

کالیبراسیون بین سنجنده‌های مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر جنگل‌های تصادفی بمنظور تخمین روزانه رطوبت خاک در تصاویر ماهواره‌های مادیس

بهنام ولاشجردی^۱، علیرضا صدفردی نژاد^۲، اشکان رزاقمنش^۳

^۱ کارمند واحد GIS شرکت گاز استان مرکزی، کارشناس ارشد فتوگرامتری، دانشگاه تفرش،

behnam.201268@gmail.com

^۲ استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش

safdarinezhad@tafreshu.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران،

razaghmanesh@ut.ac.ir

چکیده

تخمین رطوبت خاک به کمک تصاویر ماهواره‌ای یک رویکرد مرسوم در برآورد این عامل محیطی در مقیاس‌های منطقه‌ای است. ماهیت پویای تغییر این کمیت ضرورت پایش مستمر آن را محسوس‌تر می‌سازد. تصاویر مادیس با توان تفکیک زمانی بالا ظرفیت کافی در تولید سری‌های زمانی از پارامترهای محیطی را برخوردارند. استفاده از مدل‌های رگرسیونی در تخمین پارامترهای محیطی به کمک تصاویر سنجنش از دوری یک رویکرد متداول قلمداد می‌شود. کالیبراسیون مدل‌های رگرسیونی نیازمند واقعیت‌های زمینی است. تامین واقعیت زمینی در وسعتی معادل با توان تفکیک مکانی سنجنده‌های مادیس موضوعی چالش‌برانگیز است. به همین دلیل روش‌های کالیبراسیون بین سنجنده‌ای برای این تصاویر نتایج بهتری را تامین می‌کنند. در این مقاله، بعد از کالیبراسیون میدانی تصاویر لندست-۸ بمنظور برآورد رطوبت خاک، از این تصاویر بمنظور تامین داده‌های کنترلی در کالیبراسیون مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر جنگل‌های تصادفی برای تصاویر مادیس استفاده شده است. این رویکرد توانسته دقت مدل‌های تخمین زده شده را در مقیاسه با شرایط استفاده مستقیم از داده‌های میدانی تا ۲۹ درصد بهبود بخشد. رویکرد پیشنهادی می‌تواند در مقاطع زمانی متناسب با توان تفکیک زمانی سنجنده‌های لندست تکرار شده و نتایج حاکی از توان تعمیم‌پذیری مطلوب زمانی نتایج کالیبراسیون در این مقاطع زمانی برای تصاویر سنجنده‌های مادیس می‌باشد.

کلمات کلیدی: تخمین رطوبت خاک، کالیبراسیون بین سنجنده‌ای، سنجنده لندست ۸، سنجنده مادیس

مقدمه

علم هیدرولوژی به شناخت و توسعه‌ی راهکارهای مدیریت چرخه‌ی آب در طبیعت می‌پردازد. مدیریت آبیاری زمین‌های زراعی، پیش‌بینی سیل و خشکسالی، شناسایی حوزه‌های آبریز و پیش‌بینی جریان

روان‌آب‌های سطحی نمونه‌ای از حوزه‌های کاربردی در این علم محسوب می‌شود. از مهمترین پارامترهای هیدرولوژیکی که در کاربردهای ذکر شده استفاده فراوانی دارد؛ رطوبت خاک است. این پارامتر همانند سایر پارامترهای هیدرولوژیکی به شدت در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متنوع و مقدار آن در هر منطقه نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کند [۱-۳-۴]. اندازه‌گیری رطوبت خاک بصورت سنتی بکمک راهکارهای میدانی زمان‌بر و پرهزینه بوده و در بسیاری از مناطق امکان اندازه‌گیری آن بصورت مستقیم میسر نیست [۵]. فن‌آوری سنجنش از دور را می‌توان بعنوان رویکردی جایگزین و قابل اعتماد در این حوزه برشمرد [۶].

