

مدل‌سازی عملکرد گندم و جو دیم بر اساس شاخص‌های خشکسالی و متغیرهای هواشناسی

ابوالفضل مساعدی^{*۱} - سمانه محمدی مقدم^۲ - محمد قبائی سوق^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۱۸

چکیده

نوسانات عوامل آب و هوایی و تنش‌های حاصل از آن‌ها نقش مهمی در مقدار تولید محصولات کشاورزی به‌ویژه در شرایط دیم دارند. در این تحقیق ارتباط بین عملکرد محصولات گندم و جو دیم با متغیرهای آب و هوایی شامل: دمای حداقل، دمای میانگین، دمای حداکثر، بارندگی، تبخیر و تعرق و شاخص‌های خشکسالی شامل: شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) در ایستگاه‌های بجنورد، مشهد و بیرجند بررسی و مدل‌سازی گردید. با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) دوره‌های موثر بر تنش‌های آب و هوایی و خشکی از میان ۳۴ دوره شامل ۱، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۹ ماهه و دوره مرطوب انتخاب شده برای هر یک از متغیرها تعیین گردیدند. نتایج نشان داد که در ایستگاه بجنورد برای برآورد عملکرد محصولات گندم و جو مدل‌های ساخته شده بر اساس متغیرهای شاخص SPI، در ایستگاه مشهد مدل‌های ترکیبی و در ایستگاه بیرجند برای گندم مدل ترکیبی و برای جو مدل ساخته شده بر اساس شاخص RDI دارای بیش‌ترین دقت و صحت می‌باشند. بر اساس معادلات استخراج شده، در بجنورد تنش‌های ناشی از خشکسالی در دوره ۴ ماهه منتهی به فروردین، مشهد ۲ ماهه مهر و آبان و بیرجند ۲ ماهه منتهی به اسفند و ماه خرداد بیش‌ترین تاثیر را بر عملکرد دارند. تنش‌های ناشی از حداقل و حداکثر دما در بجنورد در دوره‌های ۹ ماهه منتهی به خرداد، مشهد ۶ ماهه منتهی به خرداد و بیرجند ۶ ماهه منتهی به اسفند بیش‌ترین تاثیر را بر عملکرد دارند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، تنش دمایی، رگرسیون چند متغیره، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)، عوامل آب و هوایی

مقدمه

تعیین مهم‌ترین عوامل اقلیمی موثر بر تولید گندم، جو و یولاف در منطقه‌ی جنب قطبی آلاسکا مطالعه‌ای انجام دادند. بر اساس نتایج آن‌ها عوامل تغییرات تعداد روزهای بین دو بارندگی در یک فصل رشد، کمبود بارندگی و دما می‌توانند ۷۰ درصد تغییرات محصول سالیانه را در تمام رقم‌ها توضیح دهد. لاندائو و همکاران (۱۶) از عوامل آب و هوایی در مزارع بریتانیا برای مدل‌سازی عملکرد گندم زمستانه استفاده کردند. بر اساس نتایج آن‌ها بارندگی در زمان قبل از گل‌دهی و دوره‌های گل‌دهی و پر شدن دانه و در بهار دارای تاثیر منفی بر عملکرد گندم است. وارد آمدن خساراتی در اثر یخبندان زمستانه، تاثیر مثبت استمرار دما در مرحله پر شدن دانه و تاثیر مثبت تابش خورشیدی در مرحله گلدهی به دلیل افزایش فتوسنتز است. ویو و همکاران (۳۴) گزارش کردند که در مناطق شمالی چین بارندگی عامل محدود کننده عملکرد گندم می‌باشد در حالی که در مناطق جنوبی تاثیر توأم تشعشع کم و دمای بالا عامل اصلی محدود کننده است. ژیاو و همکاران (۳۵) تاثیر دما بر گندم زمستانه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دما باعث تغییر معنی‌داری در مراحل رشد و مصرف آب گندم زمستانه در مناطق نیمه‌خشک شمال غربی چین می‌شود.

نتایج تحقیق بازگیر و همکاران (۴) نشان داد که در سندج و قروه

شناخت روابط بین مقدار عملکرد محصول و پارامترهای اقلیمی به منظور پیش‌بینی تولید ضروری می‌باشد. عملکرد محصولات کشاورزی به‌ویژه در شرایط دیم به شدت تحت تاثیر عوامل آب و هوایی و نوسانات آن‌ها می‌باشد. متغیرهای هواشناسی متعددی در مراحل مختلف رشد گیاهان زارعی و به تبع آن تولید محصول نهائی موثرند که شناخت عوامل مهم و تاثیرگذار امکان توسعه‌ی مدل مناسب برای تصمیم‌گیری‌های صحیح در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، تنش‌های محیطی ناشی از عوامل آب و هوایی و ویژگی‌های خشکسالی به شدت عملکرد محصولات کشاورزی را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی موثر بر عملکرد محصولات زراعی متغیرهای بارش (۱۴ و ۱۶)، دما و رطوبت خاک (۳۷) و تابش خورشیدی (۱۶) را شامل می‌شوند. شارات و همکاران (۲۶) به‌منظور

۱- استاد و دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

*- نویسنده‌ی مسئول: (Email: mosaedi@um.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب دانشگاه بوعلی سینا، همدان

علاوه بر متغیرهای هواشناسی، تنش‌های محیطی ناشی از خشکسالی نیز یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر عملکرد محصولات زراعی می‌باشند. این پدیده در اواسط فصل رشد می‌تواند بر وضعیت‌های شکل‌گیری غلاف و دانه و در انتهای فصل رشد بر پرشدن دانه تاثیر زیادی باقی گذارد که در این میان تنش‌های ناشی از خشکسالی‌های اواسط دوره رشد تاثیر بیشتری بر کاهش عملکرد محصول دارند (۱۳). در تحقیقات متعددی ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی و عملکرد محصولات زراعی از طریق شاخص‌های SPI (۱۲، ۱۸ و ۳۵)، شاخص پالم (۱۸ و ۲۰)، شاخص Z (۹ و ۲۰) و شاخص رطوبت محصول CMI (۱۸) بررسی شده است که نتایج آن‌ها بیانگر توانائی این متغیرها در برآورد بهتر تغییرات عملکرد محصولات مختلف می‌باشد.

مایر و همکاران (۱۸) از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بررسی ارتباط بین متغیرهای هواشناسی، شاخص‌های خشکسالی پالم (PDSI) و شاخص رطوبت محصول (CMI) با عملکرد ذرت در دشت‌های نیمه غربی آمریکا استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش PCA ابزار آماری قدرتمند برای ارزیابی ارتباط بین متغیرهای اقلیمی با عملکرد محصول می‌باشد. یامو و همکاران (۳۷) با استفاده از شاخص‌های آب و هوایی (ترکیبی) عملکرد محصولات ذرت، سویا و سورگوم در تناوب گیاهی را مدل‌سازی نمودند. آن‌ها بدین منظور از سه متغیر پنجره‌های بیولوژیکی (شامل تعداد روزهای مطلوب یا زیانبار برای رشد گیاه بر اساس متغیرهای دما و رطوبت خاک) و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) استفاده نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها شاخص SPI ۹ ماهه (ماه‌های سپتامبر تا می) می‌تواند تا ۵۰ درصد تغییرات عملکرد ذرت را برآورد نماید. ضمن آن‌که متغیر پنجره بیولوژیکی ۲ (شامل تعداد روزهایی که رطوبت خاک بین نقطه پژمردگی و ظرفیت مزرعه‌ای و دمای خاک بیش از ۴۱ درجه فارنهایت باشد) در ترکیب با دمای ماه می نیز می‌تواند تا حدود ۸۰ درصد تغییرات عملکرد محصولات سویا و ذرت را بیان کند.

کوئیرینگ و پاپاکریاکو (۲۰) با استفاده از ۴ شاخص خشکسالی کشاورزی PDSI، Z (مشتق شده از شاخص پالم)، SPI و NOAA به پیش‌بینی محصول گندم بهاره در غرب کانادا پرداختند. آن‌ها با ایجاد مجموعه‌ای از روابط رگرسیونی خطی بین تولید و مقادیر شاخص‌های خشکسالی در مناطق مختلف، بیان داشتند که مناسب‌ترین شاخص برای برآورد عملکرد گندم در غرب کانادا، شاخص Z می‌باشد. سایان و بوزا (۲۵) با مدل‌سازی محصول گندم بر اساس عوامل محیطی شامل بارندگی، دمای حداقل و حداکثر و متغیرهایی مشتق شده از مدل پالم در بوینس‌آیرس، بیان داشتند

۶۸ درصد، کرمانشاه ۹۱ درصد و کنگاور ۸۱ درصد از تغییرات عملکرد محصول گندم دیم ناشی از تغییرات پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های منتخب هواشناسی کشاورزی می‌باشد. طلیدی و بهرامی (۳۰) با بررسی تاثیر بارندگی و درجه حرارت بر عملکرد گندم دیم در استان کرمانشاه بیان داشتند بارندگی بیش از درجه حرارت بر عملکرد محصول گندم دیم موثر است و بارندگی طی ماه‌های فروردین و اردیبهشت بیش از نیمی از تغییرات عملکرد را برآورد می‌نماید. عزیزی و یاراحمدی (۲) با بررسی ارتباط بین پارامترهای اقلیمی و عملکرد گندم دیم در دشت سیلاخور استان لرستان بیان کردند که ارتباط مستقیمی بین عملکرد گندم و متغیرهای مقدار بارش پائیز و تعداد روزهای بارانی دوره مرطوب سال و ارتباط معکوس بین تعداد روزهای یخبندان بهار و تاخیر در اولین بارش پاییز و عملکرد گندم دیم در این منطقه وجود دارد و تنها ۴۷ درصد از تغییرات عملکرد گندم توسط متغیرهای اقلیمی برآورد شده است. قربانی و همکاران (۸) تاثیر مقدار بارش در بازه‌های زمانی مختلف را بر عملکرد گندم دیم در ایستگاه‌های استان قزوین طی یک دوره ۱۱ ساله بررسی نمودند. آن‌ها با تعریف ۷۶ متغیر مرتبط با بارش طی فصل رشد، همبستگی آن‌ها را با عملکرد گندم مورد آزمون قرار دادند. بر پایه یافته‌های آن‌ها متغیرهایی که مجموع بارش ۶ ماه اول سال زراعی تا ۲۰ روز بعد از آن را شامل می‌شدند، بیش‌ترین همبستگی را برای بیان تغییرات عملکرد دارا بودند.

مساعدی و کاهه (۲۲) اثر بارندگی و نوسانات آن را بر عملکرد محصولات گندم و جو در استان گلستان بررسی و نشان دادند که بارندگی ماه‌های خرداد، آبان و آذر برای گندم و ماه‌های ابتدا و انتهای دوره کشت برای جو بیش‌ترین تاثیر را بر عملکرد دارند. فرج‌زاده اصل و همکاران (۶) در مطالعه‌ای تغییر پذیری محصول گندم با رویکرد تغییر پارامترهای اقلیمی از جمله دما و بارندگی در استان خراسان رضوی را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج مدل منطقه‌ای، متغیرهای مجموع بارش ماه ژانویه، فوریه، میانگین دمای ماه ژانویه، میانگین حداکثر دمای ژانویه و حداقل دمای ماه مارس در میزان عملکرد گندم بیش‌ترین تاثیر را دارند. فیضی اصل و همکاران (۷) نشان دادند که متوسط دمای سالیانه و مجموع بارندگی سال زراعی به صورت مثبت و میزان تبخیر از تشت کلاس A و متوسط حداکثر دمای سالیانه به صورت منفی بر عملکرد دانه گندم رقم سرداری در منطقه مراغه تاثیر دارند. سبزی‌پرور و همکاران (۲۴) در تحقیقی بهترین شاخص‌ها و متغیرهای آگروکلیمایی موثر در تولید گندم دیم و آبی را برای ۷ شهر در استان همدان تعیین نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها شاخص‌های کمبود بارش مرجع و گیاهی همبستگی قوی‌تری با عملکرد گندم در مقایسه با سایر شاخص‌ها دارند در حالی که شاخص‌های درجه-روز رشد همبستگی‌های معنی‌داری را نشان ندادند.

