

تخمین توزیع مکانی رطوبت سطحی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از داده‌های دورسنجی

ابوالقاسم دادرسی سبزواری^{۱*}، علی محمد آخوندعلی^۲، فریدون رادمنش^۳ و علی اکبر نوروزی^۴

*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری هیدرولوژی و منابع آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران،

پست الکترونیک: dadrasisabzevar@yahoo.com

۲- استاد، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۴- استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۲

چکیده

ایجاد رواناب به عوامل متعددی بستگی دارد، با وجود این رطوبت خاک یکی از عوامل مهم در تولید آن محسوب می‌شود که با وجود اهمیت بسیار زیاد، اندازه‌گیری‌های پیوسته آن از نظر مکانی و زمانی دشوار و در پاره‌ای از مناطق غیرممکن است. هدف از این مقاله، کاربردی کردن تهیه نقشه رطوبت سطحی خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای تصویرسازی‌های TIRS و OLI، منطبق با زمان برداشت‌های میدانی، به همراه مقادیر محاسبه شده چندین نمایه طیفی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و تبدیل داده Tasseled Cap است. ۲۴ متغیر پیش‌بینی کننده مورد استفاده قرار گرفت و همبسته‌ترین آنها به روش رگرسیون اکتشافی و روش همبستگی دو متغیره، با محاسبه عامل تورم واریانس، ضریب پیرسون و ضریب تبیین، در سه سطح رطوبتی ۴ تا ۵ درصد، بیشتر از ۵ درصد و کمتر از ۴ درصد، مشخص شدند. روش آمار مکانی شاخص مورانز برای همبستگی جغرافیایی داده‌ها استفاده شد. ۴۷ نقطه در سطح منطقه تحقیق به روش تصادفی طبقه‌بندی شده و ایجاد شبکه‌های ۱۸۰۰ متری در یک الگوریتم سیستماتیک، به‌عنوان متغیر پیش‌بینی نمونه‌برداری و در آزمایشگاه به روش وزنی-حرارتی، تعیین رطوبت شدند. پی‌ریزی توابع تخمین رطوبت سطحی خاک نیز با سه روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، گام به گام و Enter انجام شد که تمامی مدل‌ها از واسنجی قابل پذیرشی برخوردار بودند. محاسبه ۵ معیار خطاسنجی توسط ۲۴ درصد داده‌های میدانی که به‌طور تصادفی انتخاب شده بودند، نشان داد که داده‌های لندست ۸ می‌تواند برای تخمین رطوبت سطحی خاک مؤثر باشد و دقت توابع استخراج شده با روش رگرسیون چندگانه گام به گام (۱/۴۲۵ تا ۰/۵۸۵ RMSE)، بیشتر از سایر روش‌هاست. مدل‌های معرفی شده برای سطح رطوبتی $\geq 5\%$ ، تمایل به بیش برآوری (MBE=۰/۷۸۸)، و برای سایر سطوح رطوبتی، تمایل به کم برآوری دارند.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، بیابان‌زایی، هیدرولوژی، سنسج از دور، سیلاب.

مقدمه

شدن بعد از دو چالش تغییر اقلیم (گرم شدن هوای کره زمین) و کاهش دسترسی به آب شیرین، به‌عنوان سومین چالش یا تهدید مهم جهان در قرن ۲۱ شناخته می‌شود.

بر اساس مصوبه اجلاس سران جهان که در سال ۱۹۹۲ در شهر ریو برزیل برگزار شد، پدیده بیابان‌زایی یا بیابانی

طی سالیان گذشته، به‌ویژه در ۱۰ سال اخیر، پژوهشگران زیادی به تلاش و تحقیق در زمینه تخمین و دسترسی به تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک از داده‌های دورسنجی پرداخته‌اند و این روش را برای مطالعه ناهنجاری‌های طبیعی، پیش‌روی کویر، پیش‌بینی سیل، بروز خشکسالی، مدیریت مرتع و ... مفید و امکان‌پذیر ارزیابی کرده‌اند. Norouzi Aghdam و همکاران (۲۰۰۹) در مراتع خشک و نیمه‌خشک خراسان رضوی، همبستگی معنی‌داری را بین رطوبت لایه سطحی خاک و NDVI تأخیری ۱۵ روزه تصاویر مودیس به‌دست آوردند و آن را روشی ارزان و سریع برای مطالعه کویرزایی دانستند. در تحقیق Keshavarz و همکاران (۲۰۱۱)، از داده‌های ماهواره‌ای مادیس، روند تغییرات رطوبت خاک طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ در سطح استان اصفهان، مطالعه شد و وجود یک روند طولانی کاهش رطوبت و احتمال بروز خشکسالی، نتیجه‌گیری گردید. Babazadeh و همکاران (۲۰۱۲) چند نمایه طیفی را از تصاویر مودیس استخراج و با مدل‌سازی رطوبت لایه سطحی خاک، تخمین قابل قبولی را از این متغیر در مراتع خشک و نیمه‌خشک خراسان رضوی به‌دست آوردند و نتایج حاصل را راهکاری مناسب برای مطالعات منابع طبیعی و مدیریت مرتع دانستند. Babaeyan و همکاران (۲۰۱۳) امکان استفاده از داده‌های سنجش از دور را برای پایش و مطالعه نوسانهای رطوبت خاک در مناطق نیمه‌خشک و در شرایط نبود پوشش گیاهی، مورد تأکید قرار دادند. Ziaee و Khajedin (۲۰۱۳)، در بخشی از استان اصفهان نیز این روش را در مطالعات مقابله با بیابان‌زایی، روشی کنترلی و مفید ارزیابی کرده‌اند. در چین Wang و همکاران (۲۰۱۰)، در ویتنام Chen و همکاران (۲۰۱۱)، در فلات تبت Lu و همکاران (۲۰۱۲)، در کانادا Rahimzadeh و همکاران (۲۰۱۳)، در امریکا Fang و Lakshmi (۲۰۱۴) و در اسپانیا Sanchez و همکاران (۲۰۱۴)، توانستند با یافتن ارتباط قابل قبولی بین رطوبت خاک و داده‌های سنجش از دور، مطالعه بسیاری از پدیده‌های محیطی متأثر از تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک را تسهیل کنند.

