

ارزیابی شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) برای محصول گندم دیم در اقلیم معتدل سرد (مطالعه موردی: کرمانشاه)

لیلا جلالی^{۱*} - جواد بذرافشان^۲ - علیرضا توکلی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴

چکیده

تاکنون شاخص‌های مختلفی مانند شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)، شاخص رطوبت محصول (CMI) و شاخص اکتشاف خشکسالی (RDI) برای پیش‌بینی خشکسالی کشاورزی ارائه شده‌اند که عموماً شرایط کلی رطوبت خاک را به عنوان تابعی از پارامترهای اقلیمی دما و بارش مدل می‌کنند ولی اختصاص به محصول معینی ندارند. شاخص خشکسالی محصول خاص که بر پایه یک مدل بیلان آبی است جزء شاخص‌هایی است که تبخیر-تعرق را مستقیماً وارد پیش‌بینی خشکسالی کرده و بر اساس نسبت تبخیر-تعرق واقعی به تبخیر-تعرق پتانسیل تعریف می‌شود. در این مطالعه یک مدل شاخص خشکسالی محصول خاص با استفاده از داده‌های ۹ ساله هواشناسی، خاک، عملکرد و فنولوژی محصول گندم ایستگاه کرمانشاه واقع در اقلیم معتدل سرد، مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. همچنین، رابطه شدت خشکسالی محصول خاص با یک شاخص واحد طبقه‌بندی، شاخص اکتشاف خشکسالی، مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل با مقدار بالای ضریب تبیین (۰/۹۵) و شاخص توافقی (۰/۷۴۸) و مقدار پایین RMSE (۰/۰۹۸) و MAE (۰/۰۶۸) در ایستگاه مورد نظر بخوبی اجرا شد. همچنین، نتایج حاکی از ارتباط قابل قبول شاخص خشکسالی محصول خاص با شاخص اکتشاف خشکسالی در طول دوره رشد محصول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی خشکسالی کشاورزی، شاخص اکتشاف خشکسالی، تبخیر-تعرق، مدل بیلان آب

مقدمه

محصول (CMI)^۵ و شاخص اکتشاف خشکسالی (RDI)^۶ ملاحظه کرد. اما در این شاخص‌ها شرایط کلی رطوبت خاک تنها بواسطه دو پارامتر اقلیمی دما و بارش مدل شده و هیچ‌کدام اختصاص به محصول معینی ندارند (۸). مایرو همکاران (۷) با نگاهی به واکنش عملکرد سورگوم، سویا و ذرت نتیجه گرفت که هر گیاه تحت شرایط یکسان هواشناسی نتیجه متفاوتی ارائه می‌دهد. نتایج مایر و همکاران (۸) نشان دادند که شاخص‌های PDSI و CMI برای ذرت به ویژه وقتی که با تنش‌های رطوبتی و گرمایی شدید روبروست، معتبر نمی‌باشند. تحقیقات یسن و نیز نیری و ریدزوسکی نشان دادند که واکنش عملکرد به تنش رطوبتی خاک، به گیاه و مرحله فنولوژی تحت تنش بستگی دارد. به هر حال، محصولات زراعی گوناگون، عکس‌العمل‌های متفاوتی به شرایط رطوبتی خاک در مراحل مختلف فنولوژی نشان می‌دهند و بروز تنش‌های رطوبتی در مراحل مختلف فنولوژی گیاه معین، به طور مستقیم بر عملکرد نهایی محصول تاثیر می‌گذارد (۹).

خشکسالی، یک رخداد هواشناسی است که به صورت متناوب و موقت اتفاق می‌افتد و بخش کشاورزی قربانی اصلی این فاجعه طبیعی است. خشکسالی کشاورزی عمدتاً در نتیجه کمبود باندگی، اختلاف بین تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی و همچنین کمبود آب خاک رخ می‌دهد. بنابراین، تاثیر خشکسالی با توجه به شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های بیولوژیکی گیاهان و مراحل رشد آن‌ها متفاوت است (۱). تلاش‌های زیادی برای تعریف و پیش‌بینی خشکسالی، در روابط شاخص‌های مختلف انجام شده است که نمونه آن را می‌توان در شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)^۴، شاخص رطوبت

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی و استادیار گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج
(*) نویسنده مسئول: (Email: Leila.jalali07@ut.ac.ir)

۳- استادیار پژوهش موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از بین ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی که کاشت محصول گندم در آن‌ها به صورت دیم انجام می‌شود، ایستگاه کرمانشاه واقع در اقلیم معتدل سرد، انتخاب شد. در واقع آن دسته از ایستگاه‌ها که کاشت محصول گندم در آن‌ها به صورت دیم انجام می‌شود، مطلوب مطالعه حاضر می‌باشد. دلیل این امر آن است که آبیاری محصول، تنش ناشی از کمبود آب در اثر خشکسالی را جبران می‌کند (۲).

ایستگاه کرمانشاه در مختصات جغرافیایی ۱۱° - ۴۷° طولی و ۱۲° - ۳۴° عرضی با ارتفاع $۱۳۶۱/۷$ متر در میان رشته کوه‌های زاگرس شمالی و در اقلیمی نیمه خشک و سرد واقع شده است. مشخصات اقلیمی ایستگاه کرمانشاه در جدول (۱) آمده است.

۱- داده‌های مورد نیاز

۱-۱- داده‌های هواشناسی

در این مطالعه از داده‌های ۹ ساله (از سال ۱۳۷۹-۱۳۷۸ لغایت ۱۳۸۷-۱۳۸۶) هواشناسی ایستگاه کرمانشاه به صورت روزانه استفاده شد. داده‌های مورد نظر از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز برای انجام این تحقیق شامل بارندگی روزانه، متوسط دمای روزانه، دمای حداکثر و حداقل روزانه، سرعت باد در ارتفاع دو متری، دمای نقطه شبنم و ساعات آفتابی می‌باشد.

