

## ارزیابی ریسک خشک‌سالی کشاورزی محصول جو دیم تحت شرایط محدودیت داده (مطالعه موردی: آذربایجان شرقی)

مجتبی شکوهی<sup>۱</sup>، جواد بذرافشان<sup>۲\*</sup>، نوذر قهرمان<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲. استادیار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۴/۱۹)

### چکیده

ارزیابی ریسک خشک‌سالی کشاورزی در مواقع بحرانی قبل و طی فصل رشد محصول می‌تواند زمان کافی را برای سیاست‌گذاران و کشاورزان به‌منظور اتخاذ راهبردهای مناسب جهت کاهش پتانسیل ریسک خشک‌سالی فراهم کند. هدف این مطالعه توسعه مدلی آماری برای برآورد ریسک کیفی خشک‌سالی کشاورزی محصول جو دیم، قبل از کاشت و در حین فصل رشد، در شرایط محدودیت داده در استان آذربایجان شرقی است. متغیرهای ورودی مدل شامل مقادیر هفتگی شاخص بارندگی استاندارد (SPI) در پنجره‌های زمانی مختلف و متغیر خروجی و ریسک عملکرد محصول جو، با دو گروه ریسک پایین و بالا، است. برای مدل‌سازی رابطه بین متغیرهای ورودی در مراحل مختلف رشد محصول از تکنیک‌های چندمتغیره استفاده شد. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های پنج ایستگاه اهر، هشتروند، مراغه، میانه، و سراب (۱۹۸۷-۲۰۰۳) و صحت‌سنجی آن با استفاده از داده‌های ایستگاه تبریز (۱۹۷۸-۲۰۰۳) انجام شد. نتایج نشان داد تکنیک‌های چندمتغیره با در نظر گرفتن شرایط رطوبتی قبل از کاشت محصول و اضافه کردن متغیرهای جدید هم‌زمان با رشد و نمو محصول جو دیم از توانایی کافی برای ارزیابی ریسک خشک‌سالی کشاورزی برخوردارند و دقت مدل همراه با توسعه محصول افزایش می‌یابد. صحت‌سنجی مدل نشان داد مناسب‌ترین مرحله پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی محصول جو دیم مرحله گل‌دهی است. نتایج مرحله پنجه‌زنی نیز رضایت‌بخش بود.

**کلیدواژگان:** آذربایجان شرقی، تکنیک‌های چندمتغیره، جو دیم، خشک‌سالی کشاورزی، ریسک. مقدمه

### مقدمه

خشک‌سالی پدیده‌ای طبیعی و پیش‌بینی‌ناپذیر است که به علت کمبود بارندگی نسبت به میانگین بلندمدت آن طی یک دوره زمانی معین اتفاق می‌افتد و بارندگی نیازهای محیط را تأمین نمی‌کند (Wilhite, 2005). به طور کلی، چهار گروه خشک‌سالی وجود دارد که عبارت‌اند از خشک‌سالی هواشناسی، خشک‌سالی کشاورزی، خشک‌سالی هیدرولوژیک، خشک‌سالی اقتصادی-اجتماعی (Dracup et al., 1980; Wilhite and Glantz, 1985; AMS, 2000). این مطالعه بر خشک‌سالی کشاورزی متمرکز است.

خشک‌سالی کشاورزی به دلیل تنش رطوبتی خاک اتفاق می‌افتد و به افت معنادار عملکرد محصول (تولید در واحد سطح) منجر می‌شود. این نوع خشک‌سالی در سطح منطقه‌ای وسیع اتفاق می‌افتد و تأثیر آن تا زمان برداشت محصول (چند ماه پس از شروع خشک‌سالی کشاورزی) نمی‌تواند به‌درستی ارزیابی شود. از علائم خشک‌سالی کشاورزی افت بارندگی، عدم عبور

سیستم‌های باران‌زا از منطقه، و شرایط ضعیف محصول است (Boken et al., 2005). بر اثر خشک‌سالی کشاورزی عملکرد محصول کاهش می‌یابد؛ بنابراین، پایش آن به پایش فاکتورهای مؤثر بر عملکرد محصول نیاز دارد.

به‌طور کلی، عوامل مؤثر بر عملکرد محصول را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

الف) عوامل غیر زنده، از قبیل آب و خاک و وضع هوا؛ ب) عوامل مدیریت مزرعه، از قبیل خاک‌ورزی و مراقبت از محصول در مقابل آفات و بیماری‌ها؛ ج) عوامل توسعه زمین، مانند اندازه مزرعه و زهکشی و آبیاری؛ د) عوامل اقتصادی-اجتماعی، مانند فاصله تا بازار و فشار جمعیت؛ و) عوامل مصیبت‌بار، از قبیل سیل و خشک‌سالی و یخبندان.

سنجش یا تخمین برخی از عوامل مذکور اغلب عملی نیست و تأثیر برخی عوامل دیگر ممکن است در یک منطقه با ثبات اقتصادی معنادار نباشد. از این رو، فقط وضعیت هواست که تأثیر بسیار زیادی بر عملکرد محصول می‌گذارد. اگرچه پارامترهای هواشناسی متعددی- از قبیل دما، بارندگی، رطوبت

\* نویسنده مسئول: jbazr@ut.ac.ir

چند محصول زراعی در جمهوری چک، Cabas and Weersink (2009) (بررسی تأثیر عوامل اقلیمی و غیر اقلیمی بر عملکرد چند محصول زراعی)، Bannayan and Sanjani (2010) (بررسی تأثیر خشک‌سالی بر عملکرد جو گندم در استان خراسان شمالی)، Mishra and Cherkauer (2010) (ارزیابی ریسک خشک‌سالی با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد در هند) اشاره کرد. برخلاف روش‌های کمی، مطالعات چندانی در زمینه برآورد کیفی ریسک خشک‌سالی انجام نشده است. در ادامه، جزئیات برخی مطالعات انجام‌شده با این روش‌ها ارائه می‌شود. Wu *et al.* (2004) مدلی عملیاتی برای ارزیابی ریسک خشک‌سالی کشاورزی محصولات ذرت و سویا در ایالت نبراسکا (ایالات متحده) ارائه کردند. برای مدل‌سازی رابطه بین ریسک کیفی تولید محصول (یعنی طبقات ریسک پایین و بالا) و متغیرهای رطوبتی (چند شاخص خشک‌سالی شامل شاخص بارندگی استاندارد (SPI) و شاخص خشک‌سالی محصول خاص (CSDI)) از تکنیک‌های چندمتغیره (تحلیل مؤلفه‌های اصلی و ممیز و رده‌بندی) در مراحل مختلف رشد و نمو و همچنین قبل از کاشت محصول استفاده شد. نتایج نشان داد، هم‌زمان با توسعه محصول، دقت مدل ارزیابی ریسک افزایش می‌یابد. Boken *et al.* (2007)، با استفاده از تکنیک‌های چندمتغیره خطی و غیرخطی، مدلی برای ارزیابی تأثیر ریسک خشک‌سالی بر عملکرد محصول گندم در پنج منطقه کانادا ارائه کردند. نتایج نشان‌دهنده بالاتر بودن دقت مدل در سال‌های خشک در مقایسه با سال‌های غیر خشک بود.