بیرجند بر اساس روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (روش PCA به منظور کاهش حجم داده‌ها و حذف هم‌پوشانی متغیرهای ورودی) و تاثیر تنش‌های ناشی از خشکسالی بر عملکرد می‌باشد. در ادامه با انتخاب عوامل اقلیمی موثر از روش PCA، با استفاده از مدل‌های مختلف آماری (بر پایه روش‌های رگرسیون چند متغیره) بهترین مدل برآورد عملکرد محصولات زراعی گندم و جو دیم بر مبنای هریک از متغیرهای مورد بررسی یا ترکیب آن‌ها در هر ایستگاه تعیین می‌گردد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از داده‌های هواشناسی (شامل مقادیر ماهانه بارندگی، دمای حداقل، دمای میانگین، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، تعداد ساعات آفتابی و سرعت باد) و داده‌های عملکرد محصولات گندم و جو دیم ایستگاه‌های سینوپتیک بجنورد، مشهد و بیرجند که به ترتیب مراکز استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی می‌باشند، استفاده شده است. موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی در استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی در گستره ایران در شکل ۱ نشان داده شده است. مناطق مورد مطالعه در شمال شرق ایران و بین عرض‌های جغرافیائی ۳۰ تا ۳۸ درجه شمالی و طول‌های جغرافیائی ۵۵ تا ۶۱ درجه شرقی قرار دارند و در محدوده‌ی مذکور از تنوع اقلیمی قابل توجهی برخوردار می‌باشند. به طوری که ایستگاه بجنورد با قرار داشتن در ارتفاع ۱۰۹۱ متر از سطح دریا دارای میانگین بارش ۲۶۵ میلی‌متر در سال و میانگین دمایی ۱۳/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مشهد با بارندگی معادل ۲۵۶ میلی‌متر در سال و متوسط دمایی ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد نسبت به بیرجند با متوسط بارش ۱۶۵/۴ میلی‌متر و دمای ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد از وضعیت رطوبتی مناسب‌تری برخوردار می‌باشد.

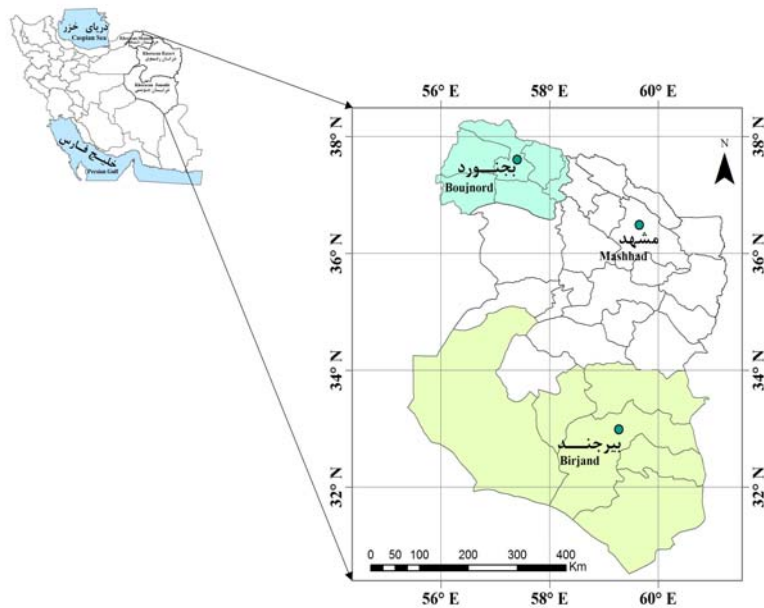
محصولات زراعی گندم و جو از مهم‌ترین گیاهان موجود در نظام‌های کشت هر سه استان می‌باشد. به طوری که در مجموع سطح زیر کشت گندم و جو دیم در سه استان به ترتیب برابر ۲۱۰۷۳۴ هکتار و ۴۴۵۶۱ هکتار می‌باشد (۳). طول دوره آماری داده‌های عملکرد محصولات گندم و جو برای ایستگاه مشهد ۲۳ سال و برای ایستگاه‌های بجنورد و بیرجند هریک ۲۱ سال می‌باشد که برخی از مشخصات آماری آن‌ها در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. آمار ماهانه متغیرهای هواشناسی نیز در دوره‌ای متناظر با دوره‌ای که مقادیر عملکرد گندم و جو دیم در اختیار قرار دارند، از پژوهشکده اقلیم‌شناسی اخذ گردید.

مدل ارائه شده با پنج متغیر می‌تواند تا ۹۵/۷۹ درصد تغییرات تولید گندم را به وسیله این عوامل برآورد نماید. هلاوینکا و همکاران (۹) ارتباط بین خشکسالی‌های فصلی کشاورزی را با استفاده از شاخص Z با عملکرد ۸ محصول در ۷۷ ناحیه از جمهوری چک بررسی نمودند. آن‌ها بیان داشتند که خشکسالی‌ها بر کاهش عملکرد محصول تاثیر معنی‌داری داشته است و ارتباط‌های معنی‌داری بین مقدار شاخص Z و تغییرات عملکرد محصولات مختلف مشاهده می‌شود.

بنایان و همکاران (۳) ارتباط بین شاخص خشکی^۱ و عملکرد محصولات گندم و جو در شرایط دیم را برای ۱۱ ایستگاه واقع در استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی و اثر شاخص‌های اقلیمی نوسانات شمالی (AO)، نوسانات اطلس شمالی (NAO) و NINO3.4 بر این ارتباط را نیز بررسی نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها ارتباط معنی‌داری بین شاخص خشکی و عملکرد گندم و جو در مناطق مورد بررسی مشاهده شد به طوری که این ارتباط برای جو شدیدتر بوده است. هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین شاخص‌های اقلیمی NAO و NINO3.4 با شاخص خشکی وجود دارد. جاینتی و همکاران (۱۲) با بررسی ارتباط بین مقدار تولید سه واریته‌ی ذرت و شاخص SPI در مناطق جنوب مالاوی نشان دادند که خشکسالی بر اساس شاخص SPI در ماه‌های فوریه و اوایل ماه مارس بیش‌ترین آسیب را به عملکرد ذرت در این مناطق وارد می‌کند.

با توجه به نتایج تحقیقات ارائه شده، عوامل آب و هوایی و اقلیمی متعددی بر رشد و عملکرد محصولات زراعی موثر می‌باشند. بررسی ارتباط این عوامل با عملکرد و مطالعه روابط بین آن‌ها در استخراج مدل‌های آب و هوا-محصول بسیار ضروری می‌باشد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل بالا بودن ضریب تغییرات بارندگی و هم‌چنین وقوع خشکسالی‌های مکرر، مقدار تولید سالانه محصولات کشاورزی به‌ویژه محصولات گندم و جو نوسانات بیشتری را دارد. بر اساس بررسی‌های انجام شده بیش‌تر مدل‌های ارائه شده تنها بر اساس متغیرهای مرتبط با بارندگی و دما می‌باشند و شاخص‌های خشکسالی (به ویژه شاخص‌هایی که تعیین آن‌ها نسبتاً به راحتی امکان‌پذیر است) کم‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر تعداد زیاد عوامل آب و هوایی موثر بر تولید و همبستگی آن‌ها با یکدیگر، می‌تواند سبب پیچیده‌تر شدن مدل شده و علاوه بر آن سبب ایجاد تورم واریانس در مدل‌ها شود.

بنا بر آنچه گفته شد هدف از این تحقیق در گام نخست بررسی ارتباط بین متغیرهای هواشناسی (بارندگی، دمای حداقل، میانگین و حداکثر و تبخیر و تعرق) و شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI با عملکرد محصولات گندم و جو در ایستگاه‌های بجنورد، مشهد و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی در بهمنی ایران و استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی

Figure 1- Geographical locations of study area in Iran and Khorasan Shomali, Razavi, and Jonoubi provinces

افزایش عملکرد در واحد سطح می‌گردند. از این رو، عملکرد محصولات کشاورزی علاوه بر عوامل آب و هوایی تابع عوامل مدیریتی و سایر عوامل ذکر شده می‌باشد و این عوامل می‌توانند باعث ایجاد روند در مقادیر عملکرد سالانه شوند. اثرات این عوامل باید از داده‌های عملکرد به نحوی حذف گردد هر چند ممکن است در عمل چنین کاری دشوار باشد. در این تحقیق به منظور بررسی روند داده‌ها از آزمون من-کندال استفاده شده است.

در طی سه دهه گذشته تنها یک چهارم افزایش تولید غذا در جهان مربوط به گسترش سطح زیر کشت بوده و بقیه از طریق بهبود تولید در واحد سطح حاصل شده است. بررسی روند ۵۰ ساله تولید غلات در ایران نشان می‌دهد که سطح زیر کشت گندم در طی ۱۰ سال گذشته رشد اندکی داشته است و افزایش تولید این محصول از طریق بهبود روش‌های مدیریت شامل آبیاری، مصرف نهاده‌ها، بهبود وارپته‌ها و مکانیزاسیون حاصل شده است که این عوامل منجر به

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های آماری داده‌های عملکرد محصولات زراعی گندم و جو دیم در شهرستان‌های مورد بررسی (۳)

Table 1- Statistical properties of rain-fed wheat and barley yield in study areas

شهرستان City	محصول Crop	دوره آماری duration	برخی از مشخصات آماری عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield's statistical properties (kg/ha)			
			حداقل minimum	میانگین average	حداکثر maximum	انحراف معیار Standard deviation
بجنورد Boujnord	گندم wheat	1984-04	345.1	865.3	1425.9	254
	جو barley	1984-04	303.6	758.4	1101.6	211.1
مشهد Mashhad	گندم Wheat	1984-06	137.5	416.3	800.0	175.6
	جو barley	1984-05	169.3	441.4	701.6	140.7
بیرجند Birjand	گندم Wheat	1984-04	83.2	225.2	400.3	75.9
	جو barley	1984-04	131.1	229.3	350.3	58.4

مشهد و بیرجند و ۷ ماهه‌ی آبان الی اردیبهشت در مورد بجنورد)، به عنوان دوره‌هایی که ممکن است وضعیت آب و هوایی و خشکسالی در آن‌ها بر مقدار عملکرد مؤثر باشند، در نظر گرفته شدند. دوره‌های مرطوب برای هر ایستگاه بر اساس منحنی آمپروترومیک آن ایستگاه استخراج شده‌اند. به این ترتیب برای هر پارامتر هواشناسی یا شاخص خشکسالی، ۳۴ دوره (شامل ۹ دوره یک ماهه، ۸ دوره دو ماهه، ۷ دوره سه ماهه، ۶ دوره چهار ماهه، ۱ دوره پنج و یا هفت ماهه، ۲ دوره شش ماهه و ۱ دوره نه ماهه) در نظر گرفته شد. در تحقیق حاضر با توجه به این که: الف) محصول قبل از تیر برداشت می‌شود، ب) بارندگی در فصل تابستان ناچیز است و ج) ذخیره رطوبتی خاک از تابستان به سال زراعی بعد منتقل نمی‌شود، سال آبی معادل دوره مهر تا خرداد منظور شده است.

