



دوره‌ی ۳۵، شماره‌ی ۴، شماره‌ی پیاپی ۱۳۷، زمستان ۱۴۰۱، صفحه‌های ۲۰-۳۳
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmrj.2022.356743.1444

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آبخیزداری

پایش دگرگونی رطوبت سطحی خاک با تحلیل گروه زمانی داده‌های لندست ۸ در آبخیز گاودره کردستان

صلاح‌الدین زاهدی

(نویسنده‌ی مسئول) * استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

باقر قرمز چشمه

استادیار پژوهشی، گروه هیدرولوژی، پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

*ایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: zahedi51@gmail.com

تاریخ دریافت: ۶ آذر ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۲۲ اسفند ۱۴۰۰

چکیده

اطلاع دقیق از اندازه‌ی رطوبت و افت‌وخیزهای آن ممکن است راه‌کاری مناسب برای تهیه‌کردن نقشه‌های رطوبت لایه‌ی سطحی خاک، پیش‌بینی روی‌داد طوفان‌های خاک و ریزگردها، سیل، خشک‌سالی و دیگر پدیده‌های اقلیمی، آگاهی از فصل چرای دام در مرتع، و زمان کشت و آبیاری گیاهان باشد. در این پژوهش برای برآوردکردن و آگاهی یافتن از رطوبت خاک، شاخص عمودی رطوبت خاک به‌دست‌آمده از تصویرهای لندست ۸ به‌کار برده‌شد. با داده‌های میدانی ارتباط میان این شاخص و رطوبت خاک آشکار شد. پس از ویرایش پرتوسنجی و هندسی تصویرها و بهنجارسازی داده‌های میدانی، تصویرهای ماهواره‌ی پردازش‌شد و شاخص عمودی رطوبت خاک به‌دست آمد. داده‌های میدانی و اندازه‌های شاخص در زمان‌های مختلف تحلیل و ابازری ساده شد. درستی نقشه‌های تولیدشده با شاخص‌های آماری ضریب تبیین، جذر میانگین مربع‌های خطا، میانگین خطا، و ضریب کارایی نش-ساتکلیف بررسی شد. نتایج نشان داد که اندازه‌های برآوردشده با شاخص عمودی رطوبت خاک وابستگی کامل به فصل و وضعیت پوشش گیاهی دارد، و در فصل رویش و زیادبودن ضریب سبزی‌نگی دقت برآورد زیاد، و در فصل خواب پوشش گیاهی همبستگی ضعیف و متوسطی با داده‌های میدانی دارد. میانگین ضریب تبیین در همه‌ی زمان‌های نمونه‌برداری حدود ۰/۶۵ بود. از یافته‌های این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که این شاخص را ممکن است برای پایدن رطوبت خاک در منطقه‌های با پوشش گیاهی مناسب، برنامه‌ریزی آبیاری در عرصه‌های کشاورزی، و آغاز و پایان فصل چرای دام در مرتع به‌کار برد.

واژگان کلیدی: رطوبت سطحی خاک، شاخص PSMI، لندست ۸

مقدمه

آگاهی از رطوبت خاک و اندوخته‌های رسوب دسترس در منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک شاخص‌های مهمی در شناخت تغییرپذیری اقلیم‌های محلی و امکان روی داد طوفان‌های ریزگرد در آینده است. اگر چه رطوبت خاک به‌اندازه‌ی بسیار کم در هر منطقه هست، همین اندازه‌ی کم اثر بسیار مهمی بر همه‌ی فرآیندهای زیست‌شیمیایی، زیستی و آب‌شناسی آبخیز، الگوهای آب‌وهوایی، روان‌آب، فرسایش، و مدل‌های داد و ستد دمایی سطح زمین و جو می‌گذارد. پژوهش‌های زیادی بر کاربرد مشاهده‌های سنجش از دور برای ارزیابی کردن شرایط رطوبت خاک انجام شده است. پژوهش‌هایی که اندازه‌گیری بازتاب پرتو خورشیدی را به‌کار برده‌اند (پاتل ۲۰۰۹)، پرتوهای فروسرخ گرمایی (رحیم‌زاده ۲۰۱۳) و پرتوهای میکرو (فانگ ۲۰۱۴) جملگی توان‌مندی به‌کاربردن این داده‌ها را در برآورد کردن رطوبت سطحی نشان دادند.

پژوهش‌های مستقل استیوارت و همکاران (۲۰۰۲) رابطه‌ی محکم میان تولید گندم و حجم رطوبت خاک دسترس نشان داد. نتیجه‌ی ماچادو و همکاران (۲۰۰۰) نیز رابطه‌ی تولید ذرت با حجم رطوبت خاک را نشان می‌دهد. از این پژوهش‌ها می‌توان دریافت که برآورد رطوبت خاک در کارهای مهمی مانند برنامه‌ریزی آبیاری کشاورزی، پیش‌بینی و برآورد تولید کشاورزی، علفه‌ی مرتع‌ها، زمان آغاز چرای دام و پایان آن در مرتع‌ها، هشدار و پیش‌آگاهی دادن روی داد خشک‌سالی، و پیش‌بینی و برآورد کردن حجم روان‌آب در آبخیزها کاربرد دارد. داده‌های راداری از مدت‌ها پیش به این کار گرفته شد، اما اثر پوشش گیاهی در رابطه‌های آن رفع نشده است. این رابطه‌ها برای برآورد کردن رطوبت خاک سطحی بی‌پوشش گیاهی تعریف شده‌است، و به‌کاربردن آن‌ها در منطقه‌های با پوشش گیاهی باعث برآورد کم‌تر از واقعیت رطوبت خاک، و برآورد بیش‌تر از واقعیت زبری سطح می‌شود. کاربرد تصویرهای سنجنده‌های نافع در منطقه‌های با پوشش گیاهی ممکن است در حل کردن این دشواری ابزار موثری باشد (شافعیان و ماس ۲۰۱۵).

از زمان ساخت و به‌کارگیری، ثابت شده است که شاخص گیاهی تفاوت بهنجار شده در تبیین وضعیت پوشش گیاهی بسیار کارآمد است. این شاخصی بسیار محافظه‌کارانه برای وضعیت رطوبت در خاک است، زیرا میان روی داد دگرگونی در رطوبت خاک و دگرگونی‌های مرتبط با آن در شاخص گیاهی تفاوت بهنجار شده زمان تاخیر هست. بنابراین روش‌های برپایه‌ی شاخص گیاهی تفاوت بهنجار شده ممکن است برای پایش سریع شرایط رطوبتی خاک موثر و کارآمد نباشد (شافعیان و ماس ۲۰۱۵). شاخص خشکی پوشش گیاهی دمایی بر پایه‌ی شاخص گیاهی تفاوت بهنجار شده و LST با داده‌های لندست ۸ برای برآورد رطوبت

