تکنیک‌های نوین ارتقاء مقیاس سنجش از دور در بازیابی رطوبت خاک

مهدی درویشی [۱]، نجمه نیسانی سامانی [۲]، علی اشرفی [۱]، غلامرضا احمدی [۳]
۱-دانشجوی دکتری سنجش از دور دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، ۲-استادیار گروه سنجش از دور و جی آی اس دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، ۳-دانشجوی دکتری اقلیم شناسیدانشکده جغرافیا دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده
رطوبت خاک یکی از پارامترهای مهم و زیربنایی در حوزه هیدرولوژی سطحی است که نقش عمده‌ای در کنترل رواناب و میزان نفوذ پذیری آب به درون خاک دارد. بنابراین داشتن اطلاعی دقیق از تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک در مقیاسی قابل قبول جهت دستیابی به مدیریت پایدار آب/ زمین، زمانبندی بهینه کشت و همچنین پیش بینی سیل و تغیرات اقلیمی حیاتی است. اغلب در کاربردهای هیدرولیکی و کشاورزی در مقیاسی وسیع، نیازمند نقشه رطوبت خاک در تفکیک مکانی-زمانی بالا هستیم. داده‌های سنجش از دور غیر فعال مایکروویو به همراه الگوریتم های تغییر مقیاس، یک رویکرد نوین در جهت نیل به تهیه نقشه رطوبت خاک در مقیاسی مناسب است. در این مقاله پس از مروری کوتاه بر تاریخچه تکنیک‌های ارتقاء مقیاس رطوبت خاک و اصول عملکرد آنها، به بررسی الگوریتم جدید فیزیک- مبنا DisPATCh در بازیابی رطوبت خاک خواهد پرداخت.

واژه های کلیدی: رطوبت خاک، ارتقاء مقیاس، سنجش از دور، مایکروویو، الگوریتم DisPATCh

مقدمه
سابقه تخمین رطوبت خاک توسط داده های سنجش از دور به سال ۱۹۹۴، اتله و همکارانش با داده‌های باند مادون قرمز حرارتی، سال ۱۹۹۶، یولبای و همکارانش با داده‌های مایکروویو فعال و در همان سال توسط نیوکو و همکارنش با داده‌های مایکروویو غیر فعال بر می‌گردد. از آنجایی که در کاربردهای هیدرولوژی سطحی، جهت حصول به دقت قابل قبول در خروجی مدل‌های هیدرولیکی، نیاز به نقشه رطوبت خاک در مقیاس‌های مناسب (۱۰۰ متر و کمتر از آن) است- این امر تا کنون توسط اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای و در محل انجام می‌شود- بنابراین امروزه ضرورت تهیه نقشه‌های رطوبت خاک در مقیاس‌های کوچک (تفکیک بالا) توسط سنجنده‌های سنجش از دور بیش از پیش احساس می‌شود. ضرورت این امر بدان آن جهت است که در روش سنتی تهیه نقشه رطوبت خاک، جمع آوری داده‌های رطوبت خاک به شکل نقطه‌ای، نیاز به حضور فرد کارشناس به همراه تجهیزات در محل دارد و در مواردی که با منطقه مطالعاتی وسیعی مواجه باشیم، نمونه برداری زمینی در ابعاد بالا اغلب پرهزینه، زمان بر و طاقت فرسا است. یکی از کاندیدهای بالقوه برای غلبه بر مشکلات و موانع فوق، استفاده از ماهواره‌های سنجش از دور جهت برآورد رطوبت خاک در تفکیک مکانی- زمانی بالا است. بازیابی رطوبت خاک توسط داده های سنجش از دور در محدوده امواج نوری (مرئی و مادون قرمز) به علت عدم دقت کافی و همچنین موضوع عدم قطعیت و در محدوده امواج مایکروویو (در سیستم فعال) به علت حساسیت ضریب پراکندگی راداری به ساختار هندسی سطح و پوشش گیاهی و پیچیدگی مدلسازی آنها، از مشکلات استفاده از این محدوده طول موج‌ها/ سیستم ها در بازیابی رطوبت خاک است. استفاده از محدوده امواج مایکروویو غیرفعال به علت عدم حساسیت به سطح و ارتباط فیزیکی قوی با تشعشع سطح زمین (ارتباط بین دمای درخشندگی، دمای سطح و توان تشعشعی) بهترین عملکرد را در بازیابی رطوبت خاک در بین داده های سنجش از دور از خود نشان می‌دهد. مشکل عمده تصاویر مایکروویو غیرفعال، تفکیک مکانی پایین آنها است. استفاده از داده‌های سنجش از دوری رطوبت خاک بزرگ مقیاس (در حدود چندین کیلومتر) در مقیاس مدلسازی (کمتر از چند صد متر) منجر به عدم قطعیت در عملکرد مدل‌های هیدرولیکی سطح زمین می‌شود (شین و همکاران، ۲۰۱۳). جهت رفع این مشکل و ارائه نقشه رطوبت خاک- بویژه مقیاس‌های مورد نیاز در حوزه کشاورزی و مدیریت منابع آب- متخصصین سنجش از دور و علوم خاک اقدام به ابداع تکنیک‌ها و الگوریتم‌هایی جهت ارتقاء توان تفکیک (مقیاس) نقشه رطوبت خاک با استفاده از یکپارچه‌سازی داده‌های سنسورهای مختلف کرده‌اند، که به طور کلی از این روش‌ها تحت عنوان "تکنیک‌های ارتقاء مقیاس رطوبت خاک"[۷۹] یاد می‌شود. عموماً در تکنیک‌های ارتقاء رطوبت خاک از یکپارچه‌سازی داده‌های سنجش از دور فعال (تفکیک بالا- نوری) برای ارتقاء مقیاس و بازیابی رطوبت خاک از داده‌های مایکروویو غیرفعال (تفکیک پایین) استفاده می‌شود. نتایج صحت سنجی به دست آمده از اعمال تکنیک‌های ابداعی ارتقاء مقیاس رطوبت خاک، همبستگی و دقت بالایی در مقایسه با داده‌ها زمینی از خود نشان می‌دهد (جدول ۱). این مقاله به بررسی جزئیات روش شناسی تکنیک‌های ارتقاء مقیاس رطوبت خاک و آخرین دستاوردها و پیشرفت ها در این حوزه می پردازد.