ارزیابی ریسک خشک‌سالی کشاورزی در مواقع بحرانی قبل و در فصل رشد محصول می‌تواند زمان کافی را برای سیاست‌گذاران و کشاورزان، به‌منظور اتخاذ استراتژی‌های مناسب جهت کاهش پتانسیل ریسک خشک‌سالی، فراهم کند. هدف این مطالعه ارزیابی ریسک خشک‌سالی کشاورزی در مراحل مختلف رشد و نمو محصول جو دیم در استان آذربایجان شرقی است. چارچوب این مطالعه به مطالعه Wu *et al.* (2004) و Arshad *et al.* (2008) بسیار شبیه است. تفاوت اصلی این تحقیق با بررسی‌های Wu *et al.* (2004) در نوع داده‌های ورودی است. به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های تفصیلی محصول و خاک در منطقه مطالعاتی، این مطالعه صرفاً مبتنی بر داده‌های بارندگی (برای کمی‌سازی خشک‌سالی) و دمای هوا (برای تعیین مراحل مختلف فنولوژی) است. اما در کار تحقیقی Wu *et al.* (2004) محدودیتی از نظر دسترسی به داده‌های متنوع (اعم از تاریخ‌های دقیق فنولوژی و داده‌های رطوبت خاک و هواشناسی) وجود نداشته است. Arshad *et al.* (2008) مدلی برای ارزیابی

هوا، تابش خورشید، ابرناکی، سرعت باد- بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارند، دو پارامتر دما و بارندگی در مقایسه با دیگر پارامترهای هواشناسی بیشترین تأثیر را دارند (Diepen and van der Wall, 1996). به هر حال، تغییر در بارندگی یکی از فاکتورهای مهم در بروز خشک‌سالی کشاورزی و افت تولید محصول، به‌ویژه محصولات دیم، است (Liverman, 1990).

پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر محصولات کشاورزی به مدیریت ریسک خشک‌سالی کمک فراوانی می‌کند. ریسک در لغت عبارت است از احتمال وقوع پدیده‌ای نامطلوب. ریسک خشک‌سالی کشاورزی با توجه به نوع متغیر استفاده‌شده برای تعریف خشک‌سالی کشاورزی تعریف می‌شود. دو متغیر بسیار مهم که در تعریف خشک‌سالی کشاورزی برای محصولات دیم استفاده شده عبارت است از مقدار بارندگی در دوره رشد و عملکرد محصول (Diepen and van der Wall, 1996). بنابراین، ریسک خشک‌سالی کشاورزی می‌تواند به صورت احتمال وقوع بارندگی (یا عملکرد محصول) کمتر از آستانه بارندگی (یا عملکرد محصول) قبل یا طی فصل رشد محصول تعریف شود.

روش‌های متعددی برای ارزیابی تأثیر ریسک خشک‌سالی بر عملکرد محصولات کشاورزی به‌کار رفته که به دو دسته کیفی و کمی تقسیم می‌شوند. از روش‌های کمی می‌توان به تکنیک‌های رگرسیونی یا سری‌های زمانی اشاره کرد. در روش‌های کیفی از تکنیک‌های شناسایی الگوی خطی، از قبیل روش‌های تصحیح خطا و تحلیل ممیز، و غیر خطی، از قبیل k-نزدیک‌ترین همسایه، برای پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی کشاورزی استفاده می‌شود (Boken *et al.*, 2007).

در حوزه روش‌های کمی برآورد ریسک خشک‌سالی می‌توان به تحقیقات Xi-Men and Wei-Bin (1988) (شبیه‌سازی تابع توزیع احتمال و ریسک افت عملکرد ذرت در چین)، Kumar (1998) (مدل پیش‌آگاهی خطر خشک‌سالی کشاورزی برای محصول ارزن در هند)، Quiring and Papakryiakou (2003) (پیش‌بینی عملکرد محصول گندم بهاره با استفاده از شاخص‌های مختلف خشک‌سالی در کانادا)، Zhang (2004) (مدل ارزیابی ریسک کمی فاجعه خشک‌سالی در کمر بند پرورش ذرت چین)، Mavromatis (2007) (ارزیابی ریسک خشک‌سالی برای محصول گندم در شمال یونان)، Trnka and Hlavinka (2007) (تأثیر خشک‌سالی بر عملکرد جو بهاره در جمهوری چک)، Li and Ye (2009) (ارزیابی ریسک تولید محصول تحت شرایط خشک‌سالی و تغییر اقلیم)، Hlavinka *et al.* (2009) (رابطه فصلی بین خشک‌سالی کشاورزی و عملکرد

بین ۵ تا ۲۲ سال متغیر است. شهرستان هشتگرد فاقد ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بود. برای تخمین مقادیر عوامل هواشناسی در هشتگرد از مدل مقادیر ثبت شده در دو ایستگاه میانه (شرق) و مراغه (غرب) استفاده شد. اقلیم همه ایستگاه‌ها نیمه‌خشک سرد است؛ به استثنای ایستگاه سراب، که نیمه‌خشک فراسرد است. متوسط بارندگی سالانه در منطقه مطالعاتی ۲۹۶٫۷ میلی‌متر و متوسط دمای حداقل و دمای حداکثر به ترتیب ۶٫۲ درجه سلسیوس و ۱۷٫۹ درجه سلسیوس است.

### تعیین تاریخ مراحل فنولوژی جو دیم

بر اساس تحقیقات محلی به دست آمده از کشاورزان مناطق مورد مطالعه مشخص شد کاشت جو دیم در استان آذربایجان شرقی معمولاً از اوایل مهرماه تا اوایل آبان‌ماه انجام می‌شود. به منظور ارائه مدل در هر مرحله فنولوژی و مرحله پیش‌کاشت برای همه مناطق، تاریخ کاشت به طور متوسط هفته اول مهرماه در نظر گرفته شد. جست‌وجوهای فراوانی برای دستیابی به تاریخ مراحل مختلف فنولوژی محصول جو در منطقه انجام شد و مشخص گردید هیچ‌گونه اطلاعاتی از این دست ثبت نشده است. بنابراین، با توجه به نیاز حرارتی جو دیم پاییزه (جدول ۲) (Behnia, 1997) و استفاده از روش پایه درجه روزهای رشد (GDD)، تاریخ‌های چهار مرحله فنولوژی، شامل جوانه‌زنی و پنجه‌زنی و گل‌دهی و رسیدن دانه برای محصول جو دیم، در منطقه محاسبه شد. علاوه بر این، یک مرحله پیش‌کاشت نیز در نظر گرفته شد که یک دوره یک‌ساله قبل از کاشت جو را شامل می‌شود (Wu et al., 2004).