تمامی روش‌های سنجنش از دوری در برآورد پارامترهای محیطی به نوعی نیازمند به داده‌های واقعیت زمینی هستند. این داده‌ها عموماً بعنوان داده‌های آموزشی در فرایندهای کالیبراسیونی مدل‌های سنجنش از دوری استفاده می‌شوند. جمع‌آوری واقعیت زمینی همواره بخش پرهزینه در کالیبراسیون مدل‌های سنجنش از دوری بوده که در مورد پارامترهای محیطی با کاهش توان تفکیک مکانی داده‌های سنجنش از دوری چالش‌های بیشتری نیز بهمراه دارد. عبارت دیگر، نسبت دادن اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای در عملیات میدانی به یک پیکسل با حد تفکیک مکانی پایین عدم قطعیت‌های روند کالیبراسیونی را افزایش می‌دهد. راهکارهای کالیبراسیون بین سنجنده‌ای در این شرایط برای کاهش عوامل نایقینی توسعه یافته‌اند.

بعنوان مثال، آمازیره و همکاران (۲۰۱۸) به کمک باند حرارتی تصاویر با رزولوشن مکانی متوسط (لندست ۷ و ۸) دقت مدلسازی رطوبت خاک حاصل از تصاویر راداری را (سنسیتینل ۱) افزایش دادند. کیم و هاگو (۲۰۱۳) نیز با ادغام تصاویر با توان تفکیک مکانی متوسط (MODIS 1km) و پایین (AMSR-E 25km) برآورد رطوبت خاک را در مقیاس مکانی متوسط (1~ کیلومتر) به اجرا رساندند. در این روش پارامترهای مختلف از جمله درجه حرارت سطح، شاخص‌های پوشش

گیاهی و آلبدوم استخراج از سنجنده‌ی مادیس به کار گرفته شده‌اند. نتایج این تحقیقات سودمندی ادغام داده‌های سنجنش از دور با مقیاس متفاوت مکانی و طیفی را نشان داده است [۷-۸].

روش تحقیق

رطوبت خاک با تغییر شرایط محیطی (توپوگرافی، پوشش گیاهی، شیب، جهت تابش خورشید و...) به سرعت قابل تغییر است. به همین منظور اندازه‌گیری‌های میدانی رطوبت خاک تنها برای اطراف این ایستگاه‌ها معتبر بوده و این مشاهدات نقطه‌ای اعتبار کافی را برای تعمیم به پیکسل‌های تصاویری همچون مادیس (با قدرت تفکیک مکانی پایین) برخوردار نیستند. با توجه به ضرورت دستیابی به واقعیت‌های زمینی در روند کالیبراسیون مدل‌های تخمین پارامترهای محیطی به کمک داده‌های سنجنش از دوری، کالیبراسیون بین سنجندهای می‌تواند بعنوان یک رویکرد جایگزین مطرح گردد.

در این تحقیق ابتدا با استفاده از تصاویر لندست-۸ (با قدرت تفکیک مکانی بالا در مقایسه با تصاویر مادیس) مدل‌های رطوبت خاک برآورد می‌شود. سپس از نتایج حاصل از این مدل‌سازی بعنوان داده‌های کنترلی در روند تخمین مدل‌های رطوبت خاک در تصاویر مادیس استفاده شده است.

در این پژوهش از دو تصویر لندست-۸ با اختلاف زمانی ۱۶ روز برای کالیبراسیون مدل رطوبت خاک منطقه استفاده شده است. این موضوع ضمن افزایش تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری شده میدانی بمنظور ارزیابی بهتر مدل رگرسیونی، شرایط استقلال زمانی عملکرد مدل را فراهم می‌آورد.

تمامی مدل‌های رگرسیونی بکارگرفته شده در این تحقیق مبتنی بر الگوریتم رگرسیونی جنگل تصادفی انتخاب شده که پارامترهای تنظیمی آن در تمامی آزمون‌های این تحقیق یکسان انتخاب شده‌اند. این تنظیمات شامل حداقل تعداد مشاهدات در هر برگ درخت؛ سه، تعداد ویژگی‌های نمونه‌برداری شده برای رشد درخت جدید؛ یک و تعداد درختان تصمیم‌گیری هزار می‌باشند.

