

برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در فصل سرد با استفاده از داده‌های سنجش از دور نوری و حرارتی در شرایط بدون ابرناکی

حامد ادب

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۷/۷)

چکیده

تعداد محدودی از ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی در کشور به اندازه‌گیری رطوبت سطح خاک می‌پردازند همچنین ممکن است در مناطق فاقد ایستگاه نیاز اساسی به اطلاعات رطوبت سطح خاک باشد. هدف پژوهش حاضر، استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۸ جهت برآورد رطوبت سطح خاک در منطقه فاقد ایستگاه هواشناسی کشاورزی است. رطوبت وزنی ۱۴ نمونه خاک در فصل سرد از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری همزمان با عبور لندست ۸ از مراتع طبیعی فقیر شمال شهر سبزوار محاسبه گردید. براساس تحلیل مؤلفه اصلی، چهار مؤلفه اول از هفت شاخص پوشش گیاهی و بیو-فیزیکی مؤثر بر رطوبت سطح خاک از داده‌های لندست ۸ استخراج شد. سپس رطوبت سطح خاک در لحظه عبور ماهواره با استفاده از چهار مؤلفه اول با روش‌های رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی برآورد شد. نتایج برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک نشان داد که متوسط درصد خطای مطلق با روش شبکه عصبی ۳۰ درصد خطا و در روش رگرسیون کلاسیک با ۴۰ درصد خطا همراه بود. نتایج تحقیق در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که مدل کردن رطوبت لحظه‌ای خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی و داده‌های ماهواره لندست ۸ در مناطق فاقد ایستگاه هواشناسی کشاورزی قابل انجام است.

واژه‌های کلیدی: رطوبت لحظه‌ای سطح خاک، سنجش از دور نوری و حرارتی، شبکه عصبی

۱. گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: h.adab@hsu.ac.ir

مقدمه

اطلاع دقیق از میزان رطوبت سطح خاک و نوسان‌های مکانی و زمانی آن می‌تواند منجر به بهره‌برداری بهینه از امکانات زمین گردد. تلاش‌ها برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت موجود در سطح خاک با استفاده از دستگاه و سنجنده‌های زمینی و به‌صورت نقطه‌ای و محدود انجام گرفته است (۳، ۲۶ و ۵۹). این روش‌ها علی‌رغم دقت بالا در مقیاس محلی، دارای معایبی مانند صرف وقت و هزینه زیاد نمونه‌گیری در مقیاس منطقه‌ای، ناکافی بودن و پراکندگی مکانی نمونه‌ها را دارد (۶۲). از اینرو روش‌های زمینی سنجنش رطوبت خاک کارایی لازم در ارائه تغییرات مکانی و زمانی رطوبت سطح خاک را به نحو مطلوب ندارد. همچنین، تلاش‌های زیادی برای برآورد مقادیر رطوبت خاک با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی انجام شده است (۱۳ و ۳۹)؛ اما این مدل‌ها دارای محدودیت ویژه‌ای هستند زیرا اجرای آن نیازمند داده‌های زیادی مانند داده‌های همگنی و نفوذپذیری خاک، بارش، دما و ساعات آفتابی است که تهیه آن در مناطق فاقد آمار امکان‌پذیر نیست (۱۰). علاوه بر روش‌های مستقیم در اندازه‌گیری رطوبت خاک، روش‌های غیرمستقیم مانند سنجنش از دور وجود دارد. داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با روش‌های مستقیم مثل ایستگاه‌های هواشناسی، پوشش مکانی کاملی از سطح زمین را با توجه به قدرت تفکیک مکانی و زمانی ثبت می‌کنند و داده‌های وسیعی را در طول موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیس ارائه می‌دهد. از طرف دیگر، اندازه‌گیری‌های درجا (In-situ) برای رطوبت لحظه‌ای سطح خاک به‌منظور کالیبره کردن مدل‌های استخراج‌شده از داده‌های دورسنجی مشکل است که این امر به‌دلیل تغییر پذیری مکانی و زمانی رطوبت سطح خاک در مقیاس‌های گوناگون به‌ویژه در مقیاس بزرگ است، با این وجود تلاش‌های متعددی توسط محققین در جهت رفع این مشکل صورت گرفته است (۳۲، ۳۷ و ۵۰). استفاده از مقدار انرژی گسیل شده مادون‌قرمز حرارتی از سطح زمین و ترکیب آن با شاخص‌های سبزی‌نگی

گیاهی یکی از روش‌های غیرمستقیم سنجنش از دور غیرفعال برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک است (۴۰). سنجنش از دور راداری مشکلاتی (مانند هزینه بالا، دسترسی محدود به داده‌ها) در جهت عملیاتی نمودن رطوبت لحظه‌ای سطح خاک دارد. از اینرو توجه ویژه‌ای به داده‌های سنجنش از دور غیرفعال مانند داده‌های نوری و حرارتی به‌دلیل هزینه پایین و دسترسی آسان به آن در زمینه برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک شده است. عمده پژوهش‌های گذشته از روش رگرسیون خطی جهت برآورد رطوبت سطح خاک و همچنین از داده‌های دورسنجی محدودی مانند شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی و دمای سطح زمین در برآورد رطوبت سطحی خاک استفاده شده است (جدول ۱). همچنین روش‌های دوزنقه و مثلثی شکل مانند شاخص عمودی خشکسالی اصلاح شده Modified perpendicular drought index (MPDI) در برآورد رطوبت سطحی خاک استفاده شده است. این قبیل شاخص‌ها دارای مشکلاتی است، از آن جمله که شکل هندسی این روش‌ها تحت تأثیر عواملی مانند ابرناکی، غبار و وجود منابع آبی سطح قرار می‌گیرد و همچنین ترسیم شکل هندسی و استخراج مقادیر مانند شیب خط از هر باند باید به‌صورت جداگانه انجام شود که کاری وقت‌گیر است (۵۶). به همین منظور در این مطالعه از روش‌های نسبتی پوشش گیاهی به‌دلیل سرعت در انجام محاسبات و شاخص‌های بیو-فیزیکی دورسنجی به‌منظور برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک استفاده شد. تاکنون پژوهشی در رابطه با مقایسه دو روش رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی در برآورد رطوبت لحظه‌ای سطحی خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های درجا و داده‌های لندست ۸، انجام نشده است. لذا، پژوهش حاضر با هدف اصلی ارائه دو مدل رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی در برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با استفاده از شاخص‌های نسبتی پوشش گیاهی و شاخص‌های بیو-فیزیکی دورسنجی انجام شد و سپس مدل‌های به‌دست‌آمده، اعتبارسنجی گردید. همچنین از دیگر

جدول ۱. خلاصه‌ای از روش‌های دورسنجی مورد استفاده برای برآورد رطوبت سطح خاک

نام محقق	داده زمینی	سنجنده مورد استفاده	داده‌های مورد استفاده	روش انتخابی	نتیجه مدل
(S. Ahmad, Kalra, and) (Stephen, 2010) (۶)	داده‌های رطوبت ۱۰ سانتی‌متری عمق خاک در ابعاد ۱۲ کیلومتری	AVHRR	بازپخش سنجنده TRMM، شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی سنجنده AVHRR	ماشین بردار پشتیبان	همبستگی ۰/۵۷
(Pierdicca, Pulvirenti,) (and Bignami, 2010) (۴۲)	رطوبت ۱۰ سانتی‌متری SMEX۰۲	AirSAR Landsat	بازپخش سنجنده AirSAR و شاخص اختلاف آب نرمال شده سنجنده Landsat	رگرسیون خطی ساده	همبستگی ۰/۷۲
(Rabin, Temimi,) Stepinski, and (Bothwell, 2014) (۴۴)	داده رطوبت خاک به‌دست‌آمده از AMSR-E	GOES	شاخص خشکی GOES	مدل فیزیکی	همبستگی ۰/۶
(Zhao et al., 2010) (۶۳)	رطوبت عمق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری ایستگاه‌های هواشناسی و داده‌های میدانی	MODIS	ضریب انتقالی تبخیر خاک براساس دمای سطحی به‌دست‌آمده با روش‌های تعادل انرژی سطحی و حداکثر درجه حرارت منطقه‌ای	رگرسیون لگاریتمی	ضریب تعیین ۰/۷۷
(Sandholt, Rasmussen,) (and Andersen, 2002) (۵۲)	MIKE SHE code	AVHRR	شاخص خشکی درجه دما-پوشش گیاهی	رگرسیون خطی ساده	ضریب تعیین ۰/۷
(Gao et al., 2013) (۲۰)	داده رطوبت خاک ۲۰ سانتی‌متری به‌دست‌آمده از TDR۳۰۰	TM5/ETM+	باندهای انعکاسی قرمز و مادون‌قرمز نزدیک	رگرسیون نمایی	همبستگی ۰/۸۷
(Sun, Sun, Li, Liang,) (and Zhang, 2012) (۵۸)	رطوبت عمق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری داده‌های میدانی	MODIS	شاخص ارتقاءیافته خشکی درجه دما-پوشش گیاهی	ترسیم فضای دوزنقه	ضریب تعیین ۰/۳۵

اهداف پژوهش حاضر، بررسی قابلیت استفاده از داده‌های دورسنجی در برآورد رطوبت سطح خاک به جای استفاده متداوم از روش‌های پرهزینه و زمان‌بر اندازه‌گیری‌های زمینی است.

