

اصلاح مدل رطوبتی حاکم بر نمایه شدت خشکسالی پالم‌ر برای مناطق تحت کشت آبی و صحت‌سنجی به کمک داده‌های ماهواره‌ای

محمدرضا کشاورز^{۱*}، مجید وظیفه دوست^۲، ابراهیم فتاحی^۳، امین علیزاده^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان

۳- دانشیار هیئت علمی پژوهشکده هواشناسی و علوم جو

۴- استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

نمایه شدت خشکسالی پالم‌ر به دلیل ایجاد رابطه میان تغییرات هواشناسی و شرایط کشاورزی، یکی از مهمترین نمایه‌های تخمین خشکسالی کشاورزی می‌باشد. این نمایه در واقع مبتنی بر ک مدل عرضه و تقاضای آب در خاک عمل می‌کند. از این رو اصلاح و نیز افزایش قدرت تفکیک مکانی مدل آبی آن قدمی در افزایش کارایی و دقت نمایه پالم‌ر در تخمین صحیح تر خشکسالی و در نتیجه بهبود مدیریت بحران خواهد بود. در این تحقیق، توزیع مکانی رطوبت حاصل از مدل رطوبتی این نمایه پس از اصلاح آن برای مناطق تحت کشت آبی، با استفاده از داده‌های شبکه‌ای شده خاک و هواشناسی و داده‌های TRMM با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر توسط نرم افزار MATLAB، برای ک دوره ۱۰ ساله (از ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۷ برای استان اصفهان استخراج و مطالعه شد. نتایج در ۱۲۰ لایه اطلاعاتی حاوی رطوبت ماهانه عمق ک متری سطح خاک استخراج شد. نتایج مقایسه رطوبت بدست آمده از مدل با رطوبت بدست آمده از ماهواره نشان می‌دهد مدل رطوبتی پالم‌ر در مناطق بایرا تحت کشت دیم، رطوبت را با دقت مناسبی مدل می‌کند اما در مناطق تحت کشت آبی دقت مناسبی ندارد که پس از اعمال تغییرات و اصلاح مدل بیلان آبی آن، رابطه رطوبت مدل شده با رطوبت بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای در مناطق تحت کشت آبی به طور معناداری افزایش میابد (افزایش R^2 از حدود ۰/۱۴ به حدود ۰/۳۰ در دوره خشک و از ۰/۱۹ به ۰/۵۰ در دوره تر) و به همبستگی معادل در زمین‌های فاقد کشت آبی نزدیک می‌شود.

واژگان کلیدی: پالم‌ر، خشکسالی، رطوبت خاک، MATLAB

مقدمه

را در استان خراسان برای ک دوره ۳۰ ساله با استفاده از داده‌های رطوبت خاک محاسبه و نتایج آنرا منتشر کردند. امین و سلطانی (۱۳۸۶) معادلات مرحله رده‌بندی نمایه خشکسالی پالمیر را تحلیل نموده و تعمیم دادند. انصاری و همکاران (۱۳۸۷)، اقدام به محاسبه دقیق‌ترین نمایه در استان خراسان در دوره زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۱ نمودند و چنین نتیجه گرفتند که اگرچه نمایه مزبور انتقادات زیادی به همراه داشته است اما همچنان می‌تواند به عنوان شاخصی توانمند در تحلیل دوره های خشک مورد استفاده قرار گیرد. پژوهشکده هواشناسی و علوم جو در سال ۱۳۹۰ نرم افزاری را جهت محاسبه خودکار نمایه در سراسر کشور با دقت مکانی ۴ کیلومتر توسعه و به سازمان ملی خشکسالی ارائه نمود (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۰). این نمایه از همان ابتدا منتقدانی نیز داشته است (آلی^۱ ۱۹۸۴؛ کارل^۲، ۱۹۸۶؛ هدینگاس و سابل^۳، ۱۹۹۱ و ...). با این حال حتی منتقدین این نمایه نیز از آن به عنوان ابزاری قدرتمند در پایش مدیریت و برنامه ریزی دوره‌های خشک اد کرده‌اند (انصاری و همکاران، ۱۳۸۷). از سوی دیگر عده‌ای از محققین نیز همواره سعی در اصلاح برخی معایب نمایه داشته‌اند. برای مثال ولز و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۴) روشی را برای واسنجی اتوماتیک نمایه پالمیر و به عنوان "پالمیر خود واسنج^{۱۲}" برای مناطقی که ضرایب تجربی پالمیر برای آن مناطق مناسب نیست معرفی نمودند و قدمی مهم در ایجاد امکان استفاده صحیح از این نمایه در کشورهایی غیر از امریکا برداشتند. وندر شرایر و همکاران^{۱۳} (۲۰۰۷) برای منطقه‌ای در اروپا مقدار نمایه SC-PDSI را در سال‌های ۱۸۰۰-۲۰۰۳ محاسبه کرده و نقشه‌های پهنه‌بندی $10^3 \times 10^3$ تولید نمودند و بدین ترتیب سعی کردند قدرت تفکیک مکانی نمایه را افزایش دهند. آنها همچنین مقادیر برف را با ک مدل ساده ذوب برف به ورودی‌های مدل پالمیر اضافه کردند و رطوبت خاک بدست آمده از مدل پالمیر را در دوره مورد مطالعه مورد پایش قرار دادند. از مهمترین ایرادات این نمایه که تا کنون

خشکسالی بخشی از اقلیم زمین است و هر سال بدون هیچ علائم هشدار دهنده و در محدوده‌ای با مرزهای غیر قابل تشخیص اتفاق می‌افتد. طی سال‌های اخیر در ایران، خشکسالی‌های مستمر و شدیدی رخ داده که منجر به خشک ا کم شدن منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است. برای پایش خشکسالی تا کنون نمایه‌های زیادی معرفی و استفاده شده است. نمایه شدت خشکسالی پالمیر^۱ کی از شناخته شده ترین، پیچیده‌ترین و بهترین سیستم‌های هشداردهنده و پیش-آگاهی خشکسالی بوده و اولین نمایه جامع خشکسالی و یکی از روش‌های بسیار مؤثر در تعیین خشکسالی بلند مدت (چندماهه) است. این نمایه در واقع ک مدل بیلان آبی را برای محاسبه مقدار رطوبت خاک منظور می‌کند. اولین بار از آن به منظور توضیح علت گسترش سطحی و شدت خشکسالی در امریکای شمالی در ۱۹۶۰ استفاده شده است (پالمیر، ۱۹۶۷)^۲. وبر و کمدریم^۳ (۱۹۹۸) به محاسبه نمایه‌های خشکسالی معرفی شده توسط پالمیر پرداخته و نشان دادند رابطه خوبی بین مقادیر نمایه و بارندگی تجمعی سالانه در منطقه مورد مطالعه آنان وجود دارد. همچنین نشان دادند که نمایه خشکسالی هواشناسی پالمیر ک ماه سریعتر از نمایه هیدرولوژیک پالمیر به تغییرات رطوبتی واکنش نشان می‌دهد. کورینگ و پاپاکریاکو^۴ (۲۰۰۳) نمایه‌های خشکسالی کشاورزی را در کانادا ارزیابی کردند و بهترین عملکرد را ابتدا در نمایه خشکسالی Z^5 و سپس در PDSI^۵ یافتند. میکا و همکاران^۶ (۲۰۰۵) به بررسی توان PDSI در نمایش شرایط رطوبت خاک در مجارستان پرداختند و آنرا در این زمینه موفق دانستند. همچنین واسیلیادس و لوکاس^۷ (۲۰۰۹) به بررسی پاسخ PDSI به خشکسالی از نظر هیدرولوژیکی و هواشناسی در ونان پرداختند و قدرت این نمایه را در تشخیص شدت خشکسالی در رخدادهای سال‌های دور مناسب گزارش کردند. در ایران نیز جوانمرد و همکاران (۱۳۸۰)، نمایه پالمیر

1. Palmer drought severity index (PDSI).
3. Weber and Nkendirim
5. Z Index
7. Vasiliades and Loukas
9. Karl
11. Wells
13. Van der schrier

2. Palmer
4. Quiring and Papakryakou
6. Mika
8. Alley
10. Heddinghaus & Sabol
12. SC-PDSI

به منظور بررسی تاثیر تغییرات اعمال شده برای مناطق تحت آبیاری، رطوبت بدست آمده از مدل پالمیر با مقادیر رطوبت که پیش از این توسط تصاویر ماهواره‌ای بدست آمده بود، مقایسه و صحت سنجی شد.