بعد از کالیبراسیون مدل تخمین رطوبت خاک در تصاویر لندست-۸ و ارزیابی دقت و کیفیت آن، مناطق هموزن با پوشش خاک لخت در مجاورت موقعیت‌های اندازه‌گیری میدانی از طریق آستانه‌گذاری در شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده‌شناسایی و بعنوان داده‌های آموزشی و آزمایشی در روند کالیبراسیون مدل‌های تخمین رطوبت خاک در تصاویر مادیس مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به منظور ارزیابی تعمیم‌پذیر بودن مدل تخمین رطوبت خاک بدست

آمده برای تصاویر مادیس از یک تصویر خارج از محدوده‌ی زمانی داده‌های کنترلی استفاده شده است. بر این اساس بعد از اخذ تصویر سوم، با کمک این تصویر و دو تصویر مورد استفاده در روند کالیبراسیون تصاویر لندست-۸؛ مدل رگرسیونی رطوبت خاک مجدداً برآورد شده تا از مناطق هموزن واقع شده در خاک لخت بعنوان نمونه‌های جدید به منظور ارزیابی استقلال زمانی استفاده شود.

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

منطقه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق مربوط به بخش‌هایی از ایالت کالیفرنیا در ایالات متحده‌ی امریکا است. موقعیت جغرافیایی این داده منطقه در محدوده‌ی حداثی عرض‌های جغرافیایی ۳۸/۴۷۱۷ و ۳۸/۳۸۶۶ و طول‌های جغرافیایی ۱۲۰/۹۹۴۲- و ۱۲۰/۹۰۴۸- واقع شده است. در این منطقه شبکه‌ای از ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی بمنظور اخذ داده‌های هواشناسی نصب بوده که علاوه بر مشاهدات جوی، کمیت‌های مرتبط با خاک مانند رطوبت خاک نیز ثبت می‌گردد. داده‌های اخذ شده از این ایستگاه‌ها را می‌توان در <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets> یافت. سه تصویر مطابق با جدول (۱) از این محدوده‌ی جغرافیایی اخذ گردیده است. انتخاب تصاویر در زمان عدم وجود پوشش محسوس ابر و برف در انتخاب این تصاویر لحاظ شده است.

جدول (۱): تاریخ اخذ تصاویر

نام سنجنده	لندست ۸	مادیس
تاریخ اخذ تصویر (روز اول)	۲۰۱۴/۰۱/۰۷	۲۰۱۴/۰۱/۰۷
تاریخ اخذ تصویر (روز دوم)	۲۰۱۴/۱۷/۰۷	۲۰۱۴/۱۷/۰۷
تاریخ اخذ تصویر (روز پایانی)	۲۰۱۴/۰۲/۰۸	۲۰۱۴/۰۲/۰۸

مجموعاً ۱۳۹ داده میدانی رطوبت خاک نیز از داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی همزمان با زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای استخراج گردید.

از تصاویر لندست ۸ و مادیس هشت شاخص مطابق با جدول (۲) استخراج شده است. این شاخص‌ها تحقیقات مختلفی بعنوان شاخص‌های موثر در تخمین رطوبت خاک گزارش شده‌اند [۹].

جدول (۲): پارامترهای استخراج شده از تصاویر لندست ۸ و مادیس [۹]

ردیف	نمایه	دامنه
۱	$NDWI^{\circ}$	$(\rho_{Green}^1 - \rho_{NIR}) / (\rho_{Green}^1 + \rho_{NIR})$

^۴ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

^۵ Normalized difference water index

^۶ باند تصویر لندست ۸

^۱ minleaf

^۲ FBoot

^۳ ntreess

۸ پرداخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از این مدل‌سازی را بعنوان نمونه‌های میدانی بین سنجنده‌ای استفاده خواهد شد. چون ضرایب مدل کالیبره شده بین سنجنده‌ای تا تاریخ اخذ گروه بعدی تغییر نخواهد کرد؛ پس نمونه‌های میدانی بین سنجنده‌ای بدست آمده از گروه آخر تصاویر لندست ۸ تنها در ارزیابی مدل استفاده می‌شود.

• تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر لندست ۸

نتایج حاصل از مدل‌سازی جنگل تصادفی توسط ۸ پارامتر جدول (۲) به در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین بازه داده های رطوبت خاک بین ۰/۱ درصد تا ۰/۳۹ درصد می باشد.

