

## بررسی وضعیت خشکسالی کشاورزی بر اساس رطوبت خاک در ایستگاه سینوپتیک قزوین

هادی رضانی اعتدالی<sup>۱\*</sup>، عبدالمجید لیاقت، مسعود پارسی نژاد،

مجتبی رضانی اعتدالی

دانشجوی دکتری گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران؛

HadiRamezani@ut.ac.ir

استاد گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران؛

Aliaghat@ut.ac.ir

دانشیار گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران؛

Parsinejad@ut.ac.ir

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی؛

m\_ramezany2000@yahoo.com

### چکیده

از دیدگاه کشاورزی، خشکسالی زمانی که رطوبت خاک از نیاز واقعی محصول کمتر باشد و منجر به خسارت در محصول شود، اتفاق می‌افتد. برای بیان کمی خشکسالی، از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شود که بیشتر از بارندگی برای محاسبه این شاخص‌ها استفاده می‌شود. اما خشکسالی از نظر کشاورزی بیشتر به رطوبت خاک توجه نموده و خاک را به عنوان محیط اصلی برای تامین نیاز آبی در نظر می‌گیرد. از مهمترین شاخص‌های خشکسالی که رطوبت خاک را به عنوان پارامتر ورودی در نظر می‌گیرد می‌توان به شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI) اشاره کرد. اما برای برآورد رطوبت خاک مستلزم استفاده از مدل‌هایی برای تخمین آن است. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop و استفاده از این نتایج در تعیین شاخص خشکسالی SMDI و مقایسه آن با شاخص‌های خشکسالی بر اساس بارندگی مثل PNI، DI، SPI و CZI بین سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۸۲ در ایستگاه سینوپتیک قزوین است. نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop نشان داد تغییرات ماهیانه رطوبت خاک در عمق پنج سانتی‌متری بسیار شدید است. با افزایش عمق، تغییرات رطوبت خاک کمتر می‌شود. از عمق حدود ۴۰ سانتی‌متر به بعد، رطوبت ثابت باقی می‌ماند. مطوب‌ترین سال در ایستگاه موردنظر با توجه به مقدار شاخص SDMI با مقدار ۲/۷ در سال ۱۹۹۴ با مقدار و شدیدترین خشکسالی با مقدار ۱/۵- در سال‌های ۱۹۹۷، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۸ رخ داده است. در مورد شاخص‌های دیگر، بیشترین و کمترین مقدار شاخص‌های خشکسالی مطابق با تغییرات بارندگی و در سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۰۸ می‌باشد. نکته بسیار مهم در مورد شاخص SMDI این است که این شاخص علاوه بر شرایط کنونی رطوبت خاک به شرایط سال قبل نیز توجه دارد. شاخص SMDI کمترین ضریب تعیین را با شاخص‌های خشکسالی دیگر و همچنین با بارندگی و تبخیر نشان می‌دهد

واژگان کلیدی: خشکسالی، AquaCrop، SMDI، PNI، DI، SPI و CZI

۱. دانشگاه تهران، کدپستی: ۳۷۱۳۶۷۴۶۴۵ - صندوق پستی: ۴۱۱۱

\* دریافت: آبان، ۱۳۹۰ و پذیرش: اسفند، ۱۳۹۰

## مقدمه

تا کنون تعاریف بسیار زیادی از خشکسالی شده است. اما هر کدام از این تعاریف دیدگاه خاصی را مد نظر داشته‌اند. هواشناسان، خشکسالی را بارش کمتر از حد معمول که منجر به تغییر الگوی آب و هوایی می‌شود، تعریف کرده‌اند. بنابراین، خشکسالی از دیدگاه هواشناسی، اساساً به حالتی از خشکی ناشی از کمبود بارندگی اطلاق می‌شود. از دیدگاه اقلیم‌شناسان، خشکسالی یک پدیده طبیعی است که در اثر تغییرات الگوهای آب و هوایی ناشی از کاهش نزولات جوی کمتر از حد معمول خود به خود به وجود می‌آید و ادامه آن موجب عدم تعادل اکولوژیکی و هیدرولوژیکی می‌شود. از دیدگاه هیدرولوژیست‌ها، خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که سطح تراز ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی از حد معمول خود پایین‌تر باشد. خشکسالی هیدرولوژیک اغلب در عرض‌های میانی بر اثر کمبود و فقدان بارش زمستانی اتفاق می‌افتد. علاوه بر بارش، فاکتورهای اقلیمی دیگر مانند دماهای بالا، بادهای قوی و رطوبت نسبی کم نیز به طور قابل ملاحظه‌ای بر روی خشکسالی هیدرولوژیک تأثیر دارند. اما از دیدگاه کشاورزی زمانی که رطوبت خاک از نیاز واقعی محصول کمتر باشد و منجر به خسارت در محصول شود، خشکسالی اتفاق افتاده است (بذر افشان، ۱۳۸۱).

برای بیان کمی پدیده خشکسالی و همچنین ارزیابی آن در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی، از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شود که برای محاسبه آنها وجود داده‌های مناسب و طولانی مدت پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی ضروری است. بارندگی اصلی‌ترین پارامتری است که در ایجاد و گسترش و دوام خشکسالی‌ها سهم می‌باشد، البته، پارامترهای موثر دیگری مثل تبخیر و تعرق نیز می‌تواند بیانگر رفتار خشکسالی در هر منطقه باشد، اما مشکلاتی که برای محاسبه این پارامترها وجود دارد، موجب شده است تا بارندگی به عنوان مناسب‌ترین و قابل

دسترس‌ترین پارامتر اقلیمی برای ساخت و محاسبه شاخص‌های خشکسالی شناخته شود (بذر افشان، ۱۳۸۱). تا کنون شاخص‌های خشکسالی زیادی پیشنهاد شده است. از مهمترین شاخص‌های خشکسالی می‌توان شاخص درصدی از نرمال<sup>۱</sup> (PNI) (ویلکه، ۱۹۹۴)، شاخص دهک‌ها<sup>۲</sup> (DI) (ماهر و گیس، ۱۹۶۷)، شاخص بارش استاندارد<sup>۳</sup> (SPI) (مک کی، ۱۹۹۵)، شاخص خشکسالی مؤثر<sup>۴</sup> (EDI) (بیون و ویلهایت، ۱۹۹۹)، شاخص Z<sup>۵</sup> (ZSI) و شاخص Z چینی<sup>۶</sup> (CZI) (کندل و استیوارت، ۱۹۷۷) اشاره کرد. در تمامی این شاخص‌ها، از بارندگی استفاده کرده، اما هر کدام از این تعاریف دیدگاه خاصی را مد نظر داشته است.