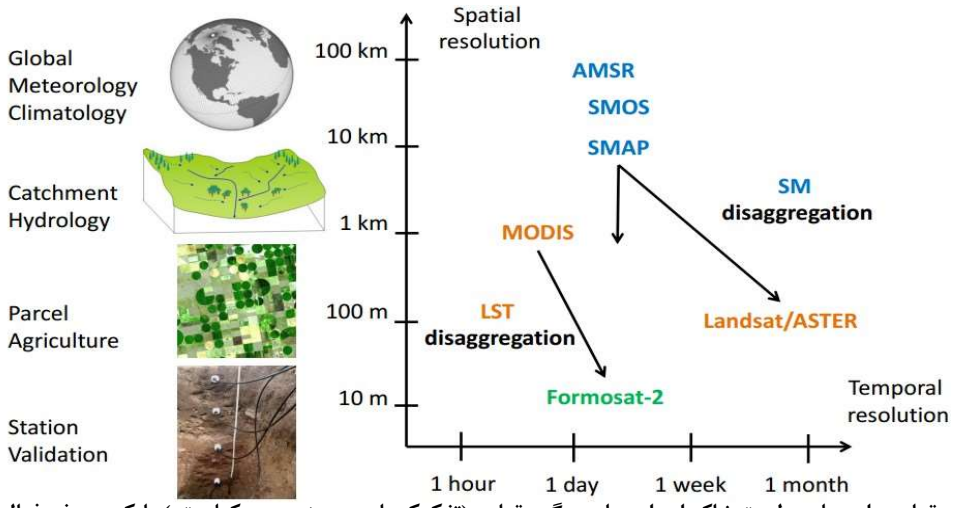
جدول ۱ - مطالعات صورت گرفته بر روی ارتقاء مقیاس رطوبت خاک با استفاده از ترکیب داده‌های سنجش از دور و مدلسازی