برای نام‌گذاری عوامل مورد استفاده، هر عامل با یک حرف انگلیسی و یک عدد دو رقمی مشخص (X_{nn}) شده است. حرف‌ها نشانه‌های متغیرهای بارندگی (P)، دمای حداقل (Tn)، دمای میانگین (T)، دمای حداکثر (Tx)، تبخیر و تعرق (E)، شاخص بارش استاندارد شده (S) و شاخص شناسایی خشکسالی (R) می‌باشند. رقم یکان اعداد نشان‌دهنده شماره ماه منتهی به دوره مورد نظر و رقم دهگان نشان‌دهنده تعداد ماه‌های آن دوره می‌باشد.

پارامترهای آب و هوایی و دوره‌های زمانی مورد بررسی

در مناطق مختلف آب و هوایی به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، بالا بودن میزان تبخیر و تعرق و تمرکز بارش در محدوده‌ی کوتاهی از سال، می‌تواند سبب افزایش اثرات تنش‌های کم‌آبی بر عملکرد محصول گردد. در نتیجه، در این مناطق استفاده از متغیر بارندگی به تنهایی نمی‌تواند منجر به ارائه مدلی مناسب برای توصیف عملکرد محصول شود. از طرفی به نظر می‌رسد در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر تبخیر و تعرق (که خود اثر متغیرهای دما، رطوبت، تابش خورشیدی و باد را در بر دارد) و شاخص‌های خشکسالی (نشان - دهنده تنش‌های رطوبتی و خشکی در طول دوره رشد)، بتوانند منجر به افزایش دقت مدل‌سازی عملکرد محصول گردند. از این‌رو در این تحقیق از ۷ متغیر شامل: دمای حداقل، دمای میانگین، دمای حداکثر، بارش، تبخیر و تعرق، شاخص SPI و شاخص RDI استفاده شده است.

با توجه به این که هر یک از پارامترهای آب و هوایی یا خشکسالی در دوره‌های کوتاه مدت نیز می‌توانند بر عملکرد محصول مؤثر باشند، دوره‌های زمانی ۱ تا ۴ ماهه (معادل دوره مرطوب)، ۶ ماهه پائیز و زمستان، ۶ ماهه زمستان و بهار، ۹ ماهه منتهی به خرداد (مهر الی خرداد) و همچنین دوره مرطوب (۵ ماهه‌ی آذر الی فروردین در مورد

جدول ۲- دوره‌های زمانی متفاوت به همراه نماد اختصاری آن‌ها
Table 2- Different time intervals periods and their symbols

دوره	طول دوره	نماد اختصاری	دوره	طول دوره	نماد اختصاری
period	Time interval	symbol	period	Time interval	symbol
۱ ماهه 1-Month	Oct.	X_{11}	۳ ماهه 3-Months	Oct. -Dec.	X_{33}
	Nov.	X_{12}		Nov. -Jan.	X_{34}
	Dec.	X_{13}		Dec. -Feb.	X_{35}
	Jan.	X_{14}		Jan. -Mar.	X_{36}
	Feb.	X_{15}		Feb. -Apr.	X_{37}
	Mar.	X_{16}		Mar. -May.	X_{38}
	Apr.	X_{17}		Apr. -Jun.	X_{39}
	May.	X_{18}		Oct. -Jan.	X_{44}
	Jun.	X_{19}		Nov. -Feb.	X_{45}
۲ ماهه 2-Months	Oct.-Nov.	X_{22}	۴ ماهه 4-Months	Dec. -Mar.	X_{46}
	Nov.-Dec.	X_{23}		Jan. -Apr.	X_{47}
	Dec.-Jan.	X_{24}		Feb. -May.	X_{48}
	Jan.-Feb.	X_{25}		Mar. -Jun.	X_{49}
	Feb.-Mar.	X_{26}	مرطوب wet	Dec. -Apr.	X_w
	Mar.-Apr.	X_{27}	۶ ماهه 6-Months	*Nov. -May.	
	Apr.-May.	X_{28}		Oct. -Mar.	X_{66}
	May.-Jun.	X_{29}		Jan. -Jun.	X_{69}
				۹ ماهه 9-Mmonths	Oct. -Jun.

*- دوره مرطوب در شهرستان‌های مشهد و بیرجند از آذر تا فروردین و در شهرستان بجنورد از آبان تا اردیبهشت می‌باشد.

Wet period in Mashhad and Birjand is Dec. -Apr. and in Boujnord is Nov. -May.

حداکثر و بارندگی با توجه به داده‌های ماهانه هر سری مطابق دوره‌های زمانی مورد بررسی محاسبه شدند. سپس مقدار تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، تعداد ساعات آفتابی و سرعت باد از معادله فائو پنمن - مانتیث مطابق روابط ارائه شده در فصل چهار نشریه شماره ۵۶ فائو (۱) محاسبه شد.

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌های آماری چند متغیره می‌باشد که طی آن مجموعه‌ای از متغیرها به مجموعه‌ای متفاوت از متغیرهائی که ناهمبسته‌اند (مؤلفه) تبدیل می‌شوند. مؤلفه‌های جدید تابع خطی از متغیرهای اصلی هستند که غیرهمبسته و مستقل می‌باشند. تمامی تغییرات موجود در متغیرهای اصلی می‌توانند توسط مؤلفه‌های ایجاد شده بیان شوند به طوری که مؤلفه‌ی اول بیش‌ترین تغییرات موجود در متغیرهای اصلی را توضیح می‌دهد و مؤلفه‌ی دوم بیش‌ترین مقدار از تغییرات باقیمانده را توضیح می‌دهد و مؤلفه‌های بعدی نیز به همین ترتیب عمل می‌کنند. در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی تعداد زیاد متغیرها به چند مؤلفه‌ی بسیار با اهمیت، کاهش می‌یابد که در نتیجه آن پردازش و تفسیر داده‌ها آسان‌تر و ارتباط بین داده‌ها که قبلاً آشکار نبود تا حدودی می‌تواند روشن شود (۱۸). بنابر آنچه گفته شد روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی می‌تواند به عنوان یک روش آماری قدرتمند از طریق کاهش حجم داده‌ها و انتخاب متغیرهای تاثیرگذار امکان ساخت مدلی از رابطه عملکرد با متغیرهای آب و هوایی را با دقت بالا فراهم نماید.

مدل‌سازی روابط عملکرد با نوسانات آب و هوایی و شاخص‌های خشکسالی

در تحقیق حاضر مدل‌سازی بر اساس متغیرهای انتخاب شده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی انجام شده‌است. بدین منظور از میان روش‌های رگرسیونی چند متغیره‌ی خطی و غیرخطی، روش‌های بهترین زیرمجموعه^۱ و گام به گام^۲، همراه با لگاریتم مقدار تولید، توان دوم مقدار تولید و یا ...، استفاده شده‌است. روش رگرسیون گام به گام به منظور انتخاب مهم‌ترین زیرمجموعه از متغیرها در یک مدل خطی چندمتغیره به کار می‌رود. این روش همه ترکیب‌های ممکن از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده را ایجاد و در نهایت بهترین مدل را انتخاب می‌کند. رگرسیون گام به گام شامل دو روش پیشرو و پسرو می‌باشد. انتخاب بهترین زیرمجموعه یک روش رگرسیونی چندگانه است که به منظور انتخاب کوچک‌ترین زیرمجموعه از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده

شماره‌گذاری ماه‌ها بر اساس سال آبی انجام شده‌اند، به طوری که ماه مهر با عدد ۱، ماه آبان عدد ۲، ماه آذر عدد ۳، ... و ماه خرداد با عدد ۹ مشخص شده‌است. برای مثال عامل P_{45} نشان دهنده مقدار بارندگی در دوره ۴ ماهه منتهی به ماه بهمن (مقادیر بارندگی در ماه‌های آبان، آذر، دی و بهمن) است. نمادهای مربوط به هر یک از متغیرهای آب و هوایی و شاخص‌های خشکسالی در دوره‌های زمانی تعیین شده در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. در متن تحقیق به جای X در این جدول هر یک از عوامل آب و هوایی (T_n, T, T_x, P و یا E) یا شاخص‌های خشکسالی (S و یا R) قرار گرفته‌اند.

شاخص‌های خشکسالی و محاسبه آن‌ها

در تحقیق حاضر از شاخص‌های SPI و شاخص نسبتاً جدید RDI به منظور بررسی ارتباط بین عملکرد و شاخص‌های خشکسالی استفاده شده‌است. مقادیر شاخص SPI در دوره‌های زمانی مورد نظر، با برازش تابع توزیع گامای دو پارامتری (۱۹) بر داده‌های بارندگی و تبدیل آن به توزیع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف از معیار یک، بدست آمده‌است. روابط استفاده شده برای این تبدیل بر اساس روابط ارائه شده توسط لوید-هوگوس و ساندرس (۱۷) می‌باشد. بر اساس این شاخص، دوره‌ی خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به طور مستمر منفی و به مقدار -1 یا کم‌تر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت گردد (۱۷).

به منظور محاسبه‌ی شاخص RDI نیز با محاسبه نسبت بارش به تبخیر و تعرق (α_k) در دوره‌های زمانی مورد بررسی، مقادیر سری‌های α_k محاسبه و با برآورد مقادیر پارامترهای توزیع لوگ‌نرمال برای هر سری، مقدار شاخص RDI بر اساس روابط ارائه شده توسط ونگلیس و همکاران (۳۳) محاسبه گردید. با توجه به آن که شاخص RDI بر پایه مفاهیم شاخص SPI توسط ساکریس و همکاران (۳۲) توسعه داده شده‌است، تفسیر نتایج آن در بازه‌های مختلف رطوبتی مشابه شاخص SPI می‌باشد.

محاسبه تبخیر-تعرق مرجع

طی دهه‌های گذشته روابط تجربی متعددی، بر پایه استفاده از پارامترهای هواشناسی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) ارائه شده‌است که از میان آن‌ها روش فائو پنمن - مانتیث (FPM) با درجه اعتماد بالایی در دامنه وسیعی از مناطق و اقلیم‌ها برآورد صحیحی از ET_0 ارائه می‌کند و از سوی سازمان FAO به عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه ET_0 از روی داده‌های اقلیمی و همچنین برای ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد شده‌است.

در این تحقیق، ابتدا مقدار متغیرهای دمای حداقل، میانگین و

1- Best subset

2- Stepwise

کمتر فاقد روند می‌باشند. بنا بر این عمل حذف روند و روندزایی از داده‌ها ضروری نمی‌باشد و همه داده‌های عملکرد سالانه در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند.

همان‌گونه که بیان شد، در این تحقیق ارتباط عملکرد محصولات گندم و جو با متغیرهای دمای حداقل، میانگین و حداکثر، بارندگی، تبخیر و تعرق و شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI به صورت جداگانه و ترکیبی در ۳۴ دوره‌ی زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول ۲ نیز آورده شده است برای هر یک از متغیرهای هواشناسی یا شاخص‌های خشکسالی، ۳۴ دوره شامل: ۹ دوره یک ماهه، ۸ دوره دو ماهه، ۷ دوره سه ماهه، ۶ دوره چهار ماهه، ۲ دوره شش ماهه، ۱ دوره‌ی مرطوب (پنج یا هفت ماهه) و ۱ دوره نه ماهه در نظر گرفته شد.