خاک در چین با داده‌های میدانی ۹۶ نمونه‌برداری محاسبه شد (پنگ و همکاران ۲۰۲۰). نتایج نشان داد که رابطه‌ی منفی شدیدی میان شاخص خشکی پوشش گیاهی دمایی و رطوبت خاک هست. این یافته نشان می‌دهد که این شاخص وضعیت رطوبت خاک را در محل‌های جابه‌جایی به‌خوبی نمایان می‌کند. این کاربرد داده‌های سنجش از دور نشان دهنده‌ی اهمیت این داده‌ها در پژوهش‌های رطوبت خاک و بهینه‌سازی سنجش‌های خاک در مدیریت آب در زمین‌های کشاورزی است. شاخص عمودی رطوبت خاک (PSMI) در آمریکا برای برآورد رطوبت در زمین‌های کشاورزی به‌کار برده شد (شافعیان و ماس ۲۰۱۵)، و توانست رطوبت خاک را با دقت ۰/۷۶ برآورد کند. شاخص‌های گوناگون به‌دست‌آمده از داده‌های لندست ۸ برای برآورد کردن رطوبت خاک در استان سمنان به‌کار برده شد (کوهبنانی و همکاران ۲۰۱۸). نتایج نشان داد که شاخص رطوبت خاک دسته‌ی کوتاه فروسرخ بیش‌ترین همبستگی با رطوبت خاک در منطقه‌های با پوشش گیاهی تُنک دارد. پژوهشگران پیشنهاد کردند که برای اطمینان یافتن از بودن ارتباط میان شاخص‌های گیاهی با رطوبت خاک، لازم است نمونه‌گیری در دیگر روزهای سال، به ویژه در فصل خشک نیز انجام شود. نتیجه‌ی پایش دگرگونی رطوبت خاک در تالاب هورالعظیم و ارتباط آن با طوفان گردوغبار با شاخص عمودی رطوبت خاک (صدافت و نظری پور ۲۰۲۰) نشان داد که افزایش اندازه‌های این شاخص همبستگی بسیاری با کاهش اندازه‌ی رطوبت خاک در این منطقه‌ها و افزایش طوفان‌های گرد و غبار دارد.

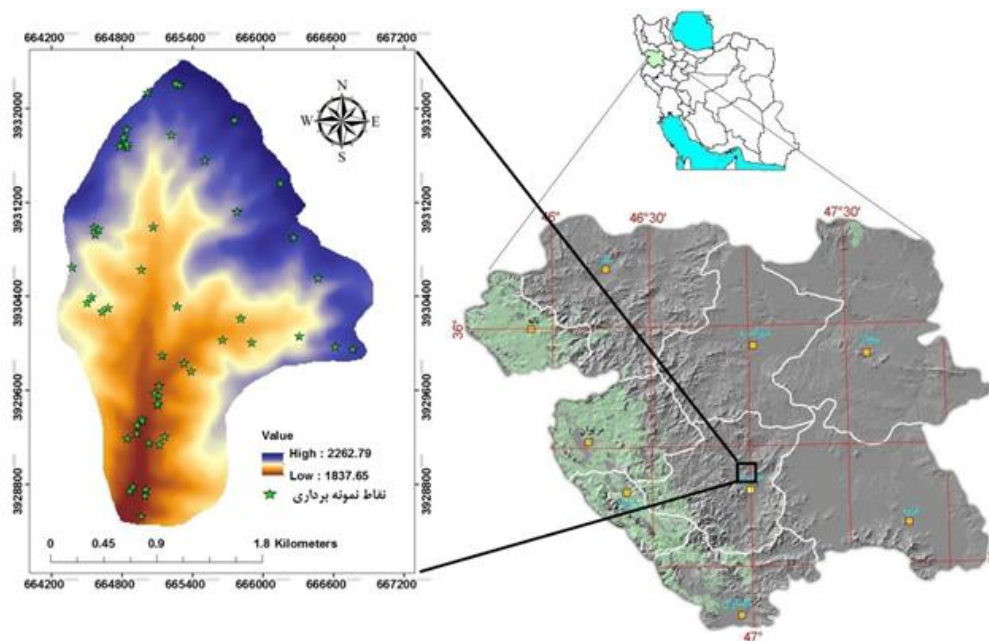
رطوبت خاک نزدیک به سطح بسیار سریع‌تر از خاک ژرفا تغییر می‌کند و این سبب دشواری تشخیص درجه‌ی خیزی خاک از مشاهده‌های سطحی می‌شود. کاربرد اطلاعات سنجش از دور ماهواره‌ی به‌دلیل ویژگی‌های یگانه‌ی آن مانند دید وسیع و یک‌پارچه، پوشش‌های تکراری، سرعت جابه‌جایی اطلاعات و امکان به‌کارگیری سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای ویژه از دشواری کار کاسته است (شافعیان و ماس ۲۰۱۵).

داده‌های لندست به‌دلیل دسترس و بی‌هزینه بودن با پوشش گسترده و تکراری، و ذخیره‌گاه پربار آن، اگر کارآمد باشد ممکن است گزینه‌ی بسیار مناسبی برای آگاهی از رطوبت سطحی خاک در پهنه‌های وسیع باشد. با ویژگی‌های داده‌های لندست ۸ می‌توان امیدوار بود که نامستقیمانه و با شاخص‌های گوناگونی که ممکن است با نوارهای گوناگون آن تهیه کرد، برآورد مناسبی از اندازه‌ی رطوبت سطحی و دگرگونی آن در خاک منطقه‌های نیمه خشک به‌دست آورد. این پژوهش به‌دلیل به‌کاربردن گروه زمانی داده‌های لندست ۸، امکان پایش دگرگونی رطوبت خاک در کاربری‌ها و شرایط پستی‌بلندی گوناگون را با شاخص عمودی رطوبت خاک در سه سال فراهم می‌کند. هدف از این پژوهش آگاهی از کارایی گروه زمانی تصویرهای سنجنده‌ی لندست ۸

مواد و روش‌ها

آبخیز گاودره بخشی از آبخیز سد قشلاق با مساحتی حدود ۶۵۰ هکتار میان طول‌های جغرافیایی "۳۱' ۲۸' ۴۶° تا "۰۱' ۳۰' ۴۶° و عرض‌های جغرافیایی "۱۵' ۲۲' ۳۵° تا "۲۸' ۲۴' ۳۵° در شمال سنندج است (شکل ۱). کاربری عمده در این آبخیز، مرتع است.

در برآورد کردن رطوبت سطحی خاک و دگرگونی آن در زمان‌های گوناگون با شاخص عمودی رطوبت خاک در کاربری‌های سطح آبخیز است.