[۷۹] Downscaling/disaggregation of soil moisture

محققین	روش شناسی	مکان و زمان	نتایج
مرلین و همکاران، ۲۰۱۰	رابطه بین قابلیت تبخیری خاک و رطوبت خاک	منطقه یانکو، جنوب استرالیا، ۲۰۰۶	ضریب همبستگی ۹/۰ و RMSE ۰۱۲/۰
پیلس و همکاران، ۲۰۱۱	ایجاد مدل بین دمای خاک، NDVI و رطوبت خاک	منطقه یانکو، جنوب استرالیا، ۲۰۱۰	ضریب همبستگی ۱۴/۰ و RMSE ۹/۰
مرلین و همکاران، ۲۰۰۸	الگوریتم ارتقاء مقیاس بر روی تصویر MODIS	منطقه یانکو، جنوب استرالیا، ۲۰۰۶	RMSE بین ۴/۱ و ۸/۱ درصد
مرلین و همکاران، ۲۰۰۹	مدل ترتیبی	منطقه یانکو، جنوب استرالیا، ۲۰۰۶	RMSE۰۶۲/۰= و بایاس ۰۴۵/۰

مواد و روش‌ها

به طور کلی تکنیک ارتقاء مقیاس مکانی ابزاری برای پیش بینی متغیرهای بزرگ مقیاس به داده های اقلیمی در مقیاس محلی یـا ایستگاهی هستند که می‌توان از آنها به عنوان ورودی‌هایی برای مدل‌های هیدرولیکی استفاده کرد (شکل ۱).

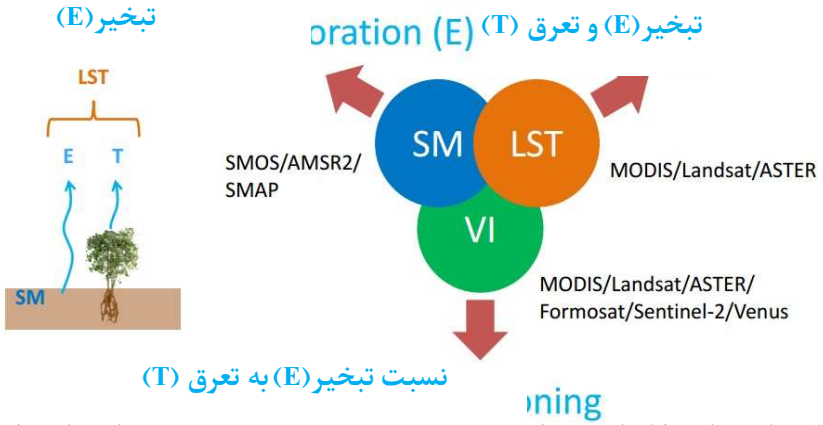


شکل ۱ - ارتقاء مقیاس داده های رطوبت خاک از داده های بزرگ مقیاس (تفکیک پایین- چندین ده کیلومتر) مایکروویو غیرفعال (به رنگ آبی) به داده‌های رطوبت خاک کوچک مقیاس (تفکیک بالا- چندین ده متر) اپتیک (به رنگ نارنجی و سبز) (مرلین و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ ب)

