

## توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی برای گندم دیم

### در استان کرمانشاه با استفاده از روش‌های آماری و هوشمند

صالح ارشد، سعید مرید\*، محمدرضا مابشری و مجید آقا علیخانی\*\*

\* نگارنده مسئول، نشانی: تهران، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵، تلفن: ۴۴۱۹۴۹۱۱ (۰۲۱)، پیام‌نگار:

morid\_sa@modares.ac.ir

\*\* به‌ترتیب دانشجوی دکتری؛ دانشیار دانشگاه تربیت مدرس؛ استادیار دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛

و استادیار دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۲/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱/۳۱

### چکیده

در سال‌های اخیر پدیده خشکسالی خسارت‌های فراوانی به بخش کشاورزی کشور وارد آورده که وجود یک سیستم پیش‌آگاهی از تأثیر آن بر محصولات کشاورزی را برای کمک به سیاست‌گذاران و ذی‌نفعان ضروری می‌سازد. در این تحقیق، مدلی برای ارزیابی پیش‌بینی آسیب ناشی از خشکسالی کشاورزی برای استان کرمانشاه با استفاده از روش‌های آماری و هوشمند توسعه یافته است. این مدل به‌طور خاص برای محصول گندم دیم است و می‌تواند خود را همراه با رشد گیاه و در مراحل مختلف فنولوژیک به‌نگام کند. در فرایند توسعه مدل، از شاخص‌های خشکسالی PDSI، Z-index، CMI، SPI و EDI استفاده و جهت انتخاب متغیرهای مناسب، روش‌های الگوریتم ژنتیک، و شبکه مصنوعی عصبی به‌کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص Z-index نسبت به بقیه شاخص‌ها آسیب ممکن را بهتر پیش‌بینی می‌کند. همچنین، مدل با گذشت زمان در مراحل مختلف بحرانی رشد از برازش بهتری برخوردار می‌شود و به‌خصوص از مرحله سوم به بعد، سطح معنی‌داری روابط به ۱ درصد رسیده و نتایج پیش‌بینی قابل اتکا می‌شود. همچنین، اتصال مدل به محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی قابلیت‌های آن را برای تحلیل‌های لازم مکانی و ارائه کارآمدتر نتایج ارتقاء نمود.

### واژه‌های کلیدی

ارزیابی آسیب، استان کرمانشاه، الگوریتم ژنتیک، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، خشکسالی کشاورزی

### مقدمه

اجتماعی دسته‌بندی می‌شود (Wilhite & Glantz, 1985). خشکسالی کشاورزی، پرهزینه‌ترین تبعات این پدیده، هنگامی اتفاق می‌افتد که میزان رطوبت موجود در خاک و بارندگی در طول فصل رشد کاهش یابد. پارامترهایی که در تعریف خشکسالی کشاورزی مد نظر قرار می‌گیرد عبارت‌اند از: کمبود بارندگی، جنبه‌های فیزیکی و بیولوژیک گیاهان، اثر متقابل خاک-گیاه-آتمسفر، و موازنه بین نیاز آبی گیاه و میزان عرضه آن توسط محیط. بین عملکرد محصول مزارع دیم و تنش خشکسالی

خشکسالی یکی از پدیده‌های محیطی و بخش جدایی‌ناپذیر تغییرات اقلیمی است که ممکن است در هر منطقه رخ دهد. این پدیده را می‌توان از جنبه‌های مختلفی مانند اقلیمی، مدیریت منابع آب، اجتماعی-اقتصادی، کلی و جزئی، نقطه‌ای یا منطقه‌ای، شدت و مدت، و فرکانس بررسی و تجزیه و تحلیل کرد (Boken, 2005). انواع خشکسالی به‌طور کلی در چهار طبقه هواشناسی، آب‌شناسی، کشاورزی، و اقتصادی-

آبی خشکسالی تحلیل و مقایسه شده است. این تحقیق اگر برای شرایط دیم و آبی به طور مجزا انجام می‌گرفت می‌توانست آن را از دقت بیشتری برخوردار سازد.

در تحقیقی دیگر، تامپسون (Thompson, 1988) آثار تغییرات آب و هوایی را بر ذرت و سویا بررسی و از متغیرهای مجموع بارندگی پیش از فصل رشد (سپتامبر تا ژوئن)، دمای ماه ژوئن، بارندگی، و دمای ماه‌های ژوئیه و اکتبر برای این بررسی استفاده کرد. وی نشان داد که پارامترهای اقلیمی در فصل رشد امکان توجیه نوسانات محصولات ذرت و سویا را تا ۶۴ درصد مواقع دارد. همچنین واکر (Walker, 1989) نیز با استفاده از داده‌های آب و هوایی پیش از فصل رشد و در حین آن، مدلی با نتایج قابل قبول برای پیش‌بینی عملکرد محصول ذرت ارائه کرد. به منظور بررسی اثر خشکسالی بر محصول ارزن در هندوستان، کومر (Kumar, 1998) معادلات رگرسیونی چندگانه را ارائه داد که ویژگی‌های فنولوژیک و آب و هوایی منطقه، متغیرهای ورودی آنها هستند. با استفاده از این مدل‌ها، عملکرد ارزن در فواصل مختلف زمانی، قبل از برداشت، و تقریباً در زمان برداشت پیش‌بینی شد. نتایج نشان می‌دهد که این مدل‌ها توانایی پیش‌بینی بیش از ۷۴ درصد واریانس موجود در عملکرد را دارند.

با همکاری مشترک مرکز ملی تخفیف خشکسالی<sup>۵</sup> (NDMC)، مرکز ملی پیش‌بینی اقلیمی<sup>۶</sup> (CPC)، و وزارت کشاورزی ایالات متحده<sup>۷</sup> (USDA) یک سامانه جامع پایش خشکسالی به منظور ارزیابی مطلوب شدت خشکسالی‌ها طراحی شد.

این سامانه بر اساس ترکیبی از شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص رطوبت محصول<sup>۸</sup> (CMI)، مدل رطوبت خاک مرکز پیش‌بینی اقلیمی، مدل جریان رودخانه<sup>۹</sup> (USGS)، درصد نرمال بارش، مدل رطوبت

رابطه‌ای نزدیک وجود دارد، بنابراین عملکرد محصول، شاخصی قابل اعتماد برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی است (Kumar & Panu, 1997). شاخص‌های خشکسالی جهت بیان کمی این پدیده تدوین شده‌اند تا با استفاده از آنها اطلاعات لازم درباره‌ی آغاز، خاتمه، و شدت آن در مقیاس زمانی و مکانی مختلف، فراهم آید (Alley, 1984). از معمول‌ترین این شاخص‌ها می‌توان به شاخص شدت خشکسالی پالمر<sup>۱</sup> (PDSI) و شاخص ناهنجاری رطوبتی (Z-index) (Palmer, 1965)، شاخص ناهنجاری بارندگی<sup>۲</sup> (RAI) (van Rooy, 1965)، شاخص رطوبت محصول (CMI) (Palmer, 1968)، شاخص Z چینی (Kendall & Stuart, 1977)، شاخص بالم-مولی<sup>۳</sup> (BMDI) (Bhalme & Mooley, 1980)، شاخص بارندگی استاندارد (SPI) (McKee et al., 1993) و شاخص خشکسالی مؤثر<sup>۴</sup> (EDI) (Byun & Wilhite, 1999) اشاره کرد که پاسخ هر یک از این شاخص‌ها به خشکسالی متفاوت است و لزوماً این طور نیست که همه آنها معرفی مناسب برای خشکسالی کشاورزی باشند. بارندگی جزء داده‌های اصلی این شاخص‌هاست ولی بعضی از آنها به داده‌های دما نیز نیاز دارند. این شاخص‌ها ورودی‌های اصلی برای ارزیابی وضعیت خشکسالی کشاورزی هستند که با ارتباط با عملکرد محصول می‌توان به این هدف رسید (Kumar & Panu, 1997).

در این زمینه، ویل هایت و نیل (Wilhite & Neild, 1982) در ایالت نبراسکا با استفاده از آمار عملکرد محصول یونجه، خشکسالی را بر اساس میزان انحراف عملکرد محصول از متوسط آن تعریف کردند. بدین معنی که اگر افت عملکرد در سالی معین از ۱۰ درصد نرمال آن منطقه بیشتر شود، خشکسالی اتفاق افتاده است. در این مطالعه بدون تفکیک مناطق دیم و

1- Palmer Drought Severity Index

4- Effective Drought Index

7- U.S. Department of Agriculture

2- Rain Anomaly Index

5- National Drought Mitigation Center

8- Crop Moisture Index

3- Bhalme and Mooley Drought Index

6- Climate Prediction Center

9- U.S. Geological Survey

توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی برای گندم...

و بهنگام خشکسالی و توسعه یک سیستم پیش آگاهی می‌تواند ابزاری مفید باشد تا با دخالت شاخص‌های مؤثر و برآورد رابطه آن با عملکرد محصولات، بتوان خشکسالی کشاورزی در مقاطع زمانی قبل، ریسک وقوع، و خسارات مربوط را پیش‌بینی کرد و آمادگی لازم را برای برخورد با آن فراهم آورد.

این تحقیق برای رسیدن به این هدف مهم است و تلاش خواهد شد تا میزان آسیب‌پذیری گندم دیم تحت تأثیر خشکسالی استان کرمانشاه را در مراحل مختلف فنولوژی این محصولات پیش‌بینی کند.

#### منطقه مورد مطالعه و منابع داده‌ها

استان کرمانشاه با مساحتی در حدود ۲۴۹۸۰۰۰ هکتار در غرب ایران بین ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است و ۱۱ شهرستان دارد (شکل ۱).

این استان در جهت شمال غربی رشته کوه زاگرس واقع است و استانی کوهستانی محسوب می‌شود. میزان متوسط بارندگی سالانه در بخش‌های مختلف استان بین ۳۷۵ تا ۵۷۵ میلی‌متر است.