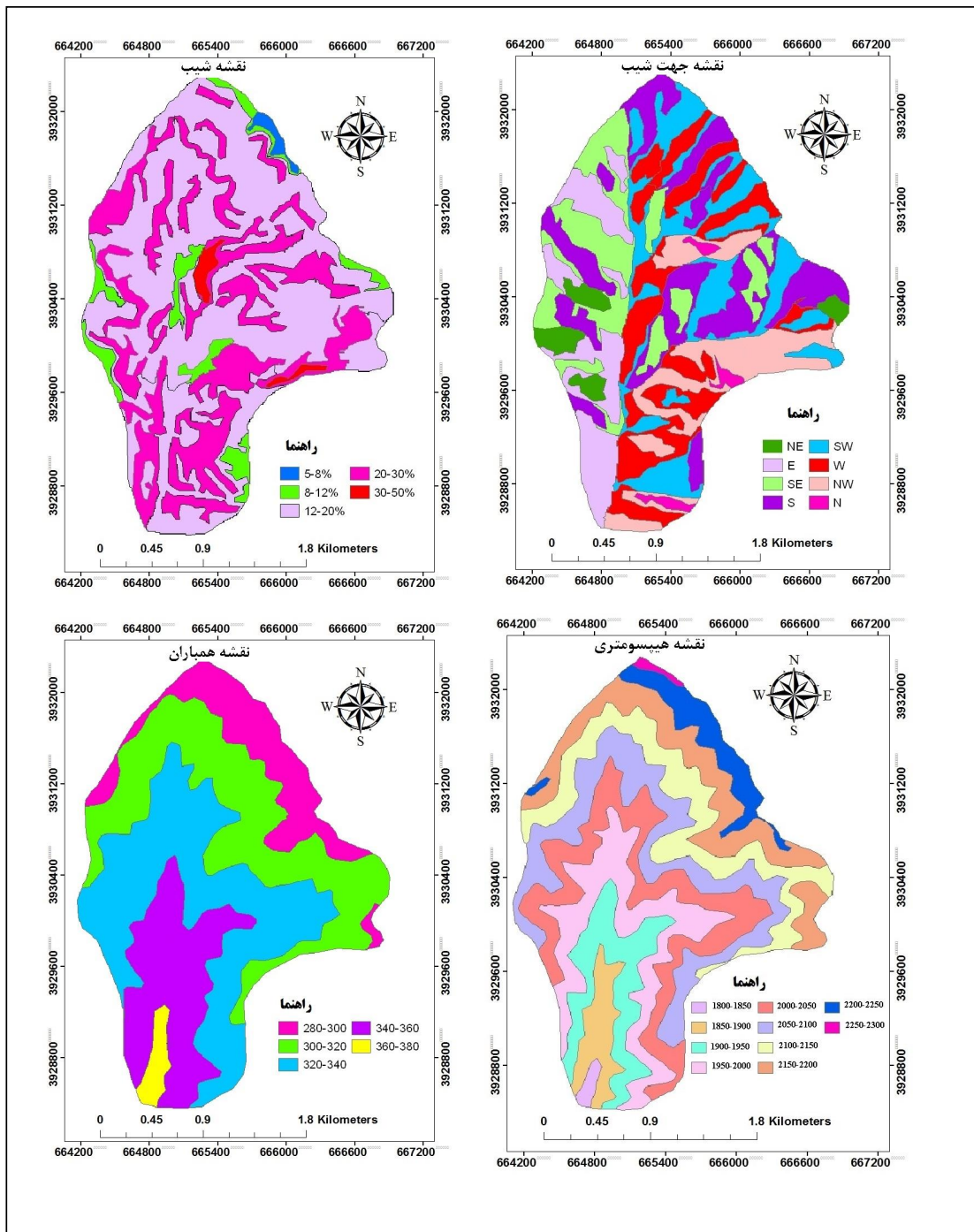


شکل ۱- موقعیت آبخیز گاودره.

در برآیند اثر بخش‌های انتزاعی اقلیمی عمدتاً متأثر از دو ویژگی کاهش بارندگی از غرب به شرق و ارتفاع است. با ضریب خشکی (IA) و میانگین کمینه‌ی دما در سردترین ماه (متر)، و کاربرد جدول‌های بخش‌بندی اقلیمی دومارتن اصلاح‌شده، اقلیم آبخیز نیمه خشک فراسرد است. میانگین درازمدت بارندگی آن بر پایه‌ی ایستگاه‌های سراب قامیش و تودار صمدی حدود ۳۲۳/۱ میلی‌متر در سال است. محیط آبخیز ۱۱ و طول آن ۴ کیلومتر و بیشینه‌ی ارتفاع ۲۲۶۰ و کمینه‌ی ارتفاع ۱۸۴۰ متر از سطح دریاست است (سازمان جهادکشاورزی کردستان ۱۹۹۷).

از نظر واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی حدود ۱۰۲ هکتار از آبخیز نوع دامنه‌ی منظم همراه با رخساره‌ی برون‌زد سنگی-پوشش نهشته‌های منفصل ۲۵ تا ۷۵٪ (MRO) است. نوع باقی‌مانده‌ی سطح آبخیز دامنه‌های نامنظم همراه با رخساره‌ی برون‌زد سنگی-پوشش نهشته‌های منفصل ۲۵ تا ۷۵٪ (MIO) است. در شکل ۲ نقشه‌های شیب، جهت، فراز‌نمایی (هیپسومتری) و همباران نشان داده شده‌است.

نوع آبخیز زمین کوهستانی با دو رخساره‌ی M.1.2.7 و M.1.2.1، و شیب متوسط آن ۱۸/۸٪ است. اقلیم منطقه



شکل ۲- نقشه‌های شیب، جهت، فرازنامی (هیپسومتری) و هم‌باران آبخیز گاودره.

نمونه‌برداری تعیین، و مختصی جغرافیایی آن‌ها با GPS ثبت شد. به دلیل دوره‌ی بازگشت زمانی تصویرهای ماهواره‌ی (هر ۱۶ روز یک بار) زمان‌های نمونه‌برداری از پیش مشخص، و به شکل جدول تهیه شد. هم‌زمان با تصویربرداری ماهواره از منطقه، با رفتن به منطقه از جاهای مشخص شده نمونه‌برداری

روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده‌ی تصادفی برای نمونه‌برداری صحرائی بود (مک کوی ۲۰۰۵). جاهای نمونه‌برداری بر پایه‌ی دامنه‌ی دگرگونی وضعیت پستی‌بلندی و پوشش زمین انتخاب شد. با تغییر وضعیت پستی‌بلندی و پی‌رو آن تغییر نوع پوشش، جاهای نمونه‌برداری انتخاب، و بر پایه‌ی مساحت ۵۲ جا برای

جاهای نمونه برداری با نصب پیکه، ثابت گرفته شد. گروه زمانی داده‌های لندست ۸ (جدول ۱) به کار برده شد. به دلیل شرایط آب و هوایی منطقه، پوشش ابر، پوشش برف، و وضعیت دمایی در ماه‌های گرم، گروه زمانی تصویرها پیوسته نبود، بل که منقطع بود.

شد. برای تهیه‌ی نمونه‌ی رطوبت خاک به روش برداشت دستی، بردن به آزمایشگاه، و خشک کردن نمونه‌ها در آن کار شد. به دلیل شرایط پستی‌بلندی و اقلیمی منطقه، امکان داده‌برداری زمینی منظم در هر سال نبود زیرا ابرناکی، پوشش برف، یا اشباع بودن خاک منطقه در فصل‌های پاییز و زمستان، یا خشک بودن کامل خاک سطحی در تابستان از مانع‌های داده‌برداری منظم بود.

جدول ۱- فهرست تصویرهای ماهواره‌ی بی به کار برده شده.

تاریخ تصویربرداری (خورشیدی)	تاریخ تصویربرداری (میلادی)	تاریخ تصویربرداری (خورشیدی)	تاریخ تصویربرداری (میلادی)
۱۳۹۵/۱۲/۱۸	۲۰۱۷/۰۳/۰۸	۱۳۹۸/۰۱/۲۶	۲۰۱۹/۰۴/۱۵
۱۳۹۶/۰۲/۲۱	۲۰۱۷/۰۵/۱۱	۱۳۹۸/۰۲/۱۱	۲۰۱۹/۰۵/۰۱
۱۳۹۶/۰۳/۰۶	۲۰۱۷/۰۵/۲۷	۱۳۹۸/۰۲/۲۷	۲۰۱۹/۰۵/۱۷
۱۳۹۶/۰۳/۲۲	۲۰۱۷/۰۶/۱۲	۱۳۹۸/۰۳/۱۲	۲۰۱۹/۰۶/۰۲
۱۳۹۶/۰۴/۰۷	۲۰۱۷/۰۶/۲۸	۱۳۹۸/۰۴/۱۳	۲۰۱۹/۰۷/۰۴
۱۳۹۶/۰۴/۲۳	۲۰۱۷/۰۷/۱۴	۱۳۹۸/۰۷/۱۶	۲۰۱۹/۱۰/۰۸
۱۳۹۷/۰۱/۰۷	۲۰۱۸/۰۳/۲۷	۱۳۹۸/۰۸/۱۸	۲۰۱۹/۱۱/۰۹
۱۳۹۷/۰۳/۲۵	۲۰۱۸/۰۶/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۲۹	۲۰۲۰/۰۴/۱۷
۱۳۹۷/۰۴/۱۰	۲۰۱۸/۰۷/۰۱		

است که بر پایه‌ی رابطه‌های ۲ و ۳ از داده‌های ماهواره‌ی، و به تفکیک هر زمان نمونه‌برداری به‌دست آورده شد (هیوت و همکاران ۱۹۸۴، روز و همکاران ۱۹۷۴).