از آنجایی که مدلسازی‌های هیدرولیکی در حال حرکت به سمت مدلسازی با رویکرد مدلسازی توزیعی هستند، بنابراین سازگاری مقیاس داده با مقیاس مدل از اهمیت حیاتی برخوردار است (آزادی عمل در رسیدن از یک مقیاس به مقیاسی دیگر). عموماً همه تکنیک های ارتقاء مقیاس بازیابی رطوبت خاک به نوعی از یک مدل سلسله مراتبی مشخص و یا از مدل‌های مبتنی بر قانون فراکتال استفاده می‌کنند. در مدل‌های هیدرولوژی توزیع شده به شکل گسترده‌ای از تغییر مقیاس مشخصه های رطوبت خاک در تفکیک‌های مکانی متفاوت استفاده می‌شود. در اغلب این روشها، شرایط پوشش گیاهی و میزان همگنی مکانی منطقه ثابت فرض می شود، در صورتی که در دنیای واقعی ما با شرایط پویا و ناهمگونی مکانی در منطقه مورد مطالعه روبرو هستیم و جهت صحت سنجی الگوریتم‌های ارتقاء مقیاس نیازمند لحاظ کردن معیار های فوق الذکر هستند. در برخی مطالعات از داده‌های مختلف سنجش از دور جهت برآورد رطوبت خاک برای رسیدن به قدرت تفکیک بالاتر (km۳ و کمتر)- با استفاده از داده‌ه ای مایکروویو تفکیک پایین (km۱۰و بیشتر)- استفاده می‌شود، مانند شاخص سطح برگ (LAI)[۸۰]، حرارت سطح زمین (LST)[۸۱] هر دو از محصولات MODIS و پوشش سطح (LC)[۸۲] استفاده می‌کنند. مدل‌های تجربی ارتقاء مقیاس رطوبت خاک (استفاده از داده های سنجش از دور) عموماً مبتنی بر روش‌های آماری مانند رگرسیون، درخت چند مقیاس و روشهای زمین آماری (مانند کریجینگ) هستند. گروهی دیگر از الگوریتم ها از روش مثلثی / ذوزنقه‌ای و با استفاده از مدل‌های آماری برای برونیابی داده های مستقل در درون یک مثلث / ذوذنقه فرضی (تشکیل شده از داده‌های مشاهداتی) بهره می‌برند. در روشی به نام (DisPATCh)[۸۳] از فاکتور کارایی تبخیر خاک[۸۴] به

[۸۰] Leaf Area Index
[۸۱] Land Surface Temperature
[۸۲] Land Cover
[۸۳] Disaggregation based on Physical And Theoretical scale Change
[۸۴] Soil Evaporative Efficiency

عنوان تابعی از شاخص NDVI[۸۵] و LST و با استفاده از رابطه مثلثی بین کارایی و رطوبت خاک در دو مقیاس برای برآورد رطوبت خاک در تفکیک‌های بالاتر استفاده می‌شود (مرلین و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ ب). در همه روش‌های ذکر شده بالا، الگوریتم‌های ارتقاء مقیاس از یک چند جمله‌ای درجه دو به عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. از آنجایی که منحنی‌های درجه دو در پروسه برازش به طور قابل توجهی مستعد از دادن اطلاعات ساختاری در داده هستند (به خصوص در مواردی که منطقه مورد مطالعه شامل ناهمگونی شدید غیرخطی و شرایط متغیر باشد)، که این یک نقطه ضعف به حساب می آید. برای فائق آمدن بر چنین نقطه ضعفی می توان از ساختار سلسله مراتبی بیزین[۸۶] که از اطلاعات توابع چگالی احتمال (PDFs)[۸۷] استفاده