محمدیان و همکاران (۱۳۸۹) در استان خراسان شمالی اقدام به پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های DI، SPI و PNI نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد، به‌رغم تفاوتی که در هر یک از روش‌های پایش در تعیین وضعیت خشکسالی وجود دارد، ولی روند کلی بیشتر آن‌ها یکسان است، هر چند ممکن است مراتب خشکسالی متفاوت به‌دست آمده باشد. همچنین، طولانی‌ترین خشکسالی مربوط به سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۹۷ می‌باشد که با توجه به قابلیت SPI برآورد شده است.

انصافی مقدم (۱۳۸۶) از شاخص‌های DI، SPI، ZSI و PNI به بررسی خشکسالی در حوضه دریاچه نمک پرداخت. نتایج بدست آمده نشان داد، طی یک دوره ۴۴ ساله، شاخص SPI و DI در جایگاه نخست، شاخص ZSI در جایگاه دوم و شاخص‌های PNI در جایگاه سوم برای تحلیل وضعیت خشکسالی قرار گرفتند.

مک کی و همکاران (۱۹۹۳) برای نشان دادن شاخص بارش استاندارد شده، از یک سیستم طبقه‌بندی شده استفاده

<sup>1</sup> Percent of Normal Index

<sup>2</sup> Deciles Index

<sup>3</sup> Standardized Precipitation Index

<sup>4</sup> Effective Drought Index

<sup>5</sup> Z-Score Index

<sup>6</sup> China Z-Index

احتیاج بوده و همچنین محاسبه آن ساده تر است. این شاخص بر مبنای مجموع رطوبت خاک بطور روزانه برای یک سال استوار است و تنها فاکتور اقلیمی مورد استفاده در این شاخص رطوبت خاک می باشد. این شاخص در مقیاس سالانه به کار می رود.

ناراسیمان و سریناواسان (۲۰۰۵) از مدل SWAT برای شبیه سازی رطوبت در عمق های مختلف در ایالت تگزاس استفاده نموده و از شاخص SMDI اصلاح شده برای بررسی وضعیت خشکسالی در طی دوره ۱۹۹۸-۱۹۰۱ استفاده نمودند. نتایج ناراسیمان و سریناواسان (۲۰۰۵) نشان داد که ضریب تعیین این شاخص با شاخص های SPI و PDSI حدوداً برابر با ۰/۶۵ و با شاخص کمبود تبخیر و تعرق (ETDI) برابر با ۰/۷۹ است. نتایج آن ها نشان داد که تبخیر و تعرق گیاهان وابستگی بیشتری به شاخص SMDI نسبت به شاخص های SPI و PDSI دارد.

هدف از این تحقیق، شبیه سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop و استفاده از این نتایج در تعیین شاخص خشکسالی SMDI و مقایسه آن با شاخص های خشکسالی PNI، DI، SPI و CZI در ایستگاه سینوپتیک قزوین است.

## مواد و روش ها

### الف- ایستگاه سینوپتیک قزوین

در این تحقیق، از داده های ایستگاه سینوپتیک قزوین طی سال های ۲۰۰۸-۱۹۸۲ استفاده شد. این ایستگاه دارای طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۲۷۹/۲ متر است.

دمای متوسط سالانه ایستگاه سینوپتیک قزوین که معرف منطقه طرح می باشد، برابر با ۱۴/۳ درجه سانتی گراد است. بیشترین میزان متوسط حداکثر مطلق دما در ایستگاه سینوپتیک قزوین نیز ۳۹/۵ درجه سانتی گراد و کمترین

کردند. به طوری که در جدول رقم های SPI شاخص بارش استاندارد را برای تعیین شدت خشکسالی ناشی از شاخص بارش استاندارد به کار برده اند. مک کی و همکاران (۱۹۹۳) همچنین معیارهایی را برای رخداد یک خشکسالی در مقیاس های زمانی متفاوت تعریف کرده اند، به طوری که آنها گزارش کردند که یک خشکسالی زمانی اتفاق می افتد که شاخص بارش استاندارد منفی، تداوم داشته باشد و همچنین وقوع یک خشکسالی زمانی شدید است که شاخص بارش استاندارد ۱- یا کمتر باشد، در صورتی که SPI مثبت شود، رخداد خشکسالی به پایان خواهد رسید. بنابراین، هر رخداد خشکسالی یک دوره ای دارد که به وسیله شروع و پایانش و همچنین شدت هر ماهی که رخداد خشکسالی در آن تداوم داشته است، تعیین می شود.

همان طور که اشاره شد، خشکسالی از نظر کشاورزی بیشتر به رطوبت خاک توجه نموده و خاک را به عنوان محیط اصلی برای تامین نیاز آبی در نظر می گیرد. لذا، شاخص های ذکر شده در بالا به میزان بارندگی توجه نموده اند و از رطوبت خاک در پایش خشکسالی خبری نیست. شاید عدم استفاده از رطوبت خاک در بیشتر شاخص ها، به دلیل عدم اندازه گیری مستقیم آن ها در ایستگاه های هواشناسی است. از مهمترین شاخص های خشکسالی که رطوبت خاک را به عنوان پارامتر ورودی در نظر می گیرد، می توان به شاخص پالم (PDSI) (پالم، ۱۹۶۵) و شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI)<sup>۱</sup> (هلینگر، ۱۹۹۴) اشاره کرد.