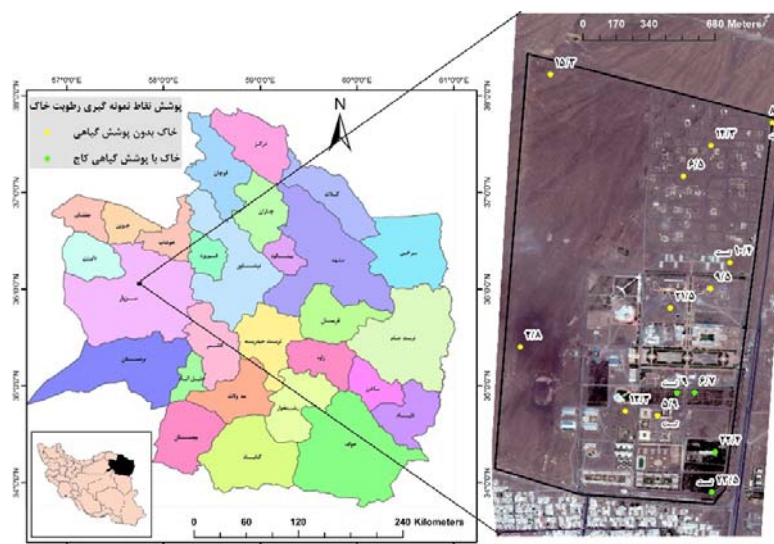
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه به مساحت ۲۰۹ هکتار در شمال شهر سبزوار و در محدوده طول‌های ۵۷° ۴۰' ۲۵" تا ۵۷° ۴۱' ۰۶" شرقی و عرض ۳۶° ۱۷' ۲۸" تا ۳۶° ۱۸' ۳۲" شمالی قرارگرفته است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه برروی مخروط افکنه و دشت سیلابی نسبتاً هموار و پوشیده شده از رخنمون‌های

سنگی، رسوبات تخریبی و جوان آبرفتی کواترنر با ارتفاع متوسط ۹۷۰ متر از سطح دریا قرارگرفته است. مراتع منطقه مورد مطالعه از نوع فقیر برروی خاک‌های رده اینسپتی سول که در مناطق کوهستانی و در اراضی شیب‌دار متوسط تشکیل می‌گردند، قرارگرفته است. اقلیم منطقه مطابق با طبقه‌بندی اقلیمی کوپن دارای آب و هوای خشک نیمه بیابانی است (۱).

داده‌های درجا رطوبت سطح خاک

تعداد ۱۴ نمونه خاک با توجه به دو نوع پوشش موجود سطح زمین در منطقه (شامل خاک بدون پوشش گیاهی و با پوشش



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال شهر سبزوار و در غرب استان خراسان رضوی و موقعیت نمونه‌های برداشت شده خاک و مقادیر واقعی رطوبت نمونه‌ها

۲۴ ساعت گذشته در تاریخ ۹۳/۱۲/۱۴ در حدود ۰/۶ میلی‌متر گزارش شده است (۲).

داده های دورسنجی

ماهواره لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی متوسط است (۱۵) متر تا ۱۰۰ متر، بسته به فرکانس طیفی بین ۰/۴۳۳ تا ۱۲/۵ میکرومتر) در طول موج مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز کوتاه و مادون قرمز حرارتی را فراهم می‌کند. این ماهواره از دو محموله تصویر ساز عملیاتی زمینی Operational Land Imager (OLI) و سنسور مادون قرمز حرارتی Thermal InfraRed Sensor (TIRS) تشکیل شده است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در اندکس عبور لندست ۸ در مسیر ۱۶۰ و ۱۶۱ ردیف ۳۵ با شناسه عبور ۶ و ۱۵ و با سیستم تصویر UTM ۴۰ شمالی و بر مبنای WGS ۸۴ تهیه گردید. شاخص‌های گیاهی و بیوفیزیکی مورد استفاده در این تحقیق به منظور برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در جدول (۲) مشخص شده است. لازم به ذکر است که این متغیرها براساس مطالعات انجام شده توسط سایر محققین و ارتباط شاخص‌های گیاهی و بیوفیزیکی با رطوبت سطح خاک انتخاب شده است (جدول ۱).

گیاهی کاج) در وسعتی به مساحت ۲۰۹ هکتار در نظر گرفته شد. نمونه‌ها در تاریخ ۹۳/۱۲/۱۶ همزمان با عبور ماهواره لندست ۸ (DOY ۶۶ و ساعت عبور ماهواره ۱۰:۲۰ به وقت محلی) در ساعت ۱۱ صبح برداشت گردید. با استفاده از اوگر دستی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متری در حدود ۶۰۰ گرم نمونه خاک از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری برداشت شد و سپس درون کیسه‌های زیپ‌دار جهت انتقال به آزمایشگاه قرار داده شد. موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌گیری با دستگاه موقعیت‌یاب ماهواره‌ای ثبت گردید. رطوبت وزنی خاک براساس پروتکل ارائه شده از سوی سازمان جهانی هواشناسی محاسبه گردید، که در آن بعد از وزن کردن نمونه‌های خاک مرطوب در محل، نمونه‌ها در آون با دمای نقطه جوش به مدت ۲۴ نگاهداری می‌شود و سپس وزن خشک آن به دست می‌آید تا در نهایت رطوبت نمونه‌های خاک محاسبه گردد (برای جزئیات بیشتر مراجعه شود به منبع شماره ۶۰). لازم به ذکر است بر طبق پروتکل فوق، در مورد نمونه‌های حاوی مواد آلی دمای آون کمتر از نقطه جوش و به مدت زمان نگاهداری نمونه‌ها در آون افزوده می‌شود. دمای هوا و دمای نقطه شبنم ساعت ۰۶ UTC ایستگاه سینوپتیک سبزوار در روز نمونه‌برداری به ترتیب ۴ و ۳- درجه سلسیوس بوده است، همچنین بارندگی

جدول ۲. متغیرهای مستقل مورد استفاده در این مطالعه جهت برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با داده‌های لندست ۸

نام شاخص	الگوریتم	نام شاخص	الگوریتم
آلبدوی سطحی (۴۷)	$a = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda}$	شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (۴۳)	$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}$
دمای سطح زمین (۹)	$T = \frac{K_T}{\ln\left(\frac{K_1}{CV_{R_T}} + 1\right)}$	شاخص تفاضلی نرمال شده آب (۵۱)	$NDWI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR_1})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR_1})}$
تابش خالص (۴۷)	$R_n = R_{solar} + R_{Atm} - R_{Surface}$	شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک (۴۳)	$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L)}(1+L)$
		شاخص سطح برگ (۱۴)	$LAI = -\frac{1}{a_1} \ln\left(\frac{a_2 - SAVI}{a_1}\right)$

که در آن: NIR برابر با مادون قرمز نزدیک انعکاسی و RED برابر با طیف قرمز انعکاسی، SWIR برابر با طیف مادون قرمز کوتاه انعکاسی، L فاکتور روشنایی خاک از صفر برای منطقه با پوشش گیاهی بالا تا ۱ برای مناطق بدون پوشش گیاهی تغییر می‌کند، مقدار ۰/۵ مناسب است (۴۳). ضرایب در شاخص LAI که در آن $a_1 = 0.082$ و $a_2 = 0.16$ است (۱۴). محاسبه آلبدوی سطحی از مطالعه از مدل ارائه شده توسط ریچتر (۴۷) استفاده شده است. CVR_۲ رادیانس طیفی تصحیح اتمسفری شده $W/(m^2 \text{ ster } \mu m)$ که از طریق روش ارائه شده توسط بارسبی و همکاران (۹) انجام شده است، K_۱ و K_۲ ضرایب کالیبره ثابت که K_۱ برای لندست ۸ برای باند ۱۰ برابر با ۷۷۴/۸۹ و برای باند ۱۱ برابر با ۴۸۰/۸۹، K_۲ برای لندست ۸ برای باند ۱۰ برابر با ۱۳۲۱/۰۸ و برای باند ۱۱ برابر با ۱۲۰۱/۱۴ $mW \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu m^{-1}$ است. تابش خالص که در آن R_s جذب موج کوتاه تابش خورشیدی ۳-۳ میکرون، تابش طول موج بلند ۱۴-۳ میکرون ساطع شده از جو به سطح زمین و R_s تابش موج بلند از سطح به اتمسفر است. جهت محاسبه تابش خالص از مدل ارائه شده توسط ریچتر (۴۷) استفاده شد.