سیلاب یکی از پیامدهای جدی بیابان‌زایی به‌شمار می‌رود (خسروشاهی، ۱۳۸۷)، از این‌رو هرگونه اقدام علمی در مناطق بالادست حوضه‌های آبخیز برای جلوگیری از بروز یا تشدید سیلاب، عملی در جهت مهار بیابان‌زایی محسوب می‌شود (خسروشاهی و همکاران، ۱۳۹۴). ایجاد رواناب به عوامل متعددی مانند جنس سازند، کاربری اراضی، شیب زمین، بافت خاک، پوشش سطح و ... بستگی دارد، با وجود این رطوبت خاک یکی از عوامل مهم در تولید رواناب می‌باشد (Orsham et al., 2010, Feiznia et al., 2005, Karnieli & Ben-Asher, 1993). به‌طوری‌که تقریباً همه فرایندهای هیدرولوژیکی اتفاق افتاده را در خاک کنترل می‌کند (Keshavarzi et al., 2013). مقدار این پارامتر مهم، در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متنوع و در هر منطقه نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کند (Rosenbaum et al., 2012)، تا جایی که اندازه‌گیری‌های پیوسته آن بسیار پرهزینه و وقت‌گیر و در بخشی از مناطق، به‌ویژه در مناطق صعب‌العبور، کوهستانی و وسیع غیرممکن است. از طرفی نمونه‌برداری‌های میدانی رطوبت خاک که برای شناخت برداشت می‌شوند، فاقد اطلاعات مکانی است و هیچگونه اطلاعاتی را در نمونه‌ای دیگر و با فاصله معلوم، ارائه نمی‌دهند (Noroozi et al., 2014). داده‌های ماهواره‌ای از قابلیت بالایی برای تخمین ناحیه‌ای رطوبت خاک، نسبت به اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای برخوردارند (Legates, 2000) و با پیشرفت روزافزون علم و فناوری، جایگزینی این روش‌ها به جای روش‌های گذشته، برای مدیریت صحیح منابع محدود آب و خاک، اجتناب‌ناپذیر است. چنانچه ارتباطی بین داده‌های سنجش از دور و رطوبت سطح خاک برقرار شود، می‌توان با شناخت تغییرات منطقه‌ای و محلی رطوبت سطحی خاک، مطالعات تمرکز و تبدیل بارش به سیلاب را با دقت و سرعت بیشتری ارزیابی کرد و پیامدهای ناشی از فزونی و جاری شدن سیلاب را مدیریت کرد، چه با توجه به نقش رطوبت خاک در سرعت نفوذ آب در خاک، اندازه‌گیری‌های مداوم رطوبت خاک در محاسبات سیل بسیار مفید خواهد بود (بداق جمالی و همکاران، ۱۳۸۲).

گرفت. دلایل اصلی انتخاب داده‌های این ماهواره در پژوهش فعلی، وجود تکنولوژی پیشرفته‌تر آن نسبت به سایر ماهواره‌های سری لندست، بهبود کیفیت تصویر به دلیل بهبود نسبت سیگنال به نویز (SNR: Singal to Noise Ratio)، افزایش تعداد آشکارسازها، قابلیت تفکیک مکانی، زمانی و طیفی مناسب و سرانجام سابقه استفاده از داده‌های لندست‌های گذشته در تحقیقات مرتبط می‌باشد. محصول با تصحیحات هندسی است (RMS کمتر از ۳ در هر دو جهت)، ولی در این پژوهش، تصحیحات رادیومتریک مربوط به سنجنده و اتمسفر، توسط ENVI_{5.1}، با روش Flat Field (Flat Field Calibration) انجام شد.

شاخص‌های طیفی

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ترکیب پیچیده نوع خاک، آثار جوی و پوشش‌های تنک گیاهی، امکان استخراج اطلاعات قابل اعتماد را کاهش می‌دهد و به همین دلیل در این پژوهش، از شاخص‌های متعددی استفاده شد، تا آثار ناخواسته فوق کاهش یابد. ۷ نمایه طیفی، ۳ انتقال طیفی تسلدکپ (Tasseled Cap Transformation)، ۳ تجزیه مؤلفه‌های اصلی (Principal Components Analysis) و ۱۱ باند تصویر ماهواره لندست ۸، در مجموع ۲۴ متغیر مندرج در جدول ۱ در تحقیق به‌کار گرفته شد.

داده‌های زمینی

مقادیر واقعی رطوبت لایه سطحی خاک، با نمونه‌برداری از سطح منطقه تحقیق و همزمان با گذر ماهواره از منطقه، میسر شد. تعداد و انتخاب موقعیت نقاط نمونه‌برداری، با روش تصادفی طبقه‌بندی شده به فواصل نمونه‌برداری حداقل ۵۰۰ متر از یکدیگر انجام و در مرحله نخست تعداد ۹۰ نمونه تعیین شد. نقاط شاهد با تلفیق نقشه نفوذپذیری که مبین بافت خاک منطقه می‌باشد، شبکه آبراهه‌ها و لایه شکل زمین (Landform) که در آن طبقات رقمی ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب و شکل فیزیوگرافی منظور شده است، به روش سیستماتیک و با شبکه‌های ۱۸۰۰ متری نهایی شدند. ۴۷ نقطه به این ترتیب انتخاب شد و مقادیر رطوبت وزنی لایه ۰-۱۵ سانتی‌متری خاک در هر نقطه، به روش مستقیم

هدف از این پژوهش، تخمین رطوبت سطحی خاک و اشتقاق الگوریتمی برای توزیع مکانی آن در سطوح رطوبتی مختلف از تصاویر ماهواره و کاربردی کردن تهیه نقشه مربوطه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با متمرکز کردن رطوبت خاک در محاسبات رواناب، برای مدل‌های بارش-رواناب است. برای سایر نواحی اقلیمی، به دلیل دامنه تغییرات رطوبت خاک متفاوتی که با منطقه انجام این پژوهش دارند، لازم است رابطه بین رطوبت سطحی خاک با داده‌های همزمان ماهواره، دوباره مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

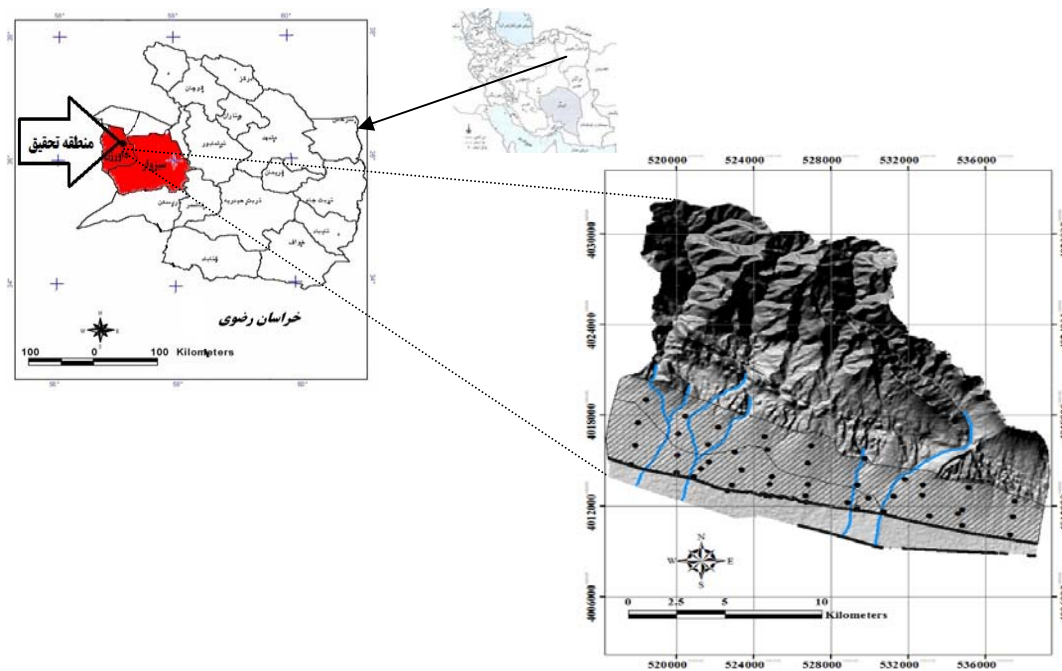
منطقه تحقیق در ۴۳ کیلومتری غرب شهر سبزوار و ۳۲ کیلومتری شرق شهر داورزن از شهرستان‌های خراسان رضوی (شکل ۱)، در حاشیه جاده ترانزیتی مشهد به تهران، بین دو طول جغرافیایی $56^{\circ}48'38''$ و $57^{\circ}26'56''$ و دو عرض جغرافیایی $36^{\circ}09'16''$ و $36^{\circ}23'18''$ قرار گرفته است. ارتفاع نواحی مختلف این منطقه از ۱۰۵۰ متر در خروجی حوزه تا ۲۸۰۰ متر در منتهی‌الیه شمال شرقی تغییر می‌کند. محدوده مورد مطالعه بر اساس نقشه رژیم رطوبتی خاک‌های ایران که بر مبنای اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی کشور در سال ۱۳۵۶ و با مقیاس ۱/۴۰۰۰۰۰، توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شده است، دارای رژیم رطوبتی اریدیک می‌باشد. اقلیم در این منطقه، بر اساس شاخص دمارتن، خشک و نیمه‌خشک است. از مجموع ۳۵۲۷۱ هکتار مساحت زیر حوزه‌ها، ۲۲۱۷۱ هکتار کوهستان و تپه و بقیه با حدود ۱۳۱۰۰ هکتار، آبرفت می‌باشد. سطح پژوهش بخش آبرفت منطقه است که در شیب جنوبی ارتفاعات کوه‌های جغتای، سفید مهر، شملق و گر به صورت شرقی غربی واقع شده است.

داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های OLI و TIRS از لندست ۸، مربوط به گذر ۱۶۱، ردیف ۳۵ و تاریخ ۵ فوریه ۲۰۱۵، که همزمان با برداشت میدانی نمونه‌های خاک می‌باشد، مورد استفاده قرار

کردن آنها، نمونه‌ای حدود ۳ کیلوگرمی به آزمایشگاه منتقل گردید. روش مبتنی بر برداشت مخلوط خاک از لایه ۰-۱۵ سانتی‌متر و خشک کردن آنها درون آون ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت است. ۲۴ درصد داده‌ها به طور تصادفی به عنوان سری داده‌های اعتبارسنجی، در مرحله استخراج دقیق‌ترین مدل، مورد استفاده قرار گرفتند.

وزنی - حرارتی، که به عنوان روشی دقیق برای واسنجی سایر ابزارهای اندازه‌گیری رطوبت خاک مطرح است (Gringof & Nabiev, 1987)، تعیین شد. از آنجا که یک نمونه رطوبت نمی‌تواند نماینده مناسبی برای یک پیکسل حدود ۹۰۰ مترمربعی باشد، در هر نقطه، از یک شبکه ۳۰ در ۳۰ متر (حداقل ۵ نمونه در هر نقطه) برداشت و پس از مخلوط



شکل ۱- موقعیت منطقه اجرای طرح در کشور و استان خراسان رضوی

جدول ۱- نمایه‌های رطوبتی، پوشش گیاهی و خاک، نسبت‌گیری‌های بانندی، باندهای طیفی و شاخص‌های گیاهی

منبع	ملاحظات	دامنه	نمایه	ردیف
Gao(1996)	آب دارای ارزش مثبت	$(\rho_{Green}-\rho_{NIR})/(\rho_{Green}+\rho_{NIR})$	NDWI	۱
Xu, Hanqiu (2006)	آب دارای ارزش مثبت	$(\rho_{Green}-\rho_{MIR})/(\rho_{Green}+\rho_{MIR})$	MNDWI	۲
Huete (1988)	L=0 مناطق با پوشش گیاهی بالا L=1 سطوح فاقد پوشش گیاهی L=0.5 برای اغلب اراضی	$((\rho_{NIR}-\rho_{Red})/(\rho_{NIR}+\rho_{Red}+L))*(1+L)$	SAVI	۳
Qi, J. et al., 1994	MSANI _n	$(1/2)*(2\rho_{NIR}+1)-\text{SquareRoot}((2\rho_{NIR}+1)^2-8(\rho_{NIR}-\rho_{Red}))$	MSAVI	۴
Liu & Huete (1995)	$G=2.5, CI=6.0,$ $C2=7.5, L=1$ Huete et.al.(1997)	$(\rho_{NIR}+C_1*\rho_{Red}-C_2*\rho_{Blue}+L)/G*((\rho_{NIR}-\rho_{Red}))$	EVI	۵
Rouse, J.W et al., (1973)	آب دارای ارزش منفی	$(\rho_{NIR}-\rho_{Red})/(\rho_{NIR}+\rho_{Red})$	NDVI	۶
Shaunet al., (2003)	آب دارای ارزش مثبت	$(\rho_{NIR}-\rho_{MIR})/(\rho_{NIR}+\rho_{MIR})$	NDMI	۷
	بالاترین تغییرات	PCA1		۸
Pearson, k.(1901)	دامنه تغییرات بینابینی	PCA2	PCA	۹
	پایین‌ترین تغییرات	PCA3		۱۰
	شفافیت خاک	Brightness (TAS1)		۱۱
Kauth & Thomas (1976)	سبزیگی پوشش گیاهی	Greenness (TAS2)	TAS	۱۲
	روابط متقابل پوشش گیاهی و رطوبت خاک	Wetness (TAS3)		۱۳
	ساحلی	۰/۴۵۱-۰/۴۳۵(μm)	Band 1	۱۴
	آبی	۰/۵۱۲-۰/۴۵۲(μm)	Band 2	۱۵
	سبز	۰/۵۹۰-۰/۵۲۵(μm)	Band 3	۱۶
	قرمز	۰/۶۷۳-۰/۶۳۶(μm)	Band 4	۱۷
	مادون قرمز نزدیک	۰/۸۷۹-۰/۸۵۱(μm)	Band 5	۱۸
NASA, (2015)	مادون قرمز طول موج کوتاه	۱/۶۵۱-۱/۵۶۶(μm)	Band 6	۱۹
	مادون قرمز طول موج کوتاه	۲/۲۹۴-۲/۱۰۷(μm)	Band 7	۲۰
	پانکروماتیک	۰/۶۷۶-۰/۵۰۳(μm)	Band 8	۲۱
	سیروس	۱/۳۸۴-۱/۳۶۳(μm)	Band 9	۲۲
	مادون قرمز طول موج بلند	۱۱/۱۹-۱۰/۶۰(μm)	Band 10	۲۳
	مادون قرمز طول موج بلند	۱۲/۵۱-۱۱/۵۰(μm)	Band 11	۲۴

ρGreen^۱, ρNIR, ρMIR, ρRed و ρBlue به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر هر پیکسل در بازتاب طول موج سبز (۰/۵۲ تا ۰/۵۹۰ μm)، مادون قرمز نزدیک (۰/۷۷ تا ۰/۸۸ μm)، مادون قرمز میانی (۱/۱۰۷ تا ۱/۵۵ μm)، قرمز (۰/۶۲ تا ۰/۶۸ μm) و آبی (۰/۴۵۲ تا ۰/۵۱۲ μm) می‌باشد.

تحلیل‌های آماری و آزمون دقت

درجه ارتباط و شدت همبستگی جغرافیایی (فاصله بین نقاط، طول مرز مشترک و گروه‌بندی جهت) میان مشاهداتی که در همسایگی هم قرار دارند، به شیوه GIS و با استفاده از ۲ شاخص خوشه‌بندی حداقل-حداکثر و Moran's I، با

فرایند اقلیدوسی (Euclidean)، انجام شد.