شاخص پالم یکی از مهمترین شاخص ها در تعیین خشکسالی با استفاده از رطوبت خاک است. اما، برای محاسبه این شاخص، فاکتورهای زیادی نظیر دما، بارش، رواناب، رطوبت خاک و تبخیر و تعرق مورد نیاز است. همچنین، طی محاسبه این شاخص روابط فراوان و نسبتاً پیچیده ای مورد استفاده قرار می گیرد. اما، شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI) به پارامتر کمتری

<sup>1</sup> Soil Moisture Deficit Index

هوا در زمستان و در ماه‌های دی و بهمن اتفاق می‌افتد. منطقه مورد مطالعه با توجه به آمار آب و هوایی براساس منحنی آمبروترمیک دارای ۲۱۰ روز خشک بوده که جزء آب و هوای گرم و خشک مدیترانه‌ای می‌باشد.

میزان متوسط حداقل مطلق دما در ایستگاه سینوپتیک قزوین ۱۲/۹- درجه سانتی‌گراد می‌باشد (جدول ۱). در بررسی‌های ماهانه دما، ملاحظه می‌شود که حداکثر مطلق دمای هوا در تابستان بخصوص در تیر یا مرداد ماه و حداقل مطلق دمای

جدول ۱- تغییرات دمای هوا در ایستگاه سینوپتیک قزوین

دما	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
میانگین	۱۱/۲	۱۶/۲	۲۱/۲	۲۵/۱	۲۵/۸	۲۲/۹	۱۷/۳	۱۰/۹	۵/۰	۱/۳	۱/۶	۵/۴
حداکثر مطلق	۲۷/۰	۳۱/۷	۳۷/۲	۳۹/۵	۳۸/۸	۳۵/۲	۲۸/۸	۲۱/۱	۱۴/۵	۱۱/۳	۱۴/۸	۲۰/۸
حداقل مطلق	-۰/۳	۴/۲	۹/۴	۱۲/۹	۱۲/۲	۱۷/۳	۲/۲	-۴/۲	-۸/۹	-۱۲/۹	-۱۰/۷	-۶/۶

### ب- شاخص‌های خشکسالی

#### ۱- شاخص درصدی از نرمال (PNI)

شاخصی است که بیشتر برای درک عموم مردم جامعه استفاده می‌شود. استفاده از شاخص آنالیز بارش نرمال زمانی مفید است که از آن تنها برای یک ناحیه یا یک فصل استفاده شود. اما از سوی دیگر، باید توجه داشت که درصد بارش نرمال به آسانی گمراه کننده و غیرواقعی می‌باشد و شرایط مختلفی را با توجه به منطقه و فصل عرضه می‌کند. بارش نرمال به وسیله تقسیم بارش واقعی به بارش نرمال ضرب در ۱۰۰ محاسبه می‌شود و معمولاً در مقیاس‌های زمانی ماهانه و یا مقیاس‌های ماهانه که معرف یک سال یا یک سال آبی متغیر است بکار می‌رود.

یکی از نقاط ضعف استفاده از بارش نرمال آن است که متوسط یا میانگین بارش با میانه یکی نیستند و ارزش آن ۵۰ درصد از بارش اتفاق افتاده در گزارشات اقلیمی، انحراف دارد. دلیل این امر آن است که بارش در مقیاس‌های ماهانه و سالانه توزیع نرمالی ندارد و استفاده از درصد بارش نرمال در جایی به توزیع نرمال به طور ضمنی شباهت دارد که میانه و میانگین یکسان فرض شده باشند. درجه‌بندی این شاخص در جدول (۲) ارائه شده است.

#### ۲- شاخص دهک‌ها (DI)

در این شاخص، بارندگی‌های طولانی مدت منطقه در مقیاس زمانی از نظر میزان به ۱۰ بخش (۱۰ دهک) تقسیم می‌شود و هر دهک از نظر خشکسالی شرایط متفاوتی دارد (جدول ۲).

#### ۳- شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص بارش استاندارد شاخصی است که بر اساس احتمال بارش برای مقیاس‌های زمانی متفاوت به کار برده می‌شود. همچنین، رخدادهای شرایط خشکسالی را قبل از وقوع پیش‌بینی می‌کند و به تخمین شدت خشکسالی کمک کرده است. بسیاری از برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان خشکسالی، چند منظوره بودن شاخص بارش استاندارد را درک کرده و به اهمیت فوق‌العاده آن پی برده‌اند. محاسبه شاخص بارش استاندارد شده برای هر منطقه بر اساس ثبت داده‌های بارش در بلند مدت برای یک دوره دلخواه استوار می‌باشد. بنابراین متوسط بارش استاندارد شده برای هر منطقه و برای هر دوره دلخواهی صفر و انحراف معیار آن یک می‌باشد (ادوارد و مکی ۱۹۹۷). تفکیک این شاخص در جدول (۲) آمده است.

#### ۴- شاخص Z چینی (CZI)

با فرض این که پراکندگی داده‌های بارندگی از پیرسون درجه ۳ پیروی کند، از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$CZI_j = \frac{6}{C_s} \left( \frac{C_s}{g} \phi_j + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^3}{n \times \sigma^3} \quad (2)$$

که در آن ها:  $z$  ماه مورد نظر،  $CS$  ضریب چولگی،  $\phi_j$  مقادیر استاندارد بارندگی است. درجه بندی این شاخص در جدول (۲) ارائه شده است.