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)

با توجه به این که تعداد متغیرهای مستقل (۳۴ دوره) برای مدل‌سازی مقدار عملکرد بر مبنای هریک از عوامل زیاد می‌باشند و همچنین برخی از این متغیرها دارای همبستگی زیادی با یکدیگر می‌باشند، از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به منظور کاهش تعداد متغیرها و همچنین جلوگیری از انتخاب متغیرهایی که با یکدیگر همپوشانی زیادی دارند استفاده شد که در این بخش نتایج مربوط به آن آورده شده است.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای هر یک از عوامل آب و هوایی و شاخص‌های خشکسالی (هر عامل ۳۴ دوره با توجه به جدول ۲) به صورت مجزا انجام شد. همچنین تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای مجموع دوره‌های زمانی موجود در تمام متغیرها و شاخص‌های خشکسالی (۲۳۸ دوره شامل ۷ متغیر در ۳۴ دوره) نیز صورت گرفت. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، روش PCA به تعداد متغیرهای اصلی، مؤلفه تعیین می‌کند. در این روش برای انتخاب متغیرهای مؤثر بر تولید ابتدا تعداد مؤلفه‌های مؤثر بر تولید تعیین می‌شوند. با توجه به این که، تعداد مؤلفه‌ها بستگی به واریانس هر مؤلفه و واریانس تجمعی مؤلفه‌ها دارد و واریانس هر مؤلفه و همچنین واریانس تجمعی مؤلفه‌ها نباید به ترتیب از پنج و ۹۰ درصد کمتر باشد و با توجه به این که مؤلفه اول بیشترین واریانس را دارد، تعداد متغیرهای بیش‌تری از این مؤلفه انتخاب شد. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در دوره‌های مختلف برای پارامترهای هواشناسی و خشکسالی مورد بررسی در ایستگاه‌های بجنورد، مشهد و بیرجند در جدول ۳ ارائه شده‌است. با توجه به نتایج ارائه شده در تمام مناطق و برای هر یک از عوامل آب و هوایی و شاخص‌های خشکسالی، با انتخاب چهار مؤلفه می‌توان حدود ۹۰ درصد از تغییرات عملکرد را برآورد نمود.

که بهترین رابطه را با داده‌های مشاهده‌ای دارد، استفاده می‌شود. بهترین زیرمجموعه از پیش‌بینی‌کننده‌ها باید دارای متغیرهایی باشد که در توضیح تغییرات متغیر پاسخ، اهمیت دارند. این روش زمانی که تعداد متغیرهای مستقل زیاد هستند مفید می‌باشد و سبب می‌شود مدلی با دقت بیشتر و تعداد متغیرهای کمتر ایجاد شود.

در این تحقیق کلیه محاسبات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و مدل‌های رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار آماری R انجام شده است. بسته‌های آماری مورد استفاده برای محاسبه تجزیه به مؤلفه‌های اصلی شامل: scatterplot3d, cluster lattice, ellipse, ade4, FactoMineR, nsRFA و رگرسیون گام به گام MASS می‌باشند. همچنین به منظور بررسی عدم تورم در مدل‌های ایجاد شده از بسته car استفاده شده است.

آماره‌های سنجش خطا برای انتخاب مدل مناسب

استفاده از آماره‌های مختلف می‌تواند منجر به انتخاب معادلات متفاوتی به عنوان مناسب‌ترین معادله گردد. بنابراین در این تحقیق دقت و صحت مدل‌های ایجاد شده از طریق آماره ترکیبی خطای نقطه ایده‌آل (IPE) مقایسه شده‌اند. این آماره با وزن دادن به آماره‌های میانگین خطای مطلق (MBE)^۱، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲، میانگین قدرمطلق خطای نسبی (MARE)^۳ و ضریب همبستگی R، بر اساس رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود. مقدار IPE بین صفر تا یک تغییر می‌کند که بهترین عملکرد بر اساس آن برابر صفر می‌باشد (۱۶).

$$IPE = \left\{ 0.25 \left[\left(\frac{RMSE_{ij}}{\max RMSE_{ij}} \right)^2 + \left(\frac{MARE_{ij}}{\max MARE_{ij}} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[\left(\frac{MBE_{ij}}{\max |MBE_{ij}|} \right)^2 + \left(\frac{R_{ij} - 1.0}{1/\max R_{ij}} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

در رابطه ۱ اندیس i معرف شماره سال‌های مختلف و اندیس j معرف هر یک از مدل‌های مختلف مورد بررسی می‌باشد.

نتایج و بحث

روند تغییرات عملکرد

داده‌های اخذ شده فاقد نقص آماری و داده پرت (بر اساس آزمون گروز-بک در سطح ۹۵ درصد) می‌باشند. بررسی روند داده‌های عملکرد گندم و جو در دو شهرستان‌های بجنورد، مشهد و بیرجند بر اساس آزمون من-کندال نشان داد که داده‌ها در سطح ۹۹ درصد یا

- 1- Ideal Point Error
- 2- Mean Bias Error
- 3- Root Mean Square Error
- 4- Mean Absolute Relative Error

جدول ۳- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در دوره‌های مختلف برای متغیرهای هواشناسی و خشکسالی در ایستگاه‌های بجنورد، مشهد و بیرجند
 Table 3. PCA Results for different periods of climate and drought variables in Boujnord, Mashhad and Birjand stations

متغیر variable	ویژگی آماری statistical properties	بجنورد Boujnord				مشهد Mashhad				بیرجند Birjand			
		1 ^{ام} مؤلفه 1 st Com.	2 ^{ام} مؤلفه 2 nd Com.	3 ^{ام} مؤلفه 3 rd Com.	4 ^{ام} مؤلفه 4 th Com.	1 ^{ام} مؤلفه 1 st Com.	2 ^{ام} مؤلفه 2 nd Com.	3 ^{ام} مؤلفه 3 rd Com.	4 ^{ام} مؤلفه 4 th Com.	1 ^{ام} مؤلفه 1 st Com.	2 ^{ام} مؤلفه 2 nd Com.	3 ^{ام} مؤلفه 3 rd Com.	4 ^{ام} مؤلفه 4 th Com.
Th	مقدار ویژه (Eigen values)	17.81	14.7	3.55	2.35	24.53	4.02	2.30	1.44	20.13	6.36	4.13	1.40
	درصد واریانس (%Variance)	52.40	21.01	10.44	6.91	72.14	11.81	6.78	4.22	59.22	18.71	12.16	4.14
	واریانس تجمعی (Cum. Variance)	52.40	73.42	83.86	90.77	72.14	83.95	90.73	94.95	59.22	77.93	90.10	94.24
T	مقدار ویژه (Eigen values)	16.41	8.32	3.92	2.42	19.76	6.65	3.36	2.21	21.95	5.24	3.76	1.33
	درصد واریانس (%Variance)	48.28	24.47	11.53	7.13	58.11	19.55	9.88	6.50	64.57	15.42	11.07	3.91
	واریانس تجمعی (Cum. Variance)	48.28	72.75	84.28	91.42	58.11	77.66	87.54	94.04	64.57	80.00	91.08	94.99
TX	مقدار ویژه (Eigen values)	16.41	8.45	3.98	2.47	17.87	7.51	3.67	2.72	20.71	6.90	3.30	1.55
	درصد واریانس (%Variance)	48.27	24.86	11.71	7.27	52.56	22.08	1.08	8.01	60.92	20.29	9.70	4.58
	واریانس تجمعی (Cum. Variance)	48.27	73.14	84.85	92.12	52.56	74.64	85.45	93.47	60.92	81.22	90.93	95.51
P	مقدار ویژه (Eigen values)	15.86	8.78	3.85	2.30	19.18	6.13	3.16	2.1	17.04	9.10	3.27	2.23
	درصد واریانس (%Variance)	46.66	25.82	11.34	6.78	56.41	18.03	9.30	6.81	50.13	26.78	9.62	6.57
	واریانس تجمعی (Cum. Variance)	46.66	72.48	83.83	61.90	56.41	74.45	83.74	90.55	50.13	76.92	86.54	93.12
E	مقدار ویژه (Eigen values)	17.48	8.53	4.11	1.67	26.18	4.14	1.63	0.87	19.93	6.82	5.10	0.82
	درصد واریانس (%Variance)	51.43	25.11	12.11	4.93	76.99	12.18	4.78	2.57	58.64	20.08	15.02	2.43
	واریانس تجمعی (Cum. Variance)	51.43	76.55	88.66	93.60	76.99	89.18	93.96	96.53	58.64	78.72	93.75	96.18
S	مقدار ویژه (Eigen values)	15.30	9.48	3.96	2.23	19.28	6.57	3.16	1.95	18.57	8.27	2.89	2.03
	درصد واریانس (%Variance)	45.01	27.90	11.64	65.85	56.69	19.33	9.31	5.73	54.63	24.32	8.50	5.97
	واریانس تجمعی (Cum. Variance)	45.01	72.92	84.57	91.15	56.69	76.03	85.34	91.07	54.63	78.95	87.46	93.44
R	مقدار ویژه (Eigen values)	13.63	11.13	3.46	2.11	19.02	6.52	3.40	1.50	16.80	8.02	3.64	2.20
	درصد واریانس (%Variance)	40.09	32.76	10.20	6.21	55.93	19.19	10.00	4.42	49.41	23.60	10.73	6.49
	واریانس تجمعی (Cum. Variance)	40.09	72.85	83.06	89.27	55.93	75.12	85.12	89.53	49.41	73.02	83.75	90.25

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵ بهترین مدل برآورد مقادیر عملکرد جو نیز مدلی مبتنی بر پارامترهای شاخص خشکسالی SPI به دست آمد که مقادیر آماره‌های ارزیابی RMSE، R و IPE برای آن به ترتیب برابر ۱۴۹/۰۷ کیلوگرم، ۰/۶۹۰ و ۰/۶۴۲ می‌باشد. بر اساس نتایج مدل‌های ارائه شده برای برآورد مقدار عملکرد جو در ایستگاه بجنورد، مدل برتر مبتنی بر پایش وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص SPI در ۳ ماهه منتهی به آذر (S₃₃)، ۴ ماهه منتهی به فروردین (S₄₇) و ۶ ماهه منتهی به خرداد (S₆₉) بیش‌ترین تاثیر را در مقدار عملکرد جو دارند.

در منطقه بجنورد و برای محصول گندم مدلی بر اساس دمای حداقل قابل ارائه نیست. هم‌چنین دمای حداقل در مدل ترکیبی نیز وارد نشده‌است. مدل ترکیبی شامل دماهای حداکثر (Tx₃₃, Tx₄₉) و دمای میانگین (T₂₉) می‌باشد. بنا براین در این منطقه عملکرد گندم دیم چندان تابع دمای حداقل نیست. به عبارت دیگر دمای حداقل عامل محدود کننده و یا تاثیرگذار بر تولید گندم دیم در این منطقه نمی‌باشد و تنش‌های ناشی از حداقل دما در این منطقه نمی‌تواند تاثیر جدی بر عملکرد داشته باشد.

پس از مدل شاخص بارش استاندارد شده، به ترتیب مدل‌های حاصل از دمای میانگین، شاخص شناسایی خشکسالی، بارندگی، تبخیر و تعرق، دمای حداکثر و مدل ترکیبی قرار دارند. برای محصول جو نیز مدلی بر اساس دمای حداقل ارائه نشده است. در مدل ترکیبی، دمای حداکثر (Tx₄₅) و بارندگی (P₆₉) وارد شده است. پس از شاخص بارش استاندارد شده به ترتیب مدل‌های حاصل از شاخص شناسایی خشکسالی، دمای میانگین، دمای حداکثر، بارندگی، مدل ترکیبی و تبخیر و تعرق قرار دارند. بر اساس نتایج بدست آمده، دمای حداکثر در دوره‌ی مرطوب تاثیر منفی بر عملکرد دارد. به عبارت دیگر تنش گرمایی در دوره مرطوب سبب کاهش عملکرد می‌شود.