شدت و ضعف وابستگی آماری و تعیین جهت روابط بین رطوبت سطحی خاک (متغیر پیش‌بینی) با متغیرهای مستقل یا پیش‌بینی‌کننده تعریف شده در تحقیق، با روش رگرسیون اکتشافی (Exploratory Regression) در شیوه GIS و با

برخوردار باشد، از آماره‌های خطاسنجی R^2 (ضریب تبیین)، RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)، SD (انحراف معیار)، MBE (میانگین خطای اریب) و RPD (نسبت انحراف کارایی: Ratio Performance Deviation)، استفاده و معتبرترین مدل‌ها برای تخمین رطوبت سطحی خاک از تصاویر ماهواره، با توجه به تعداد مناسب فاکتورهای دخیل در تحقیق معرفی شدند. در انجام اقدامات مورد نیاز تحقیق، از بسته‌های نرم‌افزاری Arc/Map^{10.2.2}، SPSS²²، Weka^{3.7}، Minitab¹⁶ و Tanagra^{1.4} استفاده شد.

نتایج

شاخص حداکثر- حداقل با واریانس 0.00004 و p مقدار 0.242351 ، همبستگی مکانی و تصادفی بودن داده‌ها را تأیید می‌کند و شاخص Moran's I نیز، واریانس 0.008335 و p مقدار 0.655993 را در تأیید همبستگی مکانی و توزیع نرمال نمونه‌ها نشان می‌دهد. وابسته‌ترین متغیرهای پیش‌بینی کننده متغیر پاسخ، متأثر از دو آزمون رگرسیون اکتشافی و همبستگی دو متغیری، به همراه مقادیر عامل تورم واریانس، ضریب همبستگی پیرسون و جهت همبستگی مرتبط با هر یک از متغیرهای مستقل پیش‌بینی کننده، در جدول ۲ آمده‌اند. بر پایه نتایج حاصل، از میان ۲۴ متغیر پیش‌بینی کننده دخیل در آزمون، تنها ۶ متغیر PCA، MSAVI، EVI، SAVI، NDWI و NDVI به ترتیب با ضریب همبستگی پیرسون -0.39 ، 0.358 ، -0.358 ، 0.356 ، -0.412 و 0.353 تأثیر معنی‌داری در سطح 0.05 ، بر تغییرات متغیر پاسخ دارند. همچنین عامل تورم واریانس که برای تعیین وجود همراستایی چندگانه بین متغیرها استفاده شد، در تمامی متغیرها نیز در محدوده ۱ است و نشان می‌دهد که هر متغیر پیش‌بینی کننده، به صورت خطی رابطه‌ای با سایر متغیرهای پیش‌بینی ندارد.

روش همبستگی دو متغیره (Bivariate correlation)، در شیوه کلاسیک انجام شد. به این ترتیب مقادیر عامل تورم واریانس (Bivariate correlation) و ضریب همبستگی پیرسون محاسبه و سهم هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته تعیین شد.

به دلیل ایجاد مدل و برای الحاق اندازه‌گیری‌های امواج الکترومغناطیس تصویر به گونه‌ای که ورودی‌های مقادیر محاسبه شده شاخص‌های طیفی و خروجی آن رطوبت خاک (SM) باشد و با مشاهدات زمینی نیز همبستگی معنی‌داری داشته باشد، از ۳ روش برقراری رگرسیون در ۳ سطح رطوبتی ۴ تا ۵ درصد، بیشتر از ۵ درصد و کمتر از ۴ درصد استفاده، که در مجموع ۹ تابع استخراج شد. بر اساس نتایج حاصل از تعیین آزمایشگاهی نمونه‌های خاک، حداکثر میزان رطوبت مشاهده شده $8/604$ درصد و حداقل میزان رطوبت در نمونه‌های مورد بررسی $2/742$ درصد است. رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR: Partial Least Square Regression)، رگرسیون چندگانه گام به گام و رگرسیون چندگانه وارد شونده روش‌های برازش داده در تحقیق بودند. با توجه به نتایج حاصل از اقدامات آماری فوق، مدل‌های مناسب برای ادامه بررسی انتخاب شدند.

اعتبارسنجی

تحلیل توصیفی نرمال بودن خطاها، به روش محاسبه شاخص چولگی و تحلیل استنباطی آنها، با انجام آزمون‌های شاپیرو-ویلک و کلموگروف-اسمیرنوف انجام شد. مستقل بودن خطاها نیز با رسم باقیمانده‌ها برحسب مقادیر برازش شده آنها در محیط نرم‌افزار آماری Minitab¹⁶ انجام و الگوی توزیع مربوطه، تحلیل توصیفی شد. سرانجام به منظور دستیابی به الگوریتمی که در مقایسه با مشاهدات میدانی و با توجه به دامنه پراکنش داده‌ها، از همبستگی و دقت بالاتری در تخمین رطوبت سطحی خاک از تصاویر ماهواره

جدول ۲- وابسته ترین متغیرهای پیش بینی کننده متغیر پاسخ و مقادیر شاخص های مورد بررسی

متغیرهای مؤثر	ضریب پیرسون	تورم واریانس	جهت همبستگی	متغیرهای مؤثر	ضریب پیرسون	تورم واریانس	جهت همبستگی
NDVI	۰/۳۵۳	۰/۰۶۲۵	مثبت	EVI	۰/۳۵۸	۱/۰۵۶۵	منفی
NDWI	۰/۴۱۲	۱/۰۰۹۸	منفی	MSAVI	۰/۳۵۸	۱/۰۵۸۸	مثبت
SAVI	۰/۳۵۶	۱/۰۵۹۹	مثبت	PCA3	۰/۳۹	۱	منفی