جدول (۳): مدل حاصل از دو تصویر لندست ۸

مدل جنگل تصادفی	RMSE	R	R ²
داده محاسباتی لندست ۸	۴/۱۲۵۰	۰/۸۹۷۱	۰/۸
داده ارزیابی لندست ۸	۴/۳۰۲۶	۰/۸۵۷۵	۰/۷۴

• برآورد رطوبت خاک توسط تصاویر مادیس

پارامترهای موجود در جدول (۲) بعنوان پارامترهای مستقل در مدل‌سازی جنگل تصادفی برای تخمین رطوبت خاک توسط تصاویر مادیس استفاده گردید. بمنظور نشان دادن؛ نتایج بهتر مدل‌سازی بین سنجنده ای ابتدا مدل‌سازی با اندازه گیری های میدانی و سپس با اندازه گیری های بین سنجنده ای انجام شد و نتایج حاصل از این دو با یکدیگر مقایسه گردید. تعداد داده های میدانی مورد استفاده در محاسبات مدل ۳۰ و تعداد داده های میدانی در ارزیابی مدل ۸ است. که نتایج این دو مدل‌سازی در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴): مدل‌های حاصل از دو تصویر مادیس با استفاده از اندازه گیری های میدانی و بین سنجنده ای

مدل جنگل تصادفی	RMSE	R	R ²
داده های محاسباتی اندازه گیری های میدانی	۵/۳۲۸۹	۰/۶۳۹۴	۰/۵۴
داده های ارزیابی اندازه گیری های میدانی	۵/۶۲۱۹	۰/۲۶۹۱	۰/۰۰۲۸

$(\rho_{Green} - \rho_{MIR}) / (\rho_{Green} + \rho_{MIR})$	MNDWI ^v	۲
$2.5 * ((\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + 6 * \rho_{Red} - 7.5 * \rho_{Blue} + 1))$	EVI ^۸	۳
$(\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$	NDVI ^۹	۴
$(\rho_{NIR} - \rho_{MIR}) / (\rho_{NIR} + \rho_{MIR})$	NDMI ^{۱۰}	۵
PCA1,2,3	PCA ^{۱۱}	۶

در جدول (۲) NDWI شاخصی برای نظارت بر تغییرات مربوط به محتوای آب است که توسط رابطه موجود در جدول فوق بیان میگردد [۱۰]. MNDWI همان NDWI است با این تفاوت که توده های آبی با تمایز بهتری بین آب های سطحی و سطوح خشک مشخص می شوند [۱۱]. EVI این شاخص برای شناسایی پوشش گیاهی مورد استفاده قرار میگیرد [۱۲]. NDVI شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده است که از رابطه موجود در جدول (۲) حاصل می شود [۱۳]. NDMI شاخصی برای شناسایی رطوبت است [۱۴]. PCA تبدیل تحلیلی مولفه‌های اصلی از تصاویر استخراج شده است [۱۵].

نتایج و بحث

در رویکرد بمنظور ارزیابی نتایج این تحقیق طراحی شده است. سناریو اول به بررسی تاثیر فرایند کالیبراسیون بین سنجنده‌ای در تخمین رطوبت خاک اختصاص داشته که برای انجام آن مدل رگرسیونی حاصل از تصاویر مادیس به دو شکل برآورد شده است. که شکل نخست کالیبراسیون مدل با استفاده از نمونه‌های میدانی انجام شده و در شکل دوم کالیبراسیون بین سنجنده‌ای توسط نتایج حاصل از مدل‌سازی رطوبت خاک بکمک تصاویر لندست ۸ به اجرا رسیده است. سپس نتایج حاصل از این دو نوع کالیبراسیون با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در سناریو دوم استقلال زمانی مدل تخمین رطوبت خاک حاصل از کالیبراسیون بین سنجنده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

از آنجا که کالیبراسیون بین سنجنده‌ای مدل تخمین رطوبت خاک توسط تصاویر مادیس به تصاویر لندست ۸ نیازمند است و این تصاویر دارای قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روز می‌باشند؛ پس باید مدل حاصل از تصاویر مادیس در یک بازه زمانی تا تصاویر لندست ۸ حاصل شود، هر روز به تخمین رطوبت خاک منطقه پردازد تا مجدداً بتوان با کالیبراسیون بین سنجنده‌ای مدل مادیس در تاریخ اخذ تصاویر لندست ۸ به تخمین رطوبت خاک منطقه مورد نظر پرداخت. به این منظور ابتدا به مدل‌سازی رطوبت خاک حاصل از ۲ گروه تصاویر لندست