در ایستگاه مشهد مدل‌های ترکیبی نسبت به سایر مدل‌ها برای تخمین عملکرد محصولات گندم و جو از دقت و صحت بالاتری برخوردار می‌باشند، به طوری که مقدار آماره‌های ارزیابی RMSE، R و IPE برای گندم به ترتیب برابر ۷۷/۲۰ کیلوگرم، ۰/۸۹۳ و ۰/۳۶۱ و برای جو به ترتیب برابر ۷۱/۰۲ کیلوگرم، ۰/۸۵۶ و ۰/۴۱۱ به دست آمدند (جدول ۶). بر اساس نتایج بدست آمده، برای گندم در ایستگاه مشهد همه مدل‌های ساخته شده بر پایه هر یک از ۷ عامل آب و هوایی یا شاخص خشکسالی از دقت و صحت تقریباً مشابهی برای برآورد عملکرد گندم برخوردارند به طوری که دامنه تغییرات مقادیر IPE بین ۰/۶۵۷ به ازای مقدار بارندگی و شاخص RDI تا ۰/۸۰۰ به ازای دمای حداقل تغییر می‌کند.

بر اساس نتایج مؤلفه اول شامل دوره‌های زمانی مربوط به ماه‌های فصل بهار و زمستان و مؤلفه دوم شامل دوره‌های زمانی مربوط به فصل پاییز می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت نسبی پارامترهای مورد بررسی در ماه‌های بهار و زمستان در مقایسه با ماه‌های فصل پاییز می‌باشد.

نتایج مدل‌سازی عملکرد محصولات

در تحقیق حاضر علاوه بر عوامل بارندگی و دما (عموما در مدل‌سازی‌های تولید گیاهی فقط از این دو عامل استفاده می‌شود)، تبخیر و تعرق، شاخص بارش استاندارد شده، شاخص شناسایی خشکسالی و ترکیبی از تمام عوامل مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج در هیچ‌یک از سه منطقه مورد بررسی مدلی که فقط بر اساس یکی از عوامل آب و هوایی ساخته شده باشد، به عنوان مدل برتر انتخاب نشده‌است. مناسب‌ترین مدل‌ها برای محصولات گندم و جو دیم در بجنورد مدل‌های مبتنی بر شاخص بارش استاندارد شده، در مشهد مدل‌های ترکیبی و در بیرجند مدل‌های ترکیبی و شاخص شناسایی خشکسالی می‌باشند (جدول ۵ تا ۷).

بررسی مناسب‌ترین مدل در هر منطقه

بر اساس نتایج جدول ۵، بهترین مدل برای برآورد مقدار عملکرد گندم در ایستگاه بجنورد مدل ساخته شده بر اساس پارامترهای شاخص خشکسالی SPI می‌باشد که مقدار آماره‌های ارزیابی RMSE، R و IPE برای مدل مذکور به ترتیب برابر با ۱۸۲/۵ کیلوگرم، ۰/۶۷۷ و ۰/۵۹۶ به دست آمد. برای محصول گندم دیم مدل ترکیبی در میان مدل‌های ارائه شده دارای بیش‌ترین مقدار ضریب همبستگی (۰/۶۸۹) و کم‌ترین مقدار RMSE (۱۷۹/۶۲ کیلوگرم) می‌باشد که نسبت به مقادیر متناظر در بهترین مدل (مبتنی بر شاخص SPI) کمی بهتر می‌باشند، اما مقادیر آماره‌های MBE و MARE نسبت به بهترین مدل اختلاف زیادتری دارند. همان‌گونه که بیان شد در این تحقیق به منظور افزایش قدرت تصمیم‌گیری در انتخاب انتخاب مدل برتر، آماره ترکیبی خطای نقطه ایده‌آل (IPE) ملاک نهایی انتخاب مدل برتر قرار گرفت. در ایستگاه بجنورد برای محصول گندم مدلی بر شاخص خشکسالی SPI با IPE برابر با ۰/۵۹۶ دارای کم‌ترین مقدار خطا می‌باشد. با توجه به نتایج مدل برتر، پایش وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص SPI در ۳ ماهه منتهی به آذر (S₃₃) و ۳ ماهه منتهی به اردیبهشت (S₃₈) بیش‌ترین تاثیر را بر عملکرد گندم دیم در شهرستان بجنورد دارد. به عبارت دیگر خشکسالی‌های ۳ ماهه پاییز و ۳ ماهه اسفند تا اردیبهشت مهم‌ترین عوامل موثر بر کاهش عملکرد گندم می‌باشند.

جدول ۵ - مدل‌های پیش‌بینی عملکرد گندم و جو بر اساس عوامل هواشناسی و اقلیمی به همراه مقادیر آماره‌های ارزیابی خطا در ایستگاه بجنورد
 Table 5. Predictive models for wheat and barley yield based on weather and climatic variables and the values of error indexes in Boujnord

محصول Crop	متغیر variable	مناسب‌ترین مدل best model	مقادیر آماره‌های ارزیابی خطا Values of error evaluations criteria				رتبه Rank	
			MBE (kg)	RMSE (kg)	MARE (kg)	IPE (-)		
گندم wheat	Tn	-	-	-	-	-	-	
	T	$Y = 3952.91 - 86.65T_{18} - 301.75T_{99} + 297.98T_{37}$	0.007	189.11	0.172	0.647	0.639	2
	Tx	$Y = 4380.05 + 151.87T_{X_{44}} + 249.93T_{X_{37}} - 541.94T_{X_{99}}$	0.032	189.41	0.177	0.645	0.811	6
	P	$Y = 234.33 + 4.04P_{33} + 2.94P_{48}$	-0.009	198.21	0.185	0.600	0.685	4
	E	$Y = 1477.31 + 7.87E_{11} - 7.87E_{19}$	-0.010	207.58	0.205	0.547	0.741	5
	S	$Y = 881.23 + 98.83S_{33} + 158.83S_{38}$	-0.001	182.5	0.185	0.677	0.596	1
	R	$Y = 881.86 - 433.17R_{46} + 462.07R_{57}$	-0.005	191.91	0.195	0.633	0.679	3
	مدل ترکیبی combined model	$Y = 4913.68 + 115.72T_{X_{49}} - 265.29T_{29} - 85.72T_{X_{33}}$	0.032	179.62	0.188	0.689	0.811	6
جو barley	Tn	-	-	-	-	-	-	
	T	$Y = 2477.14 - 84.65T_{18} - 93.21T_{23} + 26.96T_{22}$	-0.016	161.72	0.199	0.620	0.674	3
	Tx	$Y = 3045.77 + 73.17T_{X_{36}} - 221.11T_{X_{57}}$	-0.040	158.32	0.199	0.640	0.687	4
	P	$Y = 350.83 - 2.15P_{15} + 4.83P_{33} - 2.73P_{45} + 2.70P_{69}$	0.001	170.60	0.211	0.564	0.708	5
	E	$Y = 1853.30 + 3.08E_{44} - 4.34E_{57}$	-0.106	158.25	0.195	0.640	0.828	7
	S	$Y = 782.36 + 60.99S_{33} - 211.06S_{47} + 313.97S_{69}$	0.001	149.07	0.201	0.690	0.642	1
	R	$Y = 763.34 - 230.35R_{36} - 275.64R_{69}$	0.007	152.30	0.205	0.673	0.656	2
	مدل ترکیبی combined model	$Y = 953.26 + 1.88P_{69} - 51.49T_{X_{45}}$	-0.001	164.42	0.220	0.602	0.709	6

حداکثر ۲ ماهه‌ی منتهی به آبان ($T_{X_{22}}$) و دمای حداقل ۴ ماهه‌ی منتهی به فروردین ($T_{n_{45}}$) منجر به افزایش عملکرد گندم و افزایش دمای حداکثر در دوره‌ی ۹ ماهه ($T_{X_{99}}$) سبب کاهش عملکرد گندم می‌گردد. علاوه بر این افزایش مقدار شاخص RDI در ماه آبان و

این در حالی است که با ترکیب این عوامل در مدل ترکیبی، دقت و صحت مدل به مراتب بالاتر می‌رود به گونه‌ای که مقدار IPE در این روش به کم‌تر از نصف سایر روش‌ها می‌رسد. بر اساس نتایج مدل ترکیبی افزایش دمای متوسط ۲ ماهه‌ی منتهی به آذر (T_{23})، دمای

ایستگاه بیرجند نشان می‌دهد که متغیر دمای حداقل در دوره‌های ۴ ماهه منتهی به اسفند (Tn_{46}) و ۶ ماهه منتهی به اسفند (Tn_{66}) و تبخیر و تعرق در اردیبهشت (E_{18}) بیش‌ترین تاثیر را بر عملکرد گندم دارند به طوری که با افزایش متغیر Tn_{46} و کاهش متغیرهای Tn_{66} و E_{18} مقدار عملکرد افزایش می‌یابد. نتایج مدل برتر ساخته شده بر پایه پایش وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص RDI به عنوان بهترین مدل برآورد عملکرد جو در ایستگاه بیرجند نشان می‌دهد که افزایش مقدار این شاخص در ۲ ماهه منتهی به دی (R_{24}) و ۲ ماهه منتهی به خرداد (R_{29}) تاثیر مثبت و ۱ ماهه منتهی به خرداد (R_{19}) تاثیر منفی بر افزایش عملکرد جو در این منطقه دارند. به عبارت دیگر وضعیت خشکسالی در ماه‌های آذر و دی و هم‌چنین اردیبهشت و خرداد عملکرد جو دیم در این منطقه را در مقایسه با سایر عوامل بیشتر تحت تاثیر خود دارند.

در این منطقه برای محصول گندم بر اساس همه عوامل آب و هوایی و شاخص‌های خشکسالی مدل ارائه شده است. پس از مدل ترکیبی مدل‌های حاصل از تبخیر و تعرق، دمای میانگین، دمای حداقل، شاخص شناسایی خشکسالی، بارندگی، شاخص بارش استاندارد شده و دمای حداکثر قرار گرفته است. در حالی که برای محصول جو مدلی بر اساس دمای حداکثر، شاخص بارش استاندارد شده و بارندگی ارائه نشده است. هم‌چنین پس از شاخص شناسایی خشکسالی به ترتیب مدل‌های حاصل از دمای حداقل، مدل ترکیبی، تبخیر و تعرق و دمای میانگین در مرتبه‌های بعدی از نظر دقت قرار گرفته‌اند.

رابطه عملکرد با متغیرهای دمایی

بررسی مدل‌های برتر ساخته شده بر پایه متغیرهای دمای حداقل، دمای میانگین و دمای حداکثر نشان می‌دهد که افزایش دما طی ماه آذر و دوره‌های ۲ ماهه منتهی به ماه‌های آبان و آذر تاثیر مثبتی بر عملکرد گندم و جو دارند و هم‌چنین افزایش دما در ماه‌های بهمن تا فروردین نیز تاثیر مثبتی دارند. زیرا با توجه به یخبندان‌های زمستانه در منطقه، افزایش دما در این ماه‌ها برای شروع رشد مفید می‌باشد. این در حالی است که افزایش دما طی ماه‌های پایانی دوره رشد (اردیبهشت و خرداد) از طریق افزایش تبخیر و تعرق و ایجاد تنش‌های گرمائی سبب کاهش عملکرد می‌گردد. نتایج تحقیق فرج‌زاده اصل و همکاران (۶) در خراسان رضوی بر روی گندم دیم، نشان می‌دهد که در میان متغیرهای دمایی میانگین دمای ماه ژانویه (دی)، میانگین حداکثر دمای ژانویه (دی) و حداقل دمای ماه مارس (اسفند) بیش‌ترین تاثیر را در میزان عملکرد گندم دیم دارند. بر اساس نتایج تحقیق حاضر در مشهد دمای میانگین در اردیبهشت (T_{18}) و ۶ ماهه پاییز و زمستان (T_{66}) و هم‌چنین دمای حداکثر در دوره دی تا خرداد (T_{X69}) و دماهای حداقل در ماه‌های دوره آذر تا اردیبهشت (Tn_{13})،

مقدار بارش در ماه خرداد سبب افزایش عملکرد گندم می‌گردد. در عین حال، پس از مدل ترکیبی مدل‌های مبتنی بر شاخص‌های خشکسالی و یا بارندگی با مقدار IPE مشابه، در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت نسبی وضعیت خشکسالی و بارندگی در مقایسه با سایر عوامل آب و هوایی بر عملکرد گندم دیم در مشهد می‌باشد. در این منطقه بر اساس همه عوامل آب و هوایی و دو شاخص خشکسالی مدل ارائه شده است. پس از مدل ترکیبی به ترتیب مدل‌های حاصل از بارندگی، شاخص شناسایی خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده، دمای میانگین، تبخیر و تعرق، دمای حداکثر و دمای حداقل قرار گرفته است (جدول ۶).