معادله پایه درجه روزهای رشد جهت تعیین تاریخ مراحل فنولوژی با توجه به تاریخ کاشت و نیاز حرارتی برای رسیدن به هر مرحله فنولوژی، مطابق جدول (۲)، به صورت زیر است:

رابطه (۱)

$$GDD_i = \sum_{j=1}^n \left( \frac{T_{max}(j) + T_{min}(j)}{2} - T_b \right), \text{ for } \frac{T_{max}(j) + T_{min}(j)}{2} > T_b$$

که در آن  $T_{max}(j)$  و  $T_{min}(j)$  به ترتیب دمای حداقل و حداکثر روز  $i$ ام، شماره دوره رشد (مرحله فنولوژی)، و  $T_b$  دمای پایه رشد است. دمای پایه رشد گیاه جو ۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد (Behnia, 1997). به منظور تسهیل در توسعه مدل ارزیابی ریسک خشک‌سالی، تاریخ وقوع هر یک از مراحل فنولوژی جو با استفاده از مقادیر متوسط دمای حداقل و حداکثر روزانه در کل منطقه تحت بررسی تعیین و برای همه شهرستان‌های منطقه یکسان در نظر گرفته شد. جدول ۲ زمان متوسط وقوع هر یک از مراحل فنولوژی محصول جو دیم را در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد.

آسیب خشک‌سالی به محصول گندم در استان کرمانشاه ارائه کردند که مطالعه حاضر از جهات زیر با آن فرق دارد:

۱. شیوه مدل‌سازی در مطالعه Arshad et al. (2008) بر پیش‌بینی عملکرد محصول گندم و متغیر وابسته یا پیش‌بینی‌شونده از نوع پیوسته است؛ اما در مطالعه حاضر متغیر وابسته ریسک تولید محصول و از نوع گسسته است؛ یعنی، بر اساس عملکرد محصول، هر سال در یکی از دو گروه ریسک پایین یا بالا قرار می‌گیرد.

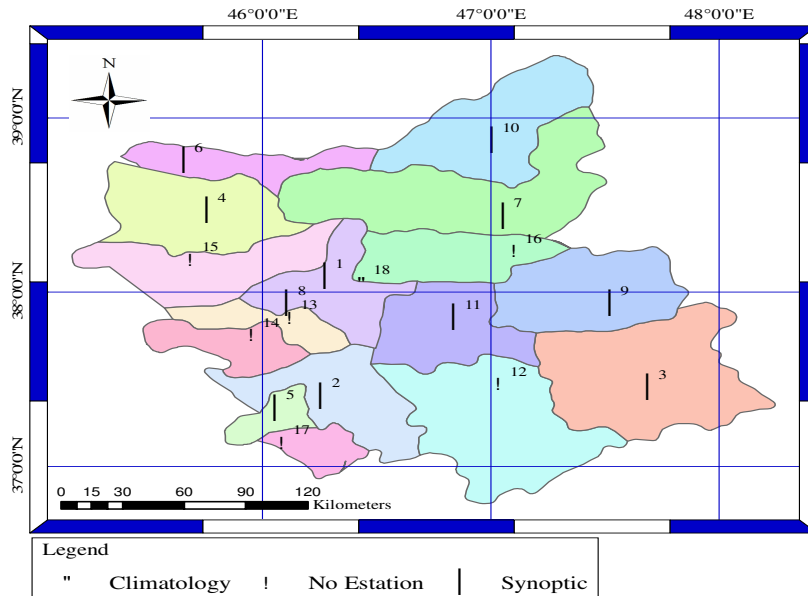
۲. مدل به‌کاررفته در مطالعه Arshad et al. (2008) از نوع رگرسیون چندمتغیره است؛ ولی در مطالعه حاضر از روش چندمتغیره تحلیل ممیز استفاده شده است.

۳. در مطالعه Arshad et al. (2008) از چندین شاخص خشک‌سالی استفاده شده است؛ اما در مطالعه حاضر صرفاً به یک شاخص خشک‌سالی توجه شده است. با این حال، در هر دو مطالعه برای کم‌کردن تعداد متغیرها تکنیک تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌کار رفته و سبک پیش‌بینی، یعنی پیش‌بینی در مراحل مختلف رشد، در هر دو مطالعه مشابه است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی

منطقه مورد بررسی استان آذربایجان شرقی ایران است. این استان در شمال غربی کشور قرار دارد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. استان آذربایجان شرقی شامل ۱۸ شهرستان است که در این مطالعه، با توجه به آمار قابل دسترس، فقط ۷ شهرستان آن بررسی شد. متوسط تولید محصول جو دیم، بر اساس آمار هفت شهرستان و طی دوره آماری ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۴، در این استان تقریباً ۶۷۲٫۸ کیلوگرم بر هکتار است. در جدول (۱) متوسط عملکرد محصول جو دیم در هر یک از شهرستان‌های تولیدکننده محصول می‌آید. آمار مذکور از ارگان‌های کشاورزی مستقر در هر شهرستان تهیه شد. در این مطالعه، علاوه بر داده‌های بلندمدت عملکرد محصول، به داده‌های هواشناسی، شامل دمای هوا و بارندگی روزانه، نیز نیاز بود. طبق اعلان سازمان هواشناسی کشور، استان آذربایجان شرقی یازده ایستگاه هواشناسی سینوپتیک دارد که پراکنش جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) می‌آید. برای انجام‌دادن این مطالعه سعی شد تا جای ممکن از ایستگاه‌های سینوپتیک مستقر در هر یک از شهرستان‌های استان استفاده شود. مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های منتخب در جدول (۱) می‌آید. ایستگاه تبریز طولانی‌ترین دوره آمار ثبت‌شده اقلیمی را دارد (۵۴ سال) و طول دوره آماری در سایر ایستگاه‌ها



هرستان	تبریز	اهر	میانه	سراب	مراغه	مرند	بناب	کلیبر	جلفا	سهند	بستان	هشترود	اسکو	آذرشهر	شستر	هریس	ملکان	خلعت	پوشان
شماره	۱	۳	۷	۹	۲	۴	۵	۱۰	۶	۸	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	

شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی و تقسیمات شهرستانی استان آذربایجان شرقی

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های منتخب استان آذربایجان شرقی