می‌کند بهره برد (ویکل و همکاران، ۲۰۰۵)، اما بار محاسباتی سنگین آن یکی از معایب این روش است. استفاده از الگوریتم های غیرپارامتریک مبتنی بر توصیف کننده‌های داده که اطلاعات را از چند جمله‌ای های مرتبه بالاتر استخراج می کنند، یکی از رویکردهای بهینه سازی الگوریتم‌های ارتقاء مقیاس رطوبت خاک است. استفاده از اطلاعات متقابل و آنتروپی برگرفته از تئوری اطلاعات که در آن چند جمله‌ای درجه دو به صورت اسکالرها و توابع، توزیع شده‌اند، یکی از تکنیک‌های کارآمد در این زمینه است (پرینسیپه، ۲۰۱۰). در یک روش به خصوص مبتنی بر تئوری اطلاعات، از اطلاعات متقابل و آنتروپی برای تولید تجزیه سلسله مراتبی از داده مکانی بر حسب اسکالرهای مکانی اطلاعات استفاده می‌شود که جایگزینی مناسب برای چند جمله‌ای های آماری درجه دو است. استفاده از تکنیک مبتنی بر تئوری اطلاعات منجر به حفظ حداکثر اطلاعات و جمع آوری کامل ساختار تصادفی داده جهت نیل به یک ارتقاء مقیاس رطوبت خاک بهینه می‌شود (بویژه در شرایط نا همگون و متغیر یک منطقه). به طور کلی در ادغام (تلفیق) داده‌های سنجش از دوری نوری و مایکروویو جهت برآورد رطوبت خاک (تفکیک بالا) یا از روش مثلثی (پارامترهای دمای سطح، رطوبت خاک و پوشش گیاهی) استفاده می‌شود، یا از روش ذوزنقه‌ای (افزوده شدن پوشش گیاهی دچار تنش آبی شده به عنوان ضلع / پارامتر چهارم). در این روش ادغام داده‌ها نیز عموماً از دو رویکرد محاسباتی الف) تجربی محض (برازش چند جمله‌ای) و ب) نیمه فیزیکی[۸۸] (مبتنی بر متغیر تبخیر) استفاده می‌شود. در روش تجربی محض ابتدا رطوبت خاک در تصویر با قدرت تفکیک بالا (داده نوری) به صورت یک تابع چند جمله‌ای (متغیرهای درجه حرارت سطح LST، شاخص پوشش[۸۹] گیاهی و آلبیدوی سطح) بیان می‌شود، سپس تابع چند جمله‌ای جهت تعیین پارامترهای برازش بر روی تصویر با قدرت تفکیک پایین (داده مایکروویو) اعمال می شود و در پایان، چند جمله‌ای (با پارامترهای برازش شده) در تصویر تفکیک بالا جهت برآورد رطوبت خاک اعمال می‌شود. در روش تجربی محض از آنجایی که یک روش مشارکتی است، بنابراین به علت ماهیت غیر خطی چند جمله‌ای، میانگین رطوبت خاک برآورد شده در تصویر تفکیک بالا معادل با رطوبت خاک در تصویر مایکروویو نیست. در روش نیمه فیزیکی همانند روش تجربی از رویکرد مشابه چندجمله‌ای برازش شده متغیرهای داده نوری استفاده می شود، اما در این روش به طور فیزیکی یک ارتباط مکانی بین کارآمدی تبخیر و رطوبت واقعی خاک بر قرار می‌شود (به علاوه در این روش از داده‌های کمکی اقلیمی و خاک نیز استفاده می‌شود). در شکل ۲ رابطه بین پارامترهای درگیر در داده های متفاوت سنجش از دور جهت ارتقاء مقیاس رطوبت خاک (SM)[۹۰] را می‌توان مشاهده نمود. در ادامه به بررسی مدل نیمه فیزیکی DisPATCh خواهیم پرداخت.