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{NIR + RED + L} (1 + L) \quad (3)$$

سنجش ازدور فروسرخ حرارتی بر این پایه است که دمای خاک مستقیمانه از رطوبت خاک با افزایش یافتن دمای ویژه و هدایت دمایی اثر می‌گیرد. تخمین رطوبت خاک از راه سنجش ازدور فروسرخ حرارتی در درجه‌ی اول به کاربرد اندازه‌گیری‌های دمای خاک، به روش خاص یا در ترکیب با شاخص‌های گیاهی ارتباط دارد. برای گرفتن بهترین نتیجه، تصویرهای ماهواره‌ی باید بی پوشش ابر باشد. محاسبه‌ی شاخص عمودی رطوبت خاک نیازمند محاسبه‌ی دمای سطح زمین و شاخص‌های گیاهی NDVI یا SAVI است. برای محاسبه‌ی دمای سطح زمین دو نوار گرمایی لندست ۸ به کار برده شد. شاخص رطوبت عمودی (PSMI) با دو شاخص دما و پوشش گیاهی برای اندازه‌گیری رطوبت سطحی معرفی شده است. شاخص رطوبت عمودی رابطه‌ی معکوسی با اندازه‌ی رطوبت خاک دارد: با افزایش اندازه‌ی عددی شاخص، اندازه‌ی رطوبت خاک کاهش می‌یابد. اندازه‌های شاخص از ۰ تا ۱ است: ۱ نشان‌دهنده‌ی خشکی شدید و ۰ نشان‌دهنده‌ی شرایط بسیار مرطوب است (شافعیان و ماس ۲۰۱۵) (رابطه‌ی ۴، ۵ و ۶).

به دلیل این که تصویرهای لندست ۸ بر پایه‌ی اندازه‌ی عددی نقطه‌ی تصویر (DN) به کاربران داده می‌شود، پیش از محاسبه‌ی متغیرهای طیفی، انجام کنش‌های پیش‌پردازش بر این تصویرها ضروری است، و لازم است برای هر تصویر با ضریب تصحیح پرتوسنجی در پرونده‌ی متادیتای آن، اندازه‌های بازتابش زیاد نیواری نوارهای سنجنده‌ی OLI محاسبه شود (USGS ۲۰۱۶). با این تصحیح، اثر اختلاف زاویه‌ی ارتفاع خورشید در داده‌های چندزمانه برطرف، و اثرهای بد نیوار، پستی‌بلندی، و خود سنجنده بر داده‌های رقمی بر طرف شد (رابطه‌ی ۱).

$$L_{rad} = (DN / \text{Max Gray}) * (L_{max} - L_{min}) + L_{min} \quad (1)$$

Lrad ارزش داده (تابش: رادیانس)، Lmin کم‌ترین اندازه‌ی تابش برای هر نوار (باند)، و Lmax بیش‌ترین اندازه‌ی تابش برای هر نوار. بر پایه‌ی اطلاعات متادیتای تصویرها، و با رابطه‌ی ۱ برای نوارهای به‌کاربرده، همه‌ی تصویرها تصحیح، و مختصه‌های تصویرها یکسان شد.

برای بررسی تاثیر پستی‌بلندی و دگرگونی ناشی از آن در اندازه‌های عددی تصویرهای ماهواره‌ی، عملگرهای نرم افزار ERDAS با عنوان بهنجار کردن پستی‌بلندی به کار برده شد، که با سنج‌های ارتفاع و زاویه‌ی سوی خورشید (آزیموت)، و نقشه‌ی DEM منطقه کار می‌کند (USGS ۲۰۱۶). پیش‌نیاز محاسبه‌ی PSMI شاخص گیاهی NDVI یا SAVI

مشاهده‌شده، y_{est} اندازه‌های برآوردشده (خروجی مدل)، میانگین اندازه‌های برآوردشده، و n تعداد داده‌ها است. جذر میانگین مربع‌های خطا دقت مدل را برپایه‌ی تفاضل میان اندازه‌های واقعی و اندازه‌های برآوردشده ارزیابی می‌کند، و هرچه اندازه‌ی آن کم‌تر و به ۰ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی کارکرد بهتر مدل است (رابطه‌ی ۹) (هیندمن و همکاران ۲۰۰۶).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((y_{est})_i - (y_{obs})_i)^2}{n}} \quad 9$$

میانگین خطای مطلق (رابطه‌ی ۱۰) از صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند. هر چه کم‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی کارکرد بهتر مدل است (پونیتوس و همکاران ۲۰۰۸).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |(y_{est})_i - (y_{obs})_i|}{n} \quad 10$$

داده‌های آزمون مدل با ضریب کارآیی نش-ساتکلیف (۱۹۷۰) مقایسه شد (رابطه‌ی ۱۱).

$$NSE = 1 - \frac{\sum (SD_o - SD_p)^2}{\sum (SD_o - SD_m)^2} \quad 11$$

SD_p ، SD_o و SD_m به ترتیب اندازه‌های ژرفای خاک اندازه گرفته‌شده (مشاهده‌شده)، برآوردشده با مدل، و میانگین اندازه گرفته‌ها (مشاهده‌شده‌ها) است. NSE خطای مربع میانگین تولیدشده از مدل را با پراش داده‌های مشاهده‌شده مقایسه می‌کند (اسکافلی و گوپتا ۲۰۰۷).

نتایج و بحث

اندازه‌های شاخص $PSMI$ برای داده‌های ماهواره‌ی در ۱۷ زمان از ۱۳۹۵/۱۲/۱۸ تا ۱۳۹۹/۰۱/۲۹ بیرون آورده و محاسبه شد (شکل‌های ۳ و ۴). در جدول ۲ نتیجه‌ی معیارهای آماری گوناگون برای شاخص در زمان‌های مختلف آورده شده‌است. رابطه‌ی همبستگی این شاخص با داده‌های میدانی در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌است.

$$PSMI_i = \frac{Di}{(1 + GC_i)} \quad 4$$

$$Di = \frac{(TIR_{i,norm} + GC_i)}{\sqrt{2}} \quad 5$$

$$TIR_{i,norm} = \frac{(TIR_{i_i} - TIR_{min})}{(TIR_{max} - TIR_{min})} \quad 6$$

GC_i پوشش زمین برای هر نقطه‌ی تصویر، GC پوشش زمین، TIR_i اندازه‌ی عددی نوار فرسرخ گرمایی برای هر نقطه‌ی تصویر، و $TIR_{i,norm}$ اندازه‌های بهنجارشده‌ی نوار گرمایی است.

روش تبدیل باکس و کوکس (۱۹۶۴) برای بهنجارسازی داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده به کار برده شد (رابطه‌ی ۷). نتیجه‌ی تبدیل نشان داد که داده‌های بررسی شده بهنجار بود.

$$t(x) = \frac{(x^\lambda - 1)}{\lambda} \quad 7$$

$t(x)$ تبدیل متغیر X با سنجه‌ی تبدیل λ است. λ برای بیشینه کردن شاخص آماری W در آزمون بهنجارسازی شاپیرو-ویلکس به کار گرفته شد (باکس و کوکس ۱۹۶۴).