پیش پردازش داده‌ها

داده‌های برداشت شده رطوبت سطح خاک باید از نظر مشکوک بودن و نرمال بودن آن بررسی گردد، زیرا ممکن است منابعی از خطای انسانی (مانند خطای قرائت) و دستگاه (کالیبره نبودن) در داده‌های رطوبت لحظه‌ای سطح خاک موجود باشد. آزمون شاپیرو ویلیک در سطح معنی داری آلفای ۰/۰۵ نرمال بودن داده‌های جمع آوری شده (رطوبت سطح خاک) را تأیید کرد. ممکن است اختلاف معناداری بین داده‌های رطوبت سطح خاک وجود داشته باشد که به صورت داده پرت بروز کند. با توجه به آزمون دیکسون، مقدار p-value (۰/۷۶۹) بیشتر از سطح معناداری آلفای ۰/۰۵ به دست آمد و می‌توان داده‌های رطوبت سطح خاک را بدون داده پرت در نظر گرفت. تصحیحات اتمسفری و ژئومتریک برای تصاویر لندست ۸ انجام گرفت. با توجه به هموار بودن (حداقل ارتفاع ۱۲۱۴ و حداکثر ۱۳۰۰ متر از سطح دریا) و عدم شرایط توپوگرافی زیاد در منطقه مورد مطالعه از مدل ATCOR_۲ به عنوان تصحیح اتمسفری مطلق

استفاده شد (۴۶). جهت انجام تصحیحات هندسی داده‌های انعکاسی اصلاح شده سطح زمین از داده‌های گوگل ارث استفاده گردید (۴۵). در این مطالعه جذر میانگین مربعات خطا به دست آمده برابر با ۰/۶۲۲ پیکسل بود که مطلوب هست. استفاده از داده‌های گوگل ارث جهت انجام تصحیحات هندسی تصاویر میان مقیاس مانند TM و مقایسه آن با داده‌های GPS نشان دهنده دقت مناسب انحراف جذر میانگین مربعات ۰/۰۰۰۱۴ درجه است (۵۵).

تحلیل مؤلفه اصلی (Principal Component Analysis)

اگر بین متغیرهای مستقل رابطه هم خطی برقرار باشد، مشکل هم چندخطی برای مدل‌های آماری مانند رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی ایجاد می‌شود و آن را در برآورد صحیح پارامترها دچار مشکل می‌کند. یکی از روش‌های تشخیص رابطه هم خطی بین متغیرهای مستقل، استفاده از عامل تورم واریانس (VIF) است که مقدار بزرگتر از ۵ را به عنوان هم خطی در نظر می‌گیرند (۳۶).

راه‌هایی برای کاهش اثرات هم خطی متغیرهای مستقل ورودی به مدل وجود دارد که از جمله آن استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی است. از اساسی‌ترین اقدامات در تحلیل مؤلفه‌های اصلی، انتخاب مؤلفه‌ها هست. با انتخاب چند مؤلفه، سایر مؤلفه‌ها از مطالعه حذف می‌شوند و بنابراین باید دقت زیادی در انتخاب تعداد مؤلفه‌ها نمود. مؤلفه‌هایی که دارای ارزش ویژه مساوی یا بزرگتر از یک باشند به عنوان مؤلفه اصلی انتخاب می‌شود، اما استفاده از این روش می‌تواند باعث نادیده گرفتن سایر عامل‌هایی (متغیرهای مستقل) شود که دارای اطلاعاتی هر چند اندک اما مفید گردد. لذا آزمون کای دو ملاک انتخاب تعداد مؤلفه‌ها قرار گرفته شد (۳۶). توصیه شده که از چرخش مایل (همبسته) اوبلیمین که در آن عامل‌ها با هم همبستگی دارند، استفاده شود زیرا استفاده از روش متعامد (نا همبسته) می‌تواند باعث ارائه نتایج نادرست می‌گردد (۱۵). در میان روش‌های اوبلیمین، کوارتیمین جهت به حداقل رساندن پیچیدگی‌های بارهای عاملی برای کلیه متغیرها یک روش مؤثر است (۱۹). در این مطالعه چرخش کوارتیمین از آنجا انتخاب شد که هفت متغیر مستقل با هم همبستگی بالا داشته و تأثیری بر روی همدیگر ندارند.

داده‌کاو

کلیه داده‌های ورودی به کار برده شده در روش رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی با میانگین صفر و انحراف معیار یک استاندارد شده‌اند. همچنین از مجموع ۱۴ نمونه، ۶۵٪ (۹ نمونه با پوشش و بدون پوشش گیاهی) برای آموزش با دامنه مقادیر رطوبت سطحی خاک بین ۲/۸ تا ۲۲/۴ درصد و ۳۵٪ (۵ نمونه با پوشش و بدون پوشش گیاهی) برای اعتبارسنجی با دامنه مقادیر رطوبت سطحی خاک بین ۵/۹ تا ۲۳/۵ درصد استفاده شده است (جهت مشاهده موقعیت جغرافیایی نمونه‌ها به شکل ۱ مراجعه شود). در این تحقیق از روش رگرسیون خطی چند متغیره و الگوریتم همزمان استفاده شده است که در آن کلیه متغیرها در یک مرحله به رابطه رگرسیونی وارد می‌شود و شدت و ضعف متغیر مستقل در مدل تأثیری در شکل نهایی

رابطه نخواهد داشت. همچنین در این مطالعه از شبکه‌های عصبی چند لایه پیش‌خور که عموماً شبکه‌های چند لایه پرسپترون هم نامیده می‌شود، استفاده شد. توپولوژی شبکه برای برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک شامل یک لایه ورودی (داده‌ها را در شبکه توزیع می‌کند)، لایه پنهان (داده‌ها را پردازش می‌کند) و یک لایه خروجی (نتایج را به ازای ورودی‌های مشخص استخراج می‌کند) است. یک لایه پنهان معمولاً در چنین شبکه‌هایی برای ارتباط ورودی به خروجی کافی است (۳۳). تعداد نرون‌ها در لایه پنهان بین تعداد داده‌های لایه ورودی و خروجی انتخاب می‌شود. از اینرو سه نرون در لایه پنهان در چهار لایه ورودی و یک لایه خروجی مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه از تابع انتقال نامتقارن تانژانت هیپربولیک به دلیل عملکرد مناسب آن استفاده شد. این تابع به عنوان تابع سیگموئید، مقادیر بایاس برای هر نرون در لایه را در نظر می‌گیرد (۲۸). در طول آموزش شبکه از روش جریمه‌ای (Penalty) با نرخ ۰/۰۱ استفاده شد، این روش یک رویکرد مؤثر در یادگیری شبکه است (۴). در این روش، شبکه به صورت متوالی آموزش می‌بینند و هنگام آموزش شبکه، ضرایب یادگیری از طریق انحراف مقدار برآورد شده از مقدار واقعی و شباهت خطاها با شبکه‌های قبلی تصحیح می‌شوند (۴). توابع خطای متعددی وجود دارد که در این مطالعه تابع Squared به کار گرفته شد در این تابع فرض می‌شود که کلیه متغیرهای مستقل دارای اهمیت در مدل پیشگو هستند (۲۸).

نتایج

تحلیل مؤلفه اصلی

به منظور بررسی ارتباط بین مقادیر درجا رطوبت سطحی خاک و شاخص‌های مورد استفاده، آزمون همبستگی پیرسون در سطح ۰/۰۵ انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که رطوبت سطحی خاک با شاخص تفاضلی نرمال شده آب، شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی و تابش خالص همبستگی مثبت معنی‌دار به ترتیب بیشترین با ۰/۶۶، ۰/۶۳ و ۰/۵۴ وجود داشت. بین

جدول ۳. همبستگی پیرسن بین رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با چهار مؤلفه اولیه (قبل و بعد چرخش کواریتمین). عامل‌های چرخش یافته نسبت به عامل‌های اولیه از همبستگی بالاتری برخوردار بود

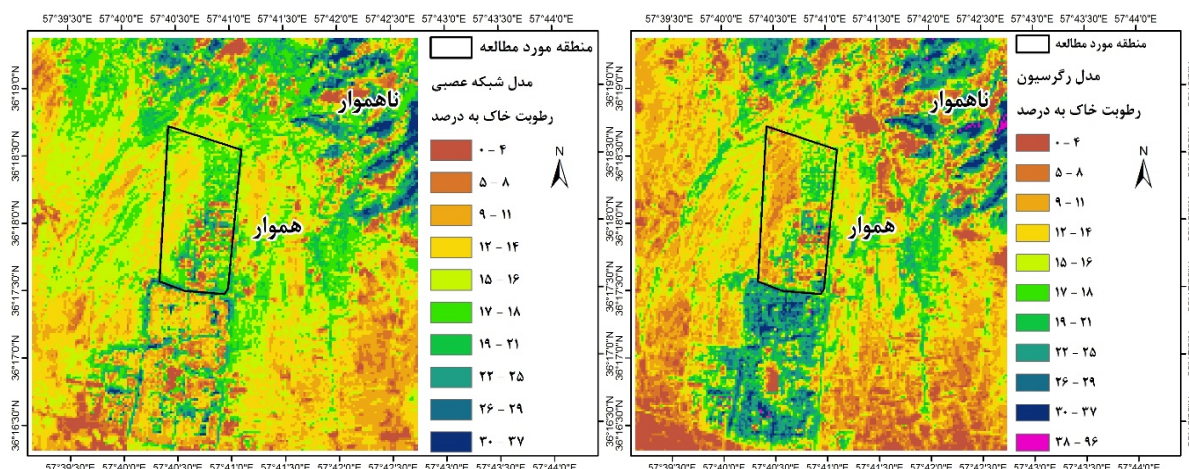
قبل از چرخش عاملی		بعد از چرخش عاملی		نام عامل‌های مورد استفاده
p-values	Correlation	p-values	Correlation	
۰/۰۷۶	۰/۴۸	۰/۰۱۴	۰/۶۴	عامل بهینه گیاهی (Quartimin _۱)
۰/۰۴۸	-۰/۵۳	۰/۵۵۲	۰/۱۷	عامل تراز انرژی (Quartimin _۲)
۰/۰۱۲	-۰/۶۴	۰/۳۷۱	-۰/۲۵	عامل حرارتی (Quartimin _۳)
۰/۰۲۱	۰/۶۱	۰/۲۲۶	-۰/۳۴	عامل تفاضلی گیاهی (Quartimin _۴)