$$\phi_j = \frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \quad (3)$$

جدول ۲- تعیین درجه خشکسالی و ترسالی در شاخص های خشکسالی مختلف

ردیف	درجه خشکسالی	مقادیر PNI	مقادیر DI	مقادیر SPI
۱	خشکسالی بسیار شدید	کمتر از ۴۰٪	کمتر از ۱۰٪	کمتر از ۲-
۲	خشکسالی شدید	۴۰-۵۵٪	۱۰-۲۰٪	-۱/۵ تا -۱/۹۹
۳	خشکسالی متوسط	۵۵-۷۰٪	۲۰-۳۰٪	-۱ تا -۱/۴۹
۴	خشکسالی ملایم	۷۰-۸۰٪	۳۰-۴۰٪	*
۵	تقریباً نرمال	بیش از ۱۰۰٪	۴۰-۶۰٪	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-
۷	ترسالی ملایم	*	۶۰-۷۰٪	*
۸	ترسالی متوسط	*	۷۰-۸۰٪	۱ تا ۱/۴۹
۹	ترسالی شدید	*	۸۰-۹۰٪	۱/۵ تا ۱/۹۹
۱۰	ترسالی بسیار شدید	*	بیش از ۹۰٪	بیش از ۲+

روزانه خاک در طی دوره آماری و SD درصد کمبود رطوبت خاک است. SD از ۱۰۰ تا ۱۰۰- متغیر است. در ۱۰۰ خاک مرطوب ترین و در ۱۰۰- خاک خشک ترین وضعیت را داراست. و در نهایت شاخص SMDI از رابطه زیر محاسبه شود.

$$SMDI_i = 0.5SMDI_{i-1} + \frac{SD_i}{50}$$

این شاخص از ۴ تا ۴- یعنی از مرطوب به خشک متغیر است. در این شاخص، گام زمانی قبل در شرایط کنونی خشکسالی لحاظ می شود.

#### ج- روش انجام کار

عملکرد گیاهان زراعی بیشتر از هر عاملی به رطوبت خاک وابسته است. این امر در کشاورزی دیم مشهودتر است. هرچند اثر بارندگی و تبخیر و تعرق نیز بر عملکرد گیاهان غیر قابل انکار است، ولی اثر این پارامترها بر عملکرد به نحوی در رطوبت خاک در نظر گرفته شده است. بنابراین، اگر در پایش خشکسالی کشاورزی وضعیت رطوبت خاک بررسی شود، مناسب تر است. میزان رطوبت خاک به عوامل متعددی مثل بارندگی، تبخیر، خیز موئینگی

#### ۵- شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI)

این شاخص بر مبنای مجموع رطوبت خاک به طور روزانه برای یک سال استوار است و تنها فاکتور اقلیمی مورد استفاده در این شاخص، رطوبت خاک می باشد. این شاخص در مقیاس سالانه به کار می رود. برای محاسبه این شاخص از روش (۵) ناراسیمان و سریناواسان (۲۰۰۵) (روابط ۵ و ۶) استفاده شد.

$$SD_i = \frac{SW_i - MSW_i}{MSW_i - \min SW_i} * 100$$

$$SD_i = \frac{SW_i - MSW_i}{\max SW_i - MSW_i} * 100$$

$$\text{if } SW_i \leq MSW_i$$

(۴)

$$\text{if } SW_i > MSW_i$$

که در آن ها:  $i$  سال مورد نظر، SW مجموع رطوبت روزانه خاک در طی سال مورد نظر، MSW مقدار میانه مجموع رطوبت روزانه خاک در طی دوره آماری، min SW مقدار حداقل مجموع رطوبت روزانه خاک در طی دوره آماری، max SW مقدار حداکثر مجموع رطوبت

جهت استفاده از مدل AquaCrop در این تحقیق داده‌های مورد نیاز آماده شد. برای داده‌های اقلیمی از داده‌های روزانه ۲۸ ساله اقلیمی ایستگاه سینوپتیک قزوین (۲۰۰۸-۱۹۸۲) و برای خاک از اطلاعات میرلطیفی و ستوده‌نیا (۱۳۸۱) استفاده شد. همچنین، فرض شد که سطح خاک بدون پوشش گیاهی (آیش) است. البته از رواناب، آبیاری و تعرق نیز صرف‌نظر شده است. به علت نادیده گرفتن پوشش گیاهی، آبیاری و تعرق حذف خواهند شد. هدف این تحقیق، بررسی وضعیت خشکسالی کشاورزی با استفاده از مدل AquaCrop است.

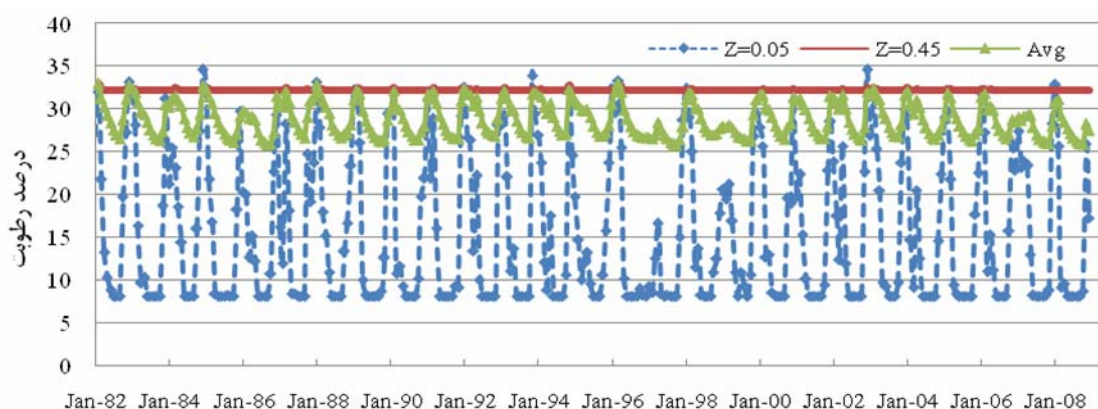
### نتایج و بحث

پس از آماده کردن فایل‌های ورودی و اجرای مدل AquaCrop، رطوبت خاک در لایه‌های مختلف ۱۰ سانتی‌متری و در مرکز هر لایه (۵، ۱۵، ۲۵ و ... سانتی‌متر) را به صورت روزانه برآورد شد. در شکل (۱) تغییرات میانگین رطوبت خاک را در عمق‌های ۵ و ۴۵ سانتی‌متر و همچنین میانگین رطوبت پروفیل خاک تا عمق یک متری را نشان می‌دهد.