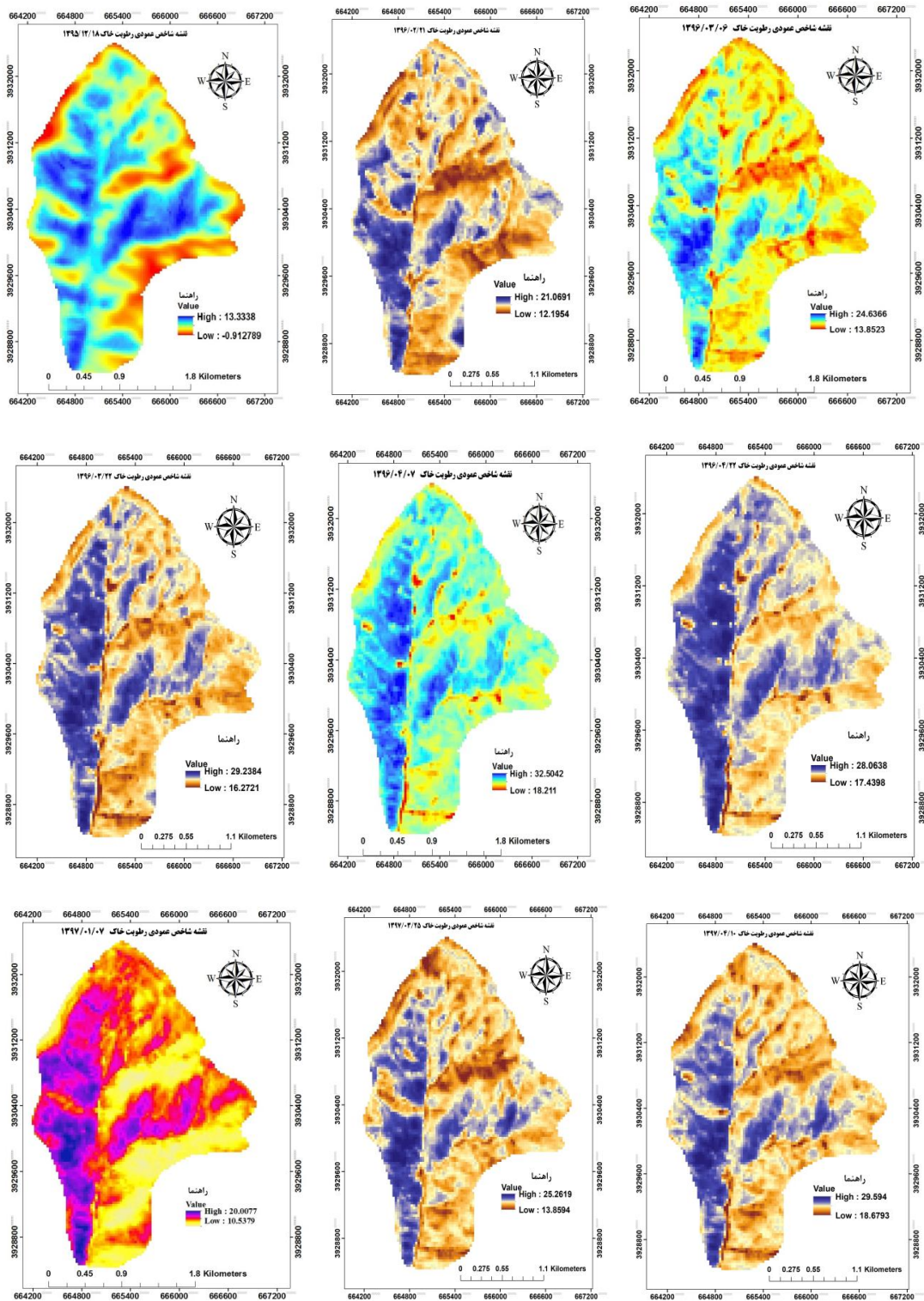
برای ارزیابی کردن آماری دقت مدل‌های تدوین شده ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربع‌های خطا ($RMSE$)، میانگین خطای مطلق (MAE)، و ضریب کارآیی نش-ساتکلیف (NSE) به کار برده شد. ضریب همبستگی یا ضریب تبیین (R^2) نشان دهنده‌ی همبستگی میان اندازه‌های برآوردشده‌ی مدل و اندازه‌های واقعی است (رابطه‌ی ۸). اندازه‌ی آن میان ۰ و ۱ است و هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی کارکرد بهتر مدل است. اندازه‌ی پذیرفتنی (R^2) برای کاربرد معادله‌های وایازی در آب‌شناسی ۰/۳۶ توصیه شده است (گونیک ۱۹۹۳).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((y_{obs})_i - (\bar{y}_{obs})) \times ((y_{est})_i - (\bar{y}_{est}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((y_{obs})_i - (\bar{y}_{obs}))^2 \sum_{i=1}^n ((y_{est})_i - (\bar{y}_{est}))^2}} \quad 8$$

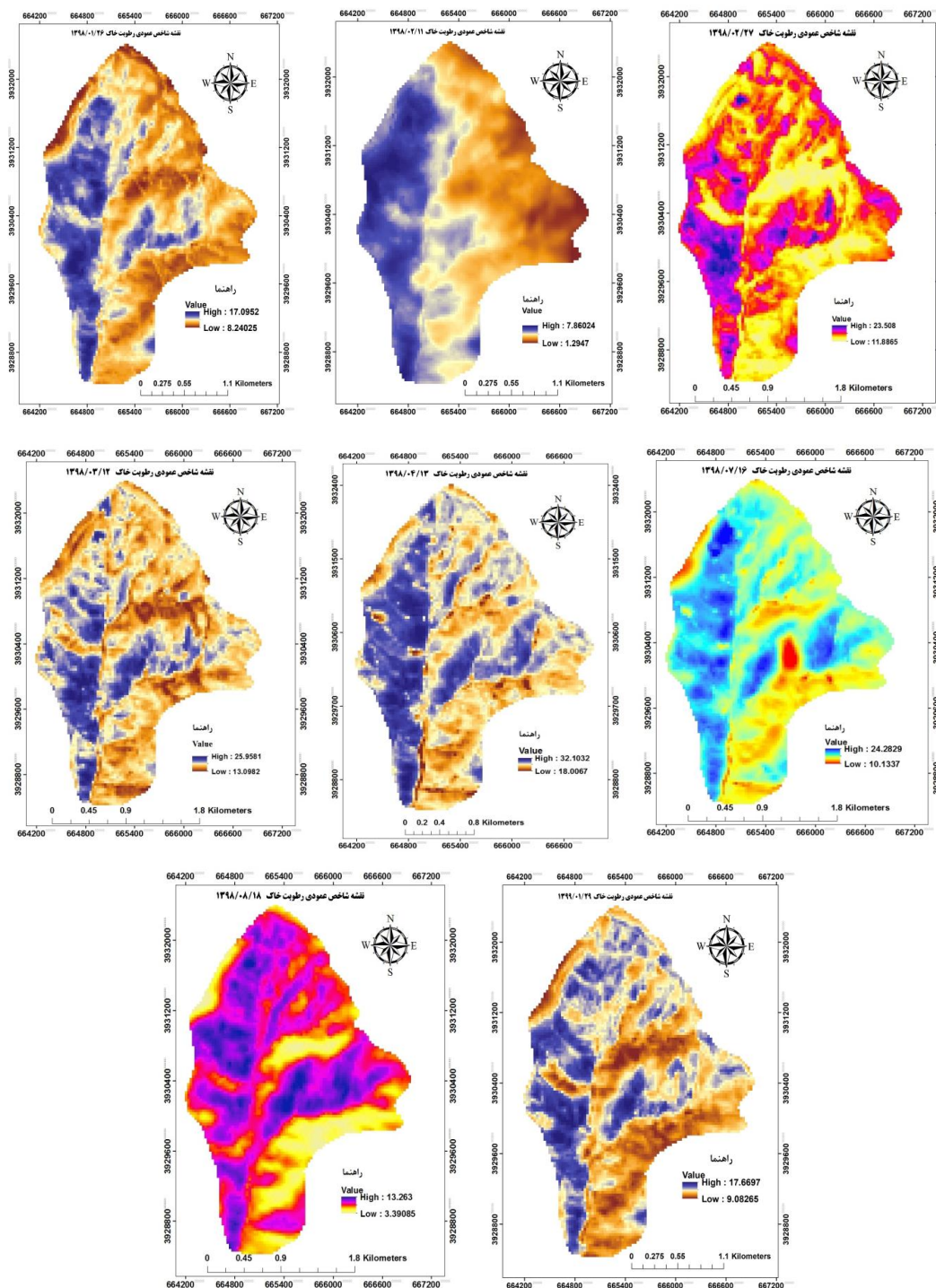
y_{obs} اندازه‌های مشاهده‌شده (واقعی)، میانگین اندازه‌های

جدول ۲- معیارهای آماری دقت نقشه‌های PSMI به دست آمده از داده‌های ماهواره‌بی.