۱-۲- اطلاعات فنولوژی محصول

اطلاعات فنولوژی محصول گندم دیم ایستگاه مورد مطالعه شامل تاریخ کشت، جوانه زنی، ساقه دهی، گلدهی و برداشت محصول بر اساس جدول (۲) مورد استفاده قرار گرفت:

جدول ۲- اطلاعات مربوط به مراحل مختلف فنولوژی محصول گندم در ایستگاه کرمانشاه (۲)

Table 2- Rain fed wheat phenology Information at Kermanshah station

مرحله رشد Growth stage	تاریخ date
کاشت Sowing	هفته چهارم بهمن Fourth week of October
جوانه زنی germination	هفته اول اسفند Third week of November
ساقه دهی Stem elongation	هفته سوم اردیبهشت Third week of April
گلدهی flowering	هفته چهارم اردیبهشت Third week of May
رسیدن محصول harvesting	هفته چهارم خرداد ماه First week of July

شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) اولین بار توسط مایر و همکاران (۹) معرفی شد. آنها با استفاده از چهار سری داده آب و هوایی، خاک، فنولوژی و عملکرد محصول، شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) را برای گیاه ذرت با استفاده از داده‌های ۸ ساله بخش مرکزی شرق نبراسکا توسعه دادند. همچنین با استفاده از داده‌های بلندمدت (۹ الی ۱۰ ساله) همان منطقه، شمال شرق میزوری، بخش مرکزی جنوب ویسکانسینو بخش مرکزی ایندیانا مورد صحت سنجی قرار دادند و در نهایت کارایی مدل CSDI را برای پیش و ارزیابی خشکسالی در مناطق زیرکشت ذرت در ایالات متحده تایید نمودند. شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) تا به حال برای محصولات دیگر مانند گندم (۱۹)، سورگم (۳) و سویا (۱۱) توسعه یافته است. هابارد و شو (۵) شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) را با معرفی یک عامل اشباع خاک که منجر به یک مدل شاخص تنش محصول خاص (CSSI) می‌شود، اصلاح کرد. آنان نشان دادند که تمام شاخص‌های توافق بین عملکردهای واقعی و برآوردی، بهبود مدل جدید CSSI را نسبت به مدل CSDI قدیمی، در تمام مناطق نشان می‌دهد. در ایران، ارشد و همکاران (۲۰۱۲) جهت ارزیابی تاثیر خشکسالی کشاورزی مناطق دیم استان کرمانشاه، از یک مدل شامل شاخص‌های ماهواره ای (شاخص شرایط دمایی) (TCI)^۳، شاخص شرایط گیاهی (VCI)^۴ و ورژن ماهواره ای CSDI (S-CSDI)^۵ و هواشناسی (PDSI)، شاخص CMI، Z، شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۶، شاخص خشکسالی موثر (EDI) و CSDI (CSDI) استفاده کرده و ترکیب این شاخص‌ها را در پیش‌بینی بهتر عملکرد محصول نشان دادند (۱). بررسی پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه خشکسالی کشاورزی در کشور نشان می‌دهد که برای پیش خشکسالی کشاورزی عمدتاً از شاخص‌های مبتنی بر بارندگی در دوره رشد و غیر رشد، نسبت بارندگی به تبخیر-تعرق در سال زراعی (RDI) و در برخی موارد شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) استفاده شده و این مطالعات، کمتر در ارتباط با رشد و نمو و یا عملکرد محصول خاص بوده است (۴، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۲۰). در این پژوهش، با استفاده از داده‌های ایستگاه کرمانشاه، اقدام به ارزیابی مدل شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) برای گندم دیم کرده و در ادامه، رابطه CSDI با شاخص اکتشاف خشکسالی (RDI) مورد مطالعه قرار گرفت.

- 1-Crop Specific Drought Index
- 2-Crop Specific Stress Index
- 3-Temperature Condition Index
- 4-Vegetation Condition Index
- 5-Satellite-based version of CSDI
- 6-Standardized Precipitation Index
- 7-Effective Drought Index

جدول ۱- مشخصات اقلیمی ایستگاه کرمانشاه در دوره آماری ۱۳۸۶-۱۳۶۱

Table 1- Climatic properties of Kermanshah station (1982-2007)

متغیر وضع هوا Weather variable	حداقل مطلق سالانه absolute annual minimum	متوسط سالانه Annual average	حداکثر مطلق سالانه absolute annual maximum
مجموع بارندگی (میلی‌متر) Total of precipitation(mm)	215.8	445.1	785.5
دما (سلسیوس) Temperature(°C)	-27	14.5	22.6
مجموع ساعات آفتابی Sunshine hours	-	2855	-
سرعت باد (متر بر ثانیه) Wind speed (m/s)	-	4.9	-
تبخیر از تشت (میلی‌متر) evaporation from pan(mm)	-	2138	-
رطوبت نسبی (درصد) Relative humidity (%)	-	47	-

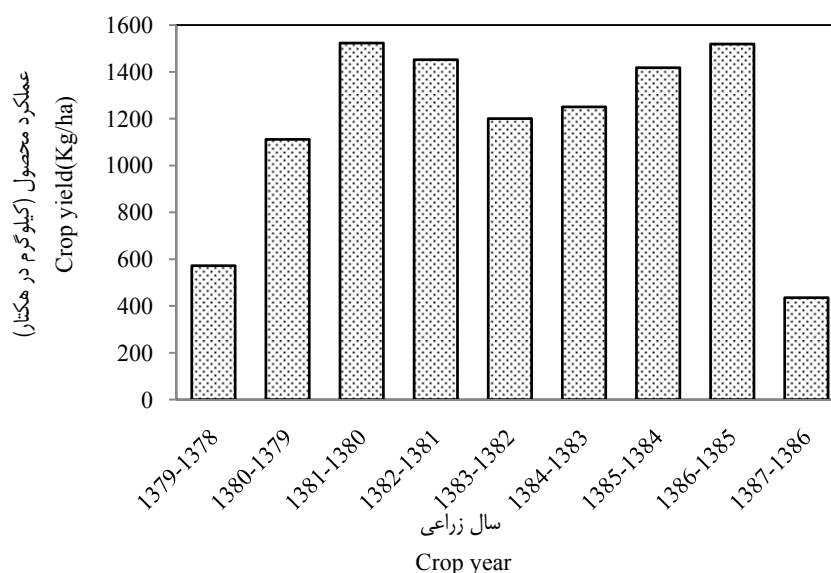
اطلاعات خاک

ایستگاه کرمانشاه در زمینی با بافت رسی-لومی واقع شده است. رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم و وزن مخصوص ظاهری خاک به ترتیب ۳۰/۶ درصد حجمی، ۲۰/۵ درصد حجمی و ۱/۳ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد (۲).

۱۳۶۱-۸۶ از آمارنامه کشاورزی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ لغایت ۱۳۸۶-۱۳۸۷) از آمارنامه کشاورزی ۱۳۶۱-۸۶ اداره کل آمار و اطلاعات کشاورزی اخذ شد. شکل (۱) عملکرد دانه گندم دیم کرمانشاه طی سال‌های زراعی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ لغایت ۱۳۸۷-۱۳۸۶ را نشان می‌دهد. متوسط عملکرد محصول، کمترین و بیشترین مقدار آن، به ترتیب برابر ۱۱۶۵/۰۲، ۴۳۵/۹۲ و ۱۵۲۳/۴۳ کیلوگرم در هکتار است. با توجه به شکل مذکور، ملاحظه می‌شود که کمترین عملکرد محصول در سال ۱۳۸۶-۱۳۸۷ اتفاق افتاده است.