وابسته است. همچنین، اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک کمتر در ایستگاه‌های هواشناسی صورت می‌گیرد. بنابراین، برای برآورد آن استفاده از روابط و مدل‌ها ضروری است. مدل AquaCrop مدل نسبتاً ساده‌ای است که به اطلاعات خاص و پیچیده‌ای احتیاج ندارد. کارآمدی این مدل توسط عزیزاده و همکاران (۱۳۸۹) گزارش شده است.

اساس مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پروسه‌ها توسط استدیوتو و همکاران (۲۰۰۹) و الگوریتم مورد استفاده در مدل و توصیف عملیات توسط ریس و همکاران (۲۰۰۹) ارائه شده است. اگرچه مدل AquaCrop بر مبنی فرآیندهای بیوفیزیکی پیچیده بنا نهاده شده (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۹)، تعداد نسبتاً کمی از پارامترهای ساده و قابل دسترس به عنوان پارامترهای ورودی استفاده می‌شود. ورودی‌های مدل شامل چهار دسته از اطلاعات شامل داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه می‌باشند.

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رطوبت خاک از بیلان رطوبت در ناحیه توسعه ریشه استفاده می‌کند. در این بیلان، ورودی رطوبت به ناحیه توسعه ریشه شامل بارندگی، آبیاری و صعود موئینگی و خروج رطوبت از طریق تبخیر و تعرق، رواناب و نفوذ عمقی است (ریس و همکاران ۲۰۰۹).



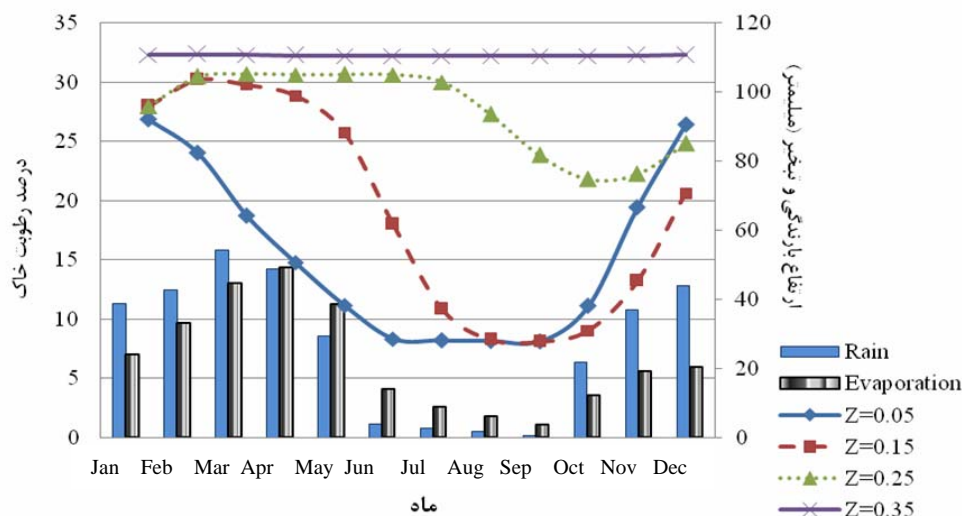
شکل ۱- تغییرات رطوبت خاک طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۰۸ در عمق‌های ۵، ۴۵ سانتیمتر و میانگین ۱ متری

تغییرات رطوبت از حدود هشت درصد تا ۳۲ درصد (پژمردگی دائم تا ظرفیت زراعی) در ماه‌های مختلف متغیر است. علت

همان‌گونه که در شکل (۱) نمایان است، تغییرات ماهیانه رطوبت خاک در عمق پنج سانتی‌متری بسیار شدید است. این

کاملاً مشخص است، تغییرات رطوبت خاک در لایه‌های سطحی (پنج و ۱۵ سانتیمتری) به شدت تابع بارندگی و تبخیر در منطقه است. البته زمان عکس‌العمل رطوبت خاک به بارندگی و البته تبخیر متفاوت است. به عبارت دیگر تغییرات رطوبت خاک به بارندگی و تبخیر ماهیانه در عمق پنج سانتی-متری سریع‌تر و در عمق ۱۵ سانتی‌متری با تاخیر زمانی صورت می‌گیرد. در عمق ۲۵ سانتی‌متری نیز علاوه بر تاخیر زمانی، تعدیل رطوبتی نیز رخ داده است. در عمق ۲۵ سانتی‌متری، تاثیرپذیری رطوبت خاک از بارندگی و تبخیر کمتر بوده و البته مقداری از رطوبت این عمق به وسیله پدیده موینگی جبران می‌شود. البته همان‌طور که ذکر شد فرض شده کشتی بر روی سطح خاک وجود نداشته است. در صورت کشت گیاه، عمقی از خاک که در معرض تبخیر و تعرق قرار می‌گرفت، بیشتر شده و آبیاری نیز رطوبت خاک تا عمق بیشتری را افزایش می‌دهد.