مواد و روش‌ها

الف) محدوده مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه استان اصفهان با مساحت تقریبی km^2 ۲۱۴۵۰۳ می‌باشد که در مرکز ایران (از $30/67$ تا $34/58$ درجه شمالی و از $49/67$ تا $55/55$ درجه شرقی) واقع گردیده است. اقلیم منطقه نیمه خشک و بارندگی بسیار محدود (حدود mm ۱۳۰ در سال) است که عموماً در فصل زمستان از ماه دسامبر تا آوریل رخ می‌دهد. اراضی تحت کشت در منطقه حدود $6/$ تا $37/6380$ هکتار) از مساحت استان را شامل می‌شود که از این مقدار، حدود $95/$ (609250 هکتار) به کشت آبی و $5/$ (28787 هکتار) به کشت دیم اختصاص دارد. حداکثر دما در تابستان و به طور متوسط به 30 درجه سانتیگراد در ماه ژولای می‌رسد، و حداقل دما در ژانویه و تا 3 درجه سانتیگراد سقوط می‌کند (کشاورز و همکاران، ۱۳۸۹).

ب) مدل رطوبتی حاکم بر معادلات نمایه پالمیر

PDSI مبتنی بر ک مدل عرضه و تقاضای رطوبت خاک در ک مکان عمل می‌کند. عرضه، مقدار رطوبت خاک به علاوه مقدار رطوبت حاصل از بارندگی است که جذب خاک می‌شود. بنابراین ظرفیت نگهداری آب در خاک AWC اهمیت پیدا میکند. در PDSI از ک رهیافت دو لایه‌ای در مورد نگهداری رطوبت خاک استفاده می‌شود. لایه بالایی خاک که ظرفیت نگه داری آن ک اینچ در نظر گرفته می‌شود می‌تواند تمامی رطوبت خود را از دست دهد. تنها زمانی که لایه بالایی تمام رطوبت خود را از دست داده، لایه زیرین رطوبت از دست می‌دهد، و سپس تنها کسری از آن در ک زمان از دست می‌رود. بدین صورت که لایه بالایی همانند ک حساب جاری و لایه زیرین همانند حساب پس‌انداز می‌باشد.

مورد توجه قرار گرفته است، عدم محاسبه آب آبیاری به عنوان ورودی در معادله بیلان آبی است که استفاده از آن را در مناطق تحت کشت آبی نامعتبر نموده است.

یکی از مشکلاتی که در گذشته در استفاده از نمایه پالمیر در زمین‌های کشاورزی تحت کشت آبی وجود داشت این بود که با توجه به عدم توجه نمایه پالمیر به آب ورودی به ستون خاک در اثر اعمال آبیاری توسط زارع در زمین‌های تحت کشت آبی، نتایج حاصل از این نمایه در تخمین رطوبت خاک در این مناطق گمراه کننده خواهد بود. توجه داشته باشید که در نظر گرفتن آبیاری نیز عملی نبود چرا که محاسبات به صورت ایستگاهی انجام میشد و به منطقه وسیعی تعمیم داده میشد. از این رو در این تحقیق بر آن شدیم تا علاوه بر افزایش قدرت تفکیک مکانی و محاسبه منطقه‌ای و نه ایستگاهی، نقیصه عدم منظور کردن آب آبیاری در بیلان آبی مدل را نیز تا حد ممکن برطرف نموده و راه را برای تحقیقات آتی بگشاییم.

بنابراین هدف این تحقیق اصلاح معادلات بیلان آب در نمایه شدت خشکسالی پالمیر به منظور امکان استفاده از این نمایه در مناطق تحت کشت آبی و کنترل نتایج حاصل از آن توسط داده‌های ماهواره‌ای است. در این تحقیق که در سطح استان اصفهان انجام شده است، ابتدا داده‌های دمای ماهانه از تمام ایستگاه‌های همدیدی استان اصفهان برای دوره زمانی ابتدای ۱۹۹۸ تا انتهای ۲۰۰۷ جمع آوری شد و سپس با استفاده از روش همبستگی دما- ارتفاع رقومی، مقدار دمای ماهانه برای کل استان با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر پهنه‌بندی شد. سپس از داده‌های بارندگی ماهواره‌ای TRMM که پیش از این بر اساس داده‌های ایستگاهی برای استان واسنجی شده بودند برای پهنه‌بندی بارندگی با همان تفکیک مکانی استفاده شد. همچنین ظرفیت آب در دسترس از نقشه خاک که توسط موسسه خاک و آب در مقیاس کشوری تهیه شده و بافت خاک ایران را به ۵ طبقه کلی تقسیم بندی می‌کند استفاده گردید. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و کد نویسی معادلات نمایه پالمیر و اعمال تغییرات مورد نظر، مقدار رطوبت خاک ناحیه ریشه در ۱۲۰ لایه که هر ک حاوی نقشه پراکندگی مکانی رطوبت مدل شده بر اساس معادلات پالمیر است با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر استخراج شد. در انتها

$$R_s = \begin{cases} 1 - S_s' & \text{if } (P - PE) > (1 - S_s); \\ P - PE & \text{if } 0 \leq (P - PE) \leq (1 - S_s); \\ 0 & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (5)$$

$$R_u = \begin{cases} P - PE - R_s & \text{if } 0 < (P - PE - R_s) < ((AWC - 1) - S_u); \\ (AWC - 1) - S_u & \text{if } (P - PE - R_s) \geq ((AWC - 1) - S_u); \\ 0 & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن R_s ذخیره در لایه بالایی و R_u ذخیره در لایه زیرین برحسب اینچ می‌باشد. مجموع این مقادیر مقدار ذخیره آب در خاک را در انتهای ماه مورد مطالعه مشخص می‌کند:

$$R = R_s + R_u \quad (7)$$

بدین ترتیب رطوبت لایه سطحی و لایه زیرین در انتهای ماه بر اساس مقدار رطوبت در ابتدای ماه، تلفات و ذخیره آب تا انتهای ماه قابل محاسبه است:

$$S_s = S_s' - L_s + R_s \quad (8)$$

$$S_u = S_u' - L_u + R_u \quad (9)$$

مقدار رطوبت خاک در انتهای ماه برابر مجموع رطوبت باقی مانده در لایه‌های زیرین و سطحی است:

$$S = S_s + S_u \quad (10)$$

ج) اعمال تاثیر آبیاری در مدل

یکی از مشکلاتی که در گذشته در استفاده از نمایه پالمر در زمین‌های کشاورزی تحت کشت آبی وجود داشت این بود که با توجه به عدم توجه نمایه پالمر به آب ورودی به ستون خاک در اثر اعمال آبیاری توسط زارع در زمین‌های تحت کشت آبی، نتایج حاصل از این نمایه در تخمین رطوبت خاک در این مناطق گمراه کننده خواهد بود. توجه داشته باشید که در نظر گرفتن آبیاری نیز عملی نبود چرا که محاسبات به صورت ایستگاهی انجام می‌شد و به منطقه وسیعی تعمیم داده می‌شد. از این رو در این تحقیق بر آن شدیم تا علاوه بر افزایش قدرت تفکیک مکانی و محاسبه منطقه‌ای و نه ایستگاهی، نقیصه عدم منظور کردن آب آبیاری در بیلان آبی مدل را نیز تا حد ممکن برطرف نموده و راه را برای تحقیقات آتی بگشاییم.