از میان مدل‌های ارائه شده برای برآورد عملکرد جو مدل ترکیبی و مدل ساخته شده بر اساس متغیر دمای حداقل به ترتیب در رتبه‌های اول و دوم از نظر دقت و صحت قرار دارند. بررسی متغیرهای موثر در مدل ترکیبی برای محصول جو در ایستگاه مشهد نشان می‌دهد که کاهش مقدار تبخیر و تعرق در ۶ ماهه منتهی به خرداد (E_{69}) و افزایش مقدار دمای حداقل ۴ ماهه منتهی به بهمن (Tn_{45})، شاخص RDI ماه آبان (R_{12})، دمای حداقل ماه آذر (Tn_{13})، شاخص SPI ماه مهر (S_{11})، بارش ماه خرداد (P_{19}) و دمای حداکثر ۲ ماهه منتهی به آبان (T_{X22}) بیش‌ترین تاثیر را بر مقدار عملکرد جو دارند. برای محصول جو مدلی بر اساس دمای حداکثر، شاخص شناسایی خشکسالی و تبخیر و تعرق قابل ارائه نمی‌باشد. هم‌چنین پس از مدل ترکیبی مدل‌های حاصل از دمای میانگین، شاخص بارش استاندارد شده، بارندگی و دمای حداقل قرار گرفته است. در تمام مدل‌های مورد بررسی بر اساس شاخص بارش استاندارد شده، وضعیت خشکسالی در ماه خرداد (S_{19}) مهم و موثر تشخیص داده می‌شود. فقط در صورتی که از روش بهترین زیر مجموعه برای ساخت مدل استفاده شود، خشکسالی خردامه موثر تشخیص داده نمی‌شود. مدل‌سازی بر اساس این روش دارای بیش‌ترین خطا می‌باشد. هم‌چنین دمای اردیبهشت در تمام مدل‌های ساخته شده بر اساس دمای میانگین با تاثیر منفی بر عملکرد وارد شده است. این مسئله نشان می‌دهد که تنش دمایی در اردیبهشت‌ماه بر عملکرد جو موثر می‌باشد و افزایش دما در این ماه به کاهش عملکرد این محصول منتهی خواهد شد. در تمامی مدل‌های مورد بررسی بر اساس دمای حداقل، دمای حداقل در ۲ ماهه منتهی به آذر با علامت مثبت و ۳ ماهه منتهی به خرداد با علامت منفی وارد شده است. این موضوع نیز نشان‌دهنده اهمیت نسبی دمای حداقل در ماه‌های آبان و آذر و تاثیر منفی افزایش دمای حداقل در ماه‌های فصل بهار می‌باشد.

در ایستگاه بیرجند مدل ترکیبی و مدل مبتنی بر شاخص خشکسالی RDI به ترتیب با مقادیر IPE برابر با ۰/۵۷۶ و ۰/۵۶۷ بهترین برآورد را برای عملکرد محصولات گندم و جو داشته‌اند (جدول ۷). بررسی عوامل موثر در مدل ترکیبی برای محصول گندم در

(Tn₁₈, Tn₄₇) بیشترین تاثیر را بر تولید دارند.

رابطه عملکرد با بارندگی

بررسی مدل‌های مبتنی بر بارندگی نشان می‌دهد که افزایش مقدار بارندگی در ماه‌های آغازین دوره رشد (آبان تا آذر)، ماه‌های پایانی دوره رشد و دوره ۵ ماهه منتهی به فروردین که تقریباً می‌تواند معادل دوره مرطوب قلمداد شود بخش زیادی از تغییرات مقدار عملکرد را می‌تواند برآورد کند. در دو منطقه بیرجند و مشهد محصول گندم دیم بیشترین رابطه را با بارندگی در دوره مرطوب (PW) دارد و برای بجنورد نیز ماه‌های مربوط به دوره مرطوب اهمیت بیشتری دارند. در مورد محصول جو دیم در مشهد بارندگی در دو ماه اول (P22) و دو ماه آخر دوره رشد (P29)، در بجنورد بارندگی در ماه‌های مربوط به کل دوره رشد بیشترین رابطه را با عملکرد دارد. نتایج تحقیق مساعدی و کاهه (۲۲) در استان گلستان نشان می‌دهد که عملکرد گندم دیم با بارندگی ماه‌های خرداد، آبان و آذر و عملکرد جو دیم با ماه‌های اولیه و آخر کشت بیشترین رابطه را دارد. تاتاری و همکاران (۳) در خراسان نشان دادند که بارندگی در ماه‌های فروردین و آبان رابطه بیشتری با عملکرد گندم دیم دارد، به طوری که می‌توان با مقدار بارندگی در این دو ماه عملکرد را با دقت قابل قبولی برآورد کرد.

رابطه عملکرد با خشکسالی

جانگران کالان و همکاران (۱۳) بیان می‌کنند که در منطقه خوان‌کن تایلند خشکسالی اواسط دوره رشد تاثیر بیشتری بر کاهش عملکرد محصول دارد. در حالی که در مشهد خشکسالی در ابتدا (مهر و آبان) و انتهای فصل رشد (خرداد) تاثیر بیشتری بر عملکرد محصول گندم و جو دارد (جدول ۶). در بیرجند خشکسالی در دوره مرطوب و همچنین ماه خرداد و در بجنورد خشکسالی طی ماه‌های آذر تا فروردین تاثیر بیشتری بر عملکرد دارند (جدول‌های ۵ و ۷). از طرفی در دو منطقه بیرجند و بجنورد رابطه عملکرد جو با خشکسالی قوی‌تر از گندم می‌باشد، ولی در منطقه مشهد رابطه عملکرد گندم با خشکسالی قوی‌تر از جو می‌باشد. بنایان و همکاران (۳) ارتباط معنی‌داری بین شاخص خشکی و عملکرد گندم و جو در مناطق مورد بررسی گزارش نموده‌اند به طوری که این ارتباط برای جو شدیدتر بوده است.

یاموا و همکاران (۳۷) با استفاده از شاخص‌های آب و هوایی (ترکیبی) عملکرد محصولات ذرت، سویا و سورگوم در تناوب گیاهی را مدل‌سازی نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها شاخص SPI نه ماهه (ماه‌های سپتامبر تا می) می‌تواند تا ۵۰ درصد تغییرات عملکرد ذرت را برآورد نماید. در منطقه بجنورد و مشهد شاخص بارش استاندارد شده می‌تواند بیش از ۶۰ درصد تغییرات عملکرد گندم و جو دیم را توضیح

دهد، در حالی که بر اساس این شاخص در بیرجند نمی‌توان مدلی را برای محصول جو ارائه نمود، ضمن این‌که عملکرد گندم نیز همبستگی کم‌تر از ۵۰ درصد با این شاخص دارد. جاپانتی و همکاران (۱۲) با بررسی ارتباط بین مقدار تولید سه وارسته ذرت و شاخص SPI در مناطق جنوب مالاوی نشان دادند که خشکسالی بر اساس شاخص SPI در ماه‌های فوریه (بهمن) و اوایل ماه مارس (اسفند) بیشترین آسیب را به عملکرد ذرت در این مناطق وارد می‌کند. برای محصول گندم در بجنورد وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص بارش استاندارد شده در دوره پاییز، در مشهد وضعیت خشکسالی در ماه خرداد و در بیرجند وضعیت خشکسالی در دوره مرطوب تاثیر بیشتری بر تولید دارد. برای محصول جو در بجنورد وضعیت خشکسالی در دو فصل زمستان و بهار و در مشهد وضعیت خشکسالی در ماه خرداد به شدت تولید را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

کوئیرینگ و پاپاکریاکو (۲۰) با استفاده از ۴ شاخص خشکسالی کشاورزی PDSI، Z (مشتق شده از شاخص پالمرا)، SPI و NOAA به پیش‌بینی محصول گندم بهار در غرب کانادا پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که مناسب‌ترین شاخص برای برآورد عملکرد گندم در غرب کانادا، شاخص Z می‌باشد. در حالی که این تحقیق نشان می‌دهد که از میان دو شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شناسایی خشکسالی (RDI) به‌منظور برآورد گندم دیم در مشهد و بیرجند شاخص شناسایی خشکسالی و در بجنورد شاخص بارش استاندارد شده مناسب‌تر می‌باشند. بررسی مدل‌ها در منطقه بیرجند اهمیت و تاثیر عامل تبخیر و تعرق در این منطقه را نشان می‌دهد. بنا بر این در بین دو شاخص خشکسالی، شاخص شناسایی خشکسالی که تبخیر و تعرق را در نظر می‌گیرد، با دقت بالاتری عملکرد جو و گندم دیم را برآورد می‌کند.

رابطه عملکرد با عوامل آب و هوایی

در میان هر یک از عوامل آب و هوایی در منطقه بجنورد به ترتیب دمای میانگین و بارندگی، مشهد بارندگی و دمای میانگین و در بیرجند تبخیر و تعرق و دمای میانگین بیشترین رابطه را با عملکرد گندم دیم دارند. همچنین در مدل‌های ارائه شده مقدار بارندگی نسبت به تبخیر و تعرق از ضریب همبستگی بیشتری با عملکرد برخوردار است. نتایج مطالعات یزدان‌پناه و همکاران (۲۲) در آذربایجان شرقی نشان داد که به ترتیب دو عامل بارندگی و تبخیر و تعرق بیشترین نقش را در تعیین عملکرد گندم دارند. مطالعات حسینی و همکاران (۱۰) در قروه نیز نشان داد که دو عامل بارندگی سالانه و حداقل رطوبت نسبی هوا در ماه خرداد، ۹۴ درصد تغییرات عملکرد گندم دیم را توجیه می‌نماید. از طرف دیگر متغیر بارش نسبت به شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI که به ترتیب منتج از متغیرهای بارش و نسبت بارش به تبخیر و تعرق می‌باشد همبستگی کم‌تری با مقدار عملکرد دارد.