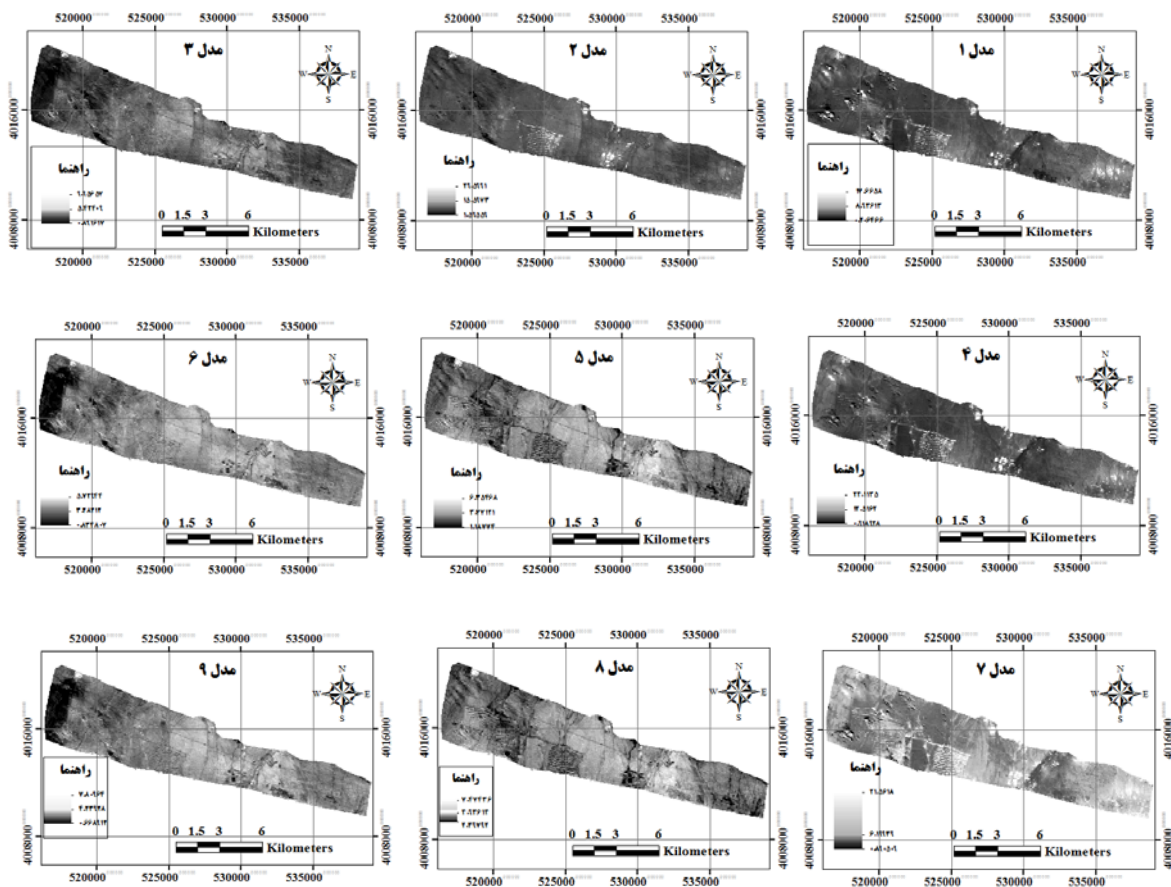
نتایج مطالعات رگرسیون در سه سطح رطوبتی مورد مطالعه، که مورد آزمون نرمال بودن، دقت آزمایی و اعتبارسنجی قرار گرفتند، در جدول ۳ و نقشه رطوبت سطحی خاک منتج از مدل های فوق، در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳- مدل های اولیه برآورد درصد رطوبت سطحی خاک

شماره مدل	روش	سطح رطوبتی	معادله	SE	R ²	r
۱	PLSR	≥ ۵٪	$(-44/65 * PCA3) + (337/99 * MSAVI) + (877/46 * EVI) - (100/88 * SAVI) + (45/05 * NDWI) - (3386/38 * NDVI) + 78/56$	۰/۳۱۵	۰/۹۰	۰/۹۵
۲	PLSR	۴-۵٪	$(32/2 * PCA3) - (10749/7 * MSAVI) + (11576/9 * EVI) + (17370/1 * SAVI) - (39/4 * NDWI) - (7379/5 * NDVI) - 48$	۰/۴۴	۰/۷۳	۰/۸۵
۳	PLSR	≤ ۴٪	$(29/88 * PCA3) - (2271/08 * MSAVI) + (429/09 * EVI) + (3372/69 * SAVI) - (23/56 * NDWI) - (1000/5 * NDVI) - 45/50$	۰/۳۱۳	۰/۹۵	۰/۹۷
۴	Enter	≥ ۵٪	$(-61/054 * PCA3) - (27129/597 * EVI) + (56/959 * NDWI) - (1757/710 * NDVI) + 105/362$	۰/۸۳	۰/۵۲۹	۰/۷۲۷
۵	Enter	۴-۵٪	$(16/280 * PCA3) + (670/714 * EVI) + (21/307 * NDWI) + (103/557 * NDVI) - 22/318$	۰/۲۵	۰/۵۱۷	۰/۷۱۹
۶	Enter	≤ ۴٪	$(25/306 * PCA3) + (5902/694 * EVI) - (21/297 * NDWI) + (423/975 * NDVI) - 37/865$	۰/۳۶	۰/۵۶۷	۰/۷۵۳
۷	Stepwise	≥ ۵٪	$(-20/198 * PCA3) - (25307/084 * EVI) - (1683/226 * NDVI) + 55/286$	۰/۸۲	۰/۵۰۱	۰/۷۰۷
۸	Stepwise	۴-۵٪	$(15/372 * PCA3) + (21/553 * NDWI) + (57/301 * NDVI) - 20/835$	۰/۲۴	۰/۵۰۹	۰/۷۱۳
۹	Stepwise	≤ ۴٪	$(21/605 * PCA3) + (5942/475 * EVI) + (464/264 * NDVI) - 32/018$	۰/۳۶	۰/۵۰۴	۰/۷۱۰

توزیع رسم باقیمانده ها برحسب مقادیر برازش شده آنها، نشان داد که توزیع فوق از الگوی خاصی پیروی نمی کند و خطاها مستقل می باشند. نتایج محاسبه آماره های خطاسنجی برای انتخاب بهترین مدل (ها) از میان ۹ مدل مورد بررسی، در جدول ۴ خلاصه شده است.

نتایج مربوط به تحلیل توصیفی و استنباطی آزمون نرمال بودن خطاها نشان می دهند که برای تمامی مدل های مورد بررسی، مقدار چولگی بین دو مقدار ۲ و ۲- واقع شده و در هر دو آزمون شاپیرو-ویلک و کلموگروف-اسمیرنوف، سطح معنی داری بالاتر از ۵ درصد است. این نتایج، دلایل خوبی بر نرمال بودن توزیع داده هاست. نتایج توصیف الگوی



شکل ۲- نقشه توزیع رطوبت سطحی خاک در سطح منطقه تحقیق با استفاده از مدل‌های مورد بررسی

جدول ۴- آماره‌های دقت سنجی در مدل‌های بسط داده شده

شماره مدل	RMSE	SD	MBE	RPD	R ²	شماره مدل	RMSE	SD	MBE	RPD	R ²
مدل ۱	۱/۴۰۲	۱/۵۶۸	-۰/۷۹۵	۱/۱۲	۰/۱۸	مدل ۶	۱/۴۲۹	۱/۳۲۸	-۱/۲۵۷	۰/۹۳	۰/۲۵
مدل ۲	۰/۷۷۸	۰/۳۵۳	-۰/۱۰۱	۰/۴۵	۰/۷۱	مدل ۷	۱/۳۴۷	۱/۴۳۲	۰/۷۸۸	۱/۰۶	۰/۲۲
مدل ۳	۱/۵۳۵	۱/۴۴۸	-۱/۳۷۱	۰/۹۵	۰/۲۷	مدل ۸	۰/۵۸۵	۰/۲۲۱	-۰/۱	۰/۳۸	۰/۴۸
مدل ۴	۱/۳۷۹	۱/۴۳۹	-۰/۹۱۱	۱/۰۴	۰/۱	مدل ۹	۱/۴۲۵	۱/۳۲۲	-۱/۲۵۱	۰/۹۳	۰/۴
مدل ۵	۱/۲۳۹	۱/۱۵۷	-۱/۰۹۲	۰/۹۳	۰/۴۷						

یافته نشان می‌دهد که تخمین رطوبت سطحی خاک بر اساس مدل ۸، اختلاف کمتری از مقادیر واقعی در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد، در حالی که این اختلاف برای مدل ۳ بیشتر از سایر مدل‌هاست. نتایج برای SD، در تمامی مدل‌ها کمتر از دو انحراف معیار است. در مطالعات علمی، معمولاً داده‌های با انحراف معیار بیشتر از دو را به‌عنوان داده‌های پرت در