فلسفه آبیاری، تامین کمبود نیاز آبی گیاه در منطقه توسعه ریشه است. از این رو می‌توان چنین تصور نمود که در زمین تحت آبیاری، با کمبود رطوبت به صورت معنی‌داری مواجه

تقاضا نیز بر اساس مقدار تبخیر تعرق پتانسیل^۱ تخمین زده می‌شود. PET با استفاده از روش تورنت وایت محاسبه می‌شود که به متوسط دمای ماهانه، مقدار نرمال دمای ماهانه، و عرض جغرافیایی نقطه مورد مطالعه بستگی دارد. علاوه بر PET، تغذیه پتانسیل^۲، رواناب پتانسیل^۳ و تلفات پتانسیل^۴ نیز وجود دارند که در تعیین مقدار شاخص نقش دارند اما در بیلان رطوبتی خاک مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. همراه با این چهار مقدار پتانسیل (PET, PRO, PR, PL)، مقادیر واقعی آنها (ET, RO, R, L) نیز محاسبه می‌شوند. قوانین تعیین ارزش این مقادیر واقعی، بسیار پیچیده بوده و به رابطه بارندگی^۵، PET و مدل رطوبت خاک بستگی دارند. این نکته اهمیت مدل خاک دو لایه‌ای را نشان می‌دهد. حال نوبت به شرح روابط حاکم بر نمایه می‌رسد:

$$S_i' = S_{i-1} \quad (1)$$

S_i' رطوبت ابتدای ماه i ام است که برابر رطوبت انتهای ماه $i-1$ است (S_{i-1}).

$$L_s = \begin{cases} 0 & (PE - P) < 0 \\ (PE - P) & 0 < (PE - P) < S_s' \\ S_s' & (PE - P) > S_s' \end{cases} \quad (2)$$

که در آن L_s تلفات در لایه سطحی خاک، P بارندگی، PE تبخیر و تعرق پتانسیل و S_s' رطوبت لایه سطحی در ابتدای ماه می‌باشد. تمام پارامترهای مذکور بر حسب اینچ محاسبه می‌شوند.

$$L_u = \begin{cases} 0 & \text{if } L_s < S_s'; \\ (PE - P - L_s) \frac{S_u'}{AWC} & \text{if } \frac{(PE - P - L_s)}{AWC} \leq 1 \text{ or } L_u \leq S_u'; \\ S_u' & \text{if } \frac{(PE - P - L_s)}{AWC} > 1; \end{cases} \quad (3)$$

که در آن L_u تلفات رطوبت در لایه زیرین خاک، AWC ظرفیت نگهداری آب در خاک و S_u' میزان رطوبت موجود در لایه زیرین خاک در ابتدای ماه است. تلفات در انتهای ماه برابر تلفات لایه‌های سطحی و زیرین خاک است:

$$L = L_s + L_u \quad (4)$$

مقدار ذخیره آب در لایه‌های بالایی و زیرین خاک در صورتی که تلفاتی وجود نداشته باشد بصورت زیر محاسبه می‌شود:

1. PET
3. PRO
5. P

2. PR
4. PL

(کاشی ۲۲ افقی و ۵ عمودی که اصفهان را پوشش می‌دهد h22v05) از پایگاه Wist^۳ دریافت شد. مقادیر بازتابش سطحی با استفاده از داده‌های MOD09Q1 با کاربرد روشی خودکار و ساده شده به دست آمد. برای برآورد دمای سطح زمین از داده‌های V005، که در سطح ۳ تولیدات مادیس تحت عنوان MOD11A2 با تفکیک مکانی ۹۲۷ متر، گامهای زمانی ۸ روز و با سامانه‌ی تصویر سینوسی ارائه می‌شود، استفاده گردید. در مسیر اصلاح هندسی، ابتدا تصاویر با روش نزدیکترین همسایه بازسازی شد، سپس به سامانه تصویر UTM با ژئوئید WGS84 تبدیل گردید. داده‌های دمای سطح زمین به منظور همخوانی با داده‌های بازتابش به صورت شبکه‌های ۲۵۰ متری بازسازی شدند.

ه) شاخص ماهواره‌ای خیزی خاک (SWI)

رطوبت خاک و نسبت پوشش گیاهی به شدت به دمای سطح زمین وابسته‌اند. با این حال تاکنون هیچ رابطه مستقیمی بین دمای سطح زمین و رطوبت خاک گزارش نشده است (مالیک و همکاران، ۲۰۰۹). بسیاری از محققان رابطه فیزیکی بین نمایه گیاهی (مثل NDVI) و دمای سطح زمین^۴ را به شکل ک نمودار پراکنش نقطه‌ای نمایش دادند که در آن از مفهوم فضای مثلثی برای استخراج رطوبت خاک استفاده می‌شود (استیسن^۵ و همکاران، ۲۰۰۸؛ ونگ^۶ و همکاران، ۲۰۰۶). مفهوم فضای مثلثی NDVI-LST (مالیک و همکاران، ۲۰۰۹) و ارتباط LST (نمودار y) با NDVI در شکل ۱ نمایش داده شده است. ضلع بالایی مثلث نمایانگر لبه خشک/گرم شامل گروهی از نقاط است که در مقادیر مختلف NDVI دارای رطوبت خاک صفر هستند. برخلاف لبه تر/سرد که نمایانگر حداکثر رطوبت خاک در مقادیر مختلف NDVI می‌باشد.

نخواهیم بود. گرچه این فرض خیلی دقیق نیست، اما به نظر می‌رسد در مطالعات با مقیاس وسیع در موضوعاتی مانند خشکسالی که نمود منطقه‌ای دارند می‌تواند راهگشا باشد. با توجه به این فرض و به منظور افزایش سرعت انجام محاسبات، پس از دریافت نقشه‌های کاربری اراضی و مشخص شدن مناطقی که غالباً تحت کشت آبی هستند، فارق از نوع کشتی که در آن صورت می‌پذیرد، مقدار بارندگی در آن ماه را به اندازه اختلاف AWC با رطوبت موجود خاک افزایش داده شد. به عبارت دیگر با توجه به اینکه تنها خروجی مدل پالمر تبخیر تفرق است، اگر در این زمین‌ها تبخیر تفرقی صورت پذیرد با فرض اینکه این تبخیر تفرق توسط آبیاری جبران می‌شود در انتهای هر ماه که دوره محاسباتی پالمر است، کمبود رطوبت خاک را جبران می‌کنیم. بدین ترتیب برای منظور کردن آبیاری، معادله (۱۱) به ابتدای محاسبات مدل افزوده شده و جایگزین معادله (۱) می‌شود:

$$S_i = \begin{cases} S_{i-1} & \text{مناطق فاقد کشت آبی} \\ AWC & \text{مناطق تحت کشت آبی} \end{cases} \quad (11)$$

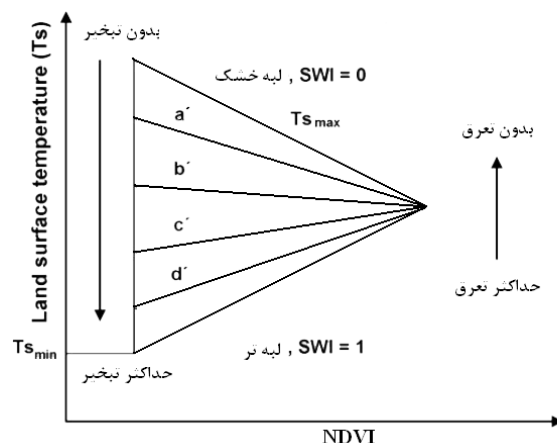
د) استخراج، آماده‌سازی و پردازش تصاویر

ماهواره‌ای

در این تحقیق از تولیدات بازتابش سطحی تصحیح شده در دو نوار^۱ مرئی (نوار ۱ در محدوده ۶۴۸ nm) و مادون قرمز نزدیک (نوار ۲ در محدوده ۸۵۸ nm)، که در سطح ۳ تولیدات تحت عنوان MOD09Q1 با تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، گامهای زمانی ۸ روز و با سامانه تصویر سینوسی ارائه می‌شوند، برای استخراج بازتابش استفاده گردید. داده‌های مادیس^۲ برای دوره‌های ۸ روزه از سپتامبر سال ۲۰۰۰ تا ژوئیه سال ۲۰۰۱، و از سپتامبر سال ۲۰۰۴ تا ژوئیه سال ۲۰۰۵

1. Band
3. <https://wist.echo.nasa.gov>
5. Stisen

2. MODIS: MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
4. Land surface temperature (LST)
6. Wang



شکل ۱- نمودار مفهومی از رابطه مثلثی LST-NDVI برای تعیین شاخص خیسى خاک. مقدار SWI در سراسر لبه خشک صفر و در سراسر لبه تر ۱ است. خطوط هم‌تراز SWI با مقادیر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، و ۰/۸ به ترتیب با a' ، b' ، c' و d' مشخص شده‌اند.