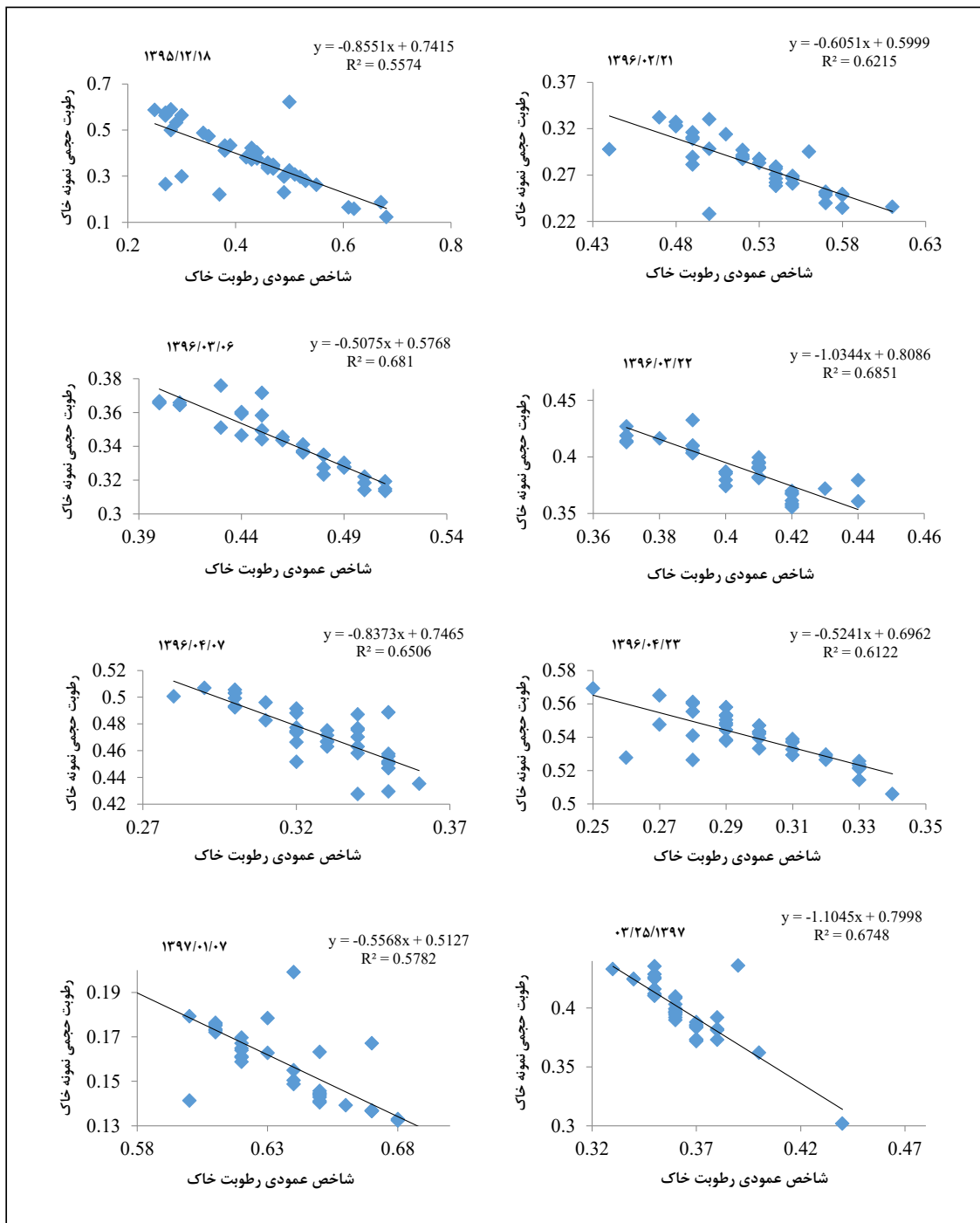
Date	NSE	MAE	RMSE	R ²
۲۰۱۷/۰۳/۰۸	۰/۵۲۱	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۵۵۷۴
۲۰۱۷/۰۵/۱۱	۰/۶۰۸۱	۰/۰۹۷	۰/۰۸۳	۰/۵۲۱۵
۲۰۱۷/۰۵/۲۷	۰/۷۰۱۲	۰/۰۴۸	۰/۰۳۸	۰/۶۸۱
۲۰۱۷/۰۶/۱۲	۰/۷۱۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۹۴	۰/۶۸۵۱
۲۰۱۷/۰۶/۲۸	۰/۷۴۱	۰/۰۸۳	۰/۰۹۷	۰/۶۵۰۶
۲۰۱۷/۰۷/۱۴	۰/۶۴۱۷	۰/۰۳۷	۰/۰۵۱	۰/۶۱۲۲
۲۰۱۸/۰۳/۲۷	۰/۶۰۲۴	۰/۰۳۱	۰/۰۴۷	۰/۵۷۸۲
۲۰۱۸/۰۶/۱۵	۰/۷۰۲۶	۰/۰۹۶	۰/۰۶۴	۰/۶۷۴۸
۲۰۱۸/۰۷/۰۱	۰/۶۳۲	۰/۱۲	۰/۱۰۲	۰/۶۲۳۷
۲۰۱۹/۰۴/۱۵	۰/۵۹	۰/۰۶۲	۰/۰۹۶	۰/۵۵۳۹
۲۰۱۹/۰۵/۰۱	۰/۶۷	۰/۱۰۲	۰/۱۱۳	۰/۶۳۰۲
۲۰۱۹/۰۵/۱۷	۰/۷۳	۰/۰۶۱	۰/۰۷۶	۰/۶۹
۲۰۱۹/۰۶/۰۲	۰/۷۴	۰/۰۸۱	۰/۰۶۷	۰/۶۸۵۵
۲۰۱۹/۰۷/۰۴	۰/۷۰۱	۰/۰۸۵	۰/۰۷۹	۰/۶۵۸۶
۲۰۱۹/۱۰/۰۸	۰/۵۲۶	۰/۰۶۹	۰/۰۹۷	۰/۵۱۷۳
۲۰۱۹/۱۱/۰۹	۰/۵۱۳	۰/۱۱۸	۰/۱۲۶	۰/۴۸
۲۰۲۰/۰۴/۱۷	۰/۶۲۱	۰/۰۶۸	۰/۰۸۴	۰/۵۷۲۲