ایستگاه	سال تأسیس	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	طول جغرافیایی (درجه شرقی)	ارتفاع m	عملکرد چو (Kg/ha)	بارندگی (mm)	دمای حداقل (°C)	دمای حداکثر (°C)	اقلیم
اهر	۱۹۸۶	۳۸٫۴۳	۴۷٫۰۷	۱۲۹۰	۷۰۳	۲۹۰٫۵	۵٫۳	۱۶٫۵	نیمه‌خشک سرد
تبریز	۱۹۵۱	۳۸٫۰۸	۴۶٫۲۸	۱۳۶۱	۶۶۱	۲۷۷٫۲	۷	۱۸٫۱	نیمه‌خشک سرد
سراب	۱۹۸۶	۳۷٫۹۳	۴۷٫۵۳	۱۶۸۲	۶۹۴	۲۳۷٫۹	۱٫۳	۱۶	نیمه‌خشک فراسرد
مراغه	۱۹۸۳	۳۷٫۴	۴۶٫۲۷	۱۴۷۷	۷۲۸	۳۲۶٫۶	۷٫۷	۱۸٫۳	نیمه‌خشک سرد
میانه	۱۹۸۷	۳۷٫۴۵	۴۷٫۷	۱۱۱۰	۶۴۵	۲۸۳٫۵	۷٫۲	۲۰٫۴	نیمه‌خشک سرد
مرند	۲۰۰۰	۳۸٫۴۷	۴۵٫۷۷	۱۵۵۰	۶۴۶	۳۶۴٫۲	۷٫۷	۱۶٫۶	نیمه‌خشک سرد
هشترود*	-	۳۷٫۴۷	۴۷٫۰۵	۱۶۳۰	۶۳۳	۲۹۷٫۵	۷٫۵	۱۹٫۴	نیمه‌خشک سرد

\* فاقد ایستگاه هواشناسی است. داده‌های تخمینی هواشناسی معدل دو ایستگاه مراغه و میانه است.

جدول ۲- زمان وقوع مراحل مختلف فنولوژی برای پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی در استان آذربایجان شرقی

مراحل فنولوژی	ماه	روز	تاریخ وقوع*	حرارت مورد نیاز
پیش‌کاشت	مهر	۱۶	هفته اول	
جوانه‌زنی	آبان	۳	هفته سوم	۲۰۰ درجه
پنجه‌زدنی	فروردین	۲۸	هفته بیست و هشتم	۳۷۵ درجه
گل‌دهی	خرداد	۹	هفته سی و چهارم	۵۳۵ درجه
رسیدن دانه	تیر	۲۰	هفته چهارم	۸۳۰ درجه

\* سال زراعی از هفته سوم مهرماه (از ۱۶ مهر) آغاز می‌شود.

### تکنیک‌های چندمتغیره

و تحلیل ممیز (DA). هدف از کاربرد PCA کاهش تعداد زیاد متغیرها در قالب تعداد متغیرهای کمتر و جدید بود. متغیرهای جدید ترکیب‌های خطی از متغیرهای اصلی‌اند و طوری انتخاب

در این مطالعه، برای مدل‌سازی ریسک خشک‌سالی، از دو تکنیک چندمتغیره استفاده شد: تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

قبیل پیش‌بینی بارندگی در جنوب آفریقا (Mason, 1998)، پیش‌بینی غلظت ازن (Ghiau, 2005)، و پیش‌بینی عملکرد گندم و جو (Boken et al., 2007) استفاده شده است.

#### توسعه مدل

تأثیر استرس آبی بر عملکرد محصول دیم به مقدار و توزیع بارندگی طی فصل رشد بسیار وابسته است. در این مطالعه چنین فرض شد که فقط شرایط بارندگی قبل و در حین فصل رشد بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد و تأثیر سایر فاکتورها، مثل سیل و سرما و آفات و بیماری‌ها و نوسانات قیمت‌ها، در نظر گرفته نشد (Dietz et al., 1998). از این رو، متغیرهای ورودی (متغیرهای تأمین رطوبت) به مدل چندمتغیره از جنس مقادیر بارندگی و شامل مقادیر هفتگی شاخص بارندگی استاندارد (SPI) قبل از کاشت محصول و در حین فصل رشد در نظر گرفته شد. به‌طور کلی، SPI در ۲۶ مقیاس زمانی شامل ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۳۰، ۳۲، ۳۴، ۴۰، ۴۴، و ۵۲ هفته‌ای محاسبه شد. به دو دلیل نمی‌توان از ۲۶ مقدار SPI به‌منزله متغیرهای ورودی در توسعه مدل استفاده کرد. دلیل نخست اینکه در صورت استفاده از همه مقیاس‌ها اطلاعات مقادیر SPI در مقیاس‌های بسیار نزدیک هم‌پوشانی خواهند داشت و ممکن است بین متغیرها هم‌خطی وجود داشته باشد. وجود هم‌خطی خطای زیادی در مرحله اعتبارسنجی به مدل وارد می‌کند. همبستگی بین متغیرهای ورودی جهت توسعه مدل باید تا حد ممکن کم باشد. دلیل دوم اینکه در صورت استفاده از همه مقیاس‌های SPI درجه آزادی مدل بسیار کم می‌شود (Wu et al., 2004). برای احتراز از دو مسئله اخیر و برای کاستن تعداد متغیرها از تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. پس از بررسی‌های آماری و انتخاب سطح آستانه ۸۵ درصد برای انتخاب تعداد مناسب مؤلفه‌های اصلی (Starr and Kostrow, 1987) متغیرهای SPI هفت‌هفته‌ای (کوتاه‌مدت)، SPI بیست و هشت هفته‌ای (بلندمدت)، و سه مؤلفه اصلی نخست (PC1، PC2، و PC3) به‌منزله ورودی انتخاب شدند.

جدول ۳ تعداد و نوع متغیرهای ورودی در هر یک از تاریخ‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. متغیر وابسته در این مطالعه ریسک تولید محصول بود؛ یعنی هر سال بر اساس عملکرد استاندارد شده محصول جو در یکی از دو گروه ریسک بالا یا پایین طبقه‌بندی شد. سال زراعی با ریسک بالا سالی است که عملکرد استاندارد شده جو دیم کمتر از ۰/۵- باشد. در مقابل، یک سال با ریسک پایین سالی است که عملکرد استاندارد شده

می‌شوند که کسر قابل توجهی از تغییرات موجود در متغیرهای اصلی را توجیه کنند (Wilks, 2011). بنابراین، با داشتن  $p$  متغیر  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ ، هر مؤلفه اصلی یک ترکیب خطی از متغیرهای  $x$  است. صورت کلی مؤلفه اصلی (PC) می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$PC_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ip}x_p \quad (\text{رابطه } ۲)$$

PCi تأمین مؤلفه اصلی است و  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip}$  ضرایب یا بردارهای ویژه‌اند. حداکثر تعداد مؤلفه‌های اصلی مساوی تعداد کل متغیرهای اصلی، یعنی  $p$ ، است (Afifi and Clark, 1996). ضرایب مورد نیاز در هر یک از مؤلفه‌های اصلی طوری انتخاب می‌شود که سه شرط تأمین شود:

$$\text{Var } PC_1 \geq \text{Var } PC_2 \geq \dots \geq \text{Var } PC_p \quad (\text{الف})$$

ب) مقادیر دوبه‌دوی مؤلفه‌های اصلی ناهمبسته باشند.  
ج) مجموع مربعات ضرایب هر مؤلفه اصلی برابر ۱ شود.  
گفتنی است  $\text{Var } PC_i$  واریانس تأمین مؤلفه اصلی یا مقدار ویژه نام است. مجموع واریانس‌های  $p$  مؤلفه اصلی برابر است با واریانس کل داده‌های اصلی. هر مؤلفه اصلی می‌تواند کسری از واریانس کل را توجیه کند. بیشترین مقدار واریانس را اولین مؤلفه اصلی توجیه می‌کند و درصد واریانس توجیه‌شده به‌وسیله مؤلفه بعدی از مؤلفه قبلی کمتر است و الی آخر. بنابراین، مسئله اصلی انتخاب تعداد مؤلفه‌های اصلی مناسب است. قواعد مختلفی برای تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی وجود دارد؛ اما قابل تعمیم در همه شرایط نیستند. یک قاعده آن است که تعداد مؤلفه‌های کافی طوری انتخاب شود که درصد معینی از واریانس کل توجیه شود؛ مثلاً Starr and Kostrow (1987) عدد ۸۵ درصد را توصیه کردند.