داده‌های عملکرد محصول

اطلاعات ۹ ساله عملکرد محصول گندم دیم کرمانشاه (از سال



شکل ۱- عملکرد دانه گندم دیم کرمانشاه طی سال‌های زراعی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ لغایت ۱۳۸۶-۱۳۸۷
Figure 1- Rainfed wheat yield at Kermanshah station during 1999-2000 to 2007-2008

روش رگرسیون خطی استفاده می‌شود. ضرایب حساسیت λ_i در این مرحله بدست می‌آید.

که در این رابطه $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ به ترتیب حساسیت نسبی گیاه به تنش رطوبتی خاک در مرحله اول، دوم، سوم و ... رشد است. سایر پارامترها در معادله (۲) تعریف شده است. در این مطالعه، جهت برآورد شاخص خشکسالی محصول خاص ($CSDI_{pred}$)، مراحل رشد گیاه در دو مرحله رویشی (کاشت تا ساقه دهی) و زایشی (ظهور سنبله تا رسیدگی فیزیولوژیک) ادغام شد. در معادله (۲)، $n = 2$ خواهد بود و تعداد ضرایب حساسیت نیز به دو ضریب λ_1 و λ_2 کاهش می‌یابد.

مدل دو لایه بیلان رطوبتی روزانه آب

در این مطالعه برای محاسبه شاخص $CSDI$ ، از یک مدل دو لایه بیلان رطوبتی روزانه آب خاک استفاده شد (شکل ۲) (۱۳). در لایه اول، منطقه رشد فعلی ریشه است و با گذشت زمان عمق آن افزایش می‌یابد. لایه دوم، حفاصل انتهایی لایه اول و حداکثر عمق توسعه ریشه می‌باشد که ضخامت آن با افزایش رشد ریشه کاهش می‌یابد، بطوریکه در زمان حداکثر رشد گیاه، ضخامت این لایه به صفر می‌رسد. این مدل برای اجرا علاوه بر اطلاعات هواشناسی ذکر شده به اطلاعات روز شروع مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی، پایان فصل رشد، ضرایب گیاهی مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی، ضریب آب سهل الوصول، مقادیر رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، حداکثر عمق ریشه در منطقه، ارتفاع منطقه از سطح دریا، عرض جغرافیایی و ضرایب آلبیدو، ضرایب تابع تخمینی تابش خورشیدی موج کوتاه رسیده به سطح زمین و متوسط رطوبت اولیه خاک نیاز دارد. در این مدل برای لایه اول و دوم خاک، محتوای رطوبتی در پایان هر روز (t)، با استفاده از معادله‌های (۴) و (۵) قابل محاسبه است:

$$\ln\left(\frac{Y_{act}}{Y_{pot}}\right) = \lambda_1 \left[\ln\left(\frac{\sum ET_{act}}{\sum ET_{pc}}\right)_1 \right] + \lambda_2 \left[\ln\left(\frac{\sum ET_{act}}{\sum ET_{pc}}\right)_2 \right] + \lambda_3 \left[\ln\left(\frac{\sum ET_{act}}{\sum ET_{pc}}\right)_3 \right] + \dots \quad (3)$$

$$MC_{1(t)} = MC_{1(t-1)} + ISM_{(t)} + R_{(t)} - Q_{(t)} - ET_{(t)} - P_{1(t)} - P_c \quad (4)$$

$$MC_{2(t)} = MC_{2(t-1)} - ISM_{(t)} + P_{1(t)} - P_{2(t)} \quad (5)$$

ساختار شاخص خشکسالی محصول خاص ($CSDI$)

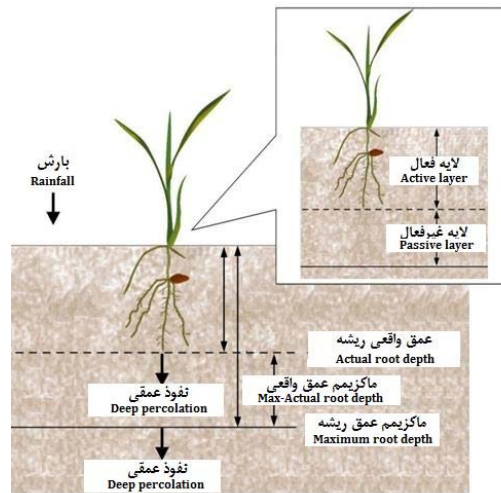
برای ارزیابی شاخص خشکسالی محصول خاص، نیاز به داده‌های آب و هوایی و خاک بعنوان ورودی مدل، اطلاعات فنولوژی برای تعیین سرعت نمو و اطلاعات عملکرد محصول جهت ارزیابی اجرای مدل با خروجی‌های می‌باشد. شاخص خشکسالی محصول خاص ($CSDI$) بصورت زیر تعریف می‌شود (۹):

$$CSDI_{act} = \frac{Y_{act}}{Y_{pot}} \quad (1)$$

که در آن Y_{act} : عملکرد واقعی محصول (kg/ha) و Y_{pot} : عملکرد پتانسیل محصول (kg/ha) است. در واقع بروز تنش‌های رطوبتی در مراحل مختلف فنولوژی گیاه معین، به طور مستقیم بر عملکرد نهایی محصول تاثیر می‌گذارد و اختلافات بین مقادیر $CSDI$ محصولات مختلف در یک منطقه ناشی از حساسیت متفاوت مراحل فنولوژی آنها به تنش خشکسالی است. در این معادله، عملکرد پتانسیل محصول در سطح احتمال ۹۹ درصد، از روی توزیع احتمال عملکردهای واقعی بدست آمد. همچنین (۹):

$$CSDI_{pred} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\sum ET_{act}}{\sum ET_{pc}} \right)_i^{\lambda_i} = \frac{Y_{pred}}{Y_{pot}} \quad (2)$$

که در آن ET_{act} : تبخیر-تعرق محاسباتی گیاه (mm)، ET_{pc} : تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه (mm)، Y_{pred} : عملکرد برآوردی محصول (kg/ha)، Y_{pot} : عملکرد پتانسیل محصول (kg/ha)، n : شماره مرحله رشدی گیاه و λ_i : حساسیت نسبی گیاه به تنش رطوبتی خاک در مرحله i -ام رشد می‌باشد. معادله (۲) با در نظر گرفتن دو عامل بسیار مهم قادر به برآورد اثر خشکسالی بر عملکرد محصول می‌باشد: (۱) آب مصرفی واقعی گیاه در مقایسه با حداکثر آبی که قابل استفاده است (برای مثال مقدار تنش رطوبتی)، (۲) دوره‌های رشد فنولوژیکی که حساسیت گیاه به تنش کمتر یا بیشتر است. جهت برآورد شاخص $CSDI$ ، مراحل رشد گیاه را در نظر گرفته و با توجه به معادله (۳) از



شکل ۲- نمایی از رهیافت مورد استفاده در اجرای مدل بیلان رطوبتی روزانه آب خاک (۷).
Figure 2- View of the used approach for modeling of daily soil-water balance.