که در آن $NDVI_{(i)}$ مقدار نمایه گیاهی در پیکسل مورد نظر؛ و a و b به ترتیب شیب و عرض از مبدأ نمودار لبه خشک و c و d به ترتیب شیب و عرض از مبدأ نمودار لبه تر می‌باشند که برای هر پراکنش نقطه‌ای LST-NDVI مقادیر ثابتی هستند و با رگرسیون‌گیری بدست می‌آیند. در شکل ۲ نمونه‌ای از توزیع جغرافیایی مقادیر شاخص خیسى خاک را مشاهده می‌نمایید.

نتایج و بحث

پس از پهنه‌بندی داده‌های ورودی، اصلاح مدل برای مناطق تحت آبیاری، کد نویسی و اجرای آن توسط نرم افزار MATLAB، نتایج در ۱۲۰ لایه نقشه پهنه بندی رطوبت خاک استخراج شد. هر لایه، ارتفاع آب موجود در عمق ک متر سطحی خاک در ک ماه از سال (سالهای ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۷) را بر حسب اینچ نمایش می‌دهد. اگر مقادیر هر لایه، بر لایه حاوی داده‌های ظرفیت نگهداشت آب خاک تقسیم شود درصد رطوبت موجود در خاک را نمایش می‌دهد. نمایش تمام لایه‌ها به دلیل حجم زیاد آنها مقدور نیست. بنابراین میانگین مقادیر بدست آمده برای هر ماه در ک دوره ۱۰ ساله و نیز میانگین کل رطوبت در این دوره نمایش داده شده است.

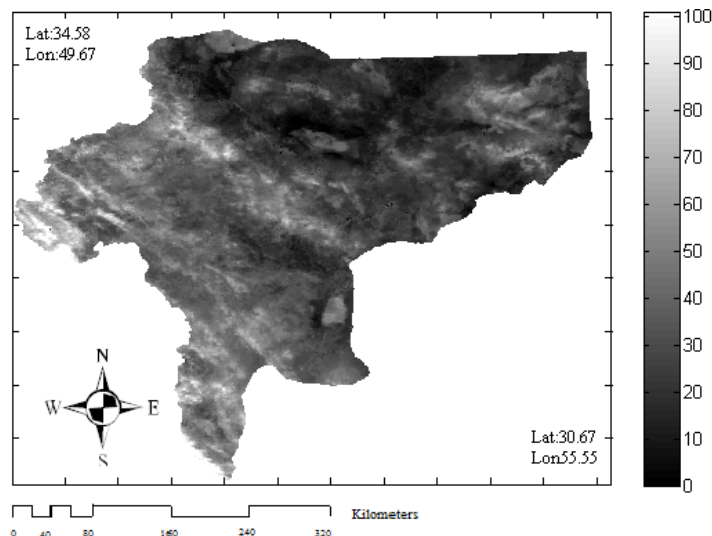
در ناحیه‌ای که لبه خشک نامیده می‌شود مقادیر حداکثر دما (خط T_{max}) وجود دارد که با فرض خطی بودن تغییرات دما در این ناحیه، معرف حالت خاک خشک (رطوبت حداقل) است. در مقابل، حداقل مقادیر دما (خط T_{min}) نیز خطی اریب را تشکیل می‌دهند که لبه تر نام دارد و خاک اشباع آ خیلی مرطوب (رطوبت حداکثر) را نمایش می‌دهد. فرض بر این است که رطوبت به طور خطی بین لبه خشک و تر تغییر می‌کند (ورستراتن، ۲۰۰۶). بر این اساس، شاخص خیسى خاک برای هر پیکسل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SWI_i = \frac{T_{max(i)} - T_{s(i)}}{T_{max(i)} - T_{min(i)}} \quad (1)$$

که در آن اندیس i نماینده شماره پیکسل، $T_{s(i)}$ همان LST پیکسل i است؛ $T_{min(i)}$ حداقل دمای مشاهده شده و $T_{max(i)}$ حداکثر دمای مشاهده شده متناظر با پیکسل مورد نظر است که بر اساس مقدار NDVI متغیر می‌باشند. شاخص خیسى خاک در واقع درصدی از حداکثر رطوبت قابل دسترس خاک است که از آب پر شده است. برای افتن مقدار T_{max} و T_{min} در هر پیکسل از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$T_{max(i)} = b + a(NDVI_{(i)}) \quad (2)$$

$$T_{min(i)} = d + c(NDVI_{(i)}) \quad (3)$$



شکل ۲- نمونه‌ای از توزیع جغرافیایی شاخص خیس‌ی خاک، SWI، بر فراز استان اصفهان (روز ژوئیه ۸۱ سال ۲۰۰۱ معادل با ۲۲ می)

در دماغه‌های جنوبی و غربی استان قرار دارند که همانطور که بیان شد از وضعیت رطوبتی مناسبی برخوردار است. همچنین کمترین دامنه تغییرات رطوبت، در ماه‌های گرم سال مشاهده می‌شود.

در ماه‌های مرطوب سال مانند ژانویه، فوریه و مارس، شاهد وقوع مقادیر بسیار بالای رطوبت در بخش‌های جنوبی و کمی از بخش‌های غربی هستیم که پذیرش آن کمی مشکل است. خصوصاً که هر تصویر نمایانگر متوسط مقادیر رخ داده در ماه مورد نظر در ۱۰ سال است. به این معنا که مثلاً وقوع رطوبت ۹۰ درصد (نزدیک به ظرفیت زراعی) در ک پیکسل در ماه ژانویه امری اتفاقی نبوده و در تمام ده سال مورد مطالعه، مقدار رطوبت در ماه ژانویه به همین میزان بالاست. دلیل این امر به احتمال قوی تخمین ناصحیح مشخصات خاک و کم برآورد کردن عمق خاک درگیر در تبادل آب با محیط و کم برآورد نمودن درصد ظرفیت نگهداشت آب در خاک می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه این بیش برآورد رطوبت عموماً در مناطق مرتفع‌تر استان رخ داده است که بارش فراوانی هم دارند، دیگر عامل موثر، عدم در نظر گرفتن جریان‌های افقی ناشی از اختلاف ارتفاع توسط مدل است. البته این اتفاق در زمین‌های تحت کشت آبی (برای مثال حاشیه زاینده رود) نیز رخ داده است که دلیل آن فرض اصلاحی است که به مدل افزوده شده است. همچنین توجه داشته باشید

در شکل ۳ می‌توانید پهنه بندی میانگین درصد رطوبت خاک در هر ماه از ۱۲ ماه سال را مشاهده نمایید. برای مثال در تصویر مربوط به ماه ژانویه، میانگین مقادیر رطوبت تخمینی در ماه‌های ژانویه در کل دوره ۱۰ ساله ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۷ برای هر پیکسل محاسبه شده و به صورت ک نقشه پهنه‌بندی رطوبت برای این ماه نمایش داده شده است. مناطقی از این تصاویر که با رنگ سفید مشخص شده است فاقد داده‌های خاک بوده و مقداری را به خود اختصاص نمی‌دهد. این مناطق شامل نمکزارها و باتلاق‌ها، مناطق شهری، سنگلاخی و کوهستانی (فاقد داده خاک) است که عمدتاً تعیین ظرفیت نگهداشت آب در خاک برای این مناطق بی‌معنی و گمراه کننده خواهد بود.

همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، تغییرات رطوبت خاک در ماه‌های مختلف، دور از انتظار نبوده و رطوبت خاک استخراج شده از مدل به نسبت سردا گرم بودن و پر باران کم باران بودن هر ماه واکنش مناسبی نشان داده است. همچنین پراکندگی رطوبت به گونه‌ای است که در مناطق کم ارتفاع و کویری شمالی و شرقی استان، کمترین مقادیر رطوبت در هر مقطع زمانی، ا به عبارتی در هر نقشه پهنه‌بندی رطوبت، قابل مشاهده است. بیشترین مقادیر درصد رطوبت خاک نیز مربوط به حاشیه رودخانه زاینده رود، مناطق مرتفع مرکزی و بخشی از مناطق جنوبی و غربی است. ذکر این نکته ضروری است که عمده مناطق تحت کشت دیم نیز

خیسی خاک توسط تصاویر ماهواره‌ای می‌توانید به مقاله دیگر از نویسندگان این تحقیق مراجعه نمایید (کشاورز و همکاران، ۱۳۸۹).

بهترین حالت برای مقایسه نتایج ک مدل رطوبتی با واقعیت، استفاده از داده‌های واقعی رطوبت خاک است که به صورت منظم و در اعماق مختلف در طول زمان مورد مطالعه استخراج شده باشد. این در حالی است که در منطقه مورد مطالعه هیچ گونه داده ثبت شده رطوبت خاک به صورت منظم در طول دوره مورد مطالعه در دسترس نبوده و اساساً استخراج نشده است. بنابر آنچه بیان شد و نیز منطقه‌ای بودن مطالعه حاضر، استفاده از نتایج سنجش رطوبت توسط تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های واقعی رطوبت خاک باشد. اگرچه ایرادات زیادی به این شیوه صحت سنجی^۱ به عبارت صحیح‌تر کنترل نتایج وجود دارد، اما در حال حاضر گزینه بهتری برای استفاده در این تحقیق در دسترس نمیباشد. علاوه بر این که در اینجا بیشتر تاکید بر کنترل بهبود نتایج در زمین‌های تحت آبیاری است و نه صحت سنجی دقت مدل.

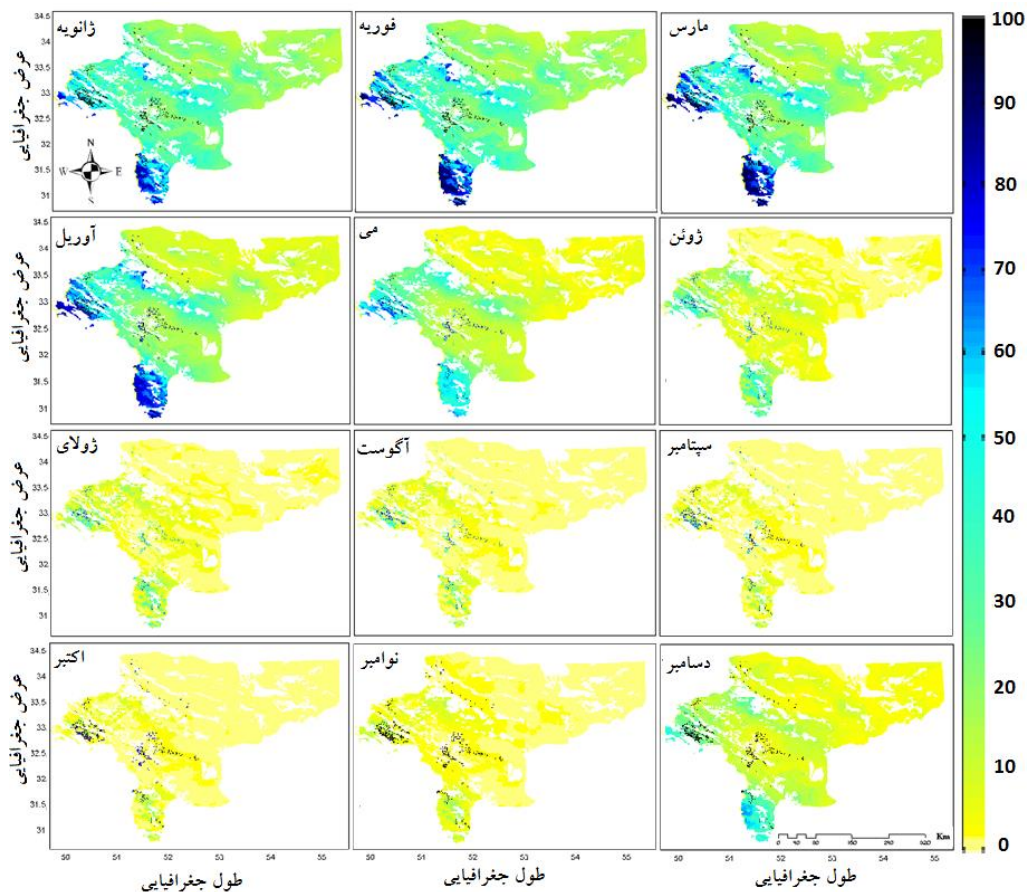
ذکر این نکته ضروری است که نظر به محدودیت استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مشکلات موجود در استخراج رطوبت در کل دوره مورد مطالعه، تنها به استخراج نمایه خیسی خاک در دو دوره خشک (۲۰۰۰-۲۰۰۱) و تر (۲۰۰۴-۲۰۰۵) اکتفا شده است (کشاورز و همکاران، ۱۳۸۹). سپس متوسط مقادیر نمایه خیسی در نزدیکترین هفته به انتهای هر ماه از دوره‌های تر و خشک مذکور، با مقادیر رطوبت خاک مدل شده در انتهای همان ماه مقایسه شده است.

که فراوانی وقوع مقادیر رطوبتی بالاتر از ۴۵ درصد بسیار کم است (شکل ۵).

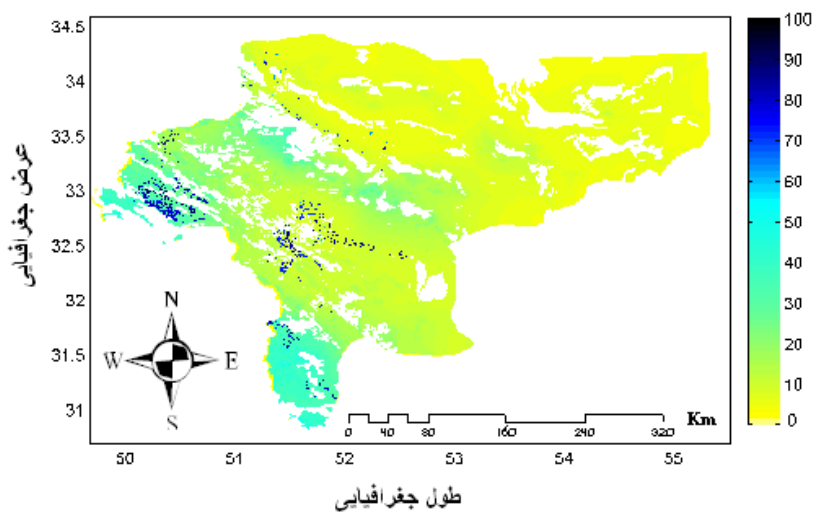
اشکال ۴ و ۵، به ترتیب شامل پهنه‌بندی میانگین رطوبت استخراج شده از مدل در کل دوره ۱۰ ساله مورد مطالعه و نمودار منحنی فراوانی وقوع حاصل از پهنه بندی مذکور می‌باشد. بر اساس منحنی فراوانی، میانه وقایع رخ داده برای رطوبت خاک ۹/۳۷ درصد و میانگین آن ۱۳ درصد میباشد. بدین معنا که در ۱۰ سال مورد مطالعه، درصد رطوبت خاک (درصدی از ظرفیت نگهداشت آب خاک که از آب پر است)، در سطح استان به طور میانگین ۱۳ درصد بوده است. بر اساس شکل ۵، همانطور که در سایر تصاویر نیز مشاهده شد، حداکثر رطوبت به غیر از نواحی تحت کشت آبی، بین ۳۰ تا ۵۶ درصد بوده و در نواحی جنوبی و اندکی از نواحی غربی رخ داده است. حداقل مقادیر رطوبت نیز در نواحی کم ارتفاع و کویری شرقی و شمالی ثبت شده است که با اقلیم این مناطق همخوانی دارد.