تحلیل ممیز تکنیکی آماری برای رده‌بندی افراد یا اشیا در گروه‌های مجزا بر مبنای مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل است (Johnson and Wichern, 1998). در این مطالعه از دو روش تحلیل ممیز استفاده شد: الف) تحلیل ممیز کانونیک، که برای نمایش بصری نحوه تمایز گروه‌های مختلف استفاده می‌شود؛ ب) تحلیل ممیز رده‌بندی، که با ارائه یک قاعده رده‌بندی امکان تفکیک افراد یا اشیا را در گروه‌های مختلف فراهم می‌کند (Wilks, 2011). برای تحلیل ممیز کانونیک و رده‌بندی از تابع تشخیص خطی فیشر استفاده شد که تابعی خطی از متغیرها و معیاری برای رده‌بندی بر اساس حداکثر فاصله بین گروه‌هاست (Johnson and Wichern, 1998). از تحلیل ممیز در مسائلی از

جو دیم بیشتر از ۰/۵- باشد.

### یافته‌ها و بحث

#### واسنجی مدل

با انجام دادن فرایند تحلیل ممیز کانونیک برای داده‌های مرحله واسنجی، تابع خطی فیشر برای دو گروه ریسک پایین و بالا در هر یک از مراحل فنولوژی جو دیم در منطقه مطالعاتی حاصل شد؛ مثلاً در مرحله پیش‌کاشت تابع خطی فیشر برای گروه با ریسک پایین (d1) و گروه با ریسک بالا (d2) به ترتیب به صورت زیر بود:

رابطه ۳- الف)

$$d_1 = -0.060(SPI_{7-1W}) - 0.276(SPI_{28-1W}) - 0.056(PCI_1) - 0.021(PCI_2) + 0.093(PCI_3) - 0.706$$

رابطه ۳- ب)

$$d_2 = -1.972(SPI_{7-1W}) - 1.475(SPI_{28-1W}) - 0.569(PCI_1) + 0.327(PCI_2) + 0.051(PCI_3) - 1.231$$

برای واسنجی مدل ریسک از داده‌های پنج ایستگاه اهر، هشت‌رود، مراغه، میانه، و سراب در دوره آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۳ استفاده شد. به دلیل کمبود آمار عملکرد محصول جو در منطقه، مدل مذکور به‌طور مجزا در ایستگاه‌ها اجرا نشد؛ بلکه آمار ایستگاه‌های یادشده به‌طور یکپارچه به مدل وارد و واسنجی شد. مدل به‌دست‌آمده از مرحله واسنجی با استفاده از آمار دو ایستگاه تبریز (۱۹۷۸-۲۰۰۳) و مرند (۲۰۰۱-۲۰۰۳)، که در مرحله واسنجی استفاده نشدند، اعتبارسنجی شد. در پایان، به‌منظور نمایش کارایی مدل در منطقه مطالعاتی، ریسک خشک‌سالی در سال زراعی ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴، که در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی استفاده نشد، برای همه شهرستان‌های تحت بررسی در هر یک از مراحل فنولوژی پیش‌بینی شد.

جدول ۳. متغیرهای استفاده‌شده در توسعه مدل ارزیابی ریسک خشک‌سالی کشاورزی در مراحل مختلف فنولوژی جو

متغیر*	پیش‌کاشت (هفته ۱)	جوانه‌زنی (هفته ۳)	پنجه‌زنی (هفته ۲۸)	گل‌دهی (هفته ۳۴)	رسیدن (هفته ۴۰)
<i>SPI</i> ۷ هفته‌ای از هفته ۱	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۲۸ هفته‌ای از هفته ۱	✓	✓	✓	✓	✓
اولین <i>PCA</i> از هفته ۱	✓	✓	✓	✓	✓
دومین <i>PCA</i> از هفته ۱	✓	✓	✓	✓	✓
سومین <i>PCA</i> از هفته ۱	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۷ هفته‌ای از هفته ۳	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۲۸ هفته‌ای از هفته ۳	✓	✓	✓	✓	✓
اولین <i>PCA</i> از هفته ۳	✓	✓	✓	✓	✓
دومین <i>PCA</i> از هفته ۳	✓	✓	✓	✓	✓
سومین <i>PCA</i> از هفته ۳	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۷ هفته‌ای از هفته ۲۸	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۲۸ هفته‌ای از هفته ۲۸	✓	✓	✓	✓	✓
اولین <i>PCA</i> از هفته ۲۸	✓	✓	✓	✓	✓
دومین <i>PCA</i> از هفته ۲۸	✓	✓	✓	✓	✓
سومین <i>PCA</i> از هفته ۲۸	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۷ هفته‌ای از هفته ۳۴	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۲۸ هفته‌ای از هفته ۳۴	✓	✓	✓	✓	✓
اولین <i>PCA</i> از هفته ۳۴	✓	✓	✓	✓	✓
دومین <i>PCA</i> از هفته ۳۴	✓	✓	✓	✓	✓
سومین <i>PCA</i> از هفته ۳۴	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۷ هفته‌ای از هفته ۴۰	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SPI</i> ۲۸ هفته‌ای از هفته ۴۰	✓	✓	✓	✓	✓
اولین <i>PCA</i> از هفته ۴۰	✓	✓	✓	✓	✓
دومین <i>PCA</i> از هفته ۴۰	✓	✓	✓	✓	✓
سومین <i>PCA</i> از هفته ۴۰	✓	✓	✓	✓	✓