جدول ۶- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد گندم و جو بر اساس عوامل هواشناسی و اقلیمی به همراه مقادیر آماره‌های ارزیابی خطا در مشهد
 Table 6. Predictive models for wheat and barely yield based on weather and climatic variables and the values of error indices in Mashhad

محصول Crop	متغیر Variable	مناسب‌ترین مدل best model	مقادیر آماره‌های ارزیابی خطا Values of error evaluations criteria				رتبه Rank	
			MBE (Kg)	RMSE (Kg)	MBE (Kg)	RMSE (Kg)		
گندم wheat	Th	$Y = 1182.43 + 14.41Tn_{13} - 77.9Tn_{18} + 81.2Tn_{47}$	0.035	134.03	0.263	0.625	0.800	7
	T	$Y = 949.11 - 61.58T_{18} + 72.91T_{66}$	0.006	137.64	0.330	0.600	0.700	4
	Tx	$Y = 1862.11 + 86.14Tx_{36} - 131.76Tx_{69}$	-0.011	140.73	0.358	0.573	0.751	6
	P	$Y = 176.31 + 0.89P_{57} + 6.48P_{19}$	-0.004	125.57	0.328	0.682	0.657	2
	E	$Y = 1006.6 + 7.02E_{36} - 2.92E_{99} + 12.92E_{12}$	-0.007	132.90	0.349	0.633	0.706	5
	S	$Y = 431.08 + 53.34S_{46} + 86.36S_{19}$	-0.010	124.33	0.330	0.690	0.633	3
	R	$Y = 437.28 + 39.79R_{69} + 57.28R_{12} + 95.14R_{19} - 60.74R_{22}$	0.000	125.13	0.328	0.682	0.657	2
	مدل ترکیبی combined model	$Y = 2132.51 - 122.91Tx_{99} + 104Tn_{45} + 47.37R_{12} + 33.04T_{23} + 2.81P_{19} - 2.77P_{11} + 4.99Tx_{22}$	-0.006	77.20	0.154	0.893	0.361	1
	جو Barely	Th	$Y = 621.84 + 65.21Tn_{33} - 36.1Tn_{39} + 45.46Tn_{47}$	-0.045	100.91	0.194	0.679	0.771
T		$Y = 445.48 - 32.23T_{18} + 71.34T_{66}$	0.007	114.26	0.254	0.556	0.720	3
Tx		-	-	-	-	-	-	-
P		$Y = 293.34 + 1.83P_{29} + 4.30P_{22}$	0.000	116.70	0.261	0.529	0.735	4
E		-	-	-	-	-	-	-
S		$Y = 453.66 + 63.56S_{19} + 33.61S_{22}$	-0.002	115.75	0.253	0.540	0.721	2
مدل ترکیبی combined model	$Y = 682.76 - 1.12E_{69} + 67.14Tn_{45} + 50.85R_{12} + 23.05Tn_{13} + 28.54S_{11} + 1.01P_{19} + 13.80Tx_{22}$	0.004	71.02	0.138	0.856	0.411	1	

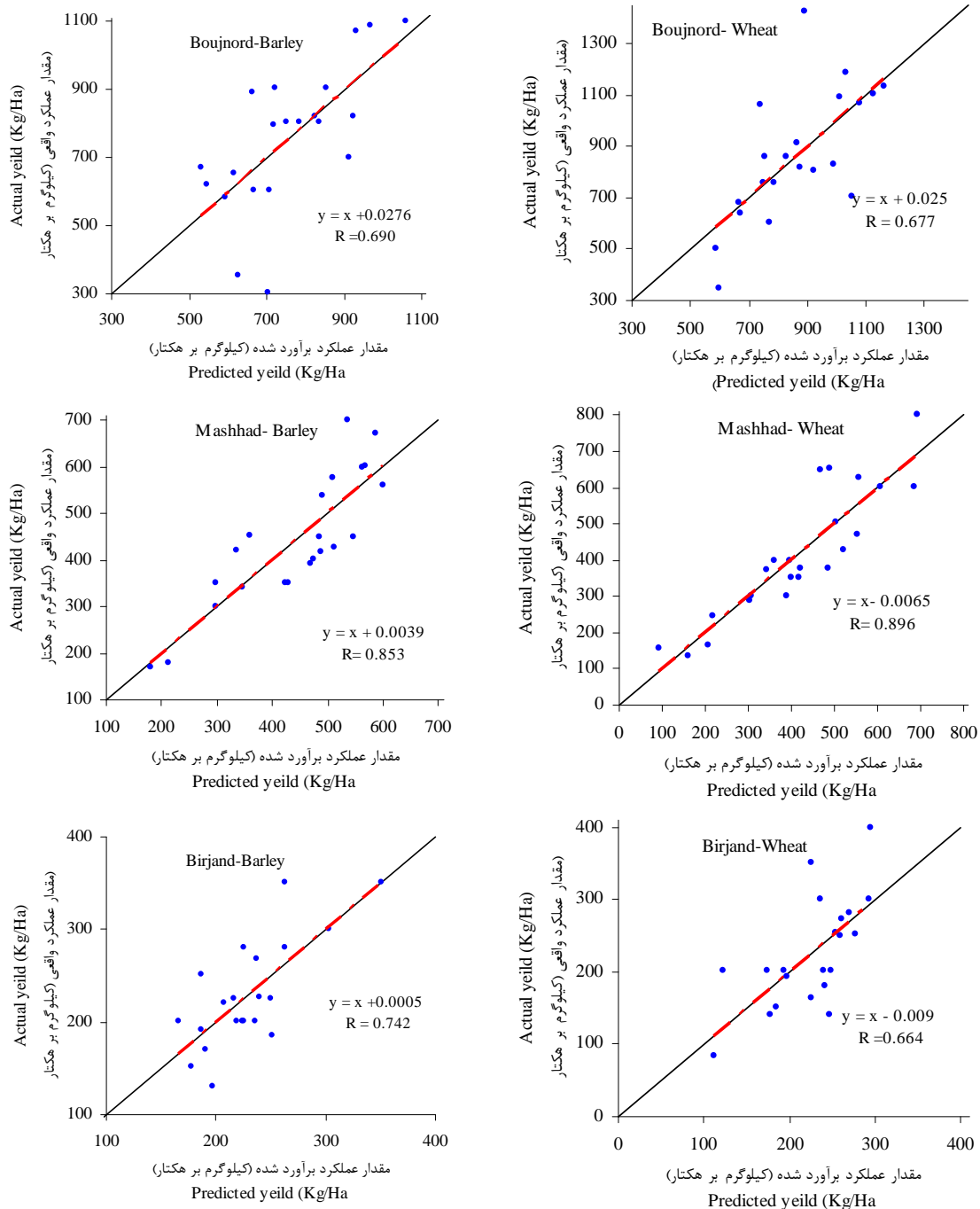
جدول ۷- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد گندم و جو بر اساس عوامل هواشناسی و اقلیمی به همراه مقادیر آماره‌های ارزیابی خطا در بیرجند
Table 7. Predictive models for wheat and barely yield based on weather and climatic variables and the values of error indexes in Birjand

محصول Crop	متغیر Variable	مناسب‌ترین مدل best model	مقادیر آماره‌های ارزیابی خطا						رتبه Rank
			MBE (Kg)	MBE (Kg)	MBE (Kg)	MBE (Kg)	MBE (Kg)	MBE (Kg)	
گندم wheat	Tn	$Y = 457.73 + 116.97Tn_{46} - 110.78Tn_{66}$	-0.008	61.48	0.232	0.557	0.646	4	
	T	$Y = 949.08 + 37.15T_{15} + 20.53T_{13} - 83.41T_{99}$	-0.016	56.83	0.241	0.641	0.634	3	
	Tx	$Y = 487.91 + 44.43Tx_{15} + 22.67Tx_{23} - 78.99Tx_{57}$	-0.060	53.26	0.227	0.694	0.767	8	
	P	$Y = 121.92 + 0.72P_{57}$	-0.001	63.84	0.274	0.506	0.709	6	
	E	$Y = 436.11 + 2.69E_{45} - 0.74E_{46} - 0.91E_{69}$	0.006	54.66	0.244	0.674	0.613	2	
	S	$Y = 226.6 + 34.1S_{57}$	0.000	65.55	0.282	0.464	0.731	7	
	R	$Y = 228.59 + 62.07R_{57} - 33.31R_{26}$	-0.005	61.85	0.233	0.549	0.647	8	
	مدل ترکیبی combined model	$Y = 825.58 + 121.36Tn_{46} - 128.1Tn_{66} - 1.97E_{18}$	-0.008	55.37	0.208	0.664	0.576	1	
جو barely	Tn	$Y = 528.2 + 24.56Tn_{33} - 46.91Tn_{49} + 30.26Tn_{47}$	-0.008	43.34	0.152	0.649	0.635	2	
	T	$Y = 400.81 - 43.13T_{49} + 58.91T_{66}$	0.040	46.26	0.177	0.584	0.861	5	
	Tx	-	-	-	-	-	-	-	
	P	-	-	-	-	-	-	-	
	E	$Y = 607.01 - 0.56E_{69}$	0.016	49.52	0.177	0.494	0.756	4	
	S	-	-	-	-	-	-	-	
	R	$Y = 232.46 - 47.41R_{19} + 25.78R_{24} + 28.74R_{29}$	0.000	38.21	0.143	0.742	0.567	1	
	مدل ترکیبی combined model	$Y = 560.40 - 34.21Tn_{27} + 29.79Tn_{46} - 1.29E_{18}$	0.000	45.30	0.161	0.606	0.663	3	

درصد پراکنده‌گی نسبتاً مناسبی در اطراف خط ۱:۱ دارند، اگر چه در برخی از سال‌ها اختلاف بین مقادیر واقعی و برآوردی زیاد می‌باشد. نتایج مقادیر برآوردی و واقعی عملکرد گندم و جو در ایستگاه مشهد نزدیکی بیشتری به هم دارند و نقاط از خط ۱:۱ انحراف کم‌تری نسبت به ایستگاه‌های بجنورد و بیرجند دارند، به طوری که مقدار ضریب همبستگی برای گندم و جو به ترتیب برابر با ۸۹ و ۸۶ درصد می‌باشد، در حالی که مقدار ضریب همبستگی محصولات گندم و جو در ایستگاه بیرجند به ترتیب برابر با ۶۶ و ۷۴ درصد می‌باشد.

نمایش ترسیمی مقادیر برآورد شده عملکرد در برابر مقادیر واقعی عملکرد

نمایش ترسیمی مقادیر برآورد شده از بهترین مدل‌های تعیین شده برای هر یک از محصولات گندم و جو در ایستگاه‌های بجنورد، مشهد و بیرجند (جدول‌های ۵ تا ۷) در برابر مقادیر واقعی عملکرد روی خط یک به یک (۱:۱) در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج در ایستگاه بجنورد مدل‌های ارائه شده برای برآورد محصولات گندم و جو به ترتیب با ضریب همبستگی برابر با ۶۸ و ۶۹



شکل ۲- نتایج مقادیر برآوردی از بهترین مدل برای هریک از محصولات گندم و جو در شهرستان‌های بجنورد، مشهد و بیرجند روی خط ۱:۱
 Figure 2- Predicted (modeled) versus observed wheat and barley yields departures (kg/ha) at givin stations

نتیجه‌گیری کلی

کدام از مناطق عوامل دما، بارندگی و تبخیر و تعرق در رتبه اول قرار نگرفته‌اند. همچنین در بین دو شاخص خشکسالی، شاخص شناسایی خشکسالی که تبخیر و تعرق را در نظر می‌گیرد با دقت بالاتری عملکرد جو و گندم دیم را برآورد می‌کند. به‌طور کلی میزان ضرایب همبستگی مدل‌های ساخته شده برای

بر اساس نتایج در میان عوامل مختلف رابطه عملکرد گندم و جو دیم با شاخص‌های خشکسالی و ترکیب عوامل آب و هوایی قوی‌تر از رابطه عملکرد با هر یک از عوامل آب و هوایی می‌باشد و در هیچ

نشان دادند که مدل‌های ساخته شده در این مناطق دارای ضرایب همبستگی بیش از ۹۰ درصد می‌باشند، در حالی که در این تحقیق متوسط ضریب همبستگی بین عوامل آب و هوایی و عملکرد گندم و جو دیم حدود ۷۰ درصد می‌باشد.

سیاسگزاری

این تحقیق در راستای انجام طرح تحقیقاتی دانشگاهی به شماره ۲۶۶۳۳ به انجام رسیده است که از حوزه معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد تشکر به عمل می‌آید.