عاملی بزرگتر از ۰/۵ بودند که به عامل بهینه گیاهی نام گرفت و اولین عامل ۷۴ درصد از تغییرات واریانس کل را تبیین می‌کند. عامل دوم تبیین کننده ۶۰ درصد از تغییرات واریانس کل است و دو متغیر آلدوی سطحی و تابش خالص دارای بار عاملی بزرگتر از ۰/۵ بودند و این عامل به نام عامل تراز انرژی نام گرفت. سومین عامل با تبیین ۵۱ درصد از تغییرات واریانس کل به نام عامل حرارتی مشخص شد که در آن متغیر دمای سطح زمین دارای بار عاملی بزرگتر از ۰/۵ بود. در عامل چهارم نیز متغیرهای شاخص تفاضلی نرمال شده آب و شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی دارای بار عاملی بزرگتر از ۰/۵ بودند که به نام عامل تفاضلی گیاهی نام گرفت، این عامل ۴۹ درصد از تغییرات واریانس کل را تبیین می‌کند. آزمون کای دو با $p\text{-value}$ ۰/۴۴ سطح معناداری آلفا ۰/۰۵ نشان می‌دهد که از بین هفت مؤلفه، چهار مؤلفه اولیه ذکر شده در بالا با ۹۹/۴ درصد واریانس کل مشاهده شده قابلیت عامل شدن را دارد. توجه شود که از آنجایی که چرخش کواریتمین یک چرخش مورب است، مجموع واریانس آن بالاتر از مجموع واریانس توضیح داده شده در حالت بدون چرخش است (۳۵). نتایج ضریب همبستگی پیرسن در این مطالعه نشان دهنده ارتباط معنی‌داری رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با عامل‌های چرخش یافته است (جدول ۳). بنابراین جهت برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با روش‌های رگرسیون چند متغیره و شبکه عصبی از چهار عامل‌های چرخش یافته به عنوان متغیرهای مستقل استفاده شد.

معادلات ۱ تا ۴ نشان دهنده چهار مؤلفه است که در نتیجه ترکیب خطی از هفت متغیر مستقل استفاده شده در این پژوهش

مقادیر رطوبت سطح خاک با دمای سطح زمین و آلوده، همبستگی منفی معنی‌دار با ۰/۶۵ و ۰/۵۵ وجود نیز داشت. همبستگی پیرسون بین شاخص سطح برگ و شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک با مقادیر رطوبت خاک، مثبت ۰/۵۳ و ۰/۴۷ بود؛ بنابراین نتایج به دست آمده نشان دهنده همبستگی بین مقادیر رطوبت سطحی خاک با شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش، بود.

عامل تورم واریانس در بین کلیه متغیرهای مستقل بیشتر از ۵ بود که بیانگر وجود هم خطی است. نتایج معیار کایزر-مایر-اولکین در مطالعه حاضر نشان دهنده مناسب بودن حجم نمونه‌ها جهت استفاده در تحلیل مؤلفه اصلی با مقدار ۰/۷۵ است. آزمون کرویت بارتلت نیز نشان می‌دهد که $P\text{-value}$ کمتر از سطح معناداری آلفا ۰/۰۵ است، از اینرو ماتریس همبستگی داده‌ها صفر نیست و دارای اطلاعات معنی‌دار است. بنابراین با توجه به معیار کایزر-مایر-اولکین و معیار کرویت بارتلت، شرایط استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی در متغیرهای مستقل نرمال شده وجود دارد. همچنین معیار کایزر-مایر-اولکین نشان دهنده کفایت لازم کلیه متغیرهای مستقل از ۱۴ نمونه در تحلیل مؤلفه اصلی است. جهت کاهش تعداد متغیرهای مستقل نرمال شده از ۱۴ نمونه، تحلیل مؤلفه‌های اصلی با چرخش کواریتمین استفاده شده است. متغیرهایی که بار عاملی آنها بزرگتر از ۰/۵ بود، به عنوان بارهای عاملی معنی‌دار استخراج گردید. نتایج این تحلیل پس از چرخش کواریتمین در مطالعه حاضر نشان داد که دو متغیر شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک و شاخص سطح برگ روی عامل (مؤلفه) اول دارای بار



شکل ۲. رطوبت لحظه‌ای سطح خاک برآورد شده با روش رگرسیون خطی چند متغیره و روش شبکه عصبی

در مطالعه حاضر، جهت محاسبه رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با روش شبکه عصبی، ابتدا معادله ۶ جهت محاسبه ۳ نرون با تابع محرکه تانژانت هایپربولیک در لایه پنهان شبکه عصبی استفاده شد، سپس از معادله ۷ جهت محاسبه رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در لایه خروجی شبکه استفاده گردید.

$$\text{TanH}_1 \left(0.5 \times \left(\begin{array}{l} -1/70.33 + \\ (-1/540.8 \times \text{Quartimin}_1) + \\ (1/673.8 \times \text{Quartimin}_2) + \\ (-0/234.1 \times \text{Quartimin}_3) + \\ (-0/588.1 \times \text{Quartimin}_4) \end{array} \right) \right) \quad [6]$$

$$\text{TanH}_2 \left(0.5 \times \left(\begin{array}{l} -1/42.82 + \\ (0/80.3 \times \text{Quartimin}_1) + \\ (-0/83.6 \times \text{Quartimin}_2) + \\ (2/48.22 \times \text{Quartimin}_3) + \\ (-0/85.21 \times \text{Quartimin}_4) \end{array} \right) \right)$$

$$\text{TanH}_3 \left(0.5 \times \left(\begin{array}{l} 0/91.39 + \\ (0/870.9 \times \text{Quartimin}_1) + \\ (0/340.1 \times \text{Quartimin}_2) + \\ (0/5 \times \text{Quartimin}_3) + \\ (0/101.7 \times \text{Quartimin}_4) \end{array} \right) \right)$$

$$\text{SMC} = 9/96.84 + (-12/38.5 \times H_1) + (-6/470.9 \times H_2) + (-12/0.2 \times H_3) \quad [7]$$

که در معادلات فوق، SMC: رطوبت لحظه‌ای سطح خاک و Quartimin_n: مؤلفه‌ها هستند که از روابط ۱ تا ۴ محاسبه می‌شود، H_n: نرون‌های محاسبه شده در لایه پنهان است که از رابطه ۶ به دست آید.

شکل (۲) نشان دهنده نتایج برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در منطقه‌ای به ابعاد بزرگتر از منطقه مورد مطالعه در دو

به دست آمد (توضیح داده شده در جدول ۳). این معادلات از طریق تحلیل مؤلفه اصلی و با چرخش عاملی کوارتیمین، محاسبه شد.

$$\text{Quartimin}_1 = (0/029 * \text{LST}) + (0/022 * \text{NDWI}) + (0/432 * \text{SAVI}) + (0/068 * \text{ALBEDO}) + (0/0296 * \text{RN}) + (-0/02 * \text{NDVI}) + (0/575 * \text{LAI}) + (-0/0000449) \quad [1]$$

$$\text{Quartimin}_2 = (-0/046 * \text{LST}) + (-0/148 * \text{NDWI}) + (0/131 * \text{SAVI}) + (0/061 * \text{ALBEDO}) + (-0/348 * \text{RN}) + (0/092 * \text{NDVI}) + (-0/083 * \text{LAI}) + (0/0000455) \quad [2]$$

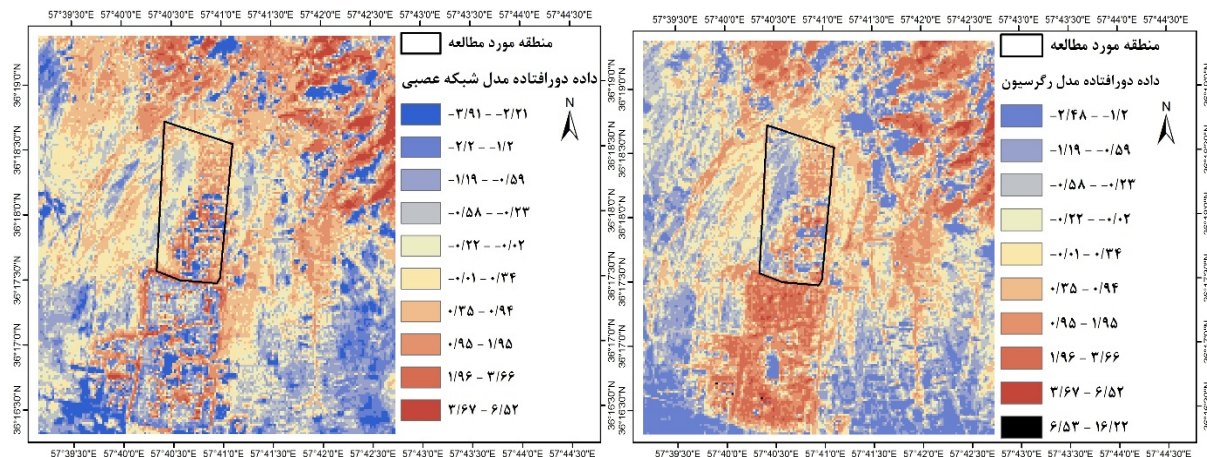
$$\text{Quartimin}_3 = (0/917 * \text{LST}) + (0/063 * \text{NDWI}) + (0/092 * \text{SAVI}) + (-0/118 * \text{ALBEDO}) + (-0/17 * \text{RN}) + (-0/033 * \text{NDVI}) + (-0/102 * \text{LAI}) + (0/000012) \quad [3]$$

$$\text{Quartimin}_4 = (0/0719 * \text{LST}) + (1/088 * \text{NDWI}) + (-0/024 * \text{SAVI}) + (0/104 * \text{ALBEDO}) + (-0/334 * \text{RN}) + (0/458 * \text{NDVI}) + (-0/257 * \text{LAI}) + (-0/00014) \quad [4]$$

