

Feasibility study of rainfed barley annual yield prediction based on different drought indices

Younes Khoshkhoo ^{*1} 

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: y.khoshkho@uok.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 06.22.2022
Revised: 08.08.2022
Accepted: 08.21.2022

Keywords:
Cross validation,
EDDI index,
PCR model,
Sararoud station,
SPEI index