تغییرات رطوبت خاک در لایه‌های سطحی خاک کاملاً منطقی است. لایه سطحی خاک به دلیل تابش مستقیم نور خورشید در معرض تبخیر بیشتر است و همچنین بارندگی (حتی به میزان کم) نیز باعث افزایش رطوبت خاک خواهد شد. اما همان‌طور که در شکل (۱) نیز مشخص است، تغییرات رطوبت خاک در عمق‌های پایین‌تر بسیار ناچیز است. در این شکل، همچنین تغییرات میانگین رطوبت خاک طی سال، میانگین ماهیانه رطوبت خاک در عمق‌های مختلف همراه با مقادیر میانگین بارندگی و تبخیر از سطح خاک طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۰۸ محاسبه شد. نتایج در شکل (۲) ارائه شده است. در این شکل نیز همان‌طور که مشخص است در عمق بیشتر از ۳۵ سانتی‌متر تقریباً رطوبت خاک ثابت بوده است. اما، رطوبت خاک در لایه‌های سطحی به خصوص در عمق پنج و ۱۵ سانتی‌متری به شدت متغیر است. همان‌طور که در این شکل



شکل ۲- تغییرات ماهیانه بارندگی و تبخیر و رطوبت خاک در لایه‌های مختلف در طول ماه‌های مختلف سال

همان‌گونه که در جدول (۳) مشخص است، بیشترین و کمترین میزان بارندگی به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۰۸ رخ داده است. شاخص‌های خشکسالی که بر اساس بارندگی محاسبه می‌شوند (PNI، DI، SPI و CZI) نیز حداکثر و حداقل این شاخص‌ها را نیز در همین سال‌ها برآورد می‌نمایند. اما در مورد شاخص SDMI، بیشترین مقدار در سال ۱۹۹۴ و

در ادامه برای محاسبه شاخص خشکسالی SMDI، از ارقام میانگین رطوبت پروفیل خاک استفاده شد. برای محاسبه شاخص SMDI، لازم است درصد کمبود رطوبت خاک (SD) محاسبه شود. نتایج مربوط به SD و SMDI در جدول (۳) ارائه شده است. البته در این جدول مقادیر مربوط به شاخص‌های خشکسالی دیگر که بر اساس بارندگی محاسبه می‌شوند نیز آورده شده است.

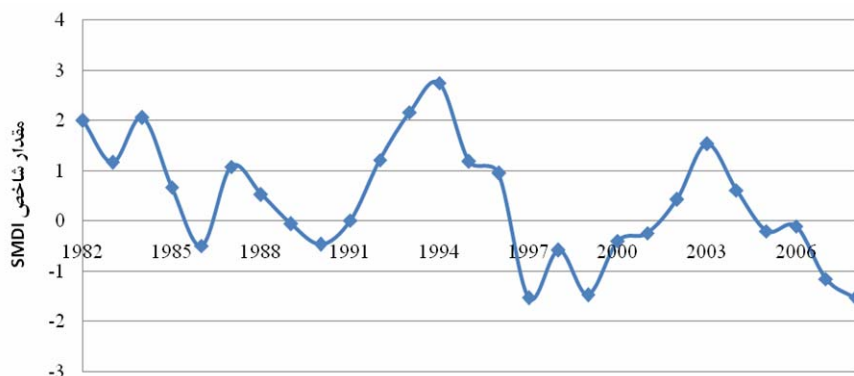
دیگر شاخص‌ها و بارندگی رخ داده است. بیشترین مقدار این شاخص پس از یک دوره پر باران طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۴ و در سال ۱۹۹۴ رخ داده است. کمترین مقدار نیز شرایط مشابهی را داشته و پس از یک دوره کم باران رخ داده است. سال‌های ۱۹۹۷ و ۱۹۹۹ در یک دوره خشکسالی بین ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ و سال ۲۰۰۸ پس از یک دوره خشک از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ رخ داده است (شکل ۴).

کمترین مقدار در سال‌های ۱۹۹۷، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۸ رخ داده است. نکته بسیار مهم در مورد شاخص SMDI این است که این شاخص علاوه بر شرایط کنونی رطوبت خاک به شرایط سال قبل نیز توجه دارد، و این بر خلاف شاخص‌های دیگر است که تنها شرایط سال مورد نظر را در نظر گرفته و به شرایط سال قبل توجهی ندارند و مقادیر آن‌ها به شدت وابسته به میزان بارندگی در همان سال است. بنابراین مشاهده می‌شود بیشترین و کمترین مقدار این شاخص در سال‌هایی متفاوت نسبت به

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های خشکسالی مختلف طی سال‌های ۱۹۸۲-۲۰۰۸ در ایستگاه سینوپتیک قزوین