مدل سازی رطوبت لحظه‌ای سطح خاک

چهار عامل چرخش یافته به عنوان متغیرهای مستقل برای برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با روش رگرسیون چند متغیره و شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش، معادله ۵ جهت محاسبه رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با روش رگرسیون چند متغیره به دست آمد.

$$\text{SMC} = 13/1423 - (5/4217 \times \text{Quartimin}_1) - (5/0244 \times \text{Quartimin}_2) - (4/355 \times \text{Quartimin}_3) + (2/4864 \times \text{Quartimin}_4) \quad [5]$$



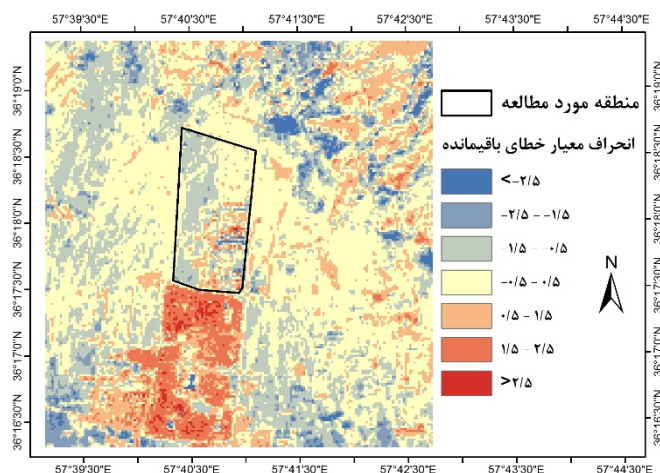
شکل ۳. داده‌های دورافتاده رطوبت لحظه‌ای سطح خاک برآورد شده با مدل رگرسیون خطی چند متغیره و مدل شبکه عصبی

سطح خاک، برخوردار است. معیارهای درست‌نمایی مانند آنچه شرح داده شد، نشان دهنده توانمندی یک مدل در برآورد یک مقدار است، اما این‌گونه معیارها معرف خوبی برای ارزیابی اعتبار یک مدل به‌ویژه در مطالعات مکانی نیست و نیازمند استفاده از معیارهایی است که نشان دهنده اختلافات و ناهنجاری‌های مکانی باشد. یکی از معیارهای تشخیص ناهنجاری‌های مکانی، تشخیص مقادیر دور افتاده هست. از نظر آماری داده‌ای پرت است که به‌طور واضح نسبت به باقیمانده مجموعه داده‌ها جدا افتاده باشد که نشان دهنده حالت غیرطبیعی آن نسبت به سایر داده‌ها است؛ اما این امر در مورد داده‌های محیطی به‌ویژه رطوبت لحظه‌ای سطح خاک که بسیار متغیر و ناحیه‌ای عمل می‌کند، صدق نمی‌کند. به‌عنوان مثال وجود یک محدوده کوچک کشت آبی با رطوبت بالای سطح خاک در یک منطقه خشک موجب می‌شود تا مقادیر رطوبت سطح خاک در منطقه کشت آبی به‌عنوان داده پرت قلمداد گردد. در شکل (۳)، مقادیر حداکثر رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در روش رگرسیون چند متغیره با مقدار ۱۶ (سیاه رنگ) بسیار بالاتر از روش شبکه عصبی با مقدار ۶/۵ (قرمز تیره رنگ) است. به معنای دیگر مناطقی که با آبی و قرمز تیره رنگ در شکل (۳) مشخص شده است، نشان می‌دهد که این مناطق از الگوی ایجاد شده توسط سایر نقاط پیروی نمی‌کند و به همین علت نقطه دورافتاده یا ناهنجار هست. مناطقی که به رنگ کرم روشن مشخص است، به معنای نرمال بودن مقادیر رطوبت سطح خاک این مناطق است.

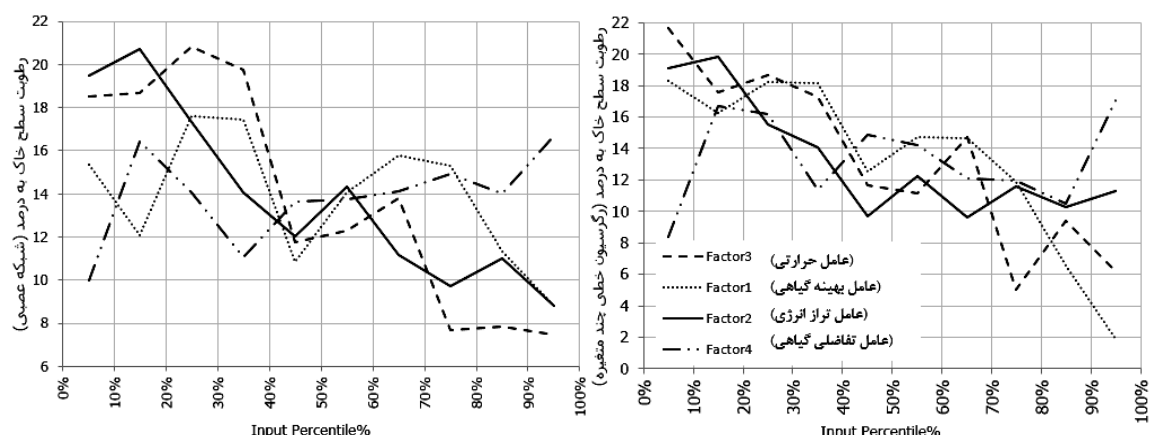
قسمت هموار و ناهموار است. هر دو مدل ساخته شده بیشترین رطوبت لحظه‌ای سطح خاک را در نواحی ناهموار شمال و شمال شرق منطقه (آبی تیره رنگ) نشان می‌دهد. بیشترین رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در مدل ساخته شده با روش رگرسیون خطی چند متغیره با ۹۶ درصد (مناطق بنفش رنگ) که به معنای اشباع بودن خاک و ۳۷ درصد مدل ساخته شده با روش شبکه عصبی است. این اختلاف بسیار زیاد بین مقادیر برآورد شده در حداکثر رطوبت سطح خاک در روش رگرسیون خطی چند متغیره با ۹۶ درصد و شبکه عصبی با ۳۷ درصد به در نتیجه خطی بودن روش رگرسیونی و عدم انعطاف آن در توضیح غیر خطی روابط است. همچنین مقادیر برآورد شده رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در داخل منطقه مورد مطالعه (چند ضلعی سیاه رنگ) در هر دو مدل تا حدودی شبیه به هم است.

تحلیل درست‌نمایی مدل رگرسیون خطی چند متغیره و مدل شبکه عصبی

متوسط درصد خطای مطلق در گروه آزمایش نشان می‌دهد که درصد درست‌نمایی برای رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با روش رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی به‌ترتیب ۶۰ درصد و ۷۰ درصد صحت است. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی، روش شبکه عصبی از خطای به‌مراتب کمتر و پایداری بیشتری در ورود داده‌های جدید به مدل نسبت به روش رگرسیونی در برآورد رطوبت لحظه‌ای



شکل ۴. انحراف معیار خطای باقیمانده رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با دو روش رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی. رنگ کرم روشن نشان دهنده اختلاف ناچیز و رنگ آبی و قرمز تیره بیانگر اختلاف زیاد رطوبت برآورد شده بین دو مدل است.



شکل ۵. آنالیز حساسیت بر رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در دو مدل رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی

آنالیز حساسیت

با استفاده از آنالیز حساسیت، تأثیر چهار عامل ورودی بر خروجی مدل‌های ساخته شده با روش‌های رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی بررسی گردید. عامل‌هایی که بیشترین تأثیر را بر رطوبت لحظه‌ای سطح خاک دارند، به‌عنوان عامل‌های حساس بر مدل شناخته می‌شوند. در شکل (۵) شیب درصد تغییر برای هر یک از عامل‌ها بر رطوبت لحظه‌ای سطح خاک مشخص است. شیب خط هر عامل هر چه تندتر باشد، نشان دهنده دامنه تأثیر بیشتر عامل ورودی بر خروجی مدل‌ها است. بیشترین دامنه تأثیرات عامل‌ها بر رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در هر دو مدل ساخته شده مربوط به عامل سوم (عامل

شکل (۴) نشان دهنده انحراف معیار خطای باقیمانده رطوبت لحظه‌ای پیش شده سطح خاک در دو روش رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی است. انحراف معیار خطای باقیمانده بین -0.5 و 0.5 (نواحی به رنگ کرم روشن) نشان دهنده اختلاف حداقل بین خطاها در دو روش رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی است. به عبارت دیگر مقادیر برآورد شده رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در دو مدل ساخته شده در این نواحی تقریباً مشابه به هم هستند. بیشترین اختلاف بین دو مدل در مقادیر خطای باقی مانده به رنگ قرمز تیره و آبی تیره (به معنای برآورد بیشتر و کمتر روش رگرسیون خطی چند متغیره نسبت به شبکه عصبی) است.