کنترل نتایج به کمک نمایه خیسی خاک^۱

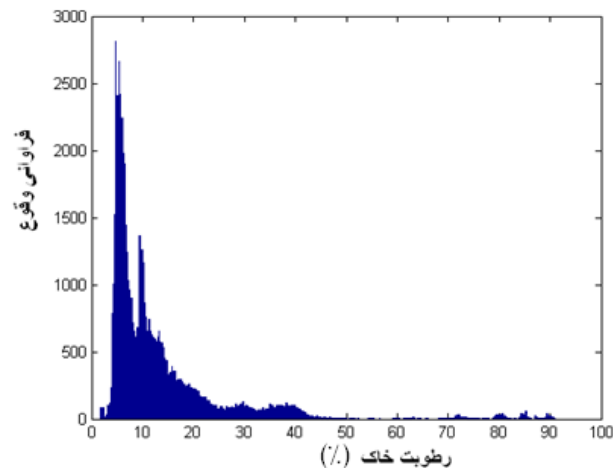
در این بخش به مقایسه نمایه خیسی خاک بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و رطوبت خاک بدست آمده از مدل در اعماق مشابه خاک خواهیم پرداخت. نمایه خیسی خاک در واقع وضعیت رطوبتی خاک را از صفر (خاک خشک) تا صد (خاک کاملاً مرطوب، ظرفیت زراعی) در عمق ۱ تا ۲ متری برای خاک بایر و در عمق توسعه ریشه برای زمین‌های غیر بایر و با دقت مناسبی تخمین میزند (مالیک^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). برای آگاهی از ماهیت و نحوه دقیق استخراج نمایه



شکل ۳- نمایش پراکندگی مکانی متوسط ۱۰ ساله (۱۹۹۸ تا ۲۰۰۷) درصد رطوبت خاک (درصدی از ظرفیت نگهداشت آب خاک که از آب پر شده است) برای ۱۲ ماه سال در استان اصفهان



شکل ۴- میانگین رطوبت مشاهده شده در دوره ۱۰ ساله بر حسب درصد (درصدی از ظرفیت نگهداشت آب خاک که از آب پر شده است) در استان اصفهان



شکل ۵- منحنی فراوانی وقوع مقادیر میانگین رطوبت خاک مدل شده (برحسب درصدی از ظرفیت نگهداشت آب خاک است که از آب پر شده است) در دوره ۱۰ ساله در استان اصفهان

ضعف مدل رطوبتی پالمر در مدل سازی رطوبت خاک در زمینهای تحت کشت آبی نسبت به دیم از زمینهای بایر است و دلیل آن نیز همانطور که پیش از این بحث شد عدم ملاحظه رطوبت وارد شده توسط آبیاری به زمین در مناطق تحت کشت آبی است. در تصویر ۸، این بار رابطه نمایه خیزی خاک با رطوبت مدل شده توسط مدل رطوبتی پالمر، اما پس از اصلاح مدل برای زمینهای تحت کشت آبی نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده میکنید میزان R^2 از ۰/۱۵ در شکل ۷ (پیش از اصلاح مدل) به ۰/۳۰ در شکل ۸ (پس از اصلاح مدل) افزایش یافته و تقریباً دو برابر شده است. اگر به محل قرار گیری نقاط نسبت به خط در شکل ۸ توجه کنید متوجه خواهید شد که در مقادیر بیشتر رطوبت، فاصله و پراکندگی نقاط حول خط برازش داده شده بسیار کمتر از نقاطی است که در مقادیر کم رطوبت قرار دارند. بنابراین انتظار می رود در دوره تر، بهبود نتایج در اثر اعمال تغییر در مدل نتایج بهتری مشاهده شود.

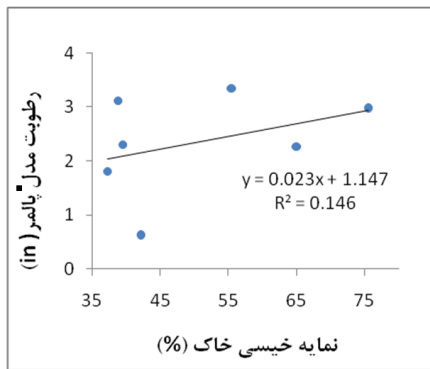
حال به بررسی نتایج به شیوه‌ای مشابه در دوره تر (۰۵-۰۴) خواهیم پرداخت. رابطه خطی نمایه خیزی خاک با رطوبت مدل شده توسط مدل رطوبتی پالمر در مناطق فاقد کشت آبی و در این دوره در تصویر ۹ نمایش داده شده است. تصویر ۱۰ نیز همین رابطه را این بار در زمینهای تحت کشت آبی نمایش می دهد. همانطور که انتظار می رود و در بررسی دوره خشک نیز مشاهده شد، مقدار R^2 از ۰/۴۸ در زمینهای

از آنجا که در مدل رطوبتی نمایه شدت خشکسالی پالمر، آب آبیاری به عنوان ک ورودی در بیلان آبی خاک منظور نشده است میتوان چنین گفت که این مدل صرفاً برای مناطق تحت کشت دیم و فاقد کشت طراحی شده است. بنابراین انتظار می رود رابطه بین رطوبت مدل شده و نمایه خیزی خاک در زمینهای فاقد کشت آبی بهتر باشد. در این قسمت بررسی خواهیم کرد که آیا تغییر اعمال شده در مدل برای مناطق تحت کشت آبی (جابجینی معادله ۱۱ بجای معادله ۱) توانسته است مقدار همبستگی بین نتایج رطوبت مدل سازی شده و نمایه خیزی خاک را افزایش دهد و به میزان مشابه در زمینهای تحت کشت دیم از زمینهای بایر برساند اخیر. بدین منظور در ادامه ۶ نمودار (شکل های ۶ تا ۱۱) که نمایش دهنده رابطه خطی بین این دو پارامتر (رطوبت مدل و SWI) در شرایط مختلف است نشان داده شده است. تصاویر ۶ تا ۸ از نتایج حاصله در دوره خشک ۰۱-۲۰۰۰ استخراج شده است و تصاویر ۹ تا ۱۱ مربوط به دوره تر (۰۵-۲۰۰۴) می باشد.