۱) می باشد.

تبخیر-تعرق محاسباتی روزانه، بر اساس مدل دو لایه بیلان رطوبتی روزانه آب خاک محاسبه شد. برای اینکار از محتوای رطوبتی لایه اول (فعال)، تبخیر-تعرق پتانسیل و مقادیر بارندگی روزانه استفاده شد. به منظور محاسبه تبخیر-تعرق محاسباتی از معادله های زیر استفاده شد:

$$ET_{a(t)} = R_{(t)} + ISM_{(t)} - Q_{(t)} - P_{c(t)} - P_{l(t)} \quad MC_{1(t)} = 0 \quad R_{(t)} > 0 \quad (8)$$

$$ET_{a(t)} = ISM_{(t)} \quad MC_{1(t)} = 0 \quad R_{(t)} = 0 \quad (9)$$

$$ET_{a(t)} = ET_{c(t)} \quad MC_{1(t)} > 0 \quad R_{(t)} > 0 \quad (10)$$

$$ET_{a(t)} = ET_{c(t)} \quad MC_{1(t)} \geq ET_{c(t)} \quad R_{(t)} = 0 \quad (11)$$

$$ET_{a(t)} = MC_{1(t)} \quad MC_{1(t)} < ET_{c(t)} \quad R_{(t)} = 0 \quad (12)$$

تمامی کمیت ها در معادلات (۴) و (۵) تعریف شده اند.

۳- ارزیابی مدل

بدلیل آمار کوتاه مدت عملکرد در ایستگاه منتخب، در این مطالعه، از اعتبارسنجی تک حذفی استفاده شد. به این ترتیب که به ترتیب با حذف داده مربوط به یک سال زراعی، شاخص CSDI بر اساس سایر سال ها برآورد شده و اعتبار مدل CSDI با توجه به داده های سال حذف شده، سنجیده می شود.

به منظور ارزیابی کارایی مدل CSDI، از شاخص های آماری تحلیل خطا شامل جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا^۳ (MAE) و شاخص توافق^۴ (d) استفاده شد:

که در آن MC_1 و MC_2 به ترتیب محتوای رطوبتی لایه ۱ و ۲ در انتهای روز t ، $MC_{1(t-1)}$ و $MC_{2(t-1)}$ به ترتیب محتوای رطوبتی لایه ۱ و ۲ در انتهای روز $t-1$ ، R بارندگی، Q رواناب، ISM افزایش رطوبت خاک به دلیل رشد روزانه ریشه، ET تبخیر-تعرق، P_1 و P_2 به ترتیب فرونشست عمقی از لایه ۱ و ۲ و PC برگاب می باشد. تمامی کمیت ها بر حسب میلی متر هستند.

در این مطالعه برای برآورد تاریخ رسیدن به مراحل مختلف رشد گندم دیم از روش درجه-روز رشد (GDD)^۱ استفاده شد که از طریق رابطه (۶) محاسبه می شود:

$$GDD = \sum_a^b \left\{ \left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right] - T_b \right\} \quad (6)$$

در این رابطه، GDD درجه-روزهای رشد (حرارت تجمعی)، T_{max} و T_{min} درجه حرارت های حداکثر و حداقل روزانه (°C)، T_b درجه حرارت پایه (°C)، a و b به ترتیب تاریخ شروع و پایان مرحله فنولوژیکی می باشند. قابل ذکر است درجه حرارت پایه در این مطالعه (پایین ترین درجه حرارتی که فرض می شود پایین تر از آن رشدی وجود ندارد) در $5^\circ C$ در نظر گرفته شده است. با جمع درجه-روزهای محاسبه شده در طی یک دوره مشخص، مقدار درجه-روز لازم جهت شروع هر مرحله از نمو فنولوژیکی گندم دیم برآورد شد. در این پژوهش، تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از معادله پنمن-مانتیت فائو و اعمال ضرایب گیاهی گندم محاسبه شد:

$$ET_c = Kc_i \cdot ET_0 \quad (7)$$

که در آن kc_i ضریب گیاهی روزانه، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع^۱ ($mm \ day^{-1}$)، ET_c تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه ($mm \ day^{-1}$)

2-Root Mean Square Error

3-Mean Absolute Error

4-Index of Agreement

1-Growing Degree-Day

که در سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۸۶ و ۱۳۷۹-۱۳۷۸ خشکسالی بوقوع پیوسته است. مشابه چنین نتیجه‌ای را ارشد و همکاران (۱) نیز گزارش کرده‌اند. بنا به تحقیق آن‌ها، خشکسالی سال ۱۳۷۸ یکی از سخت‌ترین خشکسالی‌های ۳۰ سال گذشته بوده که کمبود بارندگی بیش از ۴۰ درصد متوسط بارندگی سالانه بود. همچنین، نتایج بدست آمده در سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۸۰ و ۱۳۸۶-۱۳۸۵ وقوع ترسالی متوسط را در ایستگاه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۳- طبقه بندی شاخص RDI و تعریف طبقه‌های خشکسالی متناظر با آن (۱۸)

Classification of drought conditions according to -Table3

RDI	
مقادیر RDI	طبقه بندی خشکسالی
RDI values	Drought classification
2 or more	ترسالی بسیار شدید extremely wet
1.50 to 1.99	ترسالی شدید very wet
1.00 to 1.49	ترسالی متوسط moderately wet
0 to 0.99	ترسالی نرمال normal condition- wet
-0.99 to 0	خشکسالی نرمال normal condition- dry
-1.00 to -1.49	خشکسالی متوسط moderately dry
-1.50 to -1.99	خشکسالی شدید severely dry
-2 or less	خشکسالی بسیار شدید extremely dry

مقادیر ضرایب حساسیت (λ_i) مراحل مختلف رشد محصول در ایستگاه مورد مطالعه در جدول (۵) آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب حساسیت محصول طی مرحله رویشی (کاشت تا ساقه دهی) یک مقدار مثبت نسبتاً بالا (۱/۳۱) و طی مرحله زایشی (ظهور سنبله تا رسیدگی فیزیولوژیک) یک مقدار منفی بسیار کوچکی (۰/۰۵۴۲-) بدست آمد.