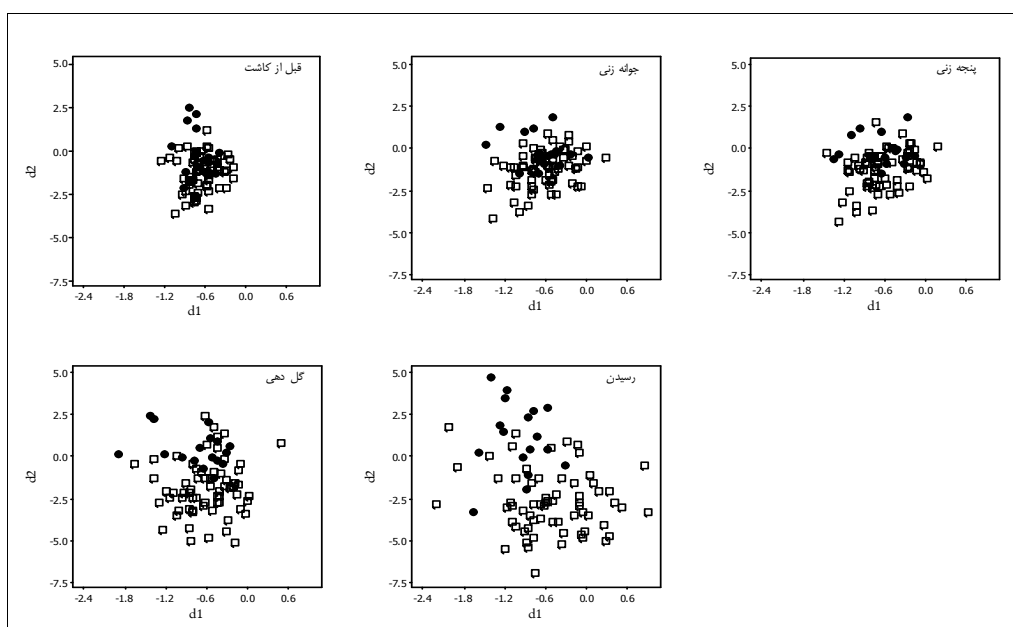
\* *SPI* هفت‌هفته‌ای از هفته اول از مقادیر *SPI* در مقیاس زمانی هفت‌هفته‌ای از هفته اول به‌دست می‌آید و اولین *PCA* از هفته اول از مقادیر *SPI* در مقیاس‌های زمانی تعریف‌شده از هفته اول حاصل می‌شود و به همین ترتیب برای متغیرهای دیگر.

گروه‌بندی می‌شود؛ در حالی که مشاهدات گروه با ریسک پایین در گوشه پایین سمت راست نمودار قرار می‌گیرد. بنابراین با استفاده از تحلیل ممیز رده‌بندی می‌توان یک قاعده رده‌بندی برای پیش‌بینی ریسک خشکسالی کشاورزی در یک سال معین به‌دست آورد. این رابطه برای مرحله پیش‌کاشت به صورت زیر است:

رابطه (۴)

$$Y = -1.861(SPI_{7-JW}) - 1.166(SPI_{28-JW}) - 0.499(PCI_1) + 0.338(PCI_2) - 0.041(PCI_3) - 0.224$$

تابع خطی فیشر برای مراحل دیگر نیز به همین شکل است؛ با این تفاوت که نوع متغیرها و ضرایب آن‌ها برای هر مرحله تغییر می‌کند. شکل (۲) نمودار مقادیر  $d_1$  در برابر  $d_2$  را در هر مرحله برای داده‌های واسنجی نشان می‌دهد. در مرحله پیش‌کاشت به‌طور قابل توجهی هم‌پوشانی بین گروه‌ها وجود دارد. اما جداسازی در جهت  $d_2$  بهتر از جهت  $d_1$  است؛ به‌طوری که تعدادی از مشاهدات با ریسک بالا در بالای گوشه نقاط مشاهده می‌شود. هم‌زمان با پیشرفت مراحل رشد و نمو جو جداسازی گروه‌ها بیشتر آشکار می‌شود. مشاهدات متعلق به گروه با ریسک بالا بیشتر در گوشه بالای سمت چپ نمودار



شکل ۲. نمودارهای متغیرهای  $d_1$  در برابر  $d_2$  در مراحل پیش‌کاشت تا رسیدن جو. دواپس و مربع‌ها به ترتیب نشان‌دهنده سال‌های با ریسک بالا و پایین است.

بالا به ترتیب  $-0.227$  و  $0.801$  محاسبه شد. در نتیجه، میانگین دو مقدار (یعنی  $0.287$ ) می‌تواند به‌منزله یک معیار در رده‌بندی سال‌های مختلف از نظر ریسک پایین یا بالا استفاده شود. به عبارت دیگر، برای یک مشاهده در مرحله پیش‌کاشت اگر مقدار تابع تشخیص، که از معادله ۴ به‌دست می‌آید، بزرگ‌تر از  $0.287$  باشد، آن سال در گروه ریسک بالا قرار می‌گیرد. در غیر این صورت به گروه ریسک پایین تعلق دارد.

#### صحت‌سنجی مدل

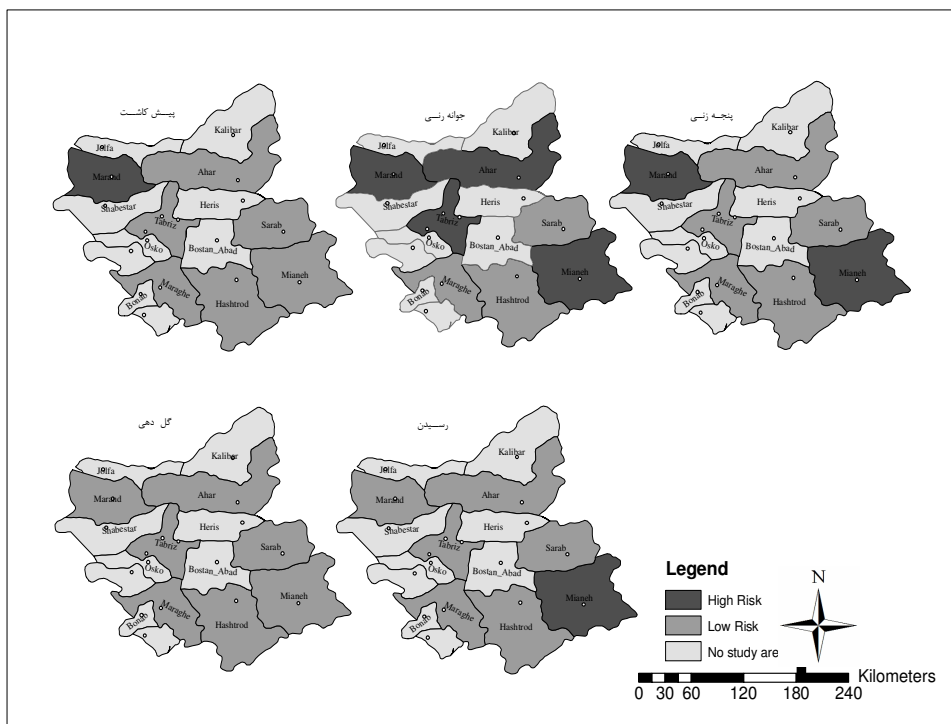
کارایی مدل‌های پیش‌بینی ریسک به‌دست‌آمده از مرحله واسنجی با محاسبه دقت مدل (احتمال رده‌بندی درست مشاهدات) برای داده‌های اعتبارسنجی ارزیابی شد. بر مبنای داده‌های اعتبارسنجی، نتایج پیش‌بینی ریسک خشکسالی کشاورزی به تفکیک مراحل مختلف فنولوژی برای هر یک از