در تمامی مدل‌های مورد بررسی، مقدار RMSE قابل قبول و از میانگین مقادیر واقعی کمتر است. این آماره که از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت متغیر است، در مدل ۸، با مقدار ۰/۵۸۵، کمتر از سایر مدل‌ها و برای مدل ۳، با مقدار ۱/۵۳۵، بیشتر از مدل‌های دیگر است. مدل‌های ۲، ۵، ۷، ۴، ۱، ۹ و ۶، مقادیر بعدی RMSE را به خود گرفته‌اند. این

عددی ۰/۴۸ تا ۰/۱، به ترتیب مقام‌های بعدی را به خود اختصاص دادند. مقدار عرض از مبدأ خط رگرسیون برای سطح رطوبتی $\geq 5\%$ با مقدار ۵۵/۲۸۶ در مدل ۷، کمتر از مدل‌های ۱ (۷۸/۵۶) و ۴ (۱۰۵/۳۶۲) است. این مقدار برای سطوح رطوبتی ۴-۵٪ و $\leq 4\%$ نیز به ترتیب با مقادیر ۲۰/۸۳۵- و ۳۲/۱۸-، در مدل‌های ردیف ۸ و ۹ مربوط به روش گام به گام، از سایر مدل‌ها کمتر است. به این ترتیب می‌توان چنین نتیجه گرفت که توابع استخراج شده از روش رگرسیون چندگانه گام به گام، در هریک از سطوح رطوبتی، مناسب‌تر از سایر روش‌ها می‌باشند و می‌توانند در شرایط خشک و نیمه خشک و استفاده از داده‌های سنجنده‌های OLI و TIRS، برای تخمین رطوبت خاک سطحی، مورد استفاده قرار گیرند. نتایج تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای تخمین رطوبت سطحی خاک در مدل نهایی شده برای سطح رطوبتی بیشتر از ۵ درصد نشان داد، که تخمین رطوبت سطحی خاک تا میزان ۱۱/۷۴ درصد، از دقت قابل قبولی برخوردار است.

بحث

توزیع رطوبت در لایه سطحی خاک، سرنوشت بارندگی را به صورت رواناب سطحی یا تغذیه به داخل خاک مشخص می‌کند (بداق جمالی و همکاران، ۱۳۸۲؛ Sharifi *et al.*, 2004) و تمرکز و تبدیل رواناب به سیلاب و فرسایش خاک‌های حاصلخیز در مناطق بالادست حوضه‌های آبخیز، از عوامل مهم در بیابان‌زایی به‌شمار می‌آید. به این ترتیب پایش زمانی و مکانی رطوبت خاک، گام نخست مدیریت رواناب، و اقدامی بایسته در جهت حفظ خاک و آب است. افزون بر آن، یکی از راهکارهای کاربردی بیابان‌زدایی، بهره‌گیری از آب به منظور افزایش رطوبت خاک و توسعه بیولوژیک خاک می‌باشد (زهتابیان و همکاران، ۱۳۸۳). این پژوهش به دنبال آن بود تا با یافتن ارتباط بین داده‌های انعکاسی و حرارتی سنجنده‌های OLI و TIRS با رطوبت خاک، امکان تخمین رطوبت سطحی خاک را از تصاویر ماهواره فراهم و پایش مکانی و زمانی آن را

نظر گرفته و از تحلیل خارج می‌شوند (Dodge, 2003). بر اساس نتایج مذکور، انحراف معیار مدل ۸ (۰/۲۲۱)، کمترین مقدار را در میان ۹ مدل به خود اختصاص داده است. به این مفهوم که داده‌های منتج از مدل ۸، پراکندگی کمتری از مقدار میانگین، نسبت به سایر روش‌ها دارد. SD با مقدار ۱/۵۶۸ انحراف معیار در مدل ۱، بالاترین رتبه انحراف را گرفته است. برای مدل‌های ۲، ۵، ۹، ۶، ۷، ۴، و ۳، مقدار SD از ۰/۳۵۳ تا ۱/۴۴۸ تغییر می‌کند. مدل ۸ در مورد آماره میانگین خطای اریب نیز نتایج مشابهی را داشت و کمترین مقدار این آماره را با ۰/۱-، به خود اختصاص داد. مدل‌های ۲، ۱، ۷، ۴، ۵، ۹، ۶ و ۳ به ترتیب مقادیر ۰/۱۰۱-، ۰/۷۹۵، ۰/۸۶۸، ۰/۹۱۱، ۱/۰۹۲، ۱/۲۵۱، ۱/۲۵۷- و ۱/۳۷۱- را به دست آورده‌اند. مقدار منفی این آماره بیان‌کننده تمایل به کم‌برآوردی توسط مدل است.

نسبت انحراف کارایی، از آماره‌هایی است که برای مقادیر بزرگتر از ۲، دقت بسیار بالای مدل و برای مقادیر کمتر از ۱، ضعف دقت فرایند تخمین مدل را نشان می‌دهد (Russell, 2003). در حالی که مقدار این آماره برای مدل‌های ۱، ۷ و ۴ به ترتیب با مقادیر ۱/۱۲، ۱/۰۶ و ۱/۰۴، در دامنه دقتی مناسب قرار دارد و برای مدل‌های ۳، ۵، ۶ و ۹، نزدیک مرز بحرانی یک واقع شده است. مقدار نسبت انحراف کارایی در سایر مدل‌های مورد بررسی، ضعف دقت برآورد را نشان می‌دهد.

اگر بررسی قدرت رابطه خطی بین مقادیر مد نظر باشد، R^2 یا ضریب تبیین، معیار بسیار خوبی برای مقایسه است، در غیر این صورت به تنهایی نمی‌توان مقدار آن را مبنای میزان همبستگی بین داده‌های واقعی و برآوردی در مدل دانست. این آماره درصد نسبی خطا را مورد ارزیابی قرار می‌دهد، در حالی که در سایر معیارهای خطاسنجی، میانگین داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضریب تبیین معیاری بدون بعد است که وقتی توأم با لحاظ کردن عرض از مبدأ خط رگرسیون باشد بیان‌کننده رابطه بین دو عامل است. مقدار ضریب تبیین در مدل ۲ بیشتر از سایر مدل‌هاست. مدل‌های ۸، ۵، ۹، ۳، ۶، ۷، ۱ و ۴ با قرار گرفتن در دامنه

حرارتی ماهواره را به‌عنوان روشی غیرمستقیم، سریع، کم هزینه و با دقت قابل قبول، برای تخمین رطوبت سطحی خاک و پایش منظم این پارامتر مهم هیدرولوژیکی و آب و هوایی تأیید می‌کند. این نتایج با یافته‌های Keshavarz و همکاران (۲۰۱۱)، Babaeyan و همکاران (۲۰۱۳)، Chen و همکاران (۲۰۱۱)، Rahimzadeh و همکاران (۲۰۱۳) و Lakshmi و Fang (۲۰۱۴) انطباق دارد. همچنین استفاده از روش ارائه شده، برای تخمین یا پایش رطوبت خاک در مطالعات بسیاری مانند بیان آبی، رواناب، نیاز آبی، دور آبیاری و مطالعات بیابان‌زدایی، بسیار مفید، ارزان و در دسترس محسوب می‌شود، که منطبق بر یافته‌های Norouzi Aghdam و همکاران (۲۰۰۹) و Ziaee و Khajedin (۲۰۱۳) است.