بر اساس ضرایب حساسیت بدست آمده می‌توان گفت عملکرد در مرحله رویشی گیاه بشدت تحت تاثیر تنش خشکی بوده و در مرحله زایشی حساسیتی به دنبال ندارد. در واقع تامین نیازآبی گیاه در مرحله اول حائز اهمیت است. کوچک بودن λ_i در مرحله زایشی دلیل بر عدم حساسیت محصول به تنش نیست. در این مرحله، گندم به کمبود رطوبت و تنش خشکی بسیار حساس است و اگر رطوبت کافی تامین نشود دچار خسارت شدید خواهد شد. در اینجا، ضریب حساسیت پایین به آن معنا است که اقلیم منطقه می‌تواند رطوبت مورد نیاز محصول را

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (14)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (15)$$

که در آن، P_i مقادیر برآورد شده CSDI، O_i مقادیر واقعی CSDI، \bar{O} میانگین مقادیر واقعی CSDI، i اندیس سال n تعداد سال است. هرچه مقدار شاخص‌های RMSE و MAE کمتر و مقدار شاخص d بزرگتر باشد ($0 \leq d \leq 1$)، کارایی مدل بالاتر است.

۴- رابطه شاخص خشکسالی محصول خاص با شاخص اکتشاف خشکسالی (RDI)

رابطه شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) با شاخص اکتشاف خشکسالی (RDI) مورد بررسی قرار گرفت. شاخص اکتشاف خشکسالی، مبتنی بر دو متغیر بارندگی و تبخیر-تعرق پتانسیل است. در واقع، RDI بارندگی را بعنوان عامل ورود رطوبت و تبخیر-تعرق پتانسیل را به عنوان عامل خروج رطوبت در نظر می‌گیرد (۱۸). بنابراین در این مدل فقط به داده‌های دما (برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل از روش تورنت وایت) و بارندگی نیاز می‌باشد که تقریباً همه جا در دسترس هستند. طبقه بندی خشکسالی براساس مقادیر شاخص RDI در جدول (۳) قابل مشاهده است.

نتایج و بحث

ارزیابی شاخص خشکسالی محصول خاص

پس از آماده کردن داده‌های مورد نیاز، CSDI محاسبه و برآورد شد. نتایج مربوط به مقادیر $CSDI_{act}$ و $CSDI_{pred}$ در ایستگاه مورد نظر طی سال‌های زراعی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ لغایت ۱۳۸۷-۱۳۸۶ در جدول (۴) ارائه شده است. این مقادیر شامل مراحل واسنجی و صحت سنجی می‌باشد. همانگونه که در جدول (۵) مشخص است، کمترین مقدار $CSDI_{act}$ مربوط به سال ۱۳۸۶-۱۳۸۷ و برابر ۰/۲۱ می‌باشد.

با مراجعه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که کمترین عملکرد محصول نیز در همین سال (۴۳۵/۹۲ kg/ha) اتفاق افتاده است. در سال ۱۳۷۹-۱۳۷۸ نیز مقدار پایین $CSDI_{act}$ (۰/۲۷) مشاهده شد. بالاترین مقدار $CSDI_{act}$ (۰/۷۳) مربوط به سال ۱۳۸۱-۱۳۸۰ است که بر این اساس شاهد بیشترین مقدار عملکرد محصول در سال مذکور (۱۵۲۳/۴۳ kg/ha) هستیم. به عبارتی، نتایج حاصله نشان داد

پایین (MAE=۰/۰۸۳ و RMSE=۰/۱۱۳) به پایان رسید. پراکندگی خوب نقاط اطراف خط ۱:۱ گواه این مساله می باشد. قابل ذکر است که در تجزیه و تحلیل پارامترهای مدل گاهی ضریب تبیین و شاخص توافق قابل قبول با خطای RMSE و MAE بالایی روبرو بود به همین دلیل ضریب تبیین و شاخص توافق به تنهایی مورد استفاده قرار نگرفت. این موضوع در مطالعات گذشته نیز لحاظ شده است (۵) و (۹).

جدول ۵- مقادیر ضرایب حساسیت (λ_i) مراحل مختلف رشد محصول
Table5- The magnitudes of the sensitivity coefficients (λ_i values) for each period of growth

مرحله رشد Growth stage	ضرایب حساسیت (λ_i) Sensitivity coefficient (λ_i)
رویشی (کاشت تا ساقه دهی) Vegetative growth (sowing to stem elongation)	1.31
زایشی (ظهور سنبله تا برداشت) Productivity growth (apparition of head to harvesting)	-0.0542

رابطه شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI_{act}) با شاخص اکتشاف خشکسالی (RDI)

در این مطالعه، RDI برای سال های زراعی ۱۳۷۸-۱۳۷۹ لغایت ۱۳۸۶-۱۳۸۷ (مهر-خرداد) محاسبه شد. شکل (۴)، رابطه و همبستگی ساده CSDI و RDI را طی ماه های فصول زراعی در دوره آماری منتخب نشان می دهد. بر اساس محاسبات انجام شده، آستانه RDI بین ۱/۱۳ الی ۲/۵۹- می باشد. بر اساس جدول طبقه بندی RDI، این آستانه، حدواسط بین شرایط "ترسالی متوسط" و "خشکسالی بسیار شدید" می باشد. در ماه های مربوط به فصول بهار و تابستان، شاخص ها از ضریب همبستگی نسبتا بالایی با یکدیگر برخوردار هستند. در واقع این روند مربوط به ماه های مرتبط با ساقه دهی و گل دهی محصول است. ارتباط بین دو شاخص از فروردین ماه ($r^2=۰/۴۶۷$) شروع شده و تا مهر ماه ($r^2=۰/۷۱۷$) ادامه دارد. اما بیشترین ضریب تبیین مربوط به مرداد تا شهریور ماه است (۰/۷۳۸). در واقع CSDI تحت تاثیر تنش خشکی مهر تا بهمن ماه نبوده بلکه متأثر از رطوبت فروردینماه به بعد است.

همانطور که مشاهده می شود، نتایج، حاکی از ارتباط قابل قبول CSDI و RDI در طول دوره رشد محصول است. از آنجایی که CSDI بر اساس نسبت تبخیر تعرق محاسباتی به تبخیر تعرق پتانسیل تعریف شده است و RDI نیز نسبت بارندگی به تبخیر تعرق پتانسیل می باشد، می توان امکان جایگزینی متغیر بارندگی به جای تبخیر تعرق محاسباتی در معادله شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) می تواند مورد ارزیابی قرار داد.