برای پی‌بردن به اهمیت نسبی هر متغیر در توابع تشخیصی از ضرایب توابع تشخیص استفاده می‌شود؛ مثلاً در تابع تشخیص خطی مرحله پیش‌کاشت (معادله ۴) متغیر  $SPI_{7-JW}$  بالاترین تأثیر (بدون توجه به علامت) را در جداسازی دو گروه ریسک بالا و پایین دارد. به‌نظر می‌رسد فراهم‌بودن رطوبت کافی در شروع جوانه‌زنی (اوایل نیمه دوم مهرماه) تأثیری چشمگیر بر پیش‌بینی ریسک و عملکرد نهایی محصول دارد. تابع تشخیص برای مراحل دیگر به همین شکل است؛ با این تفاوت که متغیرها و ضرایب با توجه به جدول (۴) برای هر مرحله تغییر می‌کند.

از توابع تشخیص خطی فیشر به‌دست‌آمده می‌توان در هر مرحله به‌منزله یک قاعده رده‌بندی استفاده کرد؛ مثلاً در مرحله پیش‌کاشت میانگین تابع تشخیص برای گروه با ریسک پایین و







شکل ۳. پیش‌بینی مدل ریسک خشک‌سالی کشاورزی از مرحله پیش‌کاشت تا مرحله رسیدن در سال زراعی ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ برای محصول جو دیم. مناطق خاکستری بسیار روشن مناطق مطالعه‌نشده و مناطق خاکستری روشن و بسیار تیره به ترتیب مناطق با ریسک پایین و بالا را نمایش می‌دهد. ریسک مشاهده‌شده در سال زراعی یادشده برای همه مناطق مورد مطالعه پایین بود.

مرحله جوانه‌زنی احتمال پیش‌بینی صحیح به‌وسیله مدل تا ۷۴/۱ درصد افزایش می‌یابد. سطح دقت کل در مرحله پنجه‌زنی به ۷۷/۸ درصد افزایش یافت و تا مرحله گل‌دهی ثابت ماند؛ اما در مرحله رسیدن دانه به اندازه ۳/۷ درصد نسبت به مرحله قبل کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد محصول جو در مرحله رسیدن به استرس آبی به اندازه مرحله گل‌دهی واکنش نشان نمی‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت ذخیره رطوبتی در مرحله رسیدن نسبت به مرحله گل‌دهی در پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی نقش کمتری دارد.

جدول ۶. سطح دقت مدل در هر مرحله برای داده‌های اعتبارسنجی

مراحل فنولوژی	گروه	نرخ دقت %	نرخ دقت کل %
پیش‌کاشت	ریسک پایین	۶۵	۶۶/۷
	ریسک بالا	۷۱/۴	
جوانه‌زنی	ریسک پایین	۷۵	۷۴/۱
	ریسک بالا	۷۱/۴	
پنجه‌زنی	ریسک پایین	۸۰	۷۷/۸
	ریسک بالا	۷۱/۴	
گل‌دهی	ریسک پایین	۸۵	۷۷/۸
	ریسک بالا	۵۷/۲	
رسیدن	ریسک پایین	۸۵	۷۴/۱
	ریسک بالا	۴۲/۹	

سال‌ها در دو ایستگاه تبریز و مرند در جدول (۵) می‌آید. بر اساس جدول ۵ مدل‌های به‌دست‌آمده از مرحله واسنجی موفق به پیش‌بینی صحیح در همه یا بیشتر مراحل فنولوژی برای بیش از ۸۱ درصد از سال‌ها شدند. وقوع خشک‌سالی شدید در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۸۹، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱، ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹، و ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ (Khalili and Bazrafshan, 2009) در ایستگاه تبریز سبب کاهش شدید عملکرد محصول و افزایش ریسک خشک‌سالی کشاورزی در این سال‌ها شد؛ طوری که مدل توانست طی این سال‌ها ریسک همه مراحل فنولوژی را به‌درستی پیش‌بینی کند.

نتایج ارزیابی دقت مدل‌ها در مرحله اعتبارسنجی برای هر یک از مراحل فنولوژی و مرحله پیش‌کاشت در جدول (۵) می‌آید؛ مثلاً در مرحله پیش‌کاشت ۱۳ مشاهده از ۲۰ مشاهده متعلق به گروه با ریسک پایین درست رده‌بندی شد و در نتیجه سطح دقت برای این گروه برابر ۶۵ درصد است و برای گروه با ریسک بالا از ۷ مشاهده ۵ مشاهده درست رده‌بندی شد و سطح دقت برای این گروه در مرحله پیش‌کاشت به ۷۱/۴ درصد رسید. در کل از ۲۷ مشاهده دو گروه ۱۸ مشاهده در مرحله پیش‌کاشت درست رده‌بندی شد. بنابراین سطح دقت کل در این مرحله برابر ۶۶/۷ درصد است. همراه رشد و نمو محصول، در

## پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی کشاورزی در سال زراعی ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴

به‌منظور ارائه تصویری از پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی کشاورزی در استان آذربایجان شرقی نتایج پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی کشاورزی برای سال زراعی ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴، که در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی استفاده نشد، در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارائه شد (شکل ۳). ریسک حادث در سال زراعی یادشده در همه شهرستان‌های استان پایین بود. بر اساس شکل (۳) دقت مدل در مرحله گل‌دهی بسیار بیشتر از دیگر مراحل است؛ به‌طوری که مدل توسعه‌یافته برای این مرحله توانست شدت کیفی ریسک را در همه شهرستان‌ها درست پیش‌بینی کند. البته، نتایج مرحله پیش‌کاشت نیز قابل توجه است. مدل در این مرحله توانست نسبت به مراحل جوانه‌زنی و پنجه‌زنی پیش‌بینی‌های درست‌تری داشته باشد.

### نتیجه‌گیری

مدل ارائه‌شده در این تحقیق می‌تواند به‌منظور پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی کشاورزی، تحت شرایط محدودیت داده، در مراحل مختلف رشد و قبل از دوره رشد محصول جو دیم در منطقه مورد مطالعه به‌کار رود. این مدل صرفاً با استفاده از اطلاعات بارندگی در هر مرحله رشد و اضافه‌کردن اطلاعات بارندگی از مراحل قبل به مرحله مورد نظر پیش‌بینی به‌هنگامی از ریسک خشک‌سالی کشاورزی طی رشد و نمو محصول ارائه می‌دهد. بر اساس تحقیقات این مطالعه نتایج زیر حاصل شد:

۱. صحت پیش‌بینی ریسک هم‌زمان با رشد و نمو محصول

بهبود می‌یابد. در مرحله پیش‌کاشت (اوایل نیمه دوم مهرماه) احتمال پیش‌بینی صحیح با مدل ۶۶/۷ درصد است و با رشد و نمو محصول صحت پیش‌بینی ریسک با مدل حداکثر به ۷۷/۸ درصد در مرحله گل‌دهی می‌رسد.