سال	بارندگی (mm)	تبخیر (mm)	SD	SMDI	PNI	DI	SPI	CZI
۱۹۸۲	۴۹۷	۳۱۵	۱۰۰	۲/۰	۱۵۲/۶	۴	۱/۸	۲/۰
۱۹۸۳	۲۸۰	۲۶۹	۸/۳	۱/۲	۸۶/۰	-۱	-۰/۵	-۰/۵
۱۹۸۴	۴۲۹	۳۱۸	۷۴/۰	۲/۱	۱۳۱/۸	۳	۱/۲	۱/۲
۱۹۸۵	۲۴۸	۲۱۳	-۱۷/۸	۰/۷	۷۶/۳	-۳	-۰/۹	۰/۹
۱۹۸۶	۳۰۹	۳۰۱	-۴۱/۴	-۰/۵	۹۴/۹	۰	-۰/۱	-۰/۲
۱۹۸۷	۴۰۷	۳۳۷	۶۶/۵	۱/۱	۱۲۴/۹	۳	۱/۰	۱/۰
۱۹۸۸	۳۵۲	۲۸۶	-۰/۵	۰/۵	۱۰۸/۳	۱	۰/۴	۰/۳
۱۹۸۹	۲۶۰	۲۲۱	-۱۵/۹	-۰/۱	۷۹/۸	-۲	-۰/۷	-۰/۸
۱۹۹۰	۲۶۳	۱۹۵	-۲۱/۹	-۰/۵	۸۰/۸	-۲	-۰/۷	-۰/۷
۱۹۹۱	۳۴۹	۲۵۸	۱۲/۵	۰/۰	۱۰۷/۲	۱	۰/۴	۰/۳
۱۹۹۲	۳۸۱	۳۵۰	۶۰/۴	۱/۲	۱۱۷/۰	۲	۰/۷	۰/۷
۱۹۹۳	۳۷۴	۲۸۱	۷۷/۸	۲/۲	۱۱۵/۱	۲	۰/۶	۰/۶
۱۹۹۴	۴۵۳	۳۲۶	۸۳/۵	۲/۷	۱۳۹/۴	۴	۱/۴	۱/۵
۱۹۹۵	۲۱۱	۲۵۲	-۹/۵	۱/۲	۶۵/۰	-۴	-۱/۴	-۱/۴
۱۹۹۶	۴۶۲	۲۹۸	۱۷/۹	۱/۰	۱۴۲/۱	۴	۱/۵	۱/۶
۱۹۹۷	۲۰۸	۱۹۵	-۱۰۰	-۱/۵	۶۴/۰	-۴	-۱/۵	-۱/۴
۱۹۹۸	۳۲۷	۳۰۴	۹/۰	-۰/۶	۱۰۰/۴	۰	۰/۱	۰/۰
۱۹۹۹	۲۴۴	۲۱۲	-۵۸/۸	-۱/۵	۷۵/۱	-۳	-۱/۰	-۱/۰
۲۰۰۰	۳۰۶	۲۷۱	۱۷/۱	-۰/۴	۹۴/۰	۰	-۰/۱	-۰/۲
۲۰۰۱	۲۲۴	۲۲۷	-۲/۰	-۰/۲	۶۸/۹	-۳	-۱/۲	-۱/۲
۲۰۰۲	۳۳۹	۲۷۲	۲۷/۸	۰/۴	۱۰۴/۳	۰	۰/۳	۰/۲
۲۰۰۳	۴۱۰	۳۶۳	۶۶/۰	۱/۵	۱۲۵/۹	۳	۱/۰	۱/۰
۲۰۰۴	۳۲۶	۳۱۹	-۷/۵	۰/۶	۱۰۰/۲	۰	۰/۱	۰/۰
۲۰۰۵	۲۸۴	۲۳۲	-۲۵/۴	-۰/۲	۸۷/۳	-۱	-۰/۴	-۰/۵
۲۰۰۶	۳۶۱	۳۱۰	۰	-۰/۱	۱۱۰/۸	۱	۰/۵	۰/۴
۲۰۰۷	۳۲۷	۳۳۵	-۵۵/۲	-۱/۲	۱۰۰/۵	۰	۰/۱	۰/۰
۲۰۰۸	۱۵۵	۱۶۴	-۴۷/۶	-۱/۵	۴۷/۶	-۴	-۲/۴	-۲/۰۵
حداقل	۱۵۵	۱۶۴	-۱۰۰	-۱/۵	۴۷/۶	-۴	-۲/۴	-۲/۰۵
حداکثر	۴۹۷	۳۶۳	۱۰۰	۲/۷	۱۵۲/۶	۴	۱/۸	۲/۰
میانگین	۳۲۵	۲۷۵	۸/۰	۰/۴	۱۰۰/۰۰	۰	۰/۰۰	۰/۰۰





شکل ۳- تغییرات سالانه شاخص SMDI در ایستگاه سینوپتیک قزوین

ناراسیمان و سریناواسان (۲۰۰۵) نیز نشان داد که ضریب تعیین شاخص SMDI نسبت به شاخص SPI پایین و برابر با ۰/۶۵ است. شاخص‌های خشکسالی PNI, DI, SPI و CZI همه بر اساس بارندگی بوده و به همین علت ضریب تبیین بین این شاخص‌ها و با بارندگی بسیار بالا است (ضریب بالای ۰/۹۵ است). در بین این شاخص‌ها نیز شاخص DI به علت دهک-بندی، ضریب تبیین پایین تری نسبت به شاخص‌های دیگر دارد. تبخیر نیز ضریب تبیین بالاتری با شاخص‌های PNI, DI, SPI و CZI نسبت به شاخص SMDI دارد. البته نتایج ناراسیمان و سریناواسان (۲۰۰۵) نشان داد که ضریب تبیین شاخص SMDI با شاخص کمبود تبخیر و تعرق (ETDI) برابر با ۰/۷۹ و با شاخص SPI برابر با ۰/۶۹ است. البته، در تحقیق ایشان تبخیر و تعرق لحاظ شده بود، در حالی که در این تحقیق فقط تبخیر از سطح خاک محاسبه شده و علت نتایج متفاوت در این تحقیق به همین موضوع مربوط است.

همچنین، نتایج ناراسیمان و سریناواسان (۲۰۰۵) نیز نشان داد که شاخص SMDI برای تحلیل خشکسالی کشاورزی بسیار مفید است. نتایج آن‌ها نشان داد که تبخیر و تعرق گیاهان وابستگی بیشتری به شاخص SMDI نسبت به شاخص SPI دارد. ضریب تبیین این شاخص با شاخص‌های SPI حدوداً برابر با ۰/۶۵ و با شاخص کمبود تبخیر و تعرق (ETDI) برابر با ۰/۷۹ است.

بررسی روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی نشان می‌دهد که تمامی نمودارها افزایش شدت خشکسالی را در منطقه پیش‌بینی می‌کنند. به عبارت دیگر، میزان بارندگی‌ها در منطقه رو به کاهش بوده و خطر خشکسالی در منطقه رو به افزایش است. این موضوع باید در این منطقه که یکی از قطب‌های کشاورزی است، مورد توجه قرار گیرد. نتایج تمامی شاخص‌ها نشان می‌دهد از سال ۱۹۹۴ به بعد منطقه سال نسبتاً پرآبی را نداشته است. همچنین، در سال ۲۰۰۸، خشکسالی بسیار شدیدی در منطقه رخ داده است. بیشترین و کمترین مقدار شاخص‌های خشکسالی در سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۰۸ می‌باشد. در یک دهه اخیر، با توجه به تمامی شاخص‌های خشکسالی، سال ۲۰۰۸ خشک‌ترین سال، سال ۲۰۰۳ مرطوب‌ترین سال و سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۴، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ شرایط نرمالی را داشته است. در جدول (۳)، شاخص‌های SPI و CZI تقریباً پیش‌بینی مشابهی در تعیین شدت خشکسالی داشته است.