حرارتی) است که تغییرات جزئی در این عامل می‌تواند باعث تغییرات اساسی در رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در هر دو مدل گردد. عامل چهارم (عامل تفاضلی گیاهی) به دلیل یکنواختی شیب تغییرات، کمترین تأثیر را بر رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در هر دو مدل رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی دارد. شیب درصد تغییرات عامل دوم (عامل تراز انرژی) و اول (عامل بهینه گیاهی) بر مقادیر خروجی مورد انتظار در شبکه عصبی در رده‌های دوم و سوم و در رگرسیون خطی چند متغیره در رده‌های سوم و دوم قرار دارد. در این مطالعه از روش مجموع تجمع (CUSUM) و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف جهت بررسی فرض ارتباط خطی بودن چهار مؤلفه اصلی با مقادیر رطوبت سطحی خاک استفاده شد. نتایج تست خطی نشان داد که بین مؤلفه اول، دوم و سوم با رطوبت سطح خاک رابطه خطی و برای مؤلفه چهارم یک رابطه غیرخطی معنادار در سطح ۰/۰۵ وجود داشت.

بحث

در این مطالعه از هفت شاخص بیو-فیزیکی و پوشش گیاهی شامل شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی، شاخص گیاهی تعدیل کننده اثر خاک، شاخص تفاضلی نرمال شده آب، شاخص سطح برگ، آلودگی سطحی، دمای سطح زمین و تابش خالص جهت برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک استفاده شده است. رفتار رطوبت خاک بدون پوشش با خاک پوشیده شده از گیاه متفاوت است و در اغلب موارد، علاقه‌مندی در برآورد رطوبت خاک در منطقه غیر گیاهی بیشتر است (۸ و ۶۳)، زیرا براساس این واقعیت که در نواحی با پوشش متراکم گیاهی به سختی می‌توان از سنجش از دور نوری استفاده کرد (۶۳). از اینرو در مطالعه حاضر مقدار رطوبت خاک در دو پوشش خاک بدون گیاه و پوشش درختی اندازه‌گیری شد و سپس اقدام به مدل‌سازی رطوبت سطحی خاک شده است. در مطالعه حاضر، دمای سطح زمین و تابش خالص به عنوان عامل حرارتی و عامل تراز انرژی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در میزان رطوبت

لحظه‌ای سطح خاک مطرح است. زیرا دمای سطح زمین یک پارامتر مهم در تعیین بودجه تابش زمین، جریان گرما و رطوبت میان سطح زمین و اتمسفر است. بسیاری از فرآیندهای پوشش گیاهی و خاک به شدت وابسته به درجه حرارت است (۵۷). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با افزایش دما، آب نگهداری شده در داخل منافذ ذرات سطح خاک به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (ضریب همبستگی ۰/۶۵-)، همچنین تابش خورشیدی خالص و انرژی در دسترس زمانی که خاک مرطوب است، تمایل به افزایش دارد که این یافته منطبق با نتایج سایر محققین است (۱۷، ۲۷ و ۵۶). نتایج مطالعه احمد، رونینگ و جیان نیز مؤید این امر بود، اما ایشان معتقد هستند که علاوه بر مطالعه دمای خاک با رطوبت سطح خاک باید از سایر متغیرها مانند شاخص‌های پوشش گیاهی هم استفاده شود، زیرا رطوبت و پوشش سطح خاک پیچیدگی‌هایی دارد که توسط سایر متغیرها نیز توجیه می‌شود (۵). این امر به این دلیل ویژه است که در طول روز سایه ایجاد شده توسط پوشش گیاهان مانع از تابش مستقیم نور خورشید به زیر پوشش گیاه می‌شود و این انتظار می‌رود که دمای سطح خاک در این ناحیه به مراتب کمتر از نواحی باشد که در معرض مستقیم نور خورشید هستند (۲۹). از اینرو در مطالعه حاضر از شاخص‌های بیو-فیزیکی و پوشش گیاهی جهت برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک استفاده شده است. مطالعه حاضر نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی مانند شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی ارتباط معناداری با رطوبت سطح خاک دارند که مطالعه خان‌محمدی و همکاران نیز مؤید این ارتباط بود. شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی به رنگ خاک حساس است و مقدار آن و همچنین تن رنگ سطح خاک در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر رطوبت ناشی از بارش در روزهای گذشته تغییر پیدا کرده است (۳۰). از اینرو این شاخص متغیر مناسبی برای برآورد رطوبت سطح خاک برای مناطق فاقد پوشش گیاهی است. به طور کلی ارزش شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی به نوع خاک بستگی دارد که برای خاک تیره مقادیر بزرگتر و برای خاک‌های

رنگی یا روشن شدن مقادیر آن کوچکتر است (۴۱). همچنین این شاخص برای برآورد رطوبت سطح خاک زیرین پوشش گیاهی نیز مناسب است، زیرا این شاخص همبستگی بالایی با بارش و تنش آبی در گیاهان دارد (۳۴). نتایج این مطالعه مانند مطالعات ساهو (۴۹) و سانتوس و کوین تانیل‌ها (۵۳) نشان داد که شاخص تفاضلی نرمال شده آب ارتباط معناداری بیشتری (همبستگی ۰/۶۶) نسبت شاخص تفاضلی نرمال شده (۰/۶۳) با رطوبت سطح خاک دارد. رطوبت خاک در ارتباط با تبخیر و تعرق تاج پوشش و تنش رطوبتی گیاه است (۲۲ و ۲۵). از اینرو شاخص‌هایی مانند شاخص تفاضلی نرمال شده آب که بیانگر تنش آب گیاهی است، برای برآورد رطوبت خاک مفید است (۳۱).

از میان متغیرهای مورد استفاده در مطالعه حاضر، شاخص گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک کمترین همبستگی (۰/۴۷) را با رطوبت سطحی خاک دارد، این امر می‌تواند به دلیل فاکتور تصحیح شده خاک باشد که مقدار آن از صفر برای منطقه با پوشش گیاهی بالا تا ۱ برای مناطق با پوشش گیاهی خیلی کم تغییر می‌کند. این شاخص از نظر الگوریتم تفاوتی با شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی ندارد و عامل فاکتور تصحیح شده (ضریب خط خاک) به آن اضافه شده است. مطالعات مختلف سایر محققین نشان داده است که تغییرات انعکاسی خاک در امتداد خط خاک مربوط به رطوبت خاک، مواد آلی در خاک و نوع خاک است (۱۶ و ۶۱). آلبدوی سطحی علاوه بر رنگ سطح به رطوبت موجود نیز وابسته است، به طوری که رفتار مقادیر انعکاسی خاک تحت تأثیر رطوبت متفاوت در طول موج‌های بین ۰/۴ میکرومتر تا ۲/۶ میکرومتر تغییر می‌کند (۱۸). این تغییرات در مقدار آلبدو برای خاک خشک بین ۰/۱۴ (خاک رس) تا ۰/۳۷ (تپه‌های شنی) و برای خاک مرطوب بین ۰/۰۸ (خاک رس) تا ۰/۲۴ (تپه‌های شنی) متغیر است (۱۱). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بازتاب سطح با افزایش رطوبت خاک کاهش می‌یابد و (همبستگی ۰/۵۵-) و این ارتباط دریافته‌های سایر محققین که افزایش رطوبت خاک

موجب کاهش بازتاب طیفی نیز مشاهده می‌شود (۱۷، ۲۳ و ۴۸). تعدادی از نمونه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه از مناطق پوشیده شده از درخت کاج برداشت شد، در این مناطق شاخص سطح برگ افزایش می‌یابد، این امر نیز موجب افزایش سایه سطح زمین در زیر گیاهان می‌گردد و باعث کاهش دمای سطح زمین و افزایش نسبی رطوبت سطحی خاک در مقایسه با نواحی بدون پوشش گیاهی و بدون سایه می‌شود. نتایج این مطالعه مانند مطالعات پورزوفسکی و سچلز (۱۲) و سچلینز و همکاران (۵۴) نشان داد که همبستگی مثبت هر چند متوسط (۰/۵۳) بین شاخص سطح برگ و رطوبت سطحی خاک وجود دارد، به این معنی که با افزایش شاخص سطح برگ، رطوبت سطحی خاک نیز افزایش نسبی پیدا می‌کند. آرکس و همکاران (۷) دریافتند هنگامی که خاک مرطوب می‌شود، شاخص سطح برگ متراکم در فصل تابستان افزایش می‌یابد و زمانی که رطوبت خاک اندک می‌شود، گیاه به منظور کاهش کوتاه مدت تقاضای آب، روزنه‌های دهانی را بسته می‌کند. بنابراین شاخص سطح برگ حساسیت بالایی به کاهش آب در خاک دارد (۲۱) و در مناطق پوشیده شده از درختان به عنوان یک متغیر مهم (عامل بهینه گیاهی) در برآورد رطوبت سطحی خاک مطرح است. با توجه به مسئله تورم واریانس در متغیرهای مستقل اولیه، در این تحقیق از روش تحلیل مؤلفه اصلی جهت کاهش تأثیرات هم چند خطی بین متغیرهای مستقل استفاده شد، این روش به خصوص در مورد متغیرهای هم جنس مانند انواع شاخص‌های پوشش گیاهی کاربرد دارد. نتایج این مطالعه نشان داد که تحلیل مؤلفه اصلی یک روش ارزشمند در خلاصه‌سازی و دسته‌بندی متغیرهای مستقل در تعداد محدودی متغیرهای مستقل ثانویه (عامل) هست. هرچند که ممکن است استفاده مستقیم از متغیرهای مستقل اولیه موجب نتایج بهتر از متغیرهای مستقل ثانویه (تحلیل مؤلفه اصلی) گردد، اما عامل تورم واریانس موجب نتایج غیر واقعی در آزمون معنی‌داری ضرایب مدل رگرسیونی و شبکه عصبی می‌شود (۲۴). استفاده از روش‌های رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی در پژوهش حاضر

نشان داد که ارتباط رطوبت لحظه‌ای سطح خاک با مؤلفه‌های اصلی یک ارتباط غیر خطی است که توسط مدل رگرسیون خطی به خوبی قابل برازش و توضیح نیست و این متغیر با توابع غیر خطی مدل شده توسط شبکه‌های عصبی قابل پیش‌بینی است (۳۸).