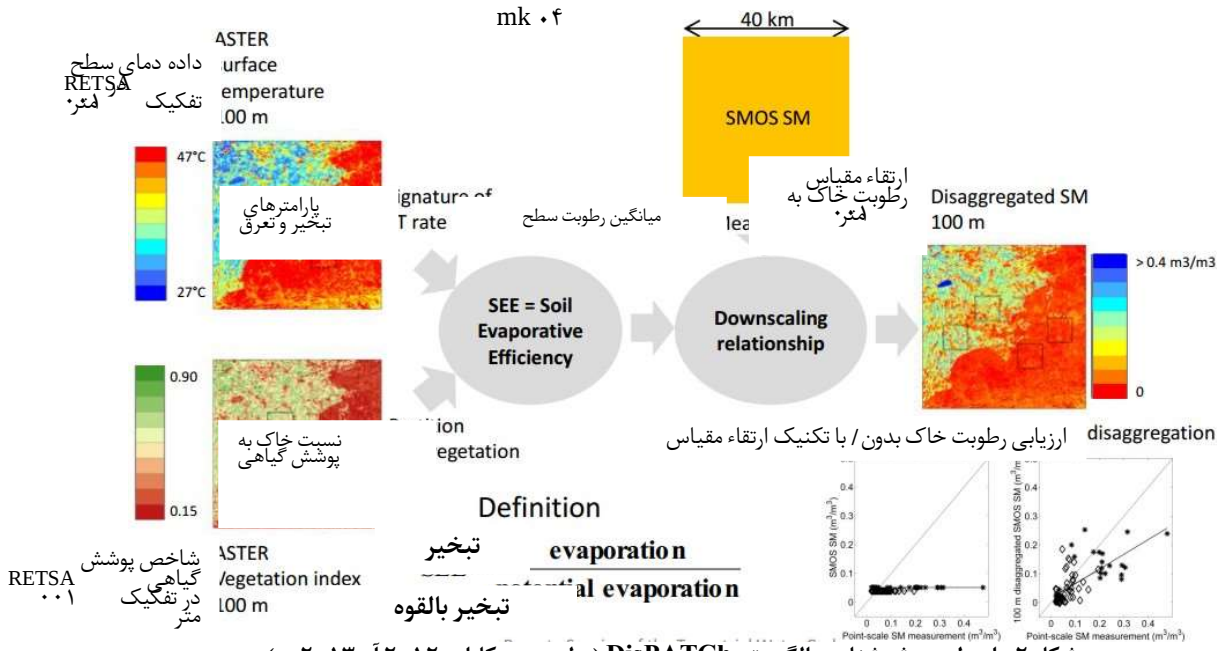


شکل ۲ - شاخص‌های به کار رفته در مدلسازی و ادغام داده های سنجش از دور جهت ارتقاء مقیاس رطوبت خاک

[۸۵] Normalized Difference Vegetation Index
[۸۶] Bayesian hierarchical framework
[۸۷] Probability Density Functions
[۸۸] Semi-physical
[۸۹] Vegetation Index
[۹۰] Soil Moisture (MS)

روش شناسی الگوریتم DisPATCh

تکنیک مبتنی بر DisPATCh یک الگوریتم جهت ارتقاء مقیاس رطوبت خاک (SM) بر اساس داده های دمایی خاک در تفکیک بالا است. این الگوریتم دمای خاک سطح زمین را با استفاده از یک مدل نیمه تجربی کارآیی تبخیر خاک و بسط سری تیلور مرتبه اول حول میانگین رطوبت خاک منطقه مطالعاتی به رطوبت خاک تبدیل می‌کند. این الگوریتم بر روی داده‌های (SMOS)[۹۱] سازمان فضایی اروپا توسعه یافته است. این داده‌ها از نوع داده‌های غیرفعال مایکروویوی در سنجش از دور است که داده‌های رطوبت خاک را در ابعاد پیکسل‌های $40\times40\ \text{km}$ در اختیار ما قرار می‌دهد. با استفاده از این الگوریتم، رطوبت خاک با قدرت تفکیک (مقیاس) $40\ \text{km}$ با استفاده از داده‌های دمایی سطح (به دست آمده از داده‌های ASTER) به داده‌های رطوبت خاک به قدرت تفکیک (مقیاس) 100m ارتقاء می‌یابد. در ادامه معادلات به کار رفته در این الگوریتم اشاره می‌شود.



شکل ۲- اصول و روش شناسی الگوریتم DisPATCh (مرلین و همکاران، ۲۰۱۲ آ و ۲۰۱۳ ب)

$$SM_{HR,i} = SM_{SMOS} + \left(\frac{\partial SEE_{mod}}{\partial SM}\right)^{-1}_{SMOS} \times \left(SEE_{HR,i} - \frac{1}{N}\sum_{j\in SMOS} SEE_{HR,j}\right) \quad , \quad SEE_{mod} = \frac{SM}{SM_p} \qquad (1)$$

در معادله (۱) عبارت داخل پرانتز اول مدل SEE است و اولین جمله SEE در پرانتز دوم مربوط به داده MODIS/ASTER است که از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$T_{mod} = f_s\left(SEE\,\mathbf{T}_{s,min} + (1-SEE)\,\mathbf{T}_{s,max}\right) + f_{vgu}\,\mathbf{T}_{v,min} + f_{vgn}\,\mathbf{T}_{v,max} \quad , \quad SEE_{HR,i} = \frac{\mathbf{T}_{s,max} - T_{s,i}}{\mathbf{T}_{s,max} - \mathbf{T}_{s,min}} \qquad (2)$$

[۹۱] Soil Moisture and Ocean Salinity

در معادله (۲) عبارت f_s ضریب تاثیر مربوط خاک عریان، f_{vgu} پوشش گیاهی بدون تنش، f_{vgn} پوشش گیاهی تحت تنش آبی و T دما است. بنابراین با توجه به معادلات، مقدار رطوبت خاک برای هر پیکسل در مقیاسی ارتقاء یافته‌تر محاسبه می‌شود.