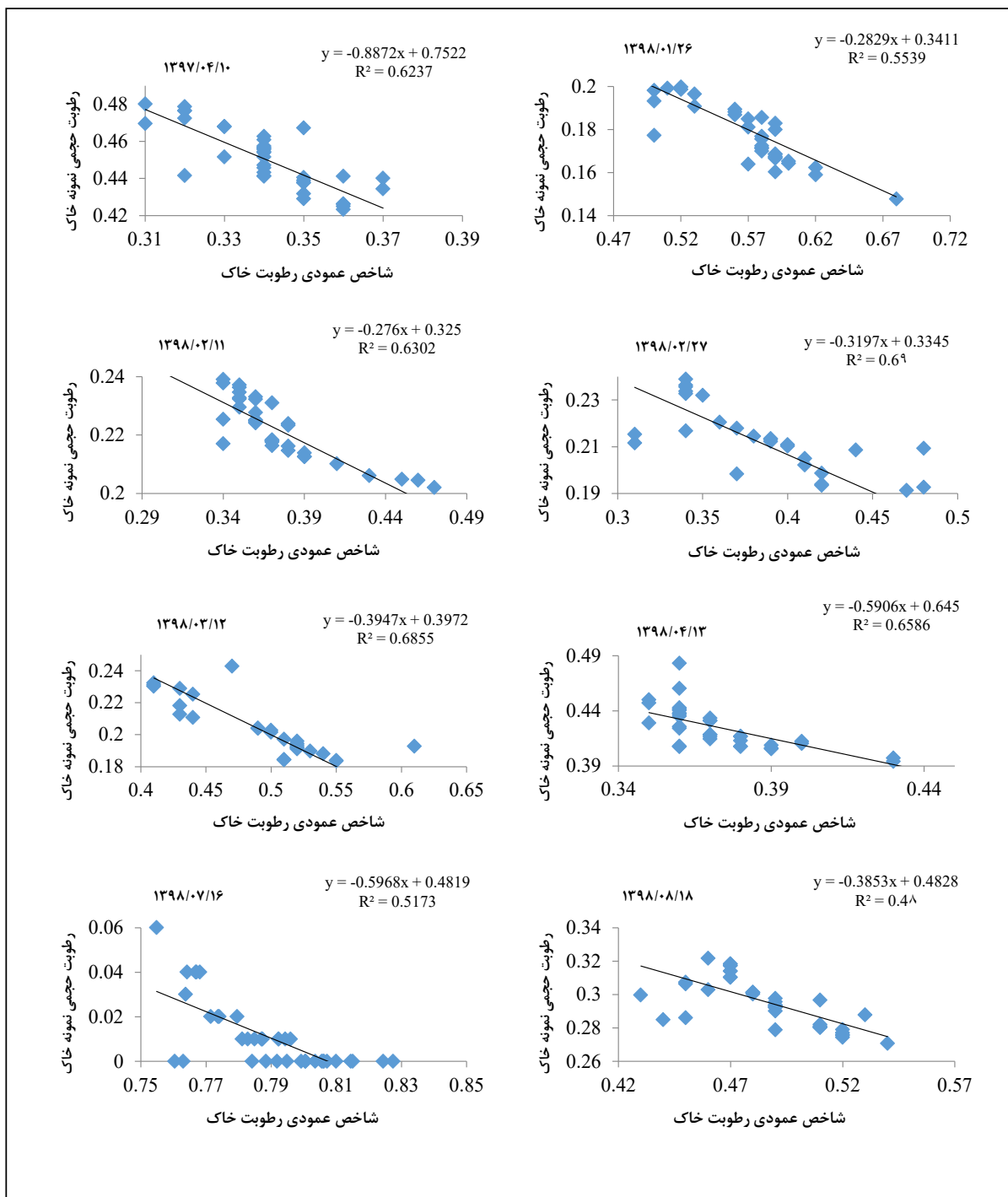
شکل ۳- نقشه‌های شاخص PSMI از ۱۳۹۵/۱۲/۱۸ تا ۱۳۹۷/۰۴/۱۰



شکل ۴- نقشه‌های شاخص رطوبت خاک (SMI) از ۱۳۹۸/۰۶/۲۱ تا ۱۳۹۹/۰۱/۲۹.



شکل ۵- نمودار وایازی شاخص PSMI و رطوبت مشاهده شده از ۱۳۹۵/۱۲/۱۸ تا ۱۳۹۷/۰۳/۲۵.



شکل ۶- نمودار وایازی شاخص PSMI و رطوبت مشاهده شده از 1397/04/10 تا 1398/08/18.

محاسبه شده در تصویرها با وضعیت پوشش گیاهی ارتباط کامل داشت (شکل‌های ۳ و ۴). اندازه‌ی این شاخص با شروع فصل

به دلیل خصوصیت شاخص عمودی رطوبت خاک و اهمیت شاخص پوشش گیاهی در محاسبه‌ی آن، اندازه‌های

شاخص رطوبت عمودی خاک اطلاعات مفیدی برای بازیابی کمی توزیع مکانی و زمانی رطوبت خاک فراهم کرد. نتیجه‌ی پژوهش نشان داد که با شاخص رطوبت سطحی خاک عمودی، رطوبت خاک بیش‌ترین همبستگی با داده‌های مشاهده‌شده در فصل رویش پوشش گیاهی، و کم‌ترین همبستگی در زمان‌های بی پوشش گیاهی یا اندازه‌های سبزیگی کم داشت.

نتیجه‌گیری

با نگاه به اهمیت و سطح گسترده‌ی اندوخته‌های طبیعی کشور، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که این شاخص و گروه زمانی آن را ممکن است برای پایش وضعیت رطوبتی خاک، و پی‌رو آن وضعیت پوشش گیاهی در فصل رشد به‌کار برد. پایش دگرگونی رطوبتی خاک ممکن است در مدیریت خشک‌سالی در عرصه‌های طبیعی، و زمان‌بندی ورود و خروج دام، و در نتیجه آگاهی از فصل چرا بسیار کارآمد باشد. از این شاخص و دگرگونی زمانی آن ممکن است برای پایش وضعیت سیل، از راه آگاهی از اندازه‌های اولیه‌ی رطوبت خاک و اثر آن بر نفوذپذیری، و در نتیجه پیش‌آگاهی سیل در آبخیزهای با احتمال روان‌آب و سیل بهره برد. از دیگر کاربردهای این شاخص پایش و مهار دگرگونی رطوبت سطحی خاک در منطقه‌های منشاء ریزگردها است. افزایش شاخص نشان‌دهنده‌ی کاهش رطوبت سطحی خاک، و در نتیجه احتمال شروع رخداد ریزگرد با فراهم‌شدن دیگر شرایط است. با نتیجه‌ی این پژوهش و اهمیتی که وضعیت پوشش گیاهی در کارکرد این شاخص دارد، زمان‌بندی و برنامه‌ریزی آبیاری بسیاری از محصولات کشاورزی را می‌توان از مهم‌ترین کاربردهای این شاخص در منطقه‌های مختلف اقلیمی دانست. در کارکرد مناسب شاخص در منطقه‌های خشک و با پوشش گیاهی کم، به‌کاربردن شاخص‌هایی مانند SAVI و PVI (که سنجه‌های شیب خط خاک و ره‌گیری (اینترسپت) برای محاسبه‌ی آن‌ها به‌کار برده می‌شود) به‌جای NDVI ممکن است دامنه‌ی کاربرد را گسترش دهد. کاربرد این شاخص در ترکیب با شاخص‌های دیگر و تهیه‌ی مدل برآورد رطوبت خاک سطحی برای افزایش دادن دقت پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود.

سپاس‌گزاری

این مقاله بخشی از نتیجه‌ی طرح پژوهشی ارزیابی کارایی داده‌های ماهواره‌ی لندست ۸ در برآورد رطوبت سطحی خاک است که در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کردستان اجرا شد.

رشد و پی‌رو آن افزایش اندازه‌ی رطوبت سطحی خاک کاهش، و با کاهش پوشش گیاهی و سبزیگی و پی‌رو آن کاهش رطوبت خاک افزایش یافت. در پاییز و زمستان به‌دلیل منفی بودن شاخص پوشش گیاهی، همبستگی اندازه‌های محاسبه‌شده‌ی شاخص عمودی رطوبت خاک و داده‌های زمینی کم و نامنظم بود.

