change Observation Mission 1st-Water GCOM-W1 (Shizuku). *NEC Tech. J.* vol. 8, no. 1. pp. 32–35.
- Liang, X. and Lettenmaier, D. P., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.* vol. 99, no. D7. pp. 14415–14428.
- Liang, S., Strahler, A. H., and Walthall, C. W., 1999. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: A simulation study, *J. Appl. Meteorol.*, 38, 712–725.
- Lillesand, T. M., 2007. *Remote Sensing and Image Interpretation, Fifth Edition.* Wiley.
- Peng, F., Mu, M., and Sun, G., 2017. Responses of soil moisture to climate change based on projections by the end of the 21st century under the high emission scenario in the 'Huang-Huai-Hai Plain' region of China. *J. Hydro-Environ. Res.* vol. 14. pp. 105–118.
- این پارامترها، تطابق مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده برقرار نمود، بطوریکه ریزمقیاس‌سازی منجر به کاهش خطا و افزایش ضریب همبستگی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری گردید. مقادیر رطوبت خاک ریزمقیاس‌شده از معادله خطی که پارامترهای آلبیدو، دمای سطح زمین، و شاخص تفاضل نرمال‌شده‌ی پوشش گیاهی مودیس را مرتبط می‌سازد، برآورد گردید. پس از ریزمقیاس‌سازی در ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ مقادیر ضریب همبستگی بترتیب از ۰/۲۹۵، ۰/۵۵۲ و ۰/۲۳۷ به ۰/۸۶۴، ۰/۷ و ۰/۷۵۰ افزایش و مقادیر خطای مطلق متوسط و خطای متوسط ریشه کاهش یافت که نشان دهنده‌ی بهبود نتایج با استفاده از این تکنیک ریزمقیاس‌سازی می‌باشد.
- پیشنهاد می‌شود، برای بهبود محصولات ریزمقیاس‌شده رطوبت، متغیرهای دیگری مانند بارش که بر محصول ریزمقیاس‌شده تأثیرگذار است، در ریزمقیاس‌سازی لحاظ شود. اثر شاخص‌های گیاهی دیگر مانند شاخص نسبت مادون قرمز ساده^۱ یا شاخص گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)^۲ بر بهبود کیفیت محصولات ریزمقیاس‌شده مقایسه گردد و شاخص مناسب مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، بمنظور اعتبارسنجی محصولات AMSR2 و مقادیر ریزمقیاس‌شده رطوبت خاک در منطقه، بهینه‌سازی تکنیک‌های ریزمقیاس‌سازی با استفاده از آنالیز حساسیت توسط شبکه‌ای متراکم از سنسورها در داخل منطقه‌ای که یک پیکسل AMSR2 پوشش می‌دهد، انجام گردد.

منابع

انصاری ح.، حسن‌پور م. ۱۳۹۴. طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری داده‌های محیطی خاک به ویژه رطوبت، دما و شوری با نام تجاری REC-P55. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۱، جلد ۹، ص ۳۳–۳۲.

Anderson, M. G., 1985. *Hydrological Forecasting.* John Wiley & Sons, Chichester.

Busch, F. A., Niemann, J. D., and Coleman, M., 2012. Evaluation of an empirical orthogonal function-based method to downscale soil moisture patterns based on topographical attributes, *Hydrological Processes*, 26(18), 2696-2709.

Coleman, M. L., and Niemann, J. D., 2013. Controls on topographic dependence and temporal instability in catchment-scale soil moisture patterns, *Water Resources Research*, 49(3), 1625-1642.

Chauhan, N. S., Miler, S., and Aradny, P., 2003. Spaceborn Soil Moisture Estimation at High Resolution: A Microwave-Optical/IR Synergistic

1- Simple Ratio Infrared Index

2- Soil Adjusted Vegetation Index

- Microwave Remote Sensing, Active Passive – Volume III. Artech House, Remote Sensing Series.
- Yan, H., DeChant, C. M., and Moradkhani, H., 2015. Improving Soil Moisture Profile Prediction With the Particle Filter-Markov Chain Monte Carlo Method. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. vol. 53, no. 11. pp.6134–6147.
- Zhuo, L., and Han, D., 2016. The Relevance of Soil Moisture by Remote Sensing and Hydrological Modelling. Procedia Eng. vol. 154. pp. 1368–1375.
- Raney, K. J., Niemann, J. D., Lehman, B. M., Green, T. R., and Jones, A. S., 2015. A method to downscale soil moisture to fine resolutions using topographic, vegetation, and soil data. Adv. Water Resour. vol. 76. pp. 81–96.
- Soulis, K. X., Elmaloglou, S., and Dercas, N., 2015. Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. Agric. Water Manag. vol. 148. pp. 258–268.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K., 1986.

Integration of Retrievals of the AMSR2 Sensor with MODIS Products to Estimate Soil Moisture at High Resolution

M.Farokhi¹, H.Ansari^{2*}, A.R.Faridhoseini³

Received: Aug.28, 2018

Accepted: Sep.24, 2018

Abstract

Soil moisture is a determinant factor in most of complex environmental processes and has an important role in agricultural activities, hydrologic studies, and environmental monitoring. In this study the soil moisture data from the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) were used and these data were compared with ground-based measurements over Rafsanjan plain. The comparison criteria's are consisted of the evaluation of the mean error, root mean squared error, and the correlation coefficient. The results of validation showed that the measurements of the soil moisture at the stations 4, 5, and 6 behaved similarly to AMSR2 soil moisture, and the correlations were above of 70% ,and at the stations 1, 2 ,and 3, the correlations were low. In order to achieve better results, a downscaling technique was used. The technique suggests that remotely sensed soil moisture retrieved from the AMSR2 system at a 25km resolution can be downscaled to 1km resolution by using a simple linear equation based on parameters calculated with a regression model, which is based on three physical properties of 1km resolution retrieved from MODIS. The results revealed that the downscaling technique reduced the errors and increased the correlation coefficient, the correlation coefficients at stations 1, 2, and 3 increased from 0.295 , 0.552 , 0.237 to 0.864 , 0.7, 0.75, respectively.

Keywords: downscaling, Remote Sensing, Rafsanjan

1- PhD student of Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

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

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

(*-Corresponding Author Email: ansary@um.ac.ir)