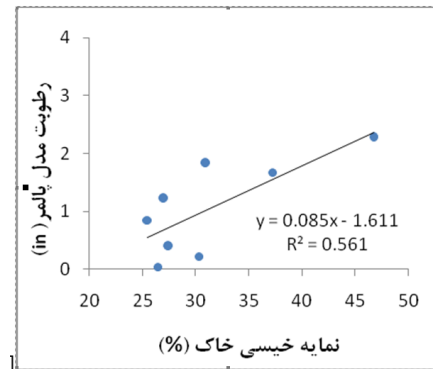
ابتدا به بررسی رابطه مورد نظر در دوره خشک (۰۱-۲۰۰۰) می پردازیم. رابطه خطی نمایه خیزی خاک با رطوبت مدل شده توسط مدل رطوبتی پالمر در مناطق فاقد کشت آبی و در این دوره در تصویر ۴ نمایش داده شده است. تصویر ۷ نیز همین رابطه را این بار در زمینهای تحت کشت آبی نمایش می دهد. کاهش شدید مقدار R^2 از ۰/۵۶ در زمینهای تحت کشت دیم به ۰/۱۴ در زمینهای تحت کشت آبی، نشانگر

بوده است و در مقادیر بالای رطوبت نتایج بهتری بدست خواهد آمد. دیگر اینکه در دوره خشک دفعات اعمال آبیاری افزایش و فواصل آن کاهش میابد و از دقت مدل می‌کاهد. بدین ترتیب همانطور که مشاهده شد، با فرضی ساده و تغییری اندک در مدل، دقت مدل در زمین‌های تحت کشت آبی به طور مطلوبی افزایش افته و در حقیقت در این مناطق قابلیت استفاده پیدا کرده است.

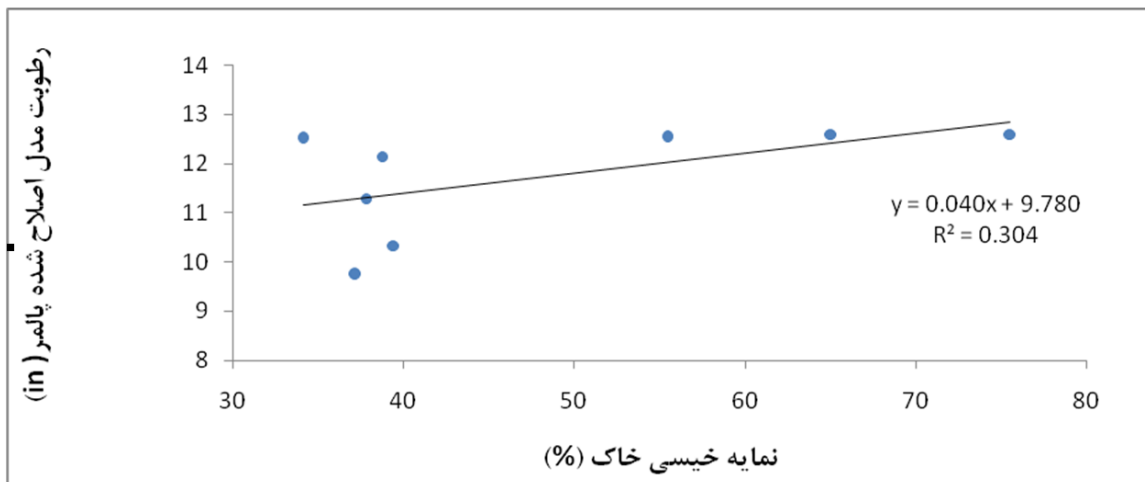
تحت کشت دیم به شدت کاهش افته و به ۰/۱۹ در زمین‌های تحت کشت آبی میرسد. در تصویر ۱۱، این بار رابطه نمایه خیسی خاک با رطوبت مدل شده توسط مدل رطوبتی پالم، اما پس از اصلاح مدل برای زمین‌های تحت کشت آبی نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده میکنید میزان R^2 از ۰/۱۹ در شکل ۱۰ (پیش از اصلاح مدل) به ۰/۵۵ در شکل ۱۱ (پس از اصلاح مدل) افزایش افته است. و همانطور که انتظار میرفت، این بهبود رابطه در دوره تر پرننگ تر از دوره خشک



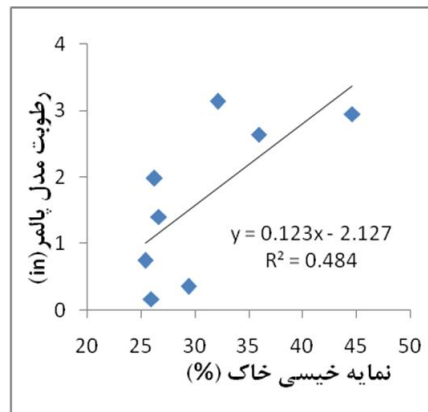
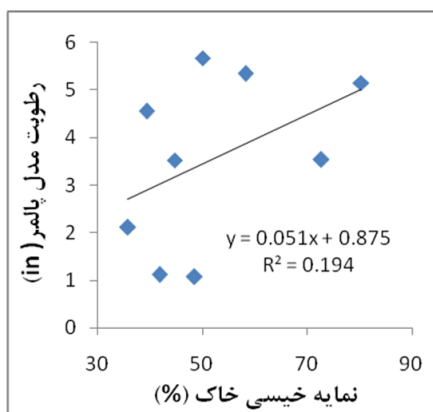
شکل ۷- نمایش رابطه خطی متوسط رطوبت خاک مدل شده توسط مدل پالم و متوسط نمایه خیسی خاک (SWI) در دوره خشک ۲۰۰۰-۰۱ در زمین‌های تحت کشت آبی (قبل از اصلاح مدل)



شکل ۶- رابطه خطی متوسط رطوبت خاک مدل شده توسط مدل پالم و متوسط نمایه خیسی خاک (SWI) در دوره خشک ۲۰۰۰-۰۱ در زمین‌های تحت کشت دیم فاقد کشت

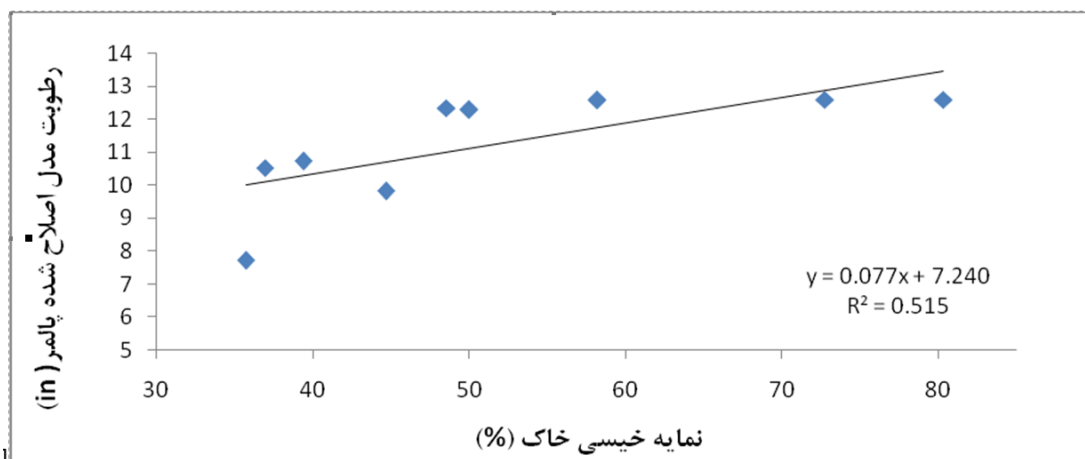


شکل ۸- نمایش رابطه خطی متوسط رطوبت خاک مدل شده توسط مدل پالم و متوسط نمایه خیسی خاک (SWI) در دوره خشک ۲۰۰۰-۰۱ در زمین‌های تحت کشت آبی (پس از اصلاح مدل)



شکل ۱۰- نمایش رابطه خطی متوسط رطوبت خاک مدل شده توسط مدل پالمر و متوسط نمایه خیسسی خاک (SWI) در دوره تر ۲۰۰۴-۰۵ در زمین‌های تحت کشت آبی (قبل از اصلاح مدل)

شکل ۹- رابطه خطی متوسط رطوبت خاک مدل شده توسط مدل پالمر و متوسط نمایه خیسسی خاک (SWI) در دوره تر ۲۰۰۴-۰۵ در زمین‌های تحت کشت دیم افاقد کشت



شکل ۱۱- نمایش رابطه خطی متوسط رطوبت خاک مدل شده توسط مدل پالمر و متوسط نمایه خیسسی خاک (SWI) در دوره تر ۲۰۰۴-۰۵ در زمین‌های تحت کشت آبی (پس از اصلاح مدل)