رابطه‌های همبستگی شاخص عمودی رطوبت خاک با داده‌های میدانی رطوبت خاک بر پایه‌ی فصل مختلف است. محاسبه‌ی آمار و ضریب R^2 در تقریباً همه‌ی زمان‌های نمونه‌برداری نشان می‌دهد که دقت برآورد رطوبت سطحی با شاخص عمودی رطوبت خاک میانگین حسابی حدود ۰/۶۵ بود (شکل‌های ۵ و ۶).

بیش‌ترین اندازه‌ی شاخص عمودی رطوبت خاک با ضریب تبیین ۰/۶۹ در ۹۸/۰۲/۲۷ و کم‌ترین آن با ۰/۴۸ در ۱۳۹۸/۰۸/۱۸ بود. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیش‌ترین همبستگی آن در بهار، هم‌زمان با اوج پوشش گیاهی، و کم‌ترین آن در میانه‌ی پاییز، هم‌زمان با کاهش اندازه‌ی سبزیگی گیاهان بود (جدول ۲). در پژوهش‌های معدودی که با این شاخص انجام شد نتیجه‌ی متفاوتی به‌دست آمد، که بیش‌تر در تاثیر از سنجه‌های اقلیمی و در نتیجه پوشش گیاهی بود. شافعیان و ماس (۲۰۱۵) ضریب زیاد ۰/۷۵ را در زمین‌های کشاورزی در منطقه‌ی تگزاس با اقلیم نیمه‌مرطوب و پوشش گیاهی منظم گزارش کردند.

نتیجه‌ی کوهبنانی و همکاران (۲۰۱۸) در کاربرد ۷ شاخص گوناگون، حذف شاخص عمودی رطوبت خاک به‌دلیل ضریب تبیین کم ۰/۱۸ بود. با این‌که میان‌دمای سطح، که از سنجه‌های مهم محاسبه‌ی شاخص عمودی خاک است، و رطوبت خاک رابطه‌ی معکوس بود، جز این سنجه، عامل‌های گوناگون دیگری مانند بافت و رنگ خاک و پوشش گیاهی، بر دمای سطحی اثرگذار بود، و وضعیت اقلیمی آبخیز این نتیجه را به‌دست داد. شاخص رطوبت عمودی خاک نیز به‌دلیل این‌که وابسته به دمای سطح است، نتوانست دقت خوبی دهد. از آن‌جا که دمای اندازه‌گرفته به روش سنجه‌ی از دور 1° تا 3° بیش‌تر از دمای واقعی سطح خاک بود، این خطا به نتیجه‌ی به‌دست آمده در پژوهش نیز کشانده‌شد.

برای کاستن از اثر خاک زمینه در محاسبه‌ی شاخص رطوبت عمودی در منطقه‌های با پوشش گیاهی کم شاخص SAVI (صداقت و همکاران ۲۰۲۰) به‌کار برده‌شد. در این پژوهش به اثر روشنایی خاک لخت در جاهای بی پوشش گیاهی بر تفسیر پوشش گیاهی سبز در مشاهده‌های ماهواره‌ی تاکید شد. کاربرد جداگانه‌ی شاخص‌های LST و SAVI برای آگاهی از رطوبت خاک نتیجه‌ی مثبتی نداشت، اما کاربرد آن‌ها در قالب

فهرست منابع

- Box GEP, Cox D. 1964. An analysis of transformations, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B.* 26: 211–252.
- Fang B, Lakshmi V. 2014. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. *Journal of Hydrology*, 516: 258–272.
- Gonick L, Smith W. 1993. *The cartoon guide to statistics*. 1st ed. Harper Perennial Press, 233 p.
- Hyndman R, Koehler J, Anne B. 2006. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4): 679–688.
- Huete AR, Post DF, Jackson RD. 1984. Soil spectral effects and 4-space vegetation discrimination. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 15:155–165.
- Koohbanani H, Yazdani M. 2018. Mapping the moisture of surface soil using Landsat 8 imagery (Case study: Suburb of Semnan City). *Geography and Sustainability of Environment*, 8 (3):51–63. (In Persian).
- Machado S, Bynum ED, Archer TL, Lascano RJ, Wilson LT, Borodvsky L, Scarra E, Nesmith DM, Xu W. 2000. Spatial and temporal variability of corn grain yield: Site specific relationships to biotic and abiotic factors. *Crop Sciences*, 42 (5): 1564–1576.
- McCoy RM. 2005. *Field methods in remote sensing*. The Guildford Press, 159 p.
- Patel NR, Anapashsha R, Kumar S, Saha S K, Dadhwa V.K. 2009. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1): 23–39.
- Peng W, Wang J, Zhang J, Zhang Y. 2020. Soil moisture estimation in the transition zone from the Chengdu Plain region to the Longmen Mountains by field measurements and Landsat 8 OLI/TIRS-derived indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(168): 1–13.
- Robert Gilmore Pontius JR, Olufunmilayo T, Hao C. 2008. Components of information for multiple resolution comparison between maps that share a real variable. *Environmental and Ecological Statistics*, 15 (2): 111–142.
- Rahimzadeh BP, Berg AA, Champagne C, 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.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750020419/downloads/19750020419.pdf>
- Schaeffli B, Gupta HV. 2007. Do Nash values have values? *Hydrological Processes*, 21 (15): 2075–2080.
- Sedaghat M, Nazaripour H. 2020. Monitoring variability of soil moisture in Hour-al-Azim Wetland and its relation to dust storms in southwest Iran. *Journal of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(114): 133–145. (In Persian).
- Shafian S, Mass JM. 2015. Index of soil moisture using raw landsat image digital count data in texas high plains. *Remote sensing*, 7 (3): 2352–2372.
- Stewart CM, McBratney AB, Skerritt JH. 2002. Site specific durum wheat quality and its relationship to soil properties in a singled in northern south wales. *Precision Agriculture*, 3(2):155–168.
- USGS.2016. *Landsat Levels of Processing*, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-levels-processing>.
- Department of watershed management- Kurdistan Jihad Agriculture Organization. 1997. *Report of Comprehensive Watershed Management Studies of Gheshlagh Dam Watershed*. 263 p. (In Persian).



Watershed Management Research

VOL. 35, No.4, Ser. No: 137, Winter 2023, pp. 20 -33
DOI: 10.22092/wmrj.2022.356743.1444

Research Paper



Monitoring Changes in Soil Surface Moisture by Analyzing the Time Series of Landsat 8 Data in Gavdare Watershed, Kurdistan Province

Salahudin Zahedi

(Corresponding Author)* Assistant professor of Kurdistan Agricultural and natural Resources research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

Bagher Ghermezcheshmeh

Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, AREEO, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: zahedi51@gmail.com

Received: 27 November 2021

Accepted: 13 March 2022

Abstract

Accurate information about the amount of moisture and its fluctuations can provide a suitable solution for preparing soil surface moisture maps, predicting the occurrence of soil storms and dust, forecasting floods, droughts, and other climatic phenomena, determining the irrigation time table and the grazing season. In this study, the Perpendicular Soil Moisture Index (PSMI) extracted from Landsat 8 images was used to estimate and determine surface soil moisture. Using field data, the relationship between this index and soil moisture was determined. After radiometric and geometric corrections of images and normalization of field data, processing of satellite images and extraction of PSMI index were performed. Simple regression analysis between field data and index values was performed at different times. Then, the accuracy of produced maps was determined with statistical indicators including coefficient of correlation (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and Nash Sutcliffe efficiency coefficient. The results showed that estimated values with the PSMI index are completely dependent on the season and vegetation status. In the growing season and with high greenness coefficient, the accuracy of estimation was high. In dormant seasons, vegetation had a weak and moderate correlation with field data. The average coefficient of R^2 in all sampling times was about 0.65. From the findings of this study, it can be concluded that this index can be used to monitor soil moisture in areas with suitable vegetation, irrigation planning in agricultural areas, and the beginning and end of the livestock grazing season.

Keywords: Landsat8, PSMI, surface soil moisture