بررسی وضعیت رطوبت و توزیع آن در رابطه با بافت خاک، نشان داد که بیشترین میزان رطوبت در بافت لومی و کمترین آن در بافت شنی منطقه است، به گونه‌ای که ۷۶/۹۳ درصد از سطح لومی منطقه، دارای رطوبتی مساوی یا بیشتر از ۵ درصد و بیش از ۵۵/۵۵ درصد از ناحیه شنی لومی، رطوبتی مساوی یا کمتر از ۴ درصد داشتند. در ناحیه شنی منطقه تحقیق، هیچ نمونه‌ای با درصد رطوبت بیشتر از ۵ درصد مشاهده نشد. بنابراین با افزایش میزان شن، رطوبت سطحی خاک کاهش و بازتاب طیفی تغییر می‌یابد. این یافته با نتایج تحقیق Ebrahimi و همکاران (۲۰۱۳) مبنی بر ارتباط معنی‌دار بازتاب طیفی و مقادیر آزمایشگاهی درصد سیلت و شن، هم‌خوانی دارد.

این تحقیق در اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور و در شرایط خاک‌های آبرفتی و با کاربری مرتع انجام شد. تکرار روش در سایر خاک‌ها و اقلیم‌ها، برای دستیابی به استاندارد برای تهیه نقشه هم‌زمانی رطوبت سطحی خاک از تصاویر ماهواره، همچنین انتخاب منطقه‌ای با کاربری‌های متنوع برای بررسی وضعیت رطوبت و توزیع آن در رابطه با کاربری‌های مختلف، پیشنهاد می‌شود.

امکان‌پذیر سازد. با استفاده از ۳ روش مدل‌سازی و استفاده از ۲۴ متغیر تخمین‌گر، ۹ مدل در سه سطح رطوبتی ۴ تا ۵ درصد، بیشتر از ۵ درصد و کمتر از ۴ درصد فراهم گردید که بعد از محاسبه شاخص‌های همبستگی، آزمون نرمال بودن و مستقل بودن خطاها، مشخص کردن ضرایب تبیین و آزمون‌های متعدد خطاسنجی، سه مدل برای سه سطح رطوبتی مورد پژوهش، به‌عنوان بهترین توابع تخمین رطوبت سطحی خاک از تصاویر هم‌زمانی ماهواره لندست ۸، شناخته شدند (جدول ۵). در تمامی توابع اشتقاقی، نمایه پوشش گیاهی، همبستگی معنی‌دار خود را با رطوبت خاک حفظ کرده است. این یافته با نتایج تحقیق Norouzi Aghdam و همکاران (۲۰۰۹)، Babazadeh و همکاران (۲۰۱۲)، Wang و همکاران (۲۰۱۰)، Champagne و همکاران (۲۰۱۱)، Chen و همکاران (۲۰۱۱) و Sanchez و همکاران (۲۰۱۴) هم‌خوانی دارد. مطلوبیت مدل‌های معرفی شده را می‌توان ناشی از ضریب همبستگی مناسب از ۰/۷۰۷ تا ۰/۷۱۳ در مرحله واسنجی و دقت مناسب (RMSE=۰/۵۸۵ تا ۱/۴۲۵) با خطای نسبی ۵ درصد، در مرحله اعتبارسنجی دانست. در تمامی معیارهای خطاسنجی مربوط به R^2 ، MBE، SD، RMSE و R^2 ، به‌جز مقدار آماره R^2 در مدل ۲، نتایج منتج از توابع استخراج شده از روش رگرسیون چندگانه گام به گام، برای تمامی سطوح رطوبتی، مناسب‌تر از سایر روش‌ها می‌باشد. مقدار RPD نیز در سطوح رطوبتی متناظر به‌جز سطح رطوبتی ۵ تا ۴ درصد برای مدل ۵، تفاوت چندانی را بین روش‌های مدل‌سازی مورد مطالعه نشان نمی‌دهد. افزون بر تمام این موارد، مقدار عرض از مبدأ خط رگرسیون، در تمامی سطوح رطوبتی منتج از روش گام به گام، کمتر از سایر روش‌هاست. نتایج تحقیق همچنین از تأثیر NDWI بر تخمین رطوبت از داده‌های ماهواره دلالت می‌کند که با نتایج تحقیق Sanchez و همکاران (۲۰۱۴) قابل مقایسه است. با توجه به عدم وجود شبکه انسجام یافته رطوبت‌سنجی خاک در کشور، نتایج این پژوهش، امکان استفاده از داده‌های انعکاسی و

جدول ۵- مدل‌های پیشنهادی تخمین رطوبت خاک سطحی (SM) از تصاویر هم‌زمانی ماهواره لندست ۸، در سطوح مختلف رطوبتی برای مناطق خشک و نیمه خشک

سطح رطوبتی	مدل اشتقاقی
≥ ۵٪	$\%SM = (-۳۰/۱۹۸ * PCA_3) - (۲۵۳۰۷/۰۸۴ * EVI) - (۱۶۸۳/۲۲۶ * NDVI) + ۵۵/۲۸۶$
۵-۴٪	$\%SM = (۱۵/۳۷۲ * PCA_3) + (۲۱/۵۵۳ * NDWI) + (۵۷/۳۰۱ * NDVI) - ۲۰/۸۳۵$
≤ ۴٪	$\%SM = (۲۱/۶۰۵ * PCA_3) + (۵۹۴۲/۴۷۵ * EVI) + (۴۶۴/۲۶۴ * NDVI) - ۳۲/۰۱۸$