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت ویژه رطوبت سطح خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در این مقاله، امکان برآورد رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در منطقه فاقد ایستگاه هواشناسی کشاورزی با استفاده از داده‌های دورسنجی ماهواره لندست ۸ انجام گرفت. طبق نتایج حاصل شده از تحلیل مؤلفه اصلی، چهار مؤلفه بر روی رطوبت سطح خاک مؤثر بود که شامل عامل بهینه گیاهی، عامل تراز انرژی، عامل حرارتی و عامل تفاضلی گیاهی است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رطوبت خاک تغییر پذیری بسیار زیادی در مقیاس مکانی (۹۰۰ مترمربع هر پیکسل) در مورد مطالعه دارد که به عوامل محلی مانند عوامل حرارتی، توازن انرژی و پوشش گیاهی وابسته است. نتایج به دست آمده از مدل برآورد رطوبت سطح خاک در این پژوهش نشان داد که متوسط درصد خطای مطلق برای مدل‌های ساخته شده با روش رگرسیون خطی چند متغیره و شبکه عصبی به ترتیب ۴۰ درصد و ۳۰ درصد خطا بود که نشان دهنده کارایی مناسب مدل پیشنهادی با روش شبکه عصبی است. مدل شبکه عصبی با توجه به ارتباط غیرخطی بین رطوبت سطح خاک با مؤلفه‌های مورد

استفاده در این پژوهش، قادر به برآورد آن در منطقه مورد مطالعه با دقت قابل قبول است. با مقایسه تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی به چهار مؤلفه اصلی، تغییرات مؤلفه حرارتی به مدل، باعث تغییرات مؤثر بر میزان برآورد رطوبت سطح خاک گردید. در مطالعات قبلی، پژوهشگران از روش‌های آماری (رگرسیون خطی) و فیزیکی جهت برآورد رطوبت سطح خاک استفاده کرده‌اند. روش‌های فیزیکی به دلیل نیاز به داده‌های متعدد هواشناسی و توپوگرافی به سختی قابل اجرا هستند. در مجموع مقایسه یافته‌های مطالعه حاضر با مطالعات قبلی نشان داد که روش شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش با همبستگی پیرسن ۰/۸۲ نسبت به نتایج سایر محققین بهتر است. از آنجایی که تعداد ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی محدود است و برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از داده‌های زود یافت هواشناسی پیچیده هست و همچنین اندازه‌گیری‌های درجا معمولاً هزینه‌بر و زمان‌بر هستند، استفاده از روش‌های سنجش از دور نوری و حرارتی در برآورد رطوبت خاک در مقیاس‌های مکانی متفاوت سودمند است. به عنوان پیشنهاد عملی و کاربردی می‌توان از مدل ارائه شده با روش شبکه عصبی جهت پایش مکانی و زمانی (در دوره سرد سال) رطوبت لحظه‌ای سطح خاک در منطقه مورد مطالعه و مناطق مشابه استفاده کرد. اگر چه بازیابی رطوبت سطح خاک با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی متوسط انجام شده است، اما بازیابی آن در مقیاس روزانه به دلیل تفکیک زمانی پایین از جمله مشکلاتی است که در آن وجود دارد.

منابع مورد استفاده

۱. ادب، ح. ۱۳۸۵. مدل‌سازی برآورد و عملکرد محصول کلزای پاییزه با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره در محیط GIS در شهرستان سبزوار، پایان نامه کارشناسی ارشد اقلیم و برنامه‌ریزی محیطی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
۲. سازمان هواشناسی کشور. ۱۳۹۵. محصولات و خدمات الکترونیکی تخصصی هواشناسی. <http://www.irimo.ir/far>.
۳. نامدار خجسته، د. و ش.م. امید محمود. ۱۳۹۰. برآورد رطوبت حجمی خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. فصلنامه علوم و مهندسی آبخیزداری. ۵(۱۴): ۶۰-۵۳.

۴. نبوی کریزی، ح. و ا. اله کبیر. ۱۳۸۵. یک روش یادگیری جدید برای افزایش کارایی سیستم طبقه‌بندی مرکب، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران ۴ (۲): ۹۹-۱۰۴.

5. Ahmad, M., S. Runping. and Y. Jing. 2012. Soil moisture retrieval through satellite data for Gansu and Xinjiang region of China. *PJM*. 9(17): 93-98 .
6. Ahmad, S., A. Kalra and H. Stephen. 2010. Estimating soil moisture using remote sensing data: A machine learning approach. *Adv. Water Resour.* 33(1): 69-80.
7. Arx, G., E. Graf Pannatier, A. Thimonier and M. Rebetez. 2013. Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. *J. Ecol.* 101(5): 1201-1213 .
8. Barbu, A., J. C. Calvet, J. F. Mahfouf and S. Lafont. 2014. Integrating ASCAT surface soil moisture and GEOV1 leaf area index into the SURFEX modelling platform: a land data assimilation application over France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18(1): 173-192 .
9. Barsi, J. A., J. R. Schott. F. D. Palluconi and S. J. Hook. 2005. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. SPIE, Earth Observing Systems, California, USA.
10. Berg, A. A., J. S. Famiglietti, M. Rodell, R. H. Reichle, U. Jambor, S. L. Holl and P. R. Houser. 2005. Development of a hydrometeorological forcing data set for global soil moisture estimation. *Int. J. Climatol.* 25: 1697-1714.
11. Berge, H. F. M. 1986. Heat and water transfer at the bare soil surface: aspects affecting thermal imagery. (PhD thesis), Landbouwhogeschool te Wageningen .
12. Borzuchowski, J. and K. Schulz. 2010. Retrieval of leaf area index (LAI) and soil water content (WC) using hyperspectral remote sensing under controlled glass house conditions for spring barley and sugar beet. *Remote Sens (Basel)* 2(7): 1702-1721 .
13. Capehart, W. J. and T. N. Carlson. 1994. Estimating near-surface soil moisture availability using a meteorologically driven soil-water profile model. *J. Hydrol. (Amst)*. 160(1-4): 1-20.
14. Choudhury, B. J., N. U. Ahmed, S. B. Idso, R. J. Reginato and C. S. T. Daughtry. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sens. Environ.* 50(1): 1-17.
15. Conway, J. M., and A. I. Huffcutt. 2003. A review and evaluation of exploratory factor analysis practices in organizational research. *Organizational research methods*, 6(2): 147-168 .
16. Dupigny-Giroux, L.-A., and J. E. Lewis. 1999. A moisture index for surface characterization over a semiarid area. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 65, 937-946 .
17. Eltahir, E. A. 1998. A soil moisture-rainfall feedback mechanism 1. Theory and observations. *Water Resour. Res.* 34(4): 765-776 .
18. Fabre, S., X. Briottet and A. Lesaignoux. 2015. Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4–2.5 μm domain. *Sensors (Basel)*, 15(2): 3262-3281 .
19. Finch, W. H. 2011. A comparison of factor rotation methods for dichotomous data. *JMASM*, 10(2): 14 .
20. Gao, Z., X. Xu. J. Wang. H. Yang. W. Huang. and H. Feng. 2013. A method of estimating soil moisture based on the linear decomposition of mixture pixels. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3-4): 606-613.
21. Gigante, V., V. Iacobellis. S. Manfreda. P. Milella and I. Portoghese. 2009. Influences of Leaf Area Index estimations on water balance modeling in a Mediterranean semi-arid basin. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9(3): 979-991 .
22. Gu, Y., E. Hunt, B. Wardlow, J. B. Basara, J. F. Brown, and J. P. Verdin. 2008. Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. *Geophys. Res. Lett.* 35(22): 1-22.
23. Guan, X., J. Huang. N. Guo. J. Bi, and G. Wang. 2009. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau. *Adv. Atmos. Sci.* 26(4): 692-700.
24. Guanghui, W., D. Xinguang and H. Anyan. 2011. Discuss on reference crop evapotranspiration in arid zone based on principal component analysis. *International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP)*. China. 4: 2900-2903.
25. Hall, F. G., R. J. Townshend and E. T. Engman. 1995. Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface state parameters. *Remote Sens. Environ.* 51(1): 138-156.
26. Huisman, J. A., J. J. C. Snepvangers, W. Bouten and G. B. M. Heuvelink. 2002. Mapping spatial variation in surface soil water content: comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry. *J. Hydrol. (Amst)*. 269(3-4): 194-207.
27. Idso, S. B., J. K. Aase and R. D. Jackson. 1975. Net radiation - soil heat flux relations as influenced by soil water content variations. *Bound. Layer Meteorol.* 9(1): 113-122.
28. JMP. 2008. JMP users guide (Version 8). Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.