تأمین کند ولی در مرحله رویشی چنین اتفاقی نمی افتد. شایان ذکر است که در تحقیق مربوط به میر و همکاران (۱۱)، مراحل فنولوژی محصول، چهار مرحله در نظر گرفته شد. در این تحقیق، از آنجایی که مقادیر تبخیر تعرق واقعی در برخی از این مراحل بسیار ناچیز بدست آمد و این امر روند برآورد CSDI را با مشکل مواجه ساخت، مراحل فنولوژی محصول به دو مرحله رویشی و زایشی ادغام شد.

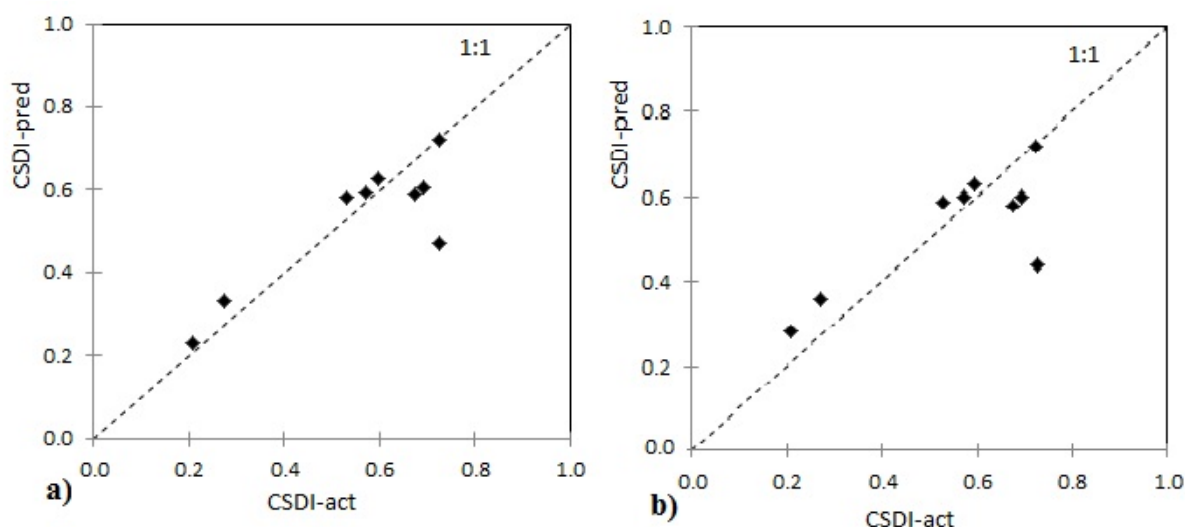
جدول ۴- مقادیر CSDI_{act} و CSDI_{pred} طی سال های زراعی ۱۳۷۹-۱۳۸۶ لغایت ۱۳۸۷-۱۳۸۶

Table4-CSDI_{act} and CSDI_{pred} values during 1999-2008

سال زراعی Crop year	CSDI _{act}	CSDI _{pred}	
		واسنجی Calibration	اعتبارسنجی Validation
۱۳۷۸-۱۳۷۹ (1999-2000)	0.27	0.33	0.36
۱۳۷۹-۱۳۸۰ (2000-2001)	0.53	0.58	0.59
۱۳۸۰-۱۳۸۱ (2001-2002)	0.73	0.47	0.44
۱۳۸۱-۱۳۸۲ (2002-2003)	0.69	0.61	0.6
۱۳۸۲-۱۳۸۳ (2003-2004)	0.57	0.59	0.6
۱۳۸۳-۱۳۸۴ (2004-2005)	0.60	0.63	0.63
۱۳۸۴-۱۳۸۵ (2005-2006)	0.68	0.59	0.58
۱۳۸۵-۱۳۸۶ (2006-2007)	0.72	0.72	0.72
۱۳۸۶-۱۳۸۷ (2007-2008)	0.21	0.23	0.28

شکل (۳) شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI_{act}) در برابر برآورد آن (CSDI_{pred}) را در ایستگاه کرمانشاه طی سال های زراعی ۱۳۷۸-۱۳۷۹ لغایت ۱۳۸۶-۱۳۸۷ در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی نشان می دهد. خط ۱:۱ نیز جهت ارزیابی بهتر در شکل مشخص شده است. در شکل، پراکندگی قابل قبول نقاط اطراف خط ۱:۱ مشاهده می شود که بصورت گرافیکی نشان دهنده اجرای قابل قبول مدل در برآورد CSDI می باشد. در ادامه، تجزیه و تحلیل آماری دقیق نتایج بدست آمده با در نظر گرفتن شاخص های آماری تحلیل خطا نظیر RMSE، MAE و شاخص d نیز صورت گرفت (جدول ۶).

واسنجی مدل CSDI نتایج رضایت بخشی به دنبال داشت بطوریکه شاهد ضریب تبیین بالا (۰/۹۵) هستیم. همچنین مقادیر RMSE، MAE و D به ترتیب برابر ۰/۰۹۸، ۰/۰۶۸ و ۰/۷۴۷ بدست آمد. در مرحله اعتبارسنجی، اجرای قابل قبول مدل با ضریب تبیین و شاخص توافق بالا ($r^2=۰/۹۵$ و $D=۰/۸۷$) و مقادیر خطای



شکل ۳- شاخص خشکسالی محصول خاص ($CSDI_{act}$) در برابر برآورد شاخص ($CSDI_{pred}$) طی سالهای زراعی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ لغایت ۱۳۸۷-۱۳۸۶ (a و b به ترتیب مربوط به مرحله واسنجی و صحت سنجی است). خط ۱:۱ در شکل مشخص شده است
 Figure 3- Actual Crop Specific Drought Index ($CSDI_{act}$) vs. predicted Crop Specific Drought Index ($CSDI_{pred}$) during 1999-2000 to 2007-2008(a- calibration process,b- validation process). 1:1 line is also shown.