^۱ Normalized Difference Moisture Index

^۱ Principal Components Analysis

^۷ Modified Normalized Difference Water Index

^۸ Enhanced Vegetation Index

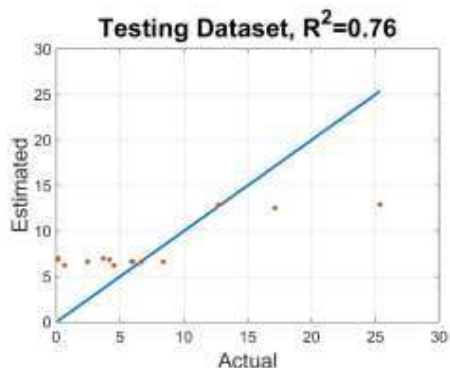
^۹ Normalized Difference Vegetation Index

داده های محاسباتی اندازه گیری های بین سنجنده ای	۱/۱۴۲۳	۰/۹۶۹۹	۰/۹۴
داده های ارزیابی اندازه گیری های بین سنجنده ای	۴/۰۰۵	۰/۸۸۴۵	۰/۷۸

به این منظور با استفاده از مدل کالیبراسیون بین سنجنده ای بدست آمده در قسمت قبل و همچنین نمونه بین سنجنده ای گرفتن تمامی نمونه های موجود تصویر مادیس اخذ شده در روز پایانی، به بررسی استقلال زمانی مدل کالیبراسیون بین سنجنده ای پرداخته شد و نتایج آن در جدول (۶) ارائه شده است. همچنین در شکل (۱) نمودار رگرسیونی برای نمونه های ارزیابی قابل مشاهده است.

جدول (۶): نتایج استقلال زمانی کالیبراسیون بین سنجنده ای

مدل اندازه گیری های بین سنجنده ای	RMSE	R	R ²
محاسباتی	۱/۱۴۲۳	۰/۹۶۹۹	۰/۹۴
ارزیابی	۴/۹۸۹۲	۰/۸۷۴۸	۰/۷۶



شکل ۱: نمودار رگرسیونی خطی داده های ارزیابی اندازه گیری های

بین سنجنده ای

با توجه به اینکه هیچ یک از نمونه های بین سنجنده ای تصویر سوم در مدل نهایی شرکت نداشته اند و تنها در ارزیابی مدل شرکت نمودن نتایج بدست آمده بمنظور بررسی استقلال زمانی مدل کالیبراسیون بین سنجنده ای تصاویر مادیس مطلوب می باشد.

نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد برای رسیدن به دقت بهتر در تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر مادیس نیاز به تصاویری با حد تفکیک مکانی بالاتر می باشیم. هر چند که مزیت تصاویر مادیس با استفاده از این تصاویر رطوبت منطقه وسیعی را هر روز بدست آوریم. از این رو پیشنهاد می شود ابتدا با استفاده از تصاویری با تفکیک مکانی بالاتر یک مدل تخمین رطوبت را برای تصاویر مادیس کالیبره گردد و سپس با استفاده از این مدل هر روز به تخمین رطوبت منطقه پرداخته شود.

مراجع و منابع

[1] U. Rosenbaum, H. R. Bogen, M. Herbst, J. A. Huisman, T. J. Peterson, A. Weuthen, A. W. Western, and H. Vereecken, 2012. WATER

همانگونه که در جدول (۴) قابل مشاهده است؛ نتایج مدل هنگام سود بردن از کالیبراسیون بین سنجنده ای سبب افزایش ۴۰ درصدی ضریب تبیین و کاهش ۴ برابری مجذور مربعات خطا می گردد. بنابراین استفاده از کالیبراسیون بین سنجنده ای در تخمین رطوبت خاک هنگام استفاده از تصاویر با رزولوشن پایین و متوسط پیشنهاد می شود.

نتایج بررسی استقلال زمانی مدل تخمین رطوبت خاک حاصل از

کالیبراسیون بین سنجنده ای

برای بررسی استقلال زمانی کالیبراسیون بین سنجنده ای مدل رطوبت خاک نیاز است؛ با استفاده از سه تصویر لندست ۸ به تخمین رطوبت خاک منطقه مورد نظر با رزولوشن ۵۰×۵۰ متر پرداخت. چراکه انتظار می رود؛ مدل حاصل از تصاویر مادیس (مدل کالیبراسیون بین سنجنده ای) در یک بازه زمانی تا تصویر بعدی لندست ۸ حاصل شود؛ هر روز به تخمین رطوبت خاک منطقه پردازد.