29. Kato, S., T. Matsunaga and Y. Yamaguchi. 2010. Influence of shade on surface temperature in an urban area estimated by ASTER data. Paper presented at the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Kyoto Japan .
30. Khanmohammadi, F., M. Homaei. A. Noroozi. 2015. Soil moisture estimating with NDVI and land surface temperature and normalized moisture index using MODIS images. *J. Soil Water Conserv.* 4: 37-45.
31. Khanna, S., A. Palacios-Orueta. M. L. Whiting. S. L. Ustin. D. Riaño and J. Litago. 2007. Development of angle indexes for soil moisture estimation, dry matter detection and land-cover discrimination. *Remote Sens. Environ.* 109(2): 154-165.
32. Kim, G. and A. P. Barros. 2002. Downscaling of remotely sensed soil moisture with a modified fractal interpolation method using contraction mapping and ancillary data. *Remote Sens. Environ.* 83(3): 400-413.
33. Liu, C. Y., C. Chen, C. T. Chang and L. M. Shih. 2013. Single-hidden-layer feed-forward quantum neural network based on Grover learning. *Neural Netw.* 45: 144-150.
34. Liu, W. and F. Kogan. 1996. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *Int. J. Remote Sens.* 17(14): 2761-2782 .
35. Maess, B., A. D. Friederici, M. Damian, A. S. Meyer and W. J. Levelt. 2002. Semantic category interference in overt picture naming: Sharpening current density localization by PCA. *J. Cogn. Neurosci.* 14(3): 455-462 .
36. Menard, S. 1995. Applied logistic regression analysis. PP. 22-25. Sage, Beverly Hills, CA.
37. Merlin, O., J. P. Walker, A. Chehbouni and Y. Kerr. 2008. Towards deterministic downscaling of SMOS soil moisture using MODIS derived soil evaporative efficiency. *Remote Sens. Environ.* 112(10): 3935-3946.
38. Moreira de Melo, T. and O. C. Pedrollo. 2015. Artificial Neural Networks for Estimating Soil Water Retention Curve Using Fitted and Measured Data. *Appl. Environ. Soil Sci.* 1-16. Doi.org/10.1155/2015/535216
39. Munro, R. K., W. F. Lyons, Y. Shao., M. S. Wood, L. M. Hood and L. M. Leslie. 1998. Modelling land surface-atmosphere interactions over the Australian continent with an emphasis on the role of soil moisture. *Environ. Model. Softw.* 13(3-4): 333-339.
40. Nemani, R., L. Pierce. S. Running and S. Goward. 1993. Developing Satellite-derived Estimates of Surface Moisture Status. *J. Appl. Meteorol.* 32(3): 548-557.
41. Nicholson, S. and T. Farrar. 1994. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote Sens. Environ.* 50(2): 107-120 .
42. Pierdicca, N., L. Pulvirenti and C. Bignami. 2010. Soil moisture estimation over vegetated terrains using multitemporal remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* 114(2): 440-448.
43. Qi, J., A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, S. A. Sorooshian. 1994. modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 48: 119-126.
44. Rabin, R. M., M. Temimi, J. Stepinski and P. D. Bothwell. 2014. Monitoring surface dryness using geostationary thermal observations. *Remote Sens. Lett.* 5(1): 10-18.
45. Redzwan, G. and M. F. Ramli. 2007. Geo-referencing the satellite image from Google Earth by relative and absolute positioning. *MJS.* 26(2): 135-141 .
46. Richter, R. 1997. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 18(5): 1099-1111.
47. Richter, R. 2011. ATCOR for ERDAS IMAGINE 2011 User Manual ATCOR2 and ATCOR3 (pp. 208-211). Riesstraße, Germany: GEOSYSTEMS GmbH.
48. Roxy, M., V. Sumithranand, and G. Renuka. 2010. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal diffusivity at Astronomical Observatory, Thiruvananthapuram, south Kerala. *J. Earth. Syst. Sci.* 119(4): 507-517.
49. Sahu, A. 2014. Identification and mapping of the water-logged areas in Purba Medinipur part of Keleghai river basin, India: RS and GIS methods. *IJAG.* 2(2): 59-65 .
50. Sánchez, N., J. Martínez-Fernández. A. Calera, E. Torres and C. Pérez-Gutiérrez. 2010. Combining remote sensing and in situ soil moisture data for the application and validation of a distributed water balance model (HIDROMORE). *Agric. Water Manage.* 98(1): 69-78.
51. Sánchez, N., A. Alonso-Arroyo. J. Martínez-Fernández. M. Piles, Á. González-Zamora. A. Camps. M. Vall-Ilosera. 2015. On the synergy of airborne GNSS-R and landsat 8 for soil moisture estimation. *Remote Sens (Basel)*, 7, 9954-9974.
52. Sandholt, I., K. Rasmussen and J. Andersen. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens. Environ.* 79(2-3): 213-224.
53. Santos, R. L. and J. A. Quintanilha. 2005. Soil Cohesion Analysis in the Tableland Coast in Northeast Region of Brazil through Aster Images (VNIR and SWIR). Paper presented at the Pecora 16 "Global Priorities in Land Remote Sensing", Sioux Falls, South Dakota .
54. Schlenz, F., J. Fallmann. P. Marzahn. A. Loew. and W. Mauser. 2012. Characterization of rape field microwave

- emission and implications to surface soil moisture retrievals. *Remote Sens (Basel)*. 4(1): 247-270 .
55. Sim, C. K., H. S. Lim. C. J. Wong. M. Z. MatJafri and K. Abdullah. 2008. Remote Sensing of Aerosols over Penang Island from Satellite Measurements. Paper presented at the Proceedings of the 2008 15th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation.
56. Small, E. E. and S. Kurc. 2001. The influence of soil moisture on the surface energy balance in semiarid environments (pp. 31): New Mexico Water Resources Research Institute, New Mexico State University.
57. Smith, J. A., N. S. Chauhan and J. Ballard. 1996. Remote sensing of land surface temperature: the directional viewing effect. Paper presented at the IGARSS 1996, Nebraska, USA.
58. Sun, L., R. Sun, X. Li, S. Liang and R. Zhang. 2012. Monitoring surface soil moisture status based on remotely sensed surface temperature and vegetation index information. *Agric. For. Meteorol.* pp. 166–167, 175-187.
59. Trnka, M., R. Brázdil, M. Možný, P. Štěpánek, P. Dobrovolný, P. Zahradníček, J. Balek, D. Semerádová, M. Dubrovský, P. Hlavinka, J. Eitzinger, B. Wardlow, M. Svoboda, M. Hayes and Z. Žalud. 2015. Soil moisture trends in the Czech Republic between 1961 and 2012. *Int. J. Climatol.* 35(9): 2664–2675.
60. World Meteorological Organization, W. 2008. Measurement of Soil Moisture Measurement of Soil Moisture (2008 ed.). Geneva, Switzerland.
61. Yoshioka, H., T. Miura, J. A. Demattê, K. Batchily and A. R. Huete. 2010. Soil line influences on two-band vegetation indices and vegetation isolines: A numerical study. *Remote Sens (Basel)*. 2(2): 545-561 .
62. Zavorotny, V., D. Masters, A. Gasiewski, B. Bartram, S. Katzberg, P. Axelrad and R. Zamora. pp 781-783. *In* Seasonal polarimetric measurements of soil moisture using tower-based gps bistatic radar, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International, 2003; IEEE:
63. Zhao, S., Y. Yang, G. Qiu, Q. Qin, Y. Yao, Y. Xiong and C. Li, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 12(5): 351-358.

Estimation of the Instantaneous Soil Surface Moisture Content in Cold Seasons by using Optical and Thermal Remote Sensing Data under Clear Sky

H. Adab

(Received: Aug. 01-2015 ; Accepted: Sept. 28-2016)

Abstract

A limited number of agricultural weather stations measure moisture in the soil surface. Furthermore, soil moisture information may be required in areas where there is no weather station. The aim of the present study was to use Landsat 8 satellite images to estimate soil surface moisture in an area without agricultural meteorological stations. Gravimetric soil moisture for a total of 14 samples was calculated in the cold season in depths of 0-10 cm when Landsat 8 satellite was overpassing poor rangeland of North of Sabzevar. Furthermore, the first four principal components were extracted from seven Landsat-derived vegetation indices and bio-physical factors affecting soil moisture. Afterwards, the first four components were used to estimate soil surface moisture at the moment of the satellite passing the region using a multivariate linear regression and neural networks. The obtained results of instantaneous soil surface moisture showed that the neural networks had mean absolute percentage error of while classical regression analysis had mean absolute percentage error of 40%. The results also showed the benefits of using both in-situ soil moisture data and Landsat 8 satellite images to model instantaneous soil surface moisture content for areas lacking meteorological networks.

Keywords: Instantaneous soil surface moisture, Optical and thermal remote sensing, Neural network.

1. Dept. of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environ. Sci., Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

*: Corresponding Author, Email: h.adab@hsu.ac.ir