جدول ۶- نتایج آماری اجرای مدل شاخص خشکسالی محصول خاص CSDI

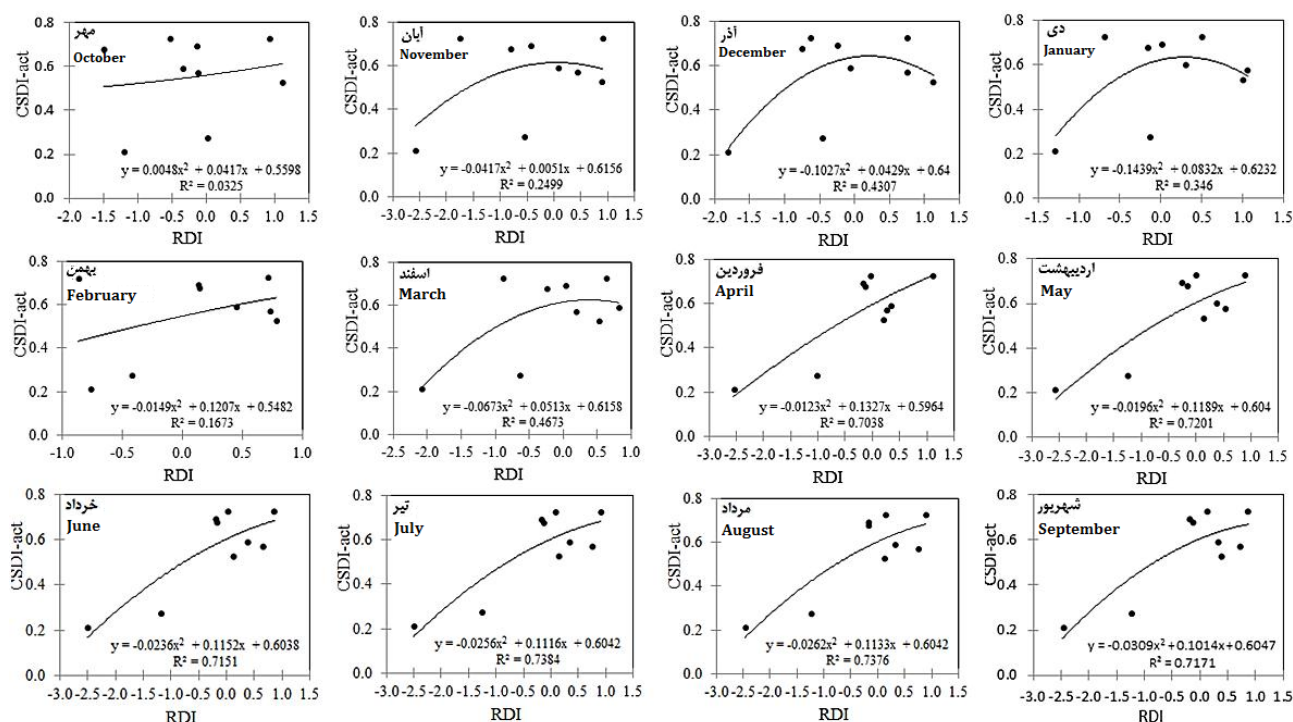
Table 6- CSDI model performance statistics

مرحله مدل Model process	r^2	RMSE	D-index	MAE
واسنجی Calibration	0.95	0.098	0.747	0.068
اعتبارسنجی Validation	0.95	0.113	0.87	0.083

مختلف و نیز رابطه آن با سایر شاخص‌های خشکسالی در مطالعات آبی مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

شاخص‌های خشکسالی امکان ارزیابی خشکسالی‌ها را در مقیاس زمانی و مکانی ممکن می‌سازند. در این مطالعه، شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI)، شاخصی که در ارتباط مستقیم با رشد و نمو و عملکرد محصول می‌باشد، در یک نمونه اقلیم معتدل سرد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آماری، حاکی از اجرای قابل قبول مدل CSDI در منطقه مورد مطالعه دارد. بنابر این تحقیق، شاخص موردنظر به دلیل ارزیابی قابل قبول آن، برای پایش خشکسالی کشاورزی بخصوص در مناطقی که از قطب‌های کشاورزی کشور می‌باشد پیشنهاد می‌شود. در ادامه، با بررسی ارتباط CSDI و RDI شاهد همبستگی رضایتبخش این دو شاخص در طی دوره رشد محصول بودیم. از نتیجه بدست آمده میتوان استفاده از متغیر بارندگی به جای تبخیر-تعرق محاسباتی را در رابطه CSDI پیشنهاد کرد. در خاتمه پیشنهاد می‌شود ارزیابی توانایی CSDI در اقلیم‌های



شکل ۴- رابطه CSDI_{act} و RDI طی سال‌های زراعی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ لغایت ۱۳۸۷-۱۳۸۶ (مهر-خرداد)

Figure 4- The association of CSDI_{act} and RDI during 1999-2000 to 2007-2008 (October-September)

منابع

- 1- Arshad S., Morid S., Mobasher M.R., Agha Alikhani M., and Arshad S. 2012. Monitoring and forecasting drought impact on dryland farming areas. *International Journal of climatology*. Volume 33, Issue 8, 2068–2081
- 2- Bazrafshan J. 2000. Agricultural drought risk assessment and scoring a sufficient method for estimating its quantitative impact on crops yield of wheat and barley. PhD. Thesis, Agrometeorology. University of Tehran.
- 3- Camargo M.B.P., and Hubbard K.G. 1999. Drought sensitivity indices for a sorghum crop. *The Journal of Production Agriculture*. 12(2):312–316.
- 4- Hejazi Zadeh Z., Javi Zadeh S., and Musavi M. 2010. Survey of climatic drought and its effects on wheat production in the province. *Geography*. Spring. 8(24), p. 27-45.
- 5- Hubbard K.G., and Wu H. 2005. Modification of a crop-specific drought index for simulating corn yield in wet years, *Agronomy Journal*, 97: 1478-1484.
- 6- Khalili N., Davari K., Ansari H., and Alizadeh, A. 2000. The Management of Supplementary Irrigation for Rain-fed Wheat during the Drought Periods Using Crop Moisture Index (The Case Study: Bojnurd). *Journal of Water and Soil*. 24, No. 6, Jan-Feb 2011, p. 1254-1264.
- 7- Meyer S.J., Hubbard K.G., and Wilhite D.A. 1990. The development of a crop-specific drought index for corn. High Plains Climate Center Report, 90-1. University of Nebraska-Lincoln.
- 8- Meyer S.J., Hubbard K.G., and D.A. Wilhite. 1991. The relationship of climatic indices and variables to corn (maize) yields: A principal components analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55:59-84.
- 9- Meyer S.J. 1993a. A crop specific Drought index for corn I. Model development and validation. *Agronomy Journal* 85, vol 2, 388-395.
- 10- Meyer S.J. 1993b. A crop specific Drought index for corn II. Application in drought monitoring and assessment. *Agronomy Journal*, 85, vol 2, 396-399.
- 11- Meyer S.J., and Hubbard K.G. 1995. Extending the crop-specific drought index to soybean. p. 258–259. In Proc. Conf. on Appl. Climatol., 9th, Dallas, TX. 15–20 Jan. 1995. Am. Meteorol. Soc., Boston.
- 12- Noghani Kar H., Bazrafshan J., and Hejazi S. 2012. Risk analysis of agricultural drought characteristics under current climate and changing climate conditions in various climates of Iran. *Iranian Water Research Journal*,