بر این اساس، در این بخش ابتدا به ارزیابی دقت کالیبراسیون مدل رطوبت خاک حاصل از ۳ تصویر لندست ۸ می پردازیم. در جدول (۵) نتایج ارزیابی این مدل را می توان مشاهده نمود.

جدول (۵): مدل حاصل از سه تصویر لندست ۸

مدل جنگل تصادفی	RMSE	R	R ²
داده محاسباتی	۳/۱۷۲۹	۰/۹۲۰۲	۰/۸۵
داده ارزیابی	۴/۲۵۳	۰/۷۲۴۵	۰/۵۲

همان طور که قبلا نیز بیان شد؛ هدف از انجام این مرحله تنها ایجاد نمونه های بین سنجنده ای بمنظور اثبات استقلال زمانی مدل حاصل از تصاویر مادیس در کالیبراسیون بین سنجنده ای می باشد. سپس برای اینکه بتوان به نتایج حاصل از مدل رطوبت خاک تصاویر مادیس برای سایر روزها نیز اطمینان حاصل کرد، نیاز است تا در تاریخ دیگری که یک تصویر لندست ۸ اخذ می گردد، به کالیبراسیون بین سنجنده ای مدل رطوبت خاک مادیس پردازیم. اما نکته ای که قابل توجه می باشد؛ این مدل باید استقلال زمانی داشته باشد. برای رسیدن

Sensing of Environment. 58 (3): 257–266.

[11] Xu, H. Q., 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27, 3025-3033

[12] A. Huete, K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, L. G. Ferreira. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83(2002) 195-213

[13] Rouse, J.W, Haas, R.H., Scheel, J.A., and Deering, D.W. (1974) 'Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.' *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, vol. 1, p. 48-62.

[14] Skakun, R.S., Wulder, M.A. and Franklin, S.E. (2003). "Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 86, Pp. 433-443." (ESRI, 2018)

[15] Pearson, K. (1901). "On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space".

RESOURCES RESEARCH, VOL. 48

[2]F.Herrmann et al., "Simulation of future groundwater recharge using a climate model ensemble and SAR-image based soil parameter distributions— A case study in an intensively-used Mediterranean catchment," *Sci. Total Environ.*, vol. 543, pp. 889–905, Feb. 2016.

[3] H. Sellami, I. La Jeunesse, S. Benabdallah, N. Baghdadi, and M. Vanclooster, "Uncertainty analysis in model parameters regionalization: A case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (southern France)," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 18, pp. 2393–2413, 2014.

[4] Fieuzal, R.; Duchemin, B.; Jarlan, L.; Zribi, M.; Baup, F.; Merlin, O.; Hagolle, O.; Garatuza-Payan, J. Combined use of optical and radar satellite data for the monitoring of irrigation and soil moisture of wheat crops. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011, 15, 1117–1129.

[5] Wilson, D., Western, A.W., Greyson, R.B., Berg, A.A., Lear, M.S., Rodell, M., Famiglietti, J.S., Woods, R.A. & McMahon, T.A. (2003). Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30cm depth, Machurangi river catchment, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 276: 254-274.

[6] Mattikalli, N. M., Engman, E. T., Ahuja, L. R. and Jackson, T. J., 1998. Microwave remote sensing of soil moisture for estimation of profile soil property. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19(9), pp. 1751-1767.

[7] Jongyoun Kim and Terri S. Hogue. Improving Spatial Soil Moisture Representation Through Integration of AMSR-E and MODIS Products. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 50, NO. 2, FEBRUARY 2012

[8] Amazirh.A, Merlin.O, Er-Rakia.S, Qi Gao, Rivalland.V, Malbeteau.Y, Khabba.S, José.M Escorihuela. Retrieving surface soil moisture at high spatio-temporal resolution from a synergy between Sentinel-1 radar and Landsat thermal data: A study case over bare soil. *Remote Sensing of Environment* 211 (2018) 321–337

[۹] ابوالقاسم دادرسی سیزوار، علی محمد آخوندعلی، فریدون رادمنش، علی اکبر نوروزی، (۱۳۹۴) مدل سازی سطوح مختلف رطوبت خاک سطحی در گستره ی داده های حرارتی و انعکاسی

[10] Gao, Bo-Cai (1996). "NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space" . *Remote*