واسنجی بر اساس داده‌های بارش ایستگاهی برای استان، برای پهنه‌بندی بارندگی با همان تفکیک مکانی استفاده شد. همچنین ظرفیت نگهداشت آب در خاک از نقشه خاک که توسط موسسه خاک و آب در مقیاس کشوری تهیه شده و بافت خاک ایران را به ۵ طبقه کلی تقسیم بندی می‌کند استفاده گردید. در نهایت با استفاده از نرم افزار MATLAB، و کد نویسی معادلات حاکم بر مدل رطوبتی نمایه شدت خشکسالی پالمر و اعمال تغییراتی در مدل به منظور اعمال تاثیر آب

نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق که در سطح استان اصفهان انجام شده است، ابتدا داده‌های دمای ماهانه از تمام ایستگاه‌های همدیدی استان اصفهان برای دوره زمانی ابتدای ۱۹۹۸ تا انتهای ۲۰۰۷ جمع آوری شد و سپس با استفاده از روش همبستگی دما-ارتفاع، مقدار دمای ماهانه برای کل استان، به کمک نقشه رقومی ارتفاع، با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر پهنه‌بندی شد. سپس از داده‌های بارندگی ماهواره‌ای TRMM، پس از

کوک و دکتر دیوید مکو، محقق موسسه تحقیقات سه حلقه‌ای آریزونا به دلیل راهنمایی‌های ارزشمندشان و تمام عزیزانی که در این پروژه ملی همکاری داشته‌اند قدردانی می‌شود.

منابع

۱. امین، س. و سلطانی، ع. ۱۳۸۶. تحلیل و تعمیم معادله‌های مرحله رده بندی نمایه خشکسالی پالم الف. ملاحظات نظری. مجله دانش کشاورزی، ۱۷(۴): ۱ تا ۱۶.
۲. انصاری، ح. ثنایی نژاد، ح. و داوری، ک. ۱۳۸۷. پایش دوره‌های خشک با نمایه شدت خشکی پالم بر اساس داده‌های رطوبت خاک تخمین زده شده از مدل بیلان آبی: مطالعه موردی استان خراسان. مجله پژوهش‌های خاک (علوم آب و خاک). ۲۲(۲): ۲۲۵ تا ۲۳۳.
۳. جوانمرد، س. بذاق‌جمالی، ج. احمدیان، ج. قهرمان، ن. و موقرمقدم، ح. ۱۳۸۰. محاسبه نمایه شدت خشکسالی پالم در استان خراسان. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب. دانشگاه زابل.
۴. فتاحی، ا.، وظیفه دوست، م.، کشاورز، م. ر. و نوری، ا. ح. ۱۳۹۰. توسعه و اصلاح نمایه خشکسالی پالم و صحت سنجی آن به کمک داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک در ایران. گزارش پروژه، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو (ASMERC)
۵. کشاورز، م. ر.، وظیفه دوست، م. و علیزاده، ا. ۱۳۸۹. توسعه نمایه کمبود رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مادیس، آبیاری و زهکشی، ۳(۴): ۴۶۵-۴۷۷.
6. Alley, W.M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: limitation and assumptions. *J. Climate Appl. Meteor.* 23. 1100-1109.
7. Heddinghaus, T.R., Sabol, P. (1991). A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here. In: *Proceeding 7th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston*, pp. 242-246.
8. Karl, T. (1986). The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-Index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *J. Climate Appl. Meteor.* 25. 77-86.

آبیاری در مناطق تحت کشت آبی، مقدار رطوبت خاک تا عمق ۱ متری در ۱۲۰ لایه، که هر لایه حاوی نقشه پراکنندگی مکانی رطوبت مدل شده بر اساس معادلات پالم در هر ماه از ۱۰ سال مورد مطالعه است، استخراج شد. همچنین توانایی مدل رطوبتی مورد استفاده در این تحقیق در تشخیص دوره های خشک و تر مورد بررسی قرار گرفته و تایید شد. در انتها به منظور بررسی تاثیر تغییرات اعمال شده در مدل برای مناطق تحت آبیاری، رطوبت بدست آمده از مدل پالم با مقادیر رطوبت که پیش از این توسط تصاویر ماهواره‌ای بدست آمده بود، مقایسه شد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد همبستگی رطوبت حاصل از مدل رطوبتی پالم با رطوبت حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در مناطق تحت کشت آبی، با اعمال تغییراتی که در این تحقیق در مدل ایجاد شد، به طور چشمگیری افزایش افته (افزایش R^2 از حدود ۰/۱۴ به حدود ۰/۳۰ در دوره خشک و از ۰/۱۹ به ۰/۵۰ در دوره تر) و به همبستگی معادل زمین‌های تحت کشت دیم ا بایر نزدیک میشود. بنابراین اعمال تغییر در مدل برای مناطق تحت کشت آبی در این تحقیق موثر بوده و باعث نزدیکتر شدن نتایج مدل سازی به واقعیت شده است. بنابراین از این پس می‌توان از نتایج مدل رطوبتی پالم در این مناطق نیز به اندازه سایر مناطق اطمینان داشت. در نتیجه نمایه شدت خشکسالی پالم نیز می‌تواند در مناطق تحت کشت آبی مورد استفاده قرار گیرد. تفکیک مکانی رطوبت مدل شده در این تحقیق ۱ کیلومتر است که در نتیجه می‌توان با استفاده از نتایج این تحقیق، نمایه‌های خشکسالی مبتنی بر رطوبت خاک مانند نمایه شدت خشکسالی پالم را با همین تفکیک مکانی استخراج نمود. چنین تفکیک مکانی جز در مورد نمایه‌های خشکسالی ماهواره‌ای ا نمایه‌های پیچیده که نیاز به داده‌های اولیه زیادی دارند سابقه چندانی ندارد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مسئولین محترم پژوهشکده هواشناسی و علوم جو کشور، که تمام تلاش خود را برای تأمین داده‌های مورد نیاز این تحقیق مبذول داشتند و همچنین دکتر ادوارد

9. Mallick, K., Bhattacharya, B.K., and Patel, N.K., (2009), Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 1327–1342.
10. Mika, J. Horváth, Sz. Makra, L. Dunkel, Z. (2005). The Palmer Drought Severity Index (PDSI) as an indicator of soil moisture. *Physics and Chemistry of the Earth*. 30. 223–230.
11. Palmer, W.C. (1965). *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, US Weather Bureau: Washington, DC.
12. Palmer, W.C. (1967). The abnormally dry weather of 1961-1966 in the northeastern United States. *Proc. Conf. Drought in the northeastern United States*, Jerome Spar, Ed., New York University of Geophys. Res. Lab. Rep. TR-68-3: 32-56.
13. Stisen, S., Sandholt, I., No'rgard, A., Fensholt, R., and Jensen, K.H., (2008), Combining the method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration-applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sens. Environ.*, 112: 1242–1255.
14. Quiring, S. M. Papakryiakou, T. N. (2003). An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 118. 49–62.
15. Vasiliades, L., Loukas A. (2009). Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece. *Desalination*. 237, 3–21.
16. Van der schrier, G., Efthymiadis, D., Briffa, K. R., and Jones, P. D. (2007). European Alpine moisture variability for 1800–2003. *J. Climatol.* 27. 415–427.
17. Verstraeten, W.W., (2006) integration of remotely sensed hydrological data into an ecosystem carbon flux model. PhD thesis .katholieke university the Leuven.
18. Wang, K.C., Li, Z.Q., and Cribb, M.M., (2006), Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: a new method to determine Priestley-Taylor parameter. *Remote Sens. Environ*, 102: 293–305.
19. Weber, L., and Nkemdirim, L. (1998). Palmer's drought indices revisited. *Geogr. Ann.*, 80 A (2). 153–172.
20. Wells, N., S., Goddard, and Hayes, M. J. (2004). A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index, *American Meteorological Society* 17. 2335-2351.