سطح کل اراضی کشاورزی استان تقریباً ۸۲۰۰۰۰ هکتار است که حدود ۶۲۰۰۰۰ هکتار آن دیم‌زار است و استان را به‌عنوان یکی از قطب‌های دیم کشور مطرح کرده است.

برای این تحقیق آمار روزانه بارندگی و دمای هوا از ۳۳ ایستگاه سازمان هواشناسی و ۲۳ ایستگاه وزارت نیرو تهیه شد و پس از بررسی‌های آماری و مینا قرار دادن پایه آمار ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۳، بر اساس کیفیت داده‌ها و دارا بودن کمترین نقص آماری و همچنین پوشش مناسب

خاک USDA/NASS و اطلاعات ماهواره‌ای پوشش گیاهی کار می‌کند (Svoboda *et al.*, 2002). کوپرینگ و پاپکریاکو (Quiring & Papakryiakou, 2003) نیز کارایی چهار شاخص خشکسالی کشاورزی شامل شاخص شدت خشکسالی پالمر، شاخص Z پالمر، شاخص بارش استاندارد شده<sup>۱</sup> (SPI)، و شاخص خشکسالی<sup>۲</sup> (NOAA) از نظر پایش خشکسالی کشاورزی و پیش‌بینی عملکرد محصول گندم بهاره در دیم‌زارهای کانادا را مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص Z پالمر، مناسب‌ترین شاخص برای سنجش خشکسالی و پیش‌بینی عملکرد گندم بهاره (در دوره‌های تنش رطوبتی) است.

بررسی‌های وو و ویل‌هایت (Wu & Wilhite, 2004)

منجر به ارائه یک مدل عملیاتی به‌منظور ارزیابی ریسک خشکسالی کشاورزی در ایالت نبراسکا آمریکا شد. این محققان می‌گویند استفاده از گام زمانی ماهانه در این ارزیابی مطلوب نیست زیرا رشد و نمو محصول از رطوبت چند روزه یا هفتگی متأثر است و به‌همین دلیل از گام زمانی هفتگی استفاده کردند. به کمک این سامانه، ریسک افت محصول در نواحی مختلف مشخص شد، هر چند از مفاهیم قوی آماری ریسک کمتر استفاده شده بود. در این مدل شاخص‌های مورد استفاده در تعیین موجودی رطوبت شامل شاخص بارندگی استاندارد شده و شاخص خشکسالی محصول خاص<sup>۳</sup> (CSDI) با گام‌های زمانی متفاوت بود. مدل‌هایی که این محققان ارائه داده‌اند، وضعیت ریسک خشکسالی را در ۵۷ تا ۸۵ درصد مواقع صحیح تشخیص می‌دهد.

این مقدمه مختصر اهمیت توجه به مدیریت خشکسالی به‌ویژه در کشورهای آشکار و برخورد علمی و عملی با آن را طلب می‌کند که بخش کشاورزی نقشی مهم در کلان اقتصاد آنها دارد. در این خصوص پایش مؤثر

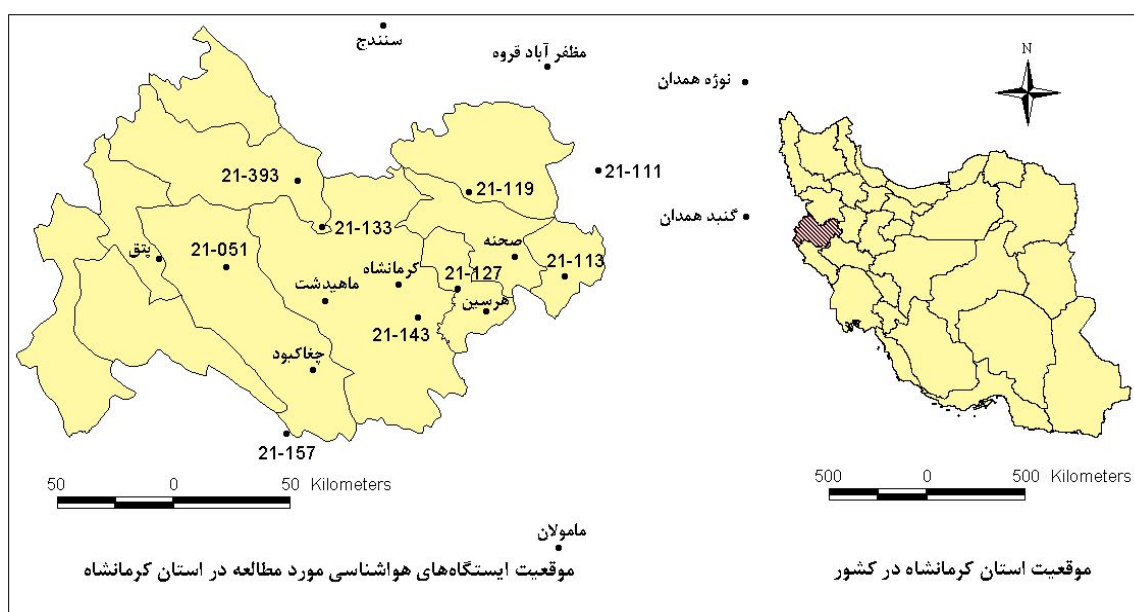
1- Standardize Precipitation Index

3- Crop Specific Drought Index

2- National Oceanic and Atmospheric Administration

منطقه، نهایتاً ۲۰ ایستگاه انتخاب شد که موقعیت آنها در شکل ۱ آمده است. داده‌های مورد نیاز بعدی این تحقیق، آمار عملکرد دیم استان بود. برای این قسمت در مرحله اول داده‌های سطح زیر کشت و عملکرد محصول در هر یک از ۱۱ شهرستان استان کرمانشاه از بانک اطلاعاتی وزارت کشاورزی تهیه و برای تکمیل داده‌ها از مراکز خدمات کشاورزی در استان بازدید شد. سطح زیر کشت و عملکرد گندم، که کشت غالب منطقه

(۷۵ درصد) است، در بازه زمانی ۸۳-۱۳۶۳ نیز تهیه شد. از ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی سرارود کرمانشاه نیز اطلاعات مراحل مختلف فنولوژی گندم اخذ شد. به‌منظور بررسی مشخصات گروه‌های خاک در سطح استان کرمانشاه از نقشه خاک تهیه شده در سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور استفاده شد که اطلاعات مورد نظر از قبیل ظرفیت آب در دسترس<sup>۱</sup> برای هر شهرستان در محدوده اراضی زراعی با استفاده از روش میانگین وزنی منطقه‌ای محاسبه شد.



شکل ۱- موقعیت استان کرمانشاه در کشور و وضعیت پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه مورد مطالعه

ماده و روش‌ها  
آماده‌سازی داده‌ها  
انتخاب شاخص‌های خشکسالی  
برای این تحقیق پنج شاخص CMI, Z-index, PDSI, SPI و EDI که بیشتر در منابع نیز توصیه شده‌اند

جهت اندازه‌گیری خشکسالی کشاورزی در اراضی دیم منطقه مطالعاتی مقایسه و از آنها در توسعه مدل ارزیابی ریسک استفاده شد. در اینجا شاخص‌های مذکور به‌طور خلاصه تشریح می‌شدند.

توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی برای گندم...

خاک، و میزان تغذیه بر پایه اطلاعات یک دوره حداقل ۳۰ ساله است. انحراف رطوبت نسبت به شرایط نرمال ( $d$ ) از اختلاف بارش یک ماه مشخص نسبت به متوسط بارش بلندمدت آن ماه محاسبه می‌شود. سپس Z-index یا ( $Z_i$ ) از حاصل ضرب  $d$  و یک فاکتور وزنی ( $K$ ) برای ماه  $i$  محاسبه می‌شود (رابطه ۱):

$$Z_i = d_i \cdot K_i \quad (1)$$

که در آن،  $K_i$  = فاکتور که در ابتدا با استفاده از یک ضریب تجربی ( $K'$ ) تعیین و سپس با یک فاکتور تصحیح منطقه‌ای تدقیق می‌شود. مقادیر ماهانه  $K_i$  مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$K_i = \frac{17.67}{\sum D_i K_i} K' \quad (2)$$

در این رابطه،  $D_i$  = متوسط قدر مطلق مقادیر  $d$  برای ماه  $i$  است.

شاخص PDSI (مشخص شده با  $X_i$ ) بر اساس ترکیبی از مقادیر Z-index ( $Z_i$ ) ماه جاری و PDSI ماه قبلی محاسبه می‌شود.

$$X_i = \frac{Z_i}{3} + 0.897 \times X_{i-1} \quad (3)$$

در حالی که هر دو شاخص PDSI و Z-index از داده‌های یکسان به دست می‌آیند، مقادیر ماهانه آنها کاملاً متفاوت هستند. شاخص Z-index تحت تأثیر وضعیت رطوبت در ماه قبل نیست و مقادیر آن از ماهی به ماه دیگر

## شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) و شاخص ناهنجاری رطوبتی (Z-index)

هر دو شاخص PDSI و Z-index را که پالم (Palmer, 1965) توسعه داده است به‌طور گسترده در مطالعات خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این دو شاخص با استفاده از حل معادله بیلان رطوبت خاک محاسبه می‌شود که نیاز به داده‌های روزانه بارندگی و دمای هوا و همچنین اطلاعات ظرفیت آب در دسترس خاک (فاکتور خاک) منطقه دارد. مدل پالم پروفیل خاک را به دو لایه سطحی و تحتانی تقسیم می‌کند و حداکثر مقادیر رطوبت قابل دسترس در لایه سطحی و قابل دسترس در لایه تحتانی خاک را به ترتیب ۲۵ و ۱۷۵ میلی‌متر فرض می‌کند. رواناب در صورتی اتفاق می‌افتد که هر دو لایه سطحی و تحتانی به ظرفیت رطوبتی کامل خود رسیده باشند. مادامی که رطوبت قابل دسترس در لایه سطحی تمام نشده باشد، رطوبت موجود در لایه تحتانی دست نخورده باقی می‌ماند. تبخیر و تعرق پتانسیل ( $PE$ ) با استفاده از روش ترن وایت (Thornwaite, 1948) محاسبه می‌شود. اتلاف رطوبت از لایه سطحی ( $L_s$ ) از طریق تبخیر و تعرق، با نرخ پتانسیل اتفاق می‌افتد. روش پالم فرض می‌کند که اتلاف رطوبت از لایه تحتانی خاک ( $L_u$ ) به گنجایش رطوبت اولیه در لایه تحتانی، تبخیر و تعرق پتانسیل، و ظرفیت آب در دسترس هر دو لایه سطحی و تحتانی بستگی دارد.

شاخص Z-index ناهنجاری رطوبت ماهانه در نتیجه انحراف شرایط رطوبتی یک ماه خاص از شرایط رطوبتی نرمال را نشان می‌دهد (Heim Jr, 2002). اولین گام در محاسبه وضعیت رطوبت ماهانه (Z-index) تعیین مقادیر واقعی و پتانسیل تبخیر و تعرق، رواناب، اتلاف رطوبت

برای استفاده از آن در خارج از فصل رشد و جهت پایش خشکسالی‌های بلند مدت که چند سال ادامه دارد، در تحقیقی، ولز (Wells, 2003) نرم‌افزاری با قابلیت محاسبه شاخص‌های CMI در مقیاس هفتگی توسعه داد که در تحقیق حاضر از این نرم افزار استفاده شد. در جدول ۱ طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های CMI نیز ارائه شده است.

#### شاخص بارندگی استاندارد (SPI)

شاخص SPI را مک‌کی و همکاران (McKee *et al.*, 1993) برای پایش خشکسالی هواشناسی تدوین کرد. اساس این شاخص احتمالات بارندگی برای هر مقیاس زمانی است و بسیاری از محققان به انعطاف‌پذیری این روش اشاره کرده‌اند (Hayes *et al.*, 1999). شاخص SPI برای هر منطقه بر اساس آمار بارندگی‌های طولانی مدت آن منطقه محاسبه می‌شود. در ابتدا، توزیع آماری مناسب بر این آمار برازش داده می‌شود و پس از آن تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل خواهد شد به طوری که استاندارد شده و متوسط آن برای هر منطقه و دوره مورد نظر صفر می‌شود (Edwards & McKee, 1997). مقادیر مثبت شاخص SPI نشان‌دهنده بارندگی بیشتر از بارش متوسط و مقادیر منفی آن معنای عکس دارد. طبق این روش، دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مثبت شود. بنابراین، دوره خشکسالی با شروع و خاتمه ارقام منفی آن تعیین می‌شود و مقادیر تجمعی SPI نیز بزرگی و شدت دوره خشکسالی را نشان می‌دهد (Hayes, 2000). در جدول ۱، طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس این شاخص نیز ارائه شده است.

به‌طور چشمگیر قابل تغییر است. به عبارت دیگر، دو سوم مقدار شاخص PDSI از شرایط رطوبتی ماه‌های قبل پیروی می‌کند، و از این رو تغییرات زمانی آن تدریجی است. اطلاعات بیشتر در خصوص این دو شاخص در مرجع هیم (Heim Jr, 2002) قابل دسترس است. در تحقیقی، ولز (Wells, 2003) مدل پالم را ارزیابی کرد و با اصلاحاتی، نرم‌افزاری با قابلیت محاسبه شاخص‌های PDSI و Z-index در مقیاس هفتگی توسعه داد که در تحقیق حاضر از این نرم افزار استفاده شد. در جدول ۱ طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های PDSI و Z-index ارائه شده است.

#### شاخص رطوبت محصول (CMI)

شاخص CMI را نیز پالم (Palmer, 1968) توسعه داد. این شاخص برای ارزیابی شرایط محصول در دوره‌های کوتاه مدت (هفتگی) در مناطقی به کار می‌رود که کاربری اصلی اراضی در آن مناطق کشاورزی است. این روش بر اساس میانگین دما، مجموع بارش هر هفته، و مقادیر شاخص از هفته قبل در یک پهنه اقلیمی وضعیت خشکسالی را اعلام می‌کند.

با توجه به واکنش سریع این شاخص به تغییرات کوتاه مدت، پایش وضعیت محصولات در زمانی امکان پذیر است که تنش آبی کوتاه مدت در مراحل حساس رشد گیاه روی می‌دهد. به عبارت دیگر، حتی در یک دوره ترسالی امکان وقوع دوره خشک کوتاه مدت (در حد یک یا دو هفته) نیز وجود دارد که این دوره کوتاه مدت اگر همزمان با یکی از مراحل حساس رشد گیاه شود، تأثیر زیادی روی عملکرد محصول خواهد داشت. این شاخص عمدتاً با شروع و خاتمه فصل رشد به صفر می‌رسد که این خود مانعی است

### شاخص خشکسالی مؤثر (EDI)

مراحل محاسباتی این شاخص با انتخاب دوره فرضی کمبود آب آغاز و در ادامه محاسبات، دوره واقعی آن تعیین خواهد شد. این دوره فرضی می‌تواند ۳۶۵ روز (نماینده مقدار کل منابع آب ذخیره شده برای یک دوره طولانی) یا ۱۵ روز (نماینده مقدار کل منابع آب ذخیره شده برای دوره‌ای کوتاه مدت) باشد. در این تحقیق دوره ۳۶۵ روز انتخاب شد که سیکل بارندگی قالب جهانی و حاکم بر کشور است.

شاخص EDI، که بر خلاف بسیاری از شاخص‌ها از توزیع‌های آماری استفاده نمی‌کند، اساساً بر مبنای داده‌های روزانه محاسبه می‌شود. برای این تحقیق و به منظور مقایسه آن با سایر شاخص‌ها، محاسبات با اطلاعات روزانه انجام و سپس از مقادیر روزانه متوسط‌گیری شده تا مقادیر با مقیاس‌های دیگر برآورد شود. در جدول ۱ طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های EDI ارائه شده است. شرح کامل این شاخص را مقدسی (Moghadasi, 2002) ارائه داده است.

شاخص EDI را بویان از دانشگاه ملی Pukyong، توسعه داد و خشکسالی سال ۹۶-۱۹۹۵ در آمریکا نیز با این شاخص با بهره‌گیری از ایستگاه ارزیابی شد (Byun & Wilhite, 1999). در این شاخص، خشکسالی به‌طور روزانه پیش می‌شود که این قابلیت در شاخص‌های قبلی مد نظر نبوده است. اصلی‌ترین مفهوم در این شاخص، بارش مؤثر<sup>۲</sup> است. بارش مؤثر جمع مقادیر بارش روزانه با یک تابع کاهشی وابسته به زمان است. به عبارت دیگر، بارش مؤثر هر روز تابعی از بارندگی همان روز و یک دوره ماقبل خود است که در آن بارش‌های اخیر نسبت به بارش‌های قدیمی‌تر وزن بیشتری دارند. بارش مؤثر با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$Ep_i = \sum_{n=i}^i \left[ \left( \sum_{m=1}^n p_m \right) / n \right] \quad (4)$$

که در آن،  $i$  = تداوم فرضی؛ و  $p_m$  = بارندگی تا  $m-1$  روز قبل است.

جدول ۱- طبقات مختلف خشکسالی بر اساس شاخص‌های مورد بررسی

PDSI	Z-index	CMI	SPI	EDI	طبقه‌بندی خشکسالی
+۰/۴ و بیشتر	+۵/۳ و بیشتر	+۰/۳ و بیشتر	+۰/۲ و بیشتر	+۵/۲ و بیشتر	فوق العاده مرطوب
+۰/۳ تا +۹۹/۳	+۵/۲ تا +۴۹/۳	+۰/۲ تا +۹۹/۲	+۵/۱ تا +۹۹/۱	+۵/۱ تا +۴۹/۲	خیلی مرطوب
+۰/۲ تا +۹۹/۲	+۰/۱ تا +۴۹/۲	+۰/۱ تا +۹۹/۱	+۰/۱ تا +۴۹/۱	+۷/۰ تا +۴۹/۱	کمی مرطوب
-۹۹/۱ تا +۹۹/۱	-۲۴/۱ تا +۹۹/۰	-۹۹/۰ تا +۹۹/۰	-۹۹/۰ تا +۹۹/۰	-۶۹/۰ تا +۶۹/۰	نرمال
-۰/۲ تا -۹۹/۲	-۲۵/۱ تا -۹۹/۱	-۰/۱ تا -۹۹/۱	-۰/۱ تا -۴۹/۱	-۷/۰ تا -۴۹/۱	خشکسالی ملایم
-۰/۳ تا -۹۹/۳	-۰/۲ تا -۷۴/۲	-۰/۲ تا -۹۹/۲	-۵/۱ تا -۹۹/۱	-۵/۱ تا -۴۹/۲	خشکسالی شدید
-۰/۴ و کمتر	-۷۵/۲ و کمتر	-۰/۳ و کمتر	-۰/۲ و کمتر	-۵/۲ و کمتر	خشکسالی بسیار شدید

### مراحل بحرانی رشد گندم

مراحل رشد گیاه به این منظور مشخص می‌شود که مراحل بحرانی دوره زندگی آن که به عوامل محیطی حساس است تعیین شود. از ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی سرارود واقع در حوزه معاونت مؤسسه تحقیقات دیم- سرارود کرمانشاه، آمار هواشناسی طی مراحل ده‌گانه رشد شامل جوانه‌زنی، رشد گیاهچه، پنجه‌زنی، تولید شدن ساقه، به سنبله رفتن، ظهور سنبله، گلدهی، شیرگی شدن دانه، خمیری شدن دانه، و رسیدن دانه برای دوره ۸۴-۱۳۷۵ اخذ شد.

یادآوری می‌شود که تاریخ‌های ارائه شده برای هر مرحله فنولوژی گیاه، بسته به سال و منطقه مطالعاتی متفاوت است. به منظور تعمیم تاریخ‌های وقوع مراحل مختلف رشد در پهنه استان، پارامتر درجه-روز-رشد<sup>۱</sup> (GDD) بر اساس میزان دمای روزانه برای منطقه سرارود محاسبه و با استفاده از آمار ایستگاه‌های سینوپتیک، نقشه درجه-روز-رشد برای استان تهیه شد و در هر شهرستان

تاریخ‌های وقوع مراحل مختلف رشد برآورد گردید. در محاسبات درجه-روز-رشد، کارشناسان ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی سرارود دمای پایه صفر درجه را برای منطقه مطالعاتی پیشنهاد کردند. برای تسهیل در تحلیل‌ها، با تلفیق مراحل ده‌گانه فوق‌الذکر و بر اساس نشریه شماره ۵۶ فائو (Allen et al., 2006) پنج مرحله رشد به شرح زیر تعیین شد (جدول ۲):

- مراحل جوانه‌زنی و رشد گیاهچه به‌عنوان مرحله سبز شدن؛
- مراحل پنجه‌زنی، تولید شدن ساقه، و به سنبله رفتن به‌عنوان مرحله رشد رویشی؛
- مراحل ظهور سنبله و گلدهی به‌عنوان مرحله تولید مثل؛
- مرحله شیرگی شدن دانه به‌عنوان مرحله دانه‌بندی؛
- مراحل خمیری شدن دانه و رسیدن دانه به‌عنوان مرحله رسیدن محصول.

جدول ۲- مشخصات و زمانبندی مراحل مختلف فنولوژی گندم

عنوان	مرحله رشد	تاریخ
مرحله اول	مرحله سبز شدن	هفته اول اسفندماه (هفته بیست و سوم)
مرحله دوم	مرحله رشد رویشی	هفته سوم اردیبهشت‌ماه (هفته سی و سوم)
مرحله سوم	مرحله تولید مثل	هفته چهارم اردیبهشت‌ماه (هفته سی و چهارم)
مرحله چهارم	مرحله دانه‌بندی	هفته دوم خردادماه (هفته سی و ششم)
مرحله پنجم	مرحله رسیدن محصول	هفته چهارم خردادماه (هفته سی و نهم)

### عملکرد محصول و مانده‌های عملکرد

داده‌های میانگین سالانه عملکرد گندم دیم در بخش‌های مختلف منطقه مطالعاتی می‌تواند معیاری برای ارزیابی آسیب احتمالی ناشی از خشکسالی باشد. بررسی سری زمانی داده‌های عملکرد نشان می‌دهد که این

داده‌ها روندی صعودی دارند. این روند می‌تواند ناشی از پیشرفت تکنولوژی کشاورزی (افزایش مصرف کود و استفاده از ارقام جدید با عملکرد بالاتر) باشد (Babb et al., 1997). به‌منظور سنجش ارتباط متغیرهای آب و هوایی با عملکرد، لازم است این روند به



توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی برای گندم...

کمتر بودن عملکرد، از متوسط دراز مدت و مقادیر مثبت آن بیانگر بالاتر بودن عملکرد از نرمال دوره است. هدف این مطالعه ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی کشاورزی است و از این رو ضرورت دارد معیاری استاندارد برای تعریف آسیب‌پذیری بر اساس داده‌های عملکرد محصول تعیین شود. بنابراین، طبقات مختلف آسیب‌پذیری بر اساس انحراف استاندارد ( $\sigma$ ) مانده عملکرد محصول در جدول ۳ تعریف می‌شود (Zhang, 2004).

نوعی حذف شود. در عمل، فرض می‌شود که روند تکنولوژیک، تابعی خطی از سال است. کوپرینگ و پاپکریاکو (Quiring & Papakryiakou, 2003) در تحقیقات خود با تعیین رابطه خطی (رگرسیون خطی) بین عملکرد محصول و سال زراعی و کسر مقدار عملکرد محاسبه شده از مقدار واقعی آن، مانده عملکرد را برای هر سال که بدین شکل روند زدایی می‌شد مبنای محاسبات بعدی قرار دادند. مقادیر منفی مانده‌ها بیانگر

جدول ۳- طبقات مختلف آسیب‌پذیری بر اساس انحراف استاندارد مانده عملکرد محصول (Zhang, 2004)

طبقات آسیب	مانده عملکرد
افزایش شدید محصول	$+1/17\sigma$ و بیشتر
افزایش متوسط محصول	$+0/34\sigma$ تا $+1/17\sigma$
وضعیت نرمال	$+0/33\sigma$ تا $-0/33\sigma$
آسیب متوسط محصول	$-1/17\sigma$ تا $-0/34\sigma$
آسیب شدید محصول	$-1/17\sigma$ و کمتر

## توسعه مدل

جغرافیایی<sup>۱</sup> (GIS). در واقع، به کمک این سامانه، خروجی‌های مدل و پراکنش زراعی محصول با یکدیگر تلفیق می‌شود تا شرایط آسیب نواحی تحت مطالعه مشخص شود.

اجرای مدل ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی کشاورزی با بررسی معیار تأمین رطوبت (با شاخص‌های رایج خشکسالی) و معیار ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی (از طریق مانده‌های عملکرد محصول دیم) صورت می‌گیرد و فرض بر آن است که عملکرد محصول، صرفاً تابعی از شرایط آب و هوا طی فصل رشد است و سایر عوامل از قبیل آفات و بیماری‌ها ثابت‌اند. هدف اجرایی مدل، برقراری ارتباط منطقی و قانونمند بین معیارهای تأمین

برای مدل ارائه شده در این تحقیق ویژگی‌هایی در نظر گرفته شده است که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: (۱) ارزیابی آسیب به‌طور خاص برای گندم انجام می‌شود، زیرا محصولات مختلف حساسیت‌های متفاوتی به تنش رطوبتی دارند، (۲) بررسی وضعیت رطوبتی با گستره وسیعی از شاخص‌هایی که مطالعات زیادی روی آنها انجام شده است، (۳) خسارت احتمالی به محصولات در مراحل بحرانی در حین فصل رشد برآورد می‌شود و با پیشرفت این مراحل، برآورد خسارت به روز می‌شود، (۴) استفاده از تکنیک‌های چند متغیره برای تشخیص نواحی آسیب خشکسالی کشاورزی، و (۵) ارائه نتایج مدل در سامانه اطلاعات

رطوبت و معیار ارزیابی آسیب‌پذیری در مراحل مختلف فنولوژی گندم است.

### متغیرهای مدل و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

برای محاسبه شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق، سال آبی (مهرماه تا شهریور سال بعد) که منطبق بر سال زراعی نیز هست، مبنای زمانی در نظر گرفته شد. شاخص‌های EDI، CMI، PDSI و Z-index در مقیاس هفتگی و شاخص‌های SPI و PDSI و Z-index نیز در مقیاس ماهانه و سه ماهه در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه شدند. پس از آن، جهت برآورد شاخص‌های مذکور در مقیاس‌های زمانی متفاوت و در سال‌های مختلف، حدود ۱۴۰۰۰ نقشه خشکسالی در محیط GIS برای محدوده اراضی دیم هر یک از شهرستان‌های استان کرمانشاه با استفاده از روش زمین‌آمار میانگین وزن‌دار عکس فاصله<sup>۱</sup> (IDW) تهیه و میانگین مربوط به هر شاخص استخراج شد. استفاده از تمامی مقادیر شاخص‌ها در مدل مناسب نیست زیرا افزایش تعداد متغیرها درجه آزادی مدل را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، برای دستیابی به مدلی کارآتر لازم است اصل امساک<sup>۲</sup> رعایت و از تعداد متغیرها به نحوی کاسته شود و در عین حال الگوی تغییرات شاخص‌ها تا حدود زیادی حفظ گردد. یک روش مناسب برای این منظور، استفاده از تجزیه‌های چند متغیره یعنی روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی<sup>۳</sup> (PCA) است (Meyer et al., 1993). فرض اساسی این روش آن است که توجیه تغییرپذیری هر سیستم واجد تعداد زیادی متغیر، با استفاده از تعداد کمتری مؤلفه اصلی امکان پذیر است. بنابراین، هدف یافتن ترکیباتی خطی از  $X_1, X_2, \dots, X_p$  است که هر یک از این ترکیبات معادل یک مؤلفه اصلی است. ویژگی عمده این مؤلفه‌ها

آن است که کاملاً مستقل از یکدیگرند و در نتیجه جنبه‌های متفاوتی از داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند. گفتنی است که تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نمی‌تواند همواره تعداد زیادی از متغیرهای اولیه را به تعداد کمتری از مؤلفه‌های اصلی کاهش دهد. در واقع، اگر متغیرهای اولیه همبستگی نداشته باشند، این تجزیه مطلقاً بی‌ارزش است. بهترین نتایج زمانی عاید می‌شود که متغیرهای اولیه همبستگی بسیار شدید مثبت یا منفی داشته باشند.

مؤلفه‌های اصلی مجموعه داده‌ها با روش جبری و با استفاده از ماتریس وارینانس-کوواریانس و ماتریس همبستگی شاخص‌ها محاسبه می‌شود. در این تحقیق، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با توجه به زمانبندی مراحل مختلف فنولوژی گندم، شاخص‌های مربوط به هر مرحله مشخص و با اعمال PCA بر شاخص‌های هر مرحله، سه مؤلفه اصلی انتخاب شد. معیار انتخاب مؤلفه‌ها یکی این است که حدود ۹۰ درصد وارینانس کل توجیه شود و دیگر اینکه اندازه مقدار ویژه از یک بزرگ‌تر باشد. بر این اساس علاوه بر شاخص‌های خشکسالی در سه مقیاس زمانی هفتگی، ماهانه، و سه ماهه، سه مؤلفه اصلی نیز در مراحل مختلف فنولوژی گندم محاسبه و به‌عنوان ورودی مدل ارزیابی شدند که در ستون اول جدول ۴ (متغیرها) آمده‌اند.

### انتخاب متغیرهای مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup>

احتمال همپوشانی یا همبستگی بین متغیرهای جدول ۴ ایجاب می‌کند تا در هر مرحله از رشد که در جدول آمده، آزمون‌هایی به اجرا درآید تا متغیرهای اضافی از مدل حذف یا در مدل ابقا شوند. حذف و ابقای متغیرها در هر یک از مراحل بحرانی رشد وابسته به کارایی متغیرها در آنالیز مدل پیش‌بینی است. متغیرهای نهایی مورد استفاده در مدل که از کارایی بالاتری نیز برخوردارند، برای

1- Inverse Distance Weighted  
3- Principle Component Analysis

2- Parsimony  
4- Genetic Algorithm

را با هم به ارث ببرد و از شبیه شدن تام فرزند به تنها یکی از والدین جلوگیری می‌کند (Pham & Karaboga, 1998). جهت انتخاب متغیرهای مدل ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی با استفاده از الگوریتم فوق مراحل زیر انجام گرفت:

**گام اول، تابع برازش<sup>۳</sup>:** تابع برازش در فرایند بهینه‌یابی به ازای مقادیر مشخص متغیرها، مقدار واحدی خواهد داشت و سعی در به حداکثر یا حداقل رساندن آن است. برازش بهترین رگرسیون چند متغیره بین متغیرهای منتخب، هدف این تحقیق است و میزان  $R^2$  این معادله به‌عنوان معیار انتخاب بهترین رگرسیون در نظر گرفته شد.

**گام دوم، معرفی متغیرها و به‌گزینی:** برای معرفی متغیرهای مدل تعداد مشخص از ورودی‌های  $X = \{0,1\}$  که متعلق به فضای نمونه  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  هستند، در نظر گرفته شد، به‌طوری‌که صفر مبین عدم حضور و یک مبین حضور هر کدام از شاخص‌های خشکسالی یا مؤلفه‌های اصلی در مدل است. این متغیرها به‌صورت تصادفی انتخاب و در یک کروموزوم به‌صورت یک عدد برداری  $Y_i = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  نمایش داده می‌شوند. یک گروه از کروموزوم‌ها تشکیل یک جمعیت<sup>۴</sup> می‌دهد. برای هر کروموزوم  $(Y_i)$ ، یک ارزش برازندگی<sup>۵</sup> یا  $f(Y_i)$  در نظر گرفته می‌شود که بر اساس تابع هدف تعریف می‌گردد. عناصر قوی‌تر یا کروموزوم‌هایی که ارزش برازندگی آنها بالاتر باشد، برای زنده ماندن در طول دوره‌های دیگر و دوباره تولید شدن شانس بیشتری دارند و ضعیف‌ترها محکوم به نابودی هستند.

هر مرحله بحرانی رشد متفاوت‌اند. همراه با رشد محصول، برخی متغیرهای مرحله قبلی ممکن است حفظ و متغیرهای جدید اضافه شوند. جهت بررسی و انتخاب متغیرهای مدل در هر مرحله از رشد، از روش جستجوی تکاملی الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

الگوریتم ژنتیک برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو از اصول انتخاب طبیعی داروین استفاده می‌کند. قانون انتخاب طبیعی می‌گوید تنها گونه‌هایی از هر جمعیت ادامه نسل می‌دهند که بهترین خصوصیات را داشته باشند و آنهایی که این ویژگی‌ها را نداشته باشند به تدریج و طی زمان از بین می‌روند. مجموعه خصوصیات هر نسل را کروموزوم‌های آن نسل به نسل بعدی انتقال می‌دهند و هر ژن که جزء تشکیل‌دهنده کروموزوم است، نماینده یک ویژگی است. حال اگر این کروموزوم به تمامی به نسل بعد انتقال یابد، تمامی خصوصیات نسل بعدی شبیه به خصوصیات نسل قبل خواهد بود. اما در عمل چنین اتفاقی نمی‌افتد و در واقع به‌صورت همزمان دو رویداد برای کروموزوم‌ها به وجود می‌آید یکی جهش<sup>۱</sup> است به‌صورتی‌که بعضی ژن‌ها به شکلی کاملاً تصادفی تغییر می‌کنند. تعداد این گونه ژن‌ها بسیار کم اما این تغییر تصادفی بسیار مهم است. رویداد دوم تلاقی<sup>۲</sup> است که چسبیدن ابتدای یک کروموزوم به انتهای کروموزومی دیگر است. این رویداد نسبت به رویداد اول بسیار دیده می‌شود. این فرایند باعث می‌شود که فرزند حاصل از این رویداد تعدادی از خصوصیات پدری و تعدادی از خصوصیات مادری

1- Mutation  
4- Colony

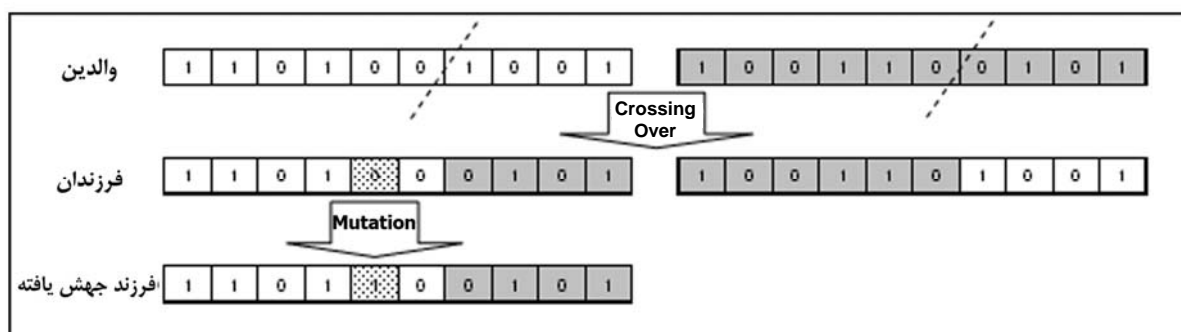
2- Crossing Over  
5- Fitness Value

3- Fitness Function

گام سوم، تولید مثل: پس از تولید جمعیت اولیه، جفت‌هایی از میان جمعیت برای تولید مثل نسل آینده به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. برای انتخاب اصلح، احتمال انتخاب جفت‌هایی با شایستگی بالاتر، بیشتر خواهد بود. لذا برای تولید مثل، موجودات با شایستگی بیشتر ممکن است بیش از یک بار انتخاب شوند. محتویات دو کروموزومی که در فرایند تولید شرکت می‌کنند با هم ترکیب می‌شوند و دو کروموزوم جدید (فرزند) ایجاد می‌شود (تلاقی دو کروموزوم). این فرایند اجازه می‌دهد، دو تا از بهترین‌ها برای ایجاد یکی بهتر از آنها با هم ترکیب شوند. تلاقی در یک نسل برای اغلب والدین صورت می‌گیرد، اما برای پرهیز از ایجاد فاصله نسل‌ها تعدادی محدود از والدین به صورت تصادفی بدون تلاقی به نسل بعد مانند همچون روش یک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای وجود دارد که در این تحقیق از تلاقی به روش یک نقطه‌ای استفاده شده است. به علاوه، در هر دوره یک سری از کروموزوم‌ها ممکن است جهش یابند.

کروموزوم جدید (فرزندان) و همچنین نحوه ایجاد جهش در یکی از فرزندان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تلاقی در نقطه‌ای تصادفی بین ژن‌ها (بین ژن ششم و هفتم) صورت گرفته و بخش‌های هر کروموزوم با هم تعویض می‌شود. در ژن پنجم یکی از فرزندان با تغییر عدد آن، جهش ایجاد شده است. میزان ارزش برزندگی هر کروموزوم از تابع هدف برآورد می‌شود و افراد نسل جدید بر این اساس مرتب می‌شوند. کل این فرایند برای نسل جدید هم تکرار می‌شود و جفت‌ها برای ترکیب انتخاب می‌شوند و نسل سوم به وجود می‌آید. این فرایند تکرار می‌شود تا شرایط خاتمه الگوریتم ژنتیک (بیشترین درجه برآزش فرزندان) فراهم شود (Janikow, 1993).

نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب متغیرهای مدل در جدول ۴ ارائه شده است. متغیرهایی که به صورت پیش فرض برای هر مرحله منظور شده‌اند، با علامت (√) و متغیرهایی که از الگوریتم ژنتیک انتخاب شده‌اند با علامت (√+) مشخص شده‌اند.



شکل ۲- تلاقی دو کروموزوم برای تولید دو کروموزوم جدید و ایجاد جهش در یکی از فرزندان

توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی برای گندم...

جدول ۴- متغیرهای مورد استفاده برای توسعه مدل در هر مرحله از رشد محصول (گندم دیم)

متغیرها	مرحله سبز شدن	مرحله رشد رویشی	مرحله تولید مثل	مرحله دانه دهی	مرحله رسیدن محصول
	هفته اول اسفندماه (هفته بیست و سوم)	هفته سوم اردیبهشتماه (هفته سی و سوم)	هفته چهارم اردیبهشتماه (هفته سی و چهارم)	هفته دوم خردادماه (هفته سی و ششم)	هفته چهارم خردادماه (هفته سی و نهم)
SPI ماه اسفند	√				
PDSI ماه اسفند	√				
Z-Index ماه اسفند	√				
SPI سه ماه اسفند	√+				
Z-Index سه ماه اسفند	√+				
PDSI سه ماه اسفند	√				
CMI هفته سی و سوم		√			
PDSI هفته سی و سوم		√			
Z-Index هفته سی و سوم		√			
EDI هفته سی و سوم		√+	√+		
SPI ماه اردیبهشت		√+	√+		
PDSI ماه اردیبهشت		√	√		
Z-Index ماه اردیبهشت		√+	√+		
CMI سی و چهارم			√+		
PDSI هفته سی و چهارم			√		
Z-Index هفته سی و چهارم			√		
EDI هفته سی و چهارم			√		
CMI هفته سی و ششم				√	
PDSI هفته سی و ششم				√	
Z-Index هفته سی و ششم				√+	
EDI هفته سی و ششم				√+	
CMI سی و هفتم					√+
Z-Index سی و هفتم					√
CMI سی و هشتم					√+
Z-Index سی و هشتم					√
CMI سی و نهم					√
Z-Index سی و نهم					√
SPI ماه خرداد					√
Z-Index ماه خرداد					√
اولین مؤلفه اصلی شاخص‌های ماه اسفند	√				
دومین مؤلفه اصلی شاخص‌های ماه اسفند	√				
سومین مؤلفه اصلی شاخص‌های ماه اسفند	√				
اولین مؤلفه اصلی شاخص‌های سه ماه اسفند	√				
دومین مؤلفه اصلی شاخص‌های سه ماه اسفند	√+				
سومین مؤلفه اصلی شاخص‌های سه ماه اسفند	√				
اولین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و سوم		√			
دومین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و سوم		√			
سومین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و سوم		√			
اولین مؤلفه اصلی شاخص‌های ماه اردیبهشت		√	√		
دومین مؤلفه اصلی شاخص‌های ماه اردیبهشت		√+	√+		
سومین مؤلفه اصلی شاخص‌های ماه اردیبهشت		√	√		
اولین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و چهارم		√	√		
دومین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و چهارم		√+	√+		
سومین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و چهارم		√	√		
اولین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و ششم				√	
دومین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و ششم				√+	
سومین مؤلفه اصلی شاخص‌های هفته سی و ششم				√	

✓ انتخاب متغیرها به صورت پیش فرض برای هر مرحله

✓+ انتخاب متغیرها از روش الگوریتم ژنتیک

## برازش مدل رگرسیون چند متغیره

پس از انتخاب متغیرهای منتخب در هر مرحله از رشد، مدلی مناسب با استفاده از تکنیک رگرسیون چند متغیره برای گندم به طور مستقل توسعه یافت که در هر یک از پنج مرحله رشد، وضعیت آسیب این دو محصول را برآورد کند. در محاسبات رگرسیون فوق از الگوریتم‌های گام به گام پیشرو<sup>۱</sup> استفاده شد.

در روش پیشرو، ابتدا هیچ متغیر مستقلی در مدل حضور ندارد و فقط عرض از مبدا وجود دارد. اولین متغیر مستقلی که برای ورود به معادله انتخاب می‌شود، متغیری است که با متغیر وابسته بیشترین همبستگی ساده را دارد. این متغیر در صورتی وارد مدل می‌شود که مقدار آماره  $t$  آن از مقدار از پیش تعیین شده برای  $t$  ( $t$  ورود) بیشتر باشد. دومین متغیر مستقل انتخاب شده برای ورود به معادله متغیری است که بالاترین همبستگی را با متغیر وابسته، بعد از تعدیل اثر اولین متغیر مستقل وارد شده به مدل بر متغیر وابسته داشته باشد. این روش را همبستگی جزئی<sup>۲</sup> اطلاق می‌کنند. بعد از ورود هر متغیر، متغیرهای قبلی دوباره با آماره  $t$  جزء مربوط، ارزیابی می‌شوند. در این مورد برای یک متغیر مستقل، اگر مقدار آماره  $t$  آن از مقدار از پیش تعیین شده ( $t$  برای حذف) کمتر شد، آن متغیر از مدل حذف می‌شود. مزیت این روش نسبت به روش ارزیابی تمام معادلات ممکن این است که تعداد معادلات کمتری را آزمون می‌کند و زودتر جواب می‌گیرد.

## معیار ارزیابی اعتبار مدل

جهت بررسی اعتبار مدل در هر شهرستان، دوره آماری به دو بخش تقسیم شد به طوری که از مجموعه داده‌های مربوط به هر شهرستان سه چهارم آن برای ساخت

مدل استفاده شد و بقیه دوره آماری برای مرحله اعتبارسنجی به کار گرفته شد. گفتنی است، که انتخاب داده‌های اعتبارسنجی مدل تصادفی بوده است. در بررسی‌های بالا از معیارهای برازندگی ضریب همبستگی ( $R^2$ )، ریشه متوسط مربع خطا (RMSE)، و شاخص توافق<sup>۳</sup> ( $d$ ) استفاده شد.

ضریب همبستگی بخشی از واریانس موجود در داده‌های مشاهده شده را توصیف می‌کند که توسط مدل قابل توجیه است. محدوده تغییرات این پارامتر بین صفر و یک است و مقادیر بالاتر آن تطابق بهتر داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده را نشان می‌دهد. مطالعات لی گیت و مک کیب (Legates & McCabe, 1999) نشان می‌دهد که مقادیر  $R^2$  تحت تأثیر داده‌های پرت است و باید آن را به اتفاق پارامترهای دیگر استفاده کرد. RMSE از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad (5)$$

RMSE میزان خطا را با استفاده از میانگین اختلافات بین مقادیر برآورد مدل ( $P$ ) و مشاهده‌ای ( $O$ ) اندازه‌گیری می‌کند. نکته مهم در استفاده از RMSE این است که خطای مدل را بر اساس واحد متغیر بیان می‌کند. شاخص توافق از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} = 1.0 - N \frac{MSE}{PE} \quad (6)$$

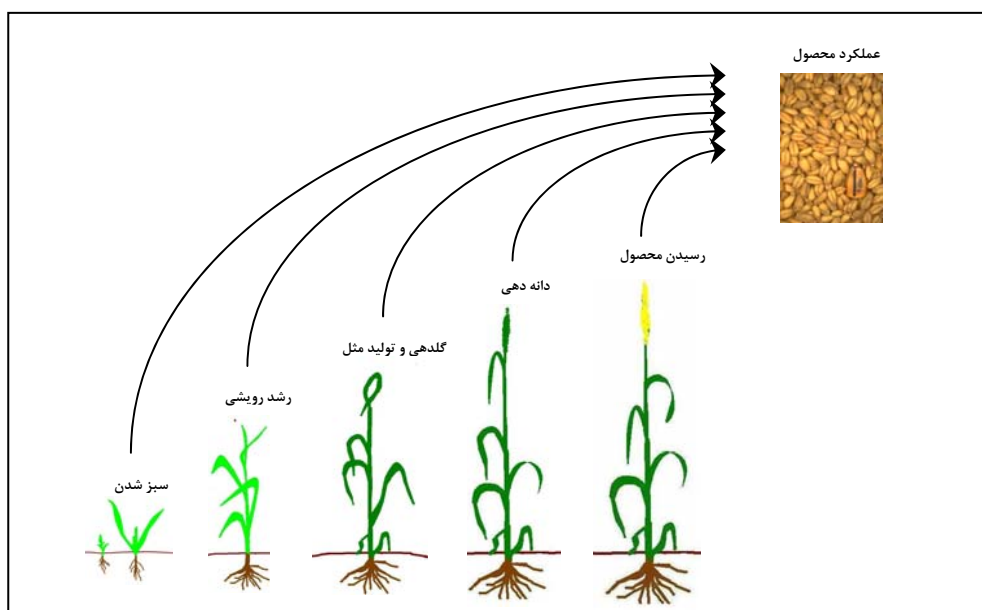
شاخص توافق نسبت متوسط مربع خطا (MSE) به خطای پتانسیل (PE) است و درجه

توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی برای گندم...

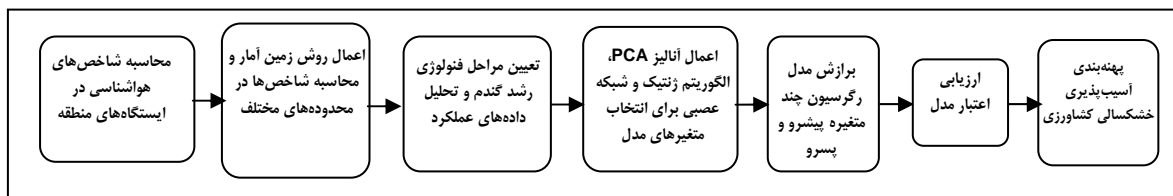
(Quiring & Papakryiakou, 2003).

به منظور درک بهتر از روند توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی در شکل ۳ یک نمایش شماتیک از نحوه پیش‌بینی عملکرد محصول در مراحل مختلف رشد ارائه شده است. همچنین در شکل ۴، فلوجارت مطالعات ارائه شده است.

نزدیکی داده‌های مشاهده‌ای به داده‌های برآورد شده را اندازه می‌گیرد و بین صفر (عدم توافق بین داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده) و یک (توافق کامل بین داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده) متغیر است. این شاخص بدون بعد است و تفاوت‌های نسبی را ساده‌تر تفسیر می‌کند و حساسیت کمتری به ماهیت داده‌ها دارد



شکل ۳- نمایش شماتیک از نحوه پیش‌بینی عملکرد محصول با شاخص‌های خشکسالی در هر یک از مراحل رشد



شکل ۴- فلوجارت مدل‌سازی و مطالعات ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی

## نتایج و بحث

## ارزیابی اعتبار مدل

نزدیک شدن به پایان فصل رشد از برآزش بهتری برخوردارند. همچنین، پارامترهای شاخص  $d$  و  $RMSE$  نیز این روند را تأیید می‌کنند. در بخش اعتبار سنجی مدل خطاها بیشتر از بخش آموزش مدل است و در مدل‌های انتهایی دوره رشد خطاها و درجه توافق به بخش آموزش مدل نزدیک می‌شود. باید گفت که مدل مرحله چهارم رشد، نسبت به بقیه مدل‌ها دقت بالاتری دارد.

متوسط پارامترهای تعیین برآزندگی مدل‌ها در شهرستان‌های استان کرمانشاه در جدول ۵ ارائه شده است. مقادیر ضریب همبستگی برای مدل‌های در مرحله آموزش از ۰/۲۳ تا ۰/۷۴ و در مرحله اعتبار سنجی نیز از ۰/۱۲ تا ۰/۷۳ افزایش داشته است و مدل‌ها با

جدول ۵- متوسط پارامترهای تعیین برآزندگی مدل‌ها در شهرستان‌های استان کرمانشاه

اعتبارسنجی مدل			آموزش مدل			مدل
RMSE	d	R <sup>2</sup>	RMSE	d	R <sup>2</sup>	
۴۸/۳	۰/۱۹	۰/۱۲	۲۹/۰	۰/۶۹	۰/۲۳	مدل مرحله اول رشد
۳۵/۵	۰/۷۰	۰/۴۶	۲۳/۴	۰/۸۵	۰/۵۰	مدل مرحله دوم رشد
۳۱/۵	۰/۷۵	۰/۵۱	۱۸/۸	۰/۹۱	۰/۵۷	مدل مرحله سوم رشد
۲۱/۷	۰/۹۲	۰/۶۹	۲۰/۶	۰/۸۹	۰/۶۱	مدل مرحله چهارم رشد
۲۶/۱	۰/۹۰	۰/۷۳	۱۷/۰	۰/۹۳	۰/۷۴	مدل مرحله پنجم رشد

محیط GIS در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که پیش‌بینی مدل در مراحل مختلف رشد، اکثر نواحی کشت گندم را تحت تأثیر افزایش متوسط و بالای محصول نشان می‌دهد و این پیش‌بینی در مرحله چهارم رشد بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد.

جهت ارزیابی دقت مدل برای برآورد طبقات آسیب ناشی از خشکسالی کشاورزی، در این تحقیق چهار رتبه در نظر گرفته شد. اگر برآورد طبقه آسیب توسط مدل با طبقه آسیب در واقعیت دقیقاً یکسان باشد، رتبه یک برای مدل منظور می‌شود. اگر برآورد مدل از آسیب فقط در شدت آسیب با واقعیت تفاوت داشته ولی طبقات آسیب متفاوت باشد (به‌طور مثال در واقعیت خسارت شدید روی داده ولی مدل خسارت متوسط را برآورد کرده است یا بالعکس)، رتبه دو برای مدل منظور می‌شود. اگر در واقعیت یکی از موارد

## پهنه‌بندی آسیب‌پذیری خشکسالی کشاورزی

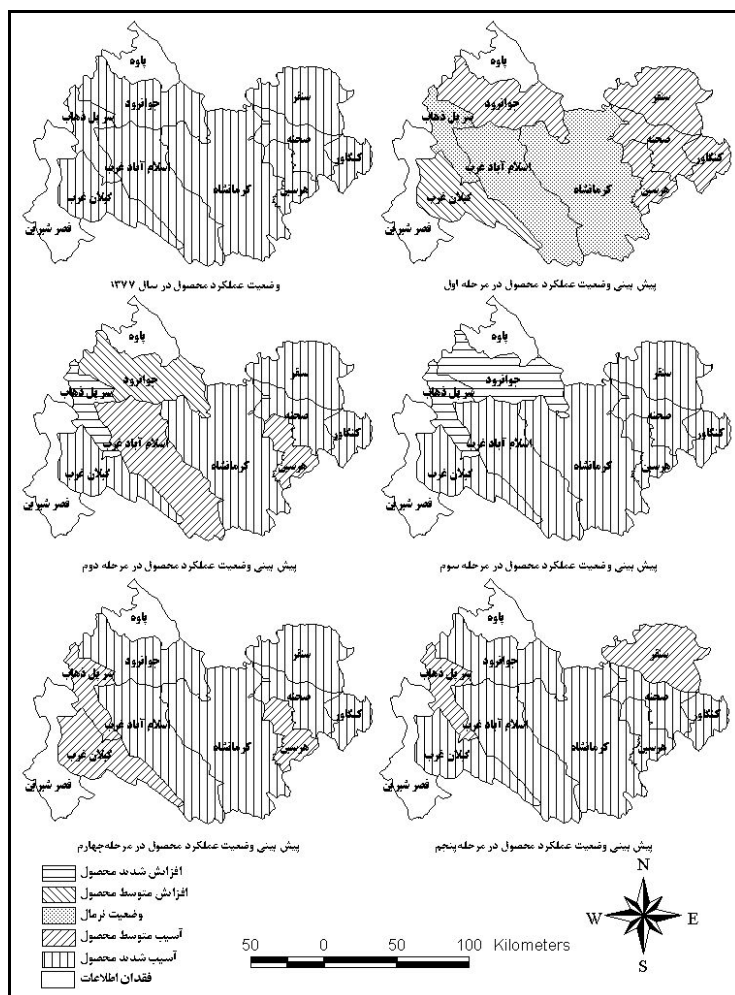
طی سال زراعی ۷۸-۱۳۷۷، استان کرمانشاه دچار خشکسالی بسیار شدیدی شد که تبعات اقتصادی و اجتماعی فراوانی برجای گذاشت. به‌منظور نمایش تصویر بهتری از مناطق درگیر خشکسالی کشاورزی، نتایج ارزیابی آسیب در مراحل مختلف رشد و نمو گندم در محیط GIS در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که پیش‌بینی مدل در مراحل مختلف رشد، اکثر نواحی کشت گندم را تحت تأثیر آسیب بالای خشکسالی نشان می‌دهد و این پیش‌بینی با نزدیک شدن به پایان فصل رشد دقیق‌تر می‌شود. طی سال زراعی ۸۱-۱۳۸۰، استان کرمانشاه از نظر بارندگی عملکرد محصول در شرایطی مناسب قرار داشت. نتایج ارزیابی آسیب در مراحل مختلف رشد و نمو گندم در

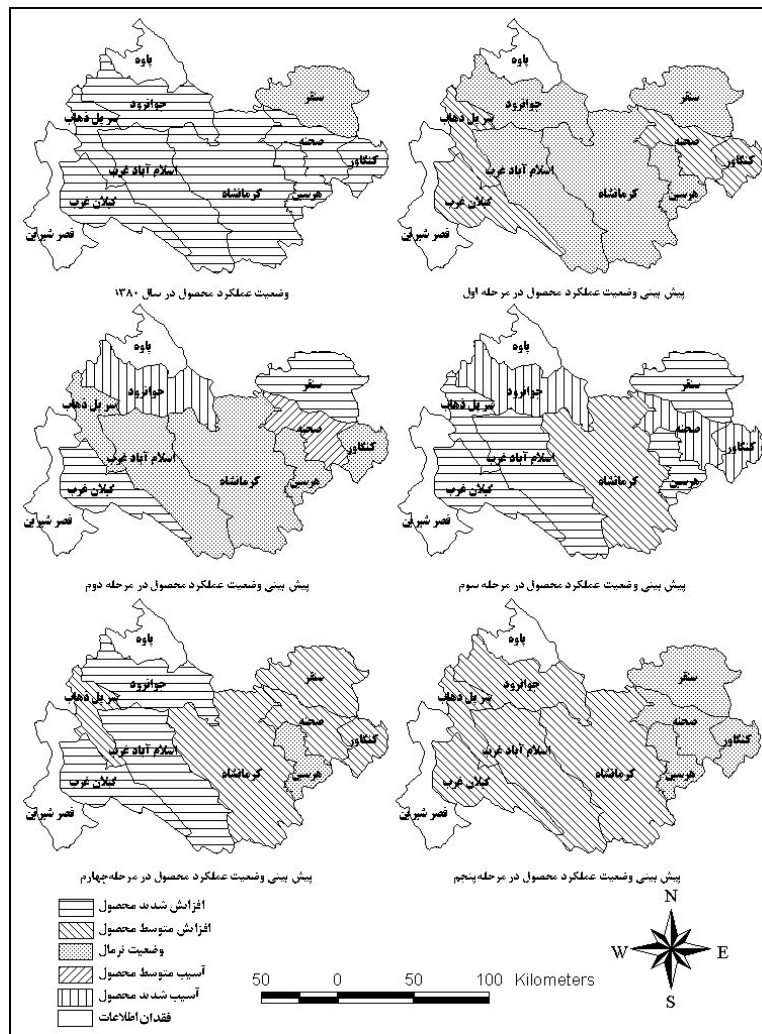


توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی برای گندم...

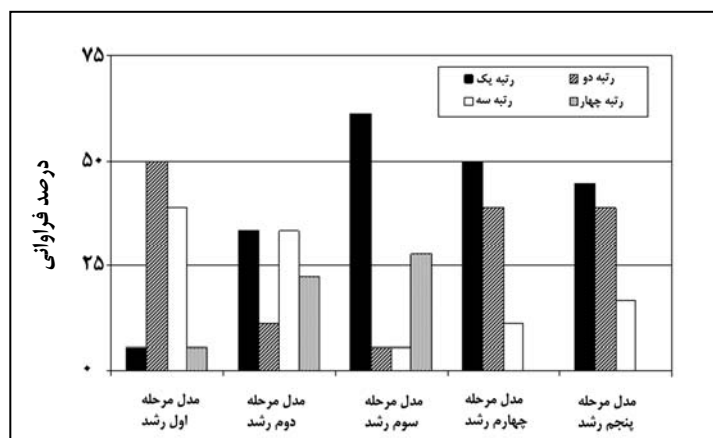
مراحل مختلف رشد نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که درصد فراوانی رتبه‌های یک و دو در مدل‌های انتهایی دوره رشد بیشتر است و به مدل‌های مرحله چهارم و پنجم در هیچ موردی رتبه چهار تعلق نگرفته است. مدل‌ها به‌طور کلی در ۳۸/۹ درصد از مواقع رتبه یک، ۲۸/۹ درصد از مواقع رتبه دو، ۲۱/۱ درصد از مواقع رتبه سه، و در ۱۱/۱ درصد از مواقع رتبه چهار را کسب می‌کنند.

آسیب یا افزایش محصول مشاهده شده باشد و مدل وضعیت نرمال را نشان دهد، رتبه سه برای آن منظور می‌شود. و سرانجام اگر جهت برآورد مدل و واقعیت متفاوت باشد، یعنی در وضعیت وجود آسیب در واقعیت، مدل افزایش محصول را نشان دهد یا بالعکس، رتبه چهار برای آن منظور می‌شود. شکل ۷، درصد فراوانی رتبه‌های چهارگانه را برای مدل‌های توسعه داده شده در





شکل ۶- نتایج پیش‌بینی مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی در مراحل مختلف رشد و نمو گندم دیم در سال زراعی مرطوب ۸۱-۱۳۸۰ در شهرستان‌های استان کرمانشاه



شکل ۷- درصد فراوانی رتبه‌های چهارگانه برای مدل‌های توسعه داده شده در مراحل مختلف رشد

توسعه مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی برای گندم...

## نتیجه‌گیری

برای گندم تعیین شد. بر اساس این روش، وضعیت عملکرد محصول و پتانسیل آسیب خشکسالی کشاورزی در دیم‌زارها در قبل از زمان برداشت به‌صورت یک روند زمانی قابل ارائه است و اطلاعات مفیدی برای تصمیم‌گیرندگان و کشاورزان فراهم می‌آورد. ارائه نتایج مدل به‌صورت نقشه در لایه‌های اطلاعاتی GIS، نمایش بهتر و واقعی‌تری از ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی در منطقه می‌دهد.

در این تحقیق، همچنین چارچوبی جهت ارزیابی آسیب محصولات کشاورزی از خشکسالی بر اساس شاخص‌های خشکسالی مربوط به مراحل رشد تعریف شده گیاه گندم طراحی شد. از این چارچوب می‌توان در مناطق دیگر با محاسبه شاخص‌های خشکسالی سازگار با آن منطقه و تعیین مراحل فنولوژی رشد گیاه مورد نظر استفاده کرد.

تحقیقات تکمیلی دیگری جهت بررسی توانایی اجرایی مدل ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی مورد نیاز خواهد بود. برای مثال، توصیه می‌شود از روش‌های خبره و هوشمند و الگوریتم‌های تکاملی همچون شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، و سیستم‌های فازی تحلیل‌های چند متغیره صورت گیرد تا دقت برآورد مدل ارتقا یابد. اطلاعات ماهواره‌ای و شاخص‌های متنوع استخراج شده از این اطلاعات به‌عنوان ورودی مدل می‌تواند کیفیت نتایج خروجی را بهبود بخشد.

در این تحقیق یک مدل ارزیابی آسیب خشکسالی برای گندم بر اساس شاخص‌های استخراج شده از داده‌های هواشناسی و با استفاده از تکنیک‌های چند متغیره تهیه شد. موارد زیر را به‌عنوان یافته‌های این تحقیق می‌توان ارائه نمود:

در مدل‌های توسعه داده شده در پنج مرحله رشد، از دو مورد شاخص SPI، سه مورد شاخص EDI، یک مورد شاخص PDSI، پنج مورد شاخص Z-index، دو مورد شاخص CMI، و پنج مورد از مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان متغیرهای ورودی استفاده شده است. مشاهده می‌شود که شاخص Z-index نسبت به بقیه شاخص‌ها وضعیت خشکسالی کشاورزی را بهتر توجیه می‌کند زیرا این شاخص بر اساس مبانی فیزیکی و با استفاده از اطلاعات فراوان (داده‌های بارندگی و دمای روزانه و ظرفیت آب در دسترس خاک) استخراج شده است. همچنین، شاخص EDI به‌دلیل مقیاس زمانی مناسب (مقیاس روزانه) و شاخص CMI به‌دلیل ارزیابی شرایط محصول در دوره‌های زمانی کوتاه مدت (هفتگی)، شرایط خشکسالی کشاورزی را در مراحل بحرانی فنولوژیک گیاه در مقیاس زمانی کوتاه مدت (هفتگی) توجیه می‌کنند.

جهت ارزیابی آسیب خشکسالی کشاورزی بر اساس شرایط واقعی فنولوژی محصول پنج مرحله بحرانی رشد

## قدردانی

مؤلفان این مقاله لازم می‌دانند از همکاری‌های صمیمانه معاونت مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود کرمانشاه و سازمان جهاد کشاورزی استان کرمانشاه در تأمین اطلاعات مورد نیاز برای انجام این تحقیق تشکر کنند.

## مراجع

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 2006. Crop Evapotranspiration. Report prepared for FAO. Water Resour. Develop. Manage. Ser. FAO. Rome. Italy.
- Alley, W. M. 1984. The palmer drought severity index: Limitation and assumptions. J. Climate Appl. Meteorol. 23, 1100-1109.
- Babb, J. C., Khandekar, M. L. and Garnett, E. R. 1997. An analysis of PNA indices for forecasting summer weather over Canadian prairies with implications for wheat yield and protein. In: Proceeding of the Long-Range Weather and Crop Forecasting Work Group Meeting III. Canadian Meteorological Center. Dorval.
- Bhalme, H. N. and Mooley, D. A. 1980. Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. Mon. Wea. Rev. 108, 1197-1211.
- Boken, V. K. 2005. Monitoring and predicting agricultural drought. Oxford University Press.
- Byun, H. R. and Wilhite, D. A. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. J. Climate. 117(6): 935-943.
- Edwards, D. C. and Mckee, T. B. 1997. Characteristics of 20<sup>th</sup> century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report. No. 97-2. Colorado State University. Fort Collins. Colorado.
- Hayes, M. J. 2000. What is drought? National Drought Mitigation Center. URL://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wihite, D. A. and Vanyarkho, O. V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. Bull. Am. Meteor. Soc. 80, 429-438.
- Heim Jr, R. R. 2002. A review of 20<sup>th</sup> drought indices used in the United States. Bull. Am. Meteor. Soc. 83, 1149-1165.
- Janikow, C. Z. 1993. A knowledge-intensive genetic algorithm for supervised learning. Machine Learning. 13, 189-228.
- Kendall, M. G. and Stuart, A. 1977. The advanced theory of statistics. Charles Griffin and Company: London, High Wycombe.
- Kumar, V. 1998. An early warning system for agricultural drought in an arid region using limited data. J. Arid. Environ. 40, 199-209.
- Kumar, V. and Panu, U. 1997. Predictive assessment of severity of agricultural droughts based on agro-climatic factors. J. Am. Water Resour. Association. 33(6): 1255-1264.
- Legates, D. R. and McCabe, G. J. 1999. Evaluating the use of "Goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resour. Res. 35, 233-241.

- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology Anaheim. CA. Am. Meteorol. Soc. Boston.
- Meyer, S. J., Hubbard, K. G. and Wilhite, D. A. 1993. A crop-specific drought index for corn: I. model development and validation. *Agron. J.* 86, 388-395.
- Moghaddasi, M. 2002. Daily drought monitoring and assessment in Tehran province. M. Sc. Thesis. Tarbiat Modares University. Tehran. (in Farsi)
- Palmer, W. C. 1965. Meteorological drought. Research paper No. 45. US Weather Bureau. Washington DC.
- Palmer, W. C. 1968. Keeping track of crop moisture conditions, Nationwide: the Crop Moisture Index. *Weatherwise* No. 21.
- Pham, D. T. and Karaboga, D. 1998. *Intelligent Optimization Techniques*. Pub. Springer.
- Quiring, S. M. and Papakryiakou, T. N. 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agric. for. Meteorol.* 1, 46-62.
- Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J. and Stephens, S. 2002. The drought monitor. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 83, 1181-1190.
- Thompson, L. M. 1988. Effects of changes in climate and weather variability on the yields of corn and soybeans. *J. Produc. Agric.* 1, 20-27.
- Thornwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38. 55-94.
- van Rooy, M. P. 1965. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos* 14, 43-48.
- Walker, G. K. 1989. Model for operational forecasting of western Canada wheat yield. *Agric. For. Meteorol.* 44, 339-351.
- Wells, N. 2003. *PDSI Users Manual: Version 2.0*. National Agricultural Decision Support System, University of Nebraska-Lincoln.
- Wilhite, D. A. and Neild, R. E. 1982. Determining drought frequency and intensity on the basis of plant response: Wild hay in the sand hills of Nebraska. USA. *Agric. Meteorol.* 25, 257-265.
- Wilhite, D. A. and Glantz, M. H. 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International.* 10(3): 111-120.
- Wu, H. and Wilhite, D. A. 2004. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska. USA. *Natural Hazards.* 33, 1-21.
- Zhang, J. 2004. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 102, 133-153.



## **Agricultural Drought Risk Assessment Model for Kermanshah Province, Using Statistical and Intelligent Methods**

**S. Arshad, S. Morid\*, M. R. Mobasheri and M. Agha Alikhani**

\*Corresponding Author: Associate Professor, Tarbiat Modares University, P. O. Box: 14155-3838. Tehran, Iran. E-mail: morid\_sa@modares.ac.ir

The agriculture sector has been affected by severe drought in recent years, making development of a drought warning system for agriculture crucial. Such a system can be a useful tool for policy makers and investors. This research develops a model for agricultural drought risk assessment using statistical and intelligent methods. Kermanshah province, a major rain-fed region of Iran, was selected as the study area. The model is specific to rain-fed wheat and was updated during the different phenological stages of the growing season. The inputs are a combination of the PDSI, Z-index, CMI, SPI and EDI drought indices which were selected using genetic algorithm and artificial neural networking techniques. The results show that the Z-index better predicts possible losses. The general performance of the model increased toward the end of the growing season, especially after the third stage, when the significance level of the relation reaches 1% and the results become more reliable. Furthermore, linkage of the model to the geographical information system makes it more capable of spatial analysis and more suitable for presentation of the final results.

**Key Word:** Agricultural Drought, Genetic Algorithm, Kermanshah Province, Principle Component Analysis, Vulnerability Assessment