بحث و نتایج

رطوبت خاک یک پارامتر مهم در بسیاری از کاربردهای متنوع، به ویژه در کشاورزی (رطوبت منطقه ریشه گیاه) و هیدرولوژی (به عنوان ورودی مدل‌های هیدرولیکی) است. نیاز به داشتن اطلاعات مکانی دقیق (تفکیک مکانی) در بازه تکرار زمانی کوتاه مدت (تفکیک زمانی) از رطوبت خاک یکی از نیازهای کاربران حوزه های مختلف و همچنین یکی از چالش های پیش رو در برابر متخصصین علوم خاک است. در یک دهه گذشته با ظهور سنجنده های پیشرفته سنجش از دوری چون SMOS و SMAP فرصتی بی نظیر برای متخصصان علوم خاک و زمین پدیده آورده تا به برآورد رطوبت خاک در گستره وسیعی از یک منطقه در قدرت تفکیک مکانی ۵۰ m تا ۱ km و تا دقت $\pm 0/04\ cm^3\ cm^{-3}$ دست یابند.

منابع

Merlin O., Hydrol. ۲۰۱۳b. An original interpretation of the wet edge of the surface temperature-albedo space to estimate cropevapotranspiration (SEB-۱S), and its validation over an irrigated area in north-western MexicoEarth Syst. Sci., ۱۷, ۳۶۲۳-۳۶۳۷.

Merlin O., F. Jacob, J.-P. Wigneron, J. Walker and G. Chehbouni. ۲۰۱۲a. Multi-dimensional disaggregation of land surface temperature using high-resolution red, near-infrared, shortwaveinfrared and microwave-L bands IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, ۵۰ (۵), pp. ۱۸۶۴-۱۸۸۰.

Shin, Y., and B. P. Mohanty. ۲۰۱۳. Development of a deterministic downscaling algorithm for remote sensing soil moisture footprint using soil and vegetation classifications. Water Resour. Res., ۴۹, doi:۱۰.۱۰۰۲/wrcr.۲۰۴۹۵.

Merlin O., A. Al Bitar, J. P. Walker, and Y. Kerr. ۲۰۱۰. An improved algorithm for disaggregating microwave-derived soil moisture based on red, near-infrared and thermal-infrared data. Remote Sensing of Environment, vol.۱۱۴, no.۱۰,pp.۲۳۰۵-۲۳۱۶.

Piles M., A. Camps, M. Vall-llossera et al. ۲۰۱۱. Downscaling SMOSderived soil moisture using MODIS visible/infrared data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.۴۹, no.۹, pp. ۳۱۵۶-۳۱۶۶.

Merlin O., A. Chehbouni, J. P. Walker, R. Panciera, and Y. H. Kerr. ۲۰۰۸. A simple method to disaggregate passive microwavebased soil moisture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. ۴۶, no. ۳, pp. ۷۸۶-۷۹۶.

Merlin O., A. Al Bitar, J. P. Walker, and Y. Kerr. ۲۰۰۹. A sequential model for disaggregating near-surface soil moisture observations using multi-resolution thermal sensors. Remote Sensing of Environment, vol.۱۱۳, no.۱۰, pp.۲۲۷۵-۲۲۸۴.

Wikle C. K. and L. M. Berliner. ۲۰۰۵. Combining information across spatial scales. Technometrics, vol. ۴۷, no. ۱, pp. ۸۰-۹۱, Feb.

Principe J., Information Theoretic Learning. ۲۰۱۰. Renyi's Entropy and Kernel Perspectives. New York, NY, USA: Springer-Verlag.

Abstract

Soil moisture is significant and fundamental parameters in field of surface hydrology that has a great role at run-off control and water permeability. Therefore, having accurate knowledge about temporal-spatial variations of soil moisture in acceptable scale to reach the sustainable management of water/soil, optimal cultivation time, flood prediction and climate changes is vital. In most hydraulic and agricultural applications we need soil moisture mapping in high temporal-spatial resolution. Passive microwave remotely sensed data along with downscaling algorithms is new approach to retrieval of soil moisture in high resolution. This paper after short reviewing on background of soil moisture retrieval techniques and its principles, consider the physic-based algorithm DisPATCh.