در ادامه روابط بین شاخص‌های خشکسالی و بارندگی و تبخیر بررسی شد. نتایج در جدول (۴) نشان داده شده است. در این بین، شاخص SMDI کمترین ضریب تبیین را با شاخص‌های خشکسالی دیگر و همچنین با بارندگی و تبخیر نشان می‌دهد. علت پایین بودن ضریب تبیین با شاخص‌های خشکسالی، تفاوت در ماهیت این شاخص است. نتایج

جدول ۴- ماتریس همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی

CZI	SPI	DI	PNI	SMDI	SD	تبخیر	بارندگی	
۰/۹۹۹	۰/۹۸۸	۰/۹۶۵	۱	۰/۵۰۳	۰/۶۴۰	۰/۶۵۷	۱	بارندگی
۰/۶۶۴	۰/۶۹۰	۰/۶۸۲	۰/۶۵۷	۰/۳۳۶	۰/۴۲۱	۱		تبخیر
۰/۶۳۷	۰/۶۱۵	۰/۶۵۶	۰/۶۴۰	۰/۷۷۶	۱			SD
۰/۴۹۹	۰/۴۸۳	۰/۴۸۱	۰/۵۰۳	۱				SMDI
۰/۹۹۹	۰/۹۸۸	۰/۹۶۵	۱					PNI
۰/۹۶۶	۰/۹۵۵	۱						DI
۰/۹۹۱	۱							SPI
۱								CZI

## نتیجه‌گیری

مقدار شاخص‌های خشکسالی مطابق با تغییرات بارندگی و در سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۰۸ می‌باشد. نکته بسیار مهم در مورد شاخص SMDI این است که این شاخص علاوه بر شرایط کنونی رطوبت خاک به شرایط سال قبل نیز توجه دارد. شاخص SMDI کمترین ضریب تبیین را با شاخص‌های خشکسالی دیگر و همچنین با بارندگی و تبخیر نشان می‌دهد. شاخص‌های خشکسالی PNI، DI، SPI و CZI همه بر اساس بارندگی بوده و به همین علت ضریب تبیین بین این شاخص‌ها و همچنین ضریب تبیین این شاخص‌ها با بارندگی بسیار بالا است (ضریب تبیین بالای ۰/۹۵ است). در بین این شاخص‌ها نیز شاخص DI به علت دهک‌بندی، ضریب تبیین پایین‌تری نسبت به شاخص‌های دیگر دارد.

خشکسالی از نظر کشاورزی بیشتر به رطوبت خاک توجه نموده و خاک را به عنوان محیط اصلی برای تامین نیاز آبی در نظر می‌گیرد. از مهمترین شاخص‌های خشکسالی که رطوبت خاک را به عنوان پارامتر ورودی در نظر می‌گیرد، می‌توان به شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI) اشاره کرد. برای برآورد تخمین رطوبت خاک از مدل AquaCrop استفاده شد. از نتایج مدل در تعیین شاخص خشکسالی SMDI و مقایسه آن با شاخص‌های خشکسالی بر اساس بارندگی مثل PNI، DI، SPI و CZI استفاده شد. بیشترین مقدار شاخص SDMI در سال ۱۹۹۴ و کمترین مقدار آن در سال‌های ۱۹۹۷، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۸ رخ داده است. در مورد شاخص‌های دیگر، بیشترین و کمترین

## منابع

- انصافی مقدم، ط. ۱۳۸۶. ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران. جلد ۱۴، شماره ۲، صص ۲۸۸-۲۷۱.
- بذرافشان، ج. ۱۳۸۱. مطالعه تطبیقی برخی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه هواشناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- علیزاده، ح.، ب.، نظری، م.، پارسی‌نژاد، ه.، رضایی اعتدالی، و ح. ر. جانباز. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم آبیاری گندم و جو در منطقه کرج. مجله آبیاری و زهکشی ایران. جلد ۲، شماره ۴، صص ۲۸۳-۲۷۳.

۴. محمدیان، آ.، م. کوهی، آ.، آدینه‌بیگی، س. ج. رسولی، و ب. بذرافشان. ۱۳۸۹. مقایسه پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI، DI و PNI و پهنه‌بندی آنها (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی). مجله پژوهش حفاظت آب و خاک. جلد ۱۷، شماره ۱، صص ۱۷۷-۱۸۴.
۵. میرلطیفی، س. م. و ع. ستوده‌نیا. ۱۳۸۱. شبیه‌سازی تاثیر کم آبیاری بر عملکرد محصول ذرت. گزارش نهایی طرح تحقیقات کاربردی معاونت پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران وزارت نیرو. ص ۲۲۱.
6. Byun, H.R. and D. A. White. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*. 12: 2747-2756.
7. Gibbs, W. J., and J. V. Maher. 1967. Rainfall Deciles as Drought Indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin*, No. 48, Commonwealth of Australia, Melbourne.
8. Kendall, M., and A. Stuart. 1977. *The advance theory of statistics*. 4<sup>th</sup> ed., Vol. 1. New York: Macmillan.
9. McKee, T. B., N. J., Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proc, 8th Conf. on Applied Climatology*, January 17-22, American Meteorological Society, Massachusetts, Pp: 179-184.
10. McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. 1995. Drought Monitoring with Multiple Time Scales. In *Proc, 9th Conf. on Applied Climatology*, January 15-20, American Meteorological Society, Massachusetts, Pp: 233-236.
11. Narasimhan, B. and R. Srinivasan. 2005. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agriculture drought monitoring. *J. Agriculture and Forest Meteorology*, 133: 69-88.
12. Palmer, W.C. 1965. *Meteorological drought*, Research Paper No. 45. US Department of Commerce Weather Bureau, Washington, DC.
13. Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and soft ware description. *Agron. J.* 101:438-447.
14. Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.*, 101:426-437.
15. Willeke, G., J. R. M., Hosking, J. R., Wallis, and N. B. Guttman. 1994. *The national drought atlas*. Institute for Water Resources Report 94, NDS. 4, U.S., Army Corp of Engineers, 587p.