عوامل مختلف آب و هوایی و شاخص‌های خشکسالی در مناطق مورد بررسی با میزان عملکرد نسبتاً بالا نمی‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد که علاوه بر عوامل آب و هوایی، عملکرد محصولات کشاورزی، حتی زمانی که کشت به صورت دیم می‌باشد، تحت تاثیر عوامل دیگر (از جمله مدیریت مزرعه و...) می‌باشند. مقایسه نتایج حاصل از روابط مدل‌سازی محصولات زراعی و تولید مرتع با عوامل آب و هوایی نشان می‌دهد که ضرایب همبستگی در مراتع بسیار بالاتر از کشاورزی می‌باشد (۲۷ و ۳۱). محمدی مقدم و همکاران (۲۱) در بررسی رابطه عوامل آب و هوایی (بارندگی، دما، تبخیر و تعرق) و شاخص‌های خشکسالی (SPI, RDI) با تولید مرتع در مناطق اراک، رودشور و قم

منابع

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy.
- Azizi Gh., and Yarahmadi D. 2003. The relationship between wheat yield and climatic parameters using a regression model (Case study: Plain Silakhor). Geographical Research Quarterly, 44: 23–29. (in Persian)
- Bannayan M., Sanjani S., Alizadeh A., Sadeghi Lotfabadi S., and Mohamadian A. 2010. Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran. Field Crops Research, 118: 105–114.
- Bazgeer S., and Kamali Gh.A. 2008. Wheat yield prediction using agro meteorological indices for some regions of the Western of the country. Journal of Agricultural Science and Naturural Resoures, 15(2): 113–121. (in Persian with English abstract)
- Elshorbagy, A., Corzo G., Srinivasulu S., and Solomatine D. 2009. Experimental investigation of the predictive capabilities of soft computing techniques in hydrology. Centre for Advanced Numerical Simulation (CANSIM). Department of Civil & Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, CANADA. 49 p.
- Farajzadeh Asl M., Kashki A., and Shayan S. 2009. Analysis of rain-fed wheat yield product variability using climate change approach (Case study area: Khorasan Razavi province). Journal of modares, 13(3): 227–256. (in Persian)
- Feizi Asl V., Jafarzadeh J., Abdolrahmani B., Mosavi S.B., and Karimi E. 2010. Studies on the effects of climatic factors on dryland wheat grain yield in maragheh region. Journal of Iranian Field Crop Research, 8(1): 1–11. (in Persian with English abstract)
- Ghorbani Kh., Khalili A., and Iran Nejad P. 2008. Regional estimation of rainfed wheat yield based on precipitation data. J of agriculture research, 8(1), 89–101. (in Persian with English abstract)
- Hlavinka P., Trnka M., Semer adova D., Dubrovsky M., Zalud Z., and Mozny M. 2009. Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic. Agricultural and Forest Meteorology, 149: 431–442.
- Hosseini M.T., Siosemarde A, Fathi P., and Siosemarde M. 2007. Application of artificial neural network (ANN) and multiple regression for estimating the performance of dry farming wheat yield in Ghorveh region, Kurdistan province. Agriculture Research, 7(1): 54–41.
- IPCC, 2007. Synthesis Report 2007: AR4, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Jayanthi H., Gregory J., Husak Funk C., Magadzire T., Chavula, A., and Verdin J.P. 2013. Modelin g rain-fed maize vulnerability to droughts using the standardized precipitation index from satellite estimated rainfall- Southern Malawi case study. International Journal of Disaster Risk Reduction, 4: 71–81.
- Jongrunklang N., Toomsana B., Vorasoote N., Jogloya S., Booteb K.J., Hoogenboom G., and Patanothaia A. 2013. Drought tolerance mechanisms for yield responses to pre-flowering drought stress of peanut genotypes with different drought tolerant levels, Field Crops Research, 144: 34–42.
- Lamasson T. 1947. The development in range management: the influence of rainfall on the prosperity of eastern Montana. Mimeographed Rep,7, Regioni, U.S, forest service:1878–1946.
- Landau S., Mitchell R.A.C., Barnett V., Colls J.J., Craighon J., Moore K.L., and Payne R.W. 1998. Testing winter wheat simulation models predictions against observed UK grain yields. Agricultural and Forest Meteorology, 89: 85–99.
- Landau S., Mitchell R.A.C., Barnett V., Colls J.J., Craighon J., Moore K.L and Payne R.W. 2000. A parsimonious, multiple-regression model of wheat yield response to environment. Agricultural and Forest Meteorology, 101: 151–166.

- 17- Lloyd-Hughes B., and Saunders M.A. 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22: 1571–1592.
- 18- Meyer S.J., Hubbard K.G., and Wilhite D.A. 1991. The relationship of climatic indices and variables to corn (maize) yields: a principal components analysis. *Agriculture and Forest Meteorology*, 55: 59–84.
- 19- Mishra A., and Singh V. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391: 202–216.
- 20- Quiring S.R., Papakryiakou J. 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agriculture and Forest Meteorology*, 118: 49– 62.
- 21- Mohammadi Moghaddam S., Mosaedi A., Jankju M., and Mesdaghi M. 2013. Modeling plants yield based on climatic factors and drought indices in selected sites of the provinces of Central and Qom in Iran. *Journal water & soil*, 27(6): 1190 –1206. (in Persian with English abstract)
- 22- Mosaedi A., and Kahe M., 2008. The Assessing Precipitation Effects on Yield Productions of Wheat and Barley in Golestan Province. *Journal Agricultural Science Natural Resoures*, 15(4): 206–218. (in Persian with English abstract)
- 23- Rahmani A., Khalili A., and Iiyaghat A. 2009. Quantitative survey of drought effects on barley yield in East Azerbaijan multiple regression method. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 12(44): 25–36. (in Persian with English abstract)
- 24- Sabziparvar A.A., Torkaman M., and Maryanaji Z. 2012. Investigating the Effect of Agroclimatic Indices and Variables on Optimum Wheat Performance (Case study: Hamedan Province). *Journal of Water and Soil*, 26(6): 1554–1567.
- 25- Scian B.V., and Bouza M.E. 2005. Environmental variables related to wheat yields in the semi-arid pampa region of Argentina. *Journal of arid Environments*, 61: 669–679.
- 26- Sharatt B.S., Knight C.W., and Wooding, F. 2003. Climatic impact on small grain production in the Subarctic Region of the United States. *Arctic*, 56(3): 219–226.
- 27- Smart A., Dunn B., Johnson P., Xu L., and Gates R. 2007. Using Weather Data to Explain Herbage Yeild on Three Greate Plain Plant Communities. *Rangeland Ecology and Management*, 60 (2): 146–153.
- 28- Stern N. 2006. Review on the economics of climate change. HM Treasury, London.
- 29- Talliee A., and Bahramy N. 2003. The effects of rainfall and temperature on the yeild of dryland wheat in Kermanshah province. *Water and Soil Sciences*, 17(1): 106–113.
- 30- Tatari M. 2008. Dryland wheat yield prediction in Khorasan using climte and edaphic data by applying neural networks. Ph.D Dissertation, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
- 31- Torell L., McDaniel K., and Koren V. 2011. Estimating grass yield on blue grama range from seasonal rainfall and soil moisture measurements. *Rangeland Ecology and Management* 64(1): 56–66.
- 32- Tsakiris G., Pangalou D., and Vangelis H. 2007. Regional drought as selectssment base lectd on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resource Management*, 21: 821–833.
- 33- Vangelis H., Tigkas D., and Tsakiris G. 2013. The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *Journal of Arid Environments*, 88: 130–140.
- 34- Wu D., Yu Q., Lu C., and Hengsdijik H. 2006. Quantifying production potentials of winter wheat in the North Chian Plain. *Europ. Journal of Agronomy*, 24: 266–235.
- 35- Xiao G., Zhang Q., Li Y., Wang R., Yao Y., Zhao H., and Bai H. 2010. Impact of temperature increase on the yield of winter wheat low and high altitudes in semiarid northwestern china. *Agricultural Water Management*, 97: 1360–1364.
- 36- Yamoah C.F., Varvel G.E., Francis A., and Waltman W.J. 1998. Weather and management impact on crop yield variability in rotation. *Journal of Production Agriculture*, 11(2): 161–225.
- 37- Yazdan Panah H. 2010. Determining the effect of climatic elements on the yield of dry farmed wheat in east Azarbaijan province by using intelligent neural network. *Geography and development*. 8(20): 133–144. (in Persian)

Modeling Rain-fed Wheat and Barley based on Meteorological Features and Drought Indices

A. Mosaedi^{1*} - S. Mohammadi Moghaddam² - M. Ghabaei Sough³

Received: 02-07-2014

Accepted: 08-06-2015

Introduction: Weather features and their variations have an important role in the yield of agricultural products, especially in rain-fed conditions. The main meteorological variables that affected yields consist of precipitation, temperature, soil moisture and solar radiation. Also, drought is one of the major constraints to production, especially the mid-season drought which occurs during the pod and seed formation stages and the terminal drought which occurs during the pod filling stage. The results of investigating the relation between drought indices such as Standardized Precipitation Index (SPI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), Crop Moisture index (CMI) and Z index with crop yields indicated the capability of these indices to estimate variations in crop yields. The objective of this study in the first step is investigation of relations among wheat and barley crop yields with climatic variables and SPI and RDI drought indices based on Principle Component Analysis (PCA) method at Bojnourd, Mashhad and Birjand stations. In addition, by selecting the prominent variables via PCA method, the best models of estimating each crop's yield based on multivariate regression methods at selected stations were determined.

Materials and Methods: In this study, the relationship between yields of rain-fed wheat and barley with weather variables consisting of minimum, mean and maximum temperature, precipitation, evapotranspiration and drought indices including SPI and RDI were investigated and modeled at Bojnourd, Mashhad and Birjand stations. For this purpose, the values of each variable were calculated for 34 time scales of 1, 2, 3, 4, 6, and 9 months and wet periods (nine 1-month periods, eight 2-month periods, seven 3-month periods, six 4-month periods, two 6-month periods, one wet period (5 or 7-month) and one 9-month period). After that, the main influencing variables were chosen among investigated time periods for each variable by using the method of principal component analysis (PCA). In continuation, the selected variables via PCA technique were used in the multivariate regression methods to create the best model of predicting wheat and barley yields based on each mentioned variable and combination of them. The performance of the established model was evaluated based on Ideal Point Error (IPE) criteria and the best predicting model of wheat and barley was selected for each region.

Results and Discussion: The results showed that applying PCA technique as a powerful statistical tool leads to decrease of the error and inflation of constructed models. This is done by reducing the volume of data and selecting influencing variables. Based on the PCA results by choosing only four components the 90 percent and greater than variation of crop yields are estimated and the first component includes time periods of spring and winter months. Investigation of the results of the best model at the given stations based on IPE criteria show that the constructed models based on variables of SPI index have more accuracy for predicting yields of wheat and barley at station of Bojnourd, at Mashhad station the created models based on a combination of variables and at Birjand station a model based on a combination of variables and a created model according to RDI variables was used that has more accuracy for predicting yields of wheat and barley, respectively. Comparing the estimated and actual values of wheat and barley yields indicate that the correlation coefficients of the models when applied to estimate the yield of wheat and barley at Bojnourd station resulted in 68 and 69 percent, at Mashhad station 89 and 86 percent and at Birjand station 66 and 74 percent, respectively. The performance evaluation graph shown in Fig. 1 can be used to illustrate model performance and to diagnose model bias.

Conclusion: According to the results, a relation between crop yields and combination of meteorological variables and drought indices is more positive and stronger than only meteorological variables combination. The results showed that the variables of temperature, precipitation and evapotranspiration are to be

1,2- Professor and Former M.Sc. Student of Rangeland Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

(*Corresponding Author Email: Mosaedi@um.ac.ir)

2 -Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

considered. Also, the evaluation model indicated that the RDI index is more suitable for predicting rain-fed wheat and barley yields.

Keywords: Multivariate Regression, Principal Component Analysis (PCA), Reconnaissance Drought Index (RDI), Thermal stress