منابع مورد استفاده

- Terms. Oxford University Press. ISBN 0-19-850994-4, 506 pages.
- Ebrahimi, Z., Valli, A., Ghazavi, R. and Haghparast. H., 2013. The effect of the components of soil texture and geometric mean particle diameter on topsoil spectral response, Case study: a part of the Khatame-Kavir Yazd. *Journal of Quantitative Geomorphological Researches*, 1(3): 115-128.
- Fang, B. and Lakshmi, V., 2014. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. *Journal of Hydrology*, 516: 258-272.
- Feiznia, S., Ghaoumian, J. and Khadjeh, M., 2005. The study of the effect of physical, chemical, and climate factors on surface erosion sediment yield of loess soils (Case study in Golestan province). *Journal of Pajouhesh & Sazandegi*, 66: 14-24.
- Gao, B. C., 1996. NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257-266.
- Gringof, I. G. and Nabiev, Kh R., 1987. Modern methods of soil moisture measurement: problems and discussion. *Soviet Meteorology and Hydrology*, (10): 79-84.
- Huete, A. R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, (25) 3: 295-309.
- Karnieli, A. and Ben-Asher, J., 1993. A Daily Runoff Simulation in Semi-arid Watersheds Based on Deficit Calculations, *Journal of Hydrology*, 149: 9-25.
- Kauth, R.J. and Thomas, G. S., 1976. The tasseled Cap - A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University of West Lafayette, Indiana, (4B): 41-51.
- Keshavarz, M. R., Vazifedoust, M., Alizadeh, A and Asadi, A., 2011. Soil Moisture Routing Using Moderate Spatial Resolution of MODIS Satellite Data, A case Study: Esfahan Province. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 5(2): 209-219.
- Keshavarzi, M., Nazemi, A. M., Ashraf Sadradini, S. A., Nayshabari, M. R. and Naseri, A., 2013. Effect of soil texture on accuracy of time domain reflectometry methods for measurement of soil moisture content. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 3(11): 14-23.
- Legates, D. R., 2000. Remote sensing hydro climatology: An introduction. *The professional*
- بداق جمالی، ج.، احمدیان، ج.، جوانمرد، س.، گلمکانی، ت. و ملکی زاده، ص.، ۱۳۸۲. ضرورت پایش وضعیت رطوبت خاک در افزایش بهره‌وری آب کشاورزی، مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۳ و ۴ دی ماه ۱۳۸۲، تهران: ۳۷۵-۳۸۹.
- خسروشاهی، م. ۱۳۸۷. نقش دوگانه‌ی آب در بیابانزایی و مهار آن. جنگل و مرتع، ۷۸: ۲۶-۳۱.
- خسروشاهی، م.، سید اخلاقی، س.ج.، عباسی، ح.ر.، شفییعی، ش.، رهبر، ا.، روحی پور، ح.، مومن زاده، م.، انصافی مقدم، خ.، فتاحی، م.، جعفریان، و.، بدری پور، ح. و حقانی، ق.، ۱۳۹۴. چالش‌ها و راهبردهای مقابله با ریزگردها در ایران (سند راهبردی آب و ریزگرد)، جنگل و مرتع، ۱۰۴: ۷-۱۲.
- زهتابیان، غ.، رفیعی امام، ع. و اسماعیل زاده، ح.، ۱۳۸۳. معیارها و شاخص‌های موثر در بیابان زایی با تاکید بر نقش آب. جنگل و مرتع، ۶۲: ۱۶-۲۳.
- Babaeyan, A., Homae, M. and Noroozi, A. A., 2013. Estimating topsoil moisture from ENVISAT/ASAR. *Journal of Water Research in Agriculture*, 27(4): 611-622.
- Babazadeh, H., Norouzi Aghdam, E., Aghighi, H., Shamsnia, S.A. and Khodadadi dehkordi, D., 2012. Estimation of soil surface moisture in arid and semi arid rangelands using remotely sensed Temperature/Vegetation Index measurements (TVX), (Case Study: Khorasan Province). *Iranian journal of Range and Desert Reseach*, 19(1): 120-132.
- Champagne, C., McNairn, H. and Berg, A. A., 2011. Monitoring agricultural soil moisture extremes in Canada using passive microwave remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2434-2444.
- Chen, C. F., Son, N. T., Chang, L. U. and Chen, C. C., 2011. Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the Vietnamese Mekong Delta using MODIS data. *Applied Geography*, 31(2): 463-475.
- Dodge, Y., 2003. *The Oxford Dictionary of Statistical*

- Vereecken, H., 2012. Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale, *Water Resources Research*, 48, W10544: 1-22.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J.A. and Deering, D. W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). *Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium Greenbelt*, 10-14 December, SP-351: 309-317.
- Russell, C. A., 2003. Sample preparation and prediction of soil organic matter properties by near-infrared reflectance spectroscopy. *Soil Science and Plant Analysis*, 34(11-12): 1557-1572.
- Sanchez R., S., Piles, M., Sánchez, N., M. Fernández, J. M., V. Iossera, M. V. and Camps, A., 2014. Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates. *Journal of Hydrology*, 516: 273-283.
- Sharifi, F., Safarpour, Sh., Ayoubzadeh, S. A. and Vakilpour, J., 2004. An investigation of factors affecting runoff generation in arid and semi-arid area using simulation and rainfall runoff data. *Iranian Journal of Natural Resources*, 57(1): 33-45.
- Shaun, R. S., Wulder, M. A. and Franklin, S. E., 2003. Sensitivity of thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attract damage. *Remote Sens. of Environ.*, 86: 433-443.
- Wang, H., Li, X., Long, H., Xu, X. and Bao, Y., 2010. Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using RS data: A case study in China's Yongding River basin. *CATENA*, 82(3): 135-145.
- Xu, H., 2006. Modification of normalized difference water Index (NDWI) to enhance open water features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 80(3): 3025-3033.
- Ziaee, D. and Khajedin, S. J., 2013. Mapping of soil texture and saturated soil surface moisture using remote sensing, (Case study: Esfahan). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 20(4): 795-808.
- Geographer, 52(2): 233-234.
- Liu, H. Q. and Huete, A. R., 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2): 457-465.
- Lu, H., Koike, T., Yang, K., Hu, Z., Xu, X., Rasmy, M., Kuria, D. and Tamagawab, K., 2012. Improving land surface soil moisture and energy flux simulations over the Tibetan plateau by the assimilation of the microwave remote sensing data and the GCM output into a land surface model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 17: 43-54.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2015. SMAP, in: <http://smap.jpl.nasa.gov/>.
- Noroozi, A. A., Homaei, M. and Farshad, A., 2014. Estimating topsoil salinity from LANDSAT data: A comparison between classic and spatial statistic. *Journal of Range and Watershed Management*, 66(4): 609-620.
- Norouzi Aghdam, E., Behbahani, M.R., Rahimikhob, A. and Aghighi, H., 2009. Surface soil moisture model with NDVI (Case study: rangeland of Khorasan province). *Journal of Environmental Studies*, 34(48): 127-36.
- Orsham, A., Akhund ali, A.M. and Behnia, A., 2010. Effect of soil antecedent moisture contents on runoff and sedimentation values with simulated rainfall method. *Iranian journal of Range and Desert Research*, 16(4): 445-55.
- Pearson, K., 1901. "On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space" (PDF). *Philosophical Magazine*, 2 (11): 559-572.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R. and Kerr, Y.H., 1994. "A modified soil adjusted vegetation index", *Remote Sensing of Environment*, 48(2): 119-126.
- Rahimzadeh B., P., Berg, A. A., Champagne, C. and Omasa, K., 2013. Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83: 94-103.
- Rosenbaum, U., Bogena, H. R., Herbst, M., Huisman, J. A., Peterson, T. J., Weuthen, A., Western, A. W. and

Estimation of spatial distribution of soil surface moisture in arid and semi arid regions using remote sensing data

Dadrasi Sabzevar^{1*}, A. M. Akhondali², F. Radmanesh³ and A. A. Noorozi⁴

1*- Corresponding author, Ph.D. Student in Hydrology and Water Resources Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, Email: dadrasisabzevar@yahoo.com

2- Professor, Department of Water Resources Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering, Shahid Chamran University.

4- Assistant Professor, Soil conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received:11/4/2015

Accepted:1/2/2016

Abstract

The purpose of this paper was to make the preparation of soil surface moisture map applied in arid and semi-arid regions using satellite imagery of OLI and TIRS along with the calculated values for spectral reflectance, principal component analysis and Tasseled Cap transformation. Twenty-four predictor variables were used and the most correlated ones were identified at three moisture levels of 4 to 5 percent, more than 5 percent and less than 4 percent by exploratory regression and bivariate correlation method through calculating the inflation factor of variance, Pearson coefficient and coefficient of explanation. The Moran's I index was used for geo-spatial autocorrelation. Forty-seven soil samples were collected randomly by creating 1800-meter networks in a systematic algorithm and the soil moisture was calculated by W-thermal method. The estimation functions of soil surface moisture were derived in the form of partial least square regression (PLSR), enter regression and stepwise regression. All models had acceptable calibration. Our results clearly showed that the Landsat 8 data could be useful in estimating soil surface moisture and the accuracy of the functions extracted with stepwise regression method was more than that of other methods (RMSE=0.585 to 1.425 %). The models introduced for a moisture level of $\geq 5\%$, tend to over estimate (MBE= 0.788) and for other moisture levels tend to underestimate.

Keywords: Soil moisture, desertification, hydrology, remote sensing, floodwater.