- 2013(Issue 11). No: 11, p. 175.
- 13- Rahimi J., Khalili A., and Bazrafshan J. 2012. A Computer Model Based on Soil-Water Balance for Estimating The Effective Rainfall in Dryland Wheat Crop (The Case Study of Fars Province). *Journal of Water and Soil*. Vol. 26, No. 3, Jul-Aug 2012, p. 786-798.
 - 14- RamezaniEtedali H., liaghat A., ParsiNejad M., and RamezaniEtedali M. 2012. Assessment of agricultural drought based on soil moisture in Qazvin station. *Journal of Water Research in Agriculture*. No:1, p. 83-93.
 - 15- Shafiei M., Ghahreman B., Ansari H., and Sharifi M.B. 2011. Stochastic simulation of Drought Severity Based on the Palmer Index. *Journal of Water and Irrigation Management*. No: 1, p. 1-13.
 - 16- Shokoohi A.R. 2012. RDI and SPI indices Comparison for drought analysis in station scale with an emphasis on agricultural drought (Case Study: Qazvin and Takestan). *Journal of Irrigation & Water Engineering*, No:3, p. 111-122.
 - 17- Torabipaltkale S. 2002. Drought management: analysis and forecasting drought and its effects on water resources management. PhD thesis, Amirkabir University of Technology.
 - 18- Tsakiris G., Pangalou D., and Vangelis, H. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resource Manage*, 21:821–833.
 - 19- Wu H., and Wilhite D.A. 2004. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska. USA. *Natural Hazards*, 33:1–21.
 - 20- ZandiLak H., Fooladvand H.R., and Boostani F. 2014. Evaluate of the return period of agricultural drought for in Fars province using RDI index. *Quarterly of Water Resources Engineering*. No:22, p.1-10.
 - 21- ZareAbyaneh H., and Mahboobi A.A. 2004. Evolution of drought situation and its process in Hamadan region on the basis of drought statistical indexes. *Journal of Research and Reconstruction*. No: 64, p. 2-7.

Assessment of Crop-Specific Drought Index (CSDI) for Rain-fed Wheat In Cold-temperate Climate (Case Study: Kermanshah)

L. Jalali^{1*} - J. Bazrafshan² - A.R. Tavakoli³

Received: 10-06-2013

Accepted: 25-06-2016

Introduction: There have been several indices for agricultural drought monitoring such as Palmer Drought Severity Index (PDSI), Crop Moisture Index (CMI) and Reconnaissance Drought Index (RDI). These indices model the general conditions of soil moisture as a function of climatic parameters such as temperature and rainfall and they are not appropriate to any specific crop. Crop-Specific Drought Index (CSDI) is among few indices which directly take into account evapotranspiration for drought monitoring. This index is defined based on the ratio of actual evapotranspiration (ET_a) to potential evapotranspiration (ET_p). Literature review of agricultural drought monitoring in Iran reveals that was mainly used Reconnaissance Drought Index (RDI) and in some cases Drought Severity Index Palmer (PDSI) which have less associated with the growth or performance of the specific crop or not. In this paper, a Crop Specific Drought Index (CSDI) model was evaluated for rain-fed wheat in a cold-temperate climate. Then, its correlation with RDI was assessed.

Materials and Methods: In this study, using 9 years of data of meteorology, soil, and crop yield and phenology, a CSDI model has been calibrated and validated for rain-fed wheat. A two-layer model of daily soil water balance was used to CSDI calculation. The first layer is the current root growth zone which its depth increases with time. The second layer is between the first layer and maximum depth of root growth which its depth decreases by root growth and the thickness of this layer becomes zero when the root growth is Maximum. Actual daily Evapotranspiration (ET_a) was calculated based on two-layer model of daily soil water balance. For this, we used the moisture content of the first layer (active), potential evapotranspiration and daily rainfall values. The statistical indices of error analysis like RMSE, MAE and Index of Agreement was used for assessment of CSDI model. Then, to investigate the correlation possibility of crop specific drought severity, Reconnaissance Drought Index (RDI) was used which is based on two variables of potential evapotranspiration and precipitation. In fact, RDI considers the precipitation as a factor of moisture input and the potential evapotranspiration as a factor of moisture exhaust.

Results and Discussion: At Kermanshah station high coefficient of determination (0.95), relatively high index of agreement (0.747), and low error values (RMSE =0.098 and MAE =0.068) was obtained. Sensitivity coefficients during vegetative and productivity stages were obtained 1.31 and -0.0542, respectively. As a result, crop yield at vegetative stage severely affected by aridity stress while at productivity stage there was no sensitivity. In fact, water demand supply is vital at vegetative stage. Range of RDI at Kermanshah station was between 1.13 to -2.59. This threshold is the condition between "moderately wet" and "extreme drought". Correlation between the two index started from March ($R^2 = 0.467$) and persisted to September ($R^2 = 0.717$). But the highest coefficients of determination were related to July to August (0.738). Although CSDI didn't affect by drought stress during October to February, it affected by moisture of March onward. RDI incorporating precipitation and potential evapotranspiration is one of the most recent developments for the assessment of drought severity through drought indices. That is why this index is chosen to investigate the relationship with CSDI. Actually, both indices get evapotranspiration factor in the agricultural drought monitoring. Based on the results, there is a good correlation between two indices. Since the CSDI is relay on ET_a to ET_p ratio and RDI is based on the P/ET_p ratio, it can be concluded that there is a possible to replacement of ET_a with rainfall (R) in the CSDI equation.

Conclusion: Many indices and indicators are available to assist in the quantitative assessment of drought severity, and these should be evaluated carefully for their application to each region or location and sector. This paper presents a CSDI model which compared with RDI. Based on the results of this analysis, CSDI model was performed well in high values of coefficients of determination and Index of Agreement, and low values of errors.

1 and 2-MSc student and Assistant professor Agrometeorology, Department of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(*-Corresponding Author Email: Leila.jalali07@ut.ac.ir)

3-Assistant professor of Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj

Therefore, the CSDI seems to be a reliable index to assess agricultural drought. Furthermore, it is observed a reliable relation between CSDI and RDI during crop growth period. Due to good correlation of CSDI and RDI, it can be proposed to replacement of rainfall (R) instead of ET_p in the CSDI equation.

Keywords: Agricultural drought monitoring, Reconnaissance Drought Index, Evapotranspiration, Water balance model