۲. نتایج نشان داد شاخص ذخیره رطوبتی در مرحله رسیدن (دهه سوم خردادماه تا دهه سوم تیرماه) نقش کمتری در پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی کشاورزی نسبت به مرحله گل‌دهی دارد. بنابراین افزایش دقت در پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی کشاورزی با مدل قبل از برداشت محصول امکان‌پذیر است.

۳. مدل پیش‌بینی ریسک خشک‌سالی کشاورزی موفق به پیش‌بینی درست در همه یا بیشتر مراحل فنولوژی برای بیش از ۸۱ درصد سال‌ها شد. همچنین، مدل توانایی مطلوبی در پیش‌بینی ریسک دارد؛ به‌خصوص در سال‌هایی که خشک‌سالی شدید واقع می‌شود.

۴. نوآوری این تحقیق استفاده از داده‌های کم در چارچوب تکنیک‌های چندمتغیره و موفقیت آن در پیش‌بینی‌های ریسک محصول است؛ زیرا در مطالعه مشابهی که Wu et al (2004) انجام دادند، علاوه بر SPI، از شاخص خشک‌سالی محصول خاص (CSDI) نیز استفاده شد. سطح دقت در مرحله اعتبارسنجی در بهترین زمان پیش‌بینی برای سویا ۸۲/۵ درصد به‌دست آمد که در مطالعه حاضر به ۷۷/۸ درصد می‌رسد و در مقایسه با آن دقتی قابل توجه دارد. حتی دقت پیش‌بینی‌ها پیش از کاشت محصول تقریباً مشابه است.

## REFERENCES

- Afifi, A., Clark, V. A., and May, S. (2004). Computer-aided multivariate analysis (4th ed.), USA. Chapman and Hall/CRC Press.
- American Meteorological Society (2004). Statement on meteorological drought, *Bulletin of American Meteorological Society*, 85, 771-773.
- Arshad, S., Morid, S., Mobasheri, M., and Agha Alikhani, M., (2008). Agricultural drought risk assessment model for Kermanshah province, using statistical and intelligent methods, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 9 (3):1-23.
- Bannayan, M. and Sanjani, S. (2010). Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran, *Field Crops Research*, 118, 105-114.
- Behnia, M. R. (1997). *Cold cereals* (2nd ed.), Iran: University of Tehran, (In Farsi).
- Bihanta, M. and Zare, M. A. (2010). Statistical methods in natural resources, Iran: University of Tehran, (In Farsi).
- Boken V. K., Haque C. E., and Hoogenboom G. (2007). Predicting Drought Using Pattern Recognition, *Annals of Arid Zone*, 46 (2), 133-144.
- Boken, K., Cracknell, P., and Heathcote, L. (2005). *Monitoring and predicting agricultural drought: a global study*, New York: Oxford University.
- Cabas, J. and Weersink, A. (2009). Crop yield response to economic site and climatic variables, *Climatic Change*, 1-18.
- Diepen, C. A. and van der Wall, V. (1996). Crop growth monitoring and yield forecasting at regional and national scale, In J. F. Dallemend and P. Vossen (Eds.), Proc, Workshop for Central and Eastern Europe on Agro-meteorological Models: Theory and Applications, The MARS Project Ispra, Italy, November 21-25, 1994, European Commission, Luxembourg, 143-157.
- Dietz, T. J., Put, M., and Subbiah, S. (1998). Drought risk assessment for dryland agriculture in semiarid Telangana, Andhra Pradesh, India, In: H. J. Bruins (ed.) *The Arid Frontier: Interactive Management of Environment and Development*, Chap. 8, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 143-161.

- Dracup, J. A., Lee, K. S., and Paulson, E. G. (1980). On the definition of droughts, *Water Resource Research*, 16: 297-302.
- Ghiaus, C. (2005). "Linear fuzzy-discriminant analysis applied to forecast ozone concentration classes in sea-breeze regime, *Atmospheric Environment*, 39 (26), 4691-4702.
- Hlavinka, P., Trnka, M., Semera' dova, D., Dubrovsky', M. Z'.., alud, Z., and Moz'ny, M. (2009). Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 431-442.
- Johnson, R. and Wichern, D. (1999). Applied statistical multivariate analysis, (Translated by H. Niroomand), Iran: University of Mashhad, (In Farsi).
- Khalili, A. and Bazrafshan, J. (2009). Drought severity and extent analysis of Iran during, 1965-2003, In: National Conference of *water crisis in agriculture and natural resources*, Azad University, Shahre Rey.
- Kumar, V. (1998). An early warning system for agricultural drought in an arid region using limited data, *Journal of Arid Environments*, 40, 199-209.
- Li, Y. and Ye, W. (2009). Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts, *Climate Research*, 39: 31-46.
- Liverman, D. M. (1990). Drought and Agriculture in Mexico: The case of Sonora and Puebla in 1970, *Annals of the Association of American Geographers*, 80(1), 49-72.
- Mason, S. J. (1998). *Seasonal forecasting of South African rainfall using a non-linear discriminant analysis model*, *International Journal of Climatology*, 18 (2), 147-164.
- Mavromatis, T. (2007). Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece, *International Journal of Climatology*, 27, 911-924.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, In: Proceedings of the Eighth Conference on *Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, 179-184.
- Mishra, V. and Cherkauer, K. A. (2010). Retrospective droughts in the crop growing season: Implications to corn and soybean yield in the Midwestern United States, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (7-8), 1030-1045.
- Quiring, S. M. and Papakryiakou, T. N. (2003). An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies, *Agricultural and Forest Meteorology*, 118, 49-62.
- Starr, T. B. and Kostrow, P. I. (1978). The response of spring wheat yield to anomalous climate sequences in the United States, *Journal of Applied Meteorology*, 17 (8), 1101-1115.
- Trnka, M. and Hlavinka, P. (2007). Agricultural drought and spring barley yields in the Czech Republic, *Plant Soil Environment*, 53 (7), 306-316.
- Wilhite, D. A. and Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions, *Water International*, 10 (3), 111-120.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in atmospheric sciences* (3<sup>rd</sup> ed), USA: Academic Press.
- Wu H., Kenneth, G., Hubbard, A., and Wilhite, D. A. (2004). An agricultural drought risk-forecasting model for corn and soybeans, *International Journal of Climatology*, 24, 723-741.
- Xi-Min, Y. and Wei-Bin, P. (1988). Monte Carlo method for risk analysis of climatic damage affecting the yields of crops, *Agricultural and Forest Meteorology*, 43, 183-191.
- Zhang, J. (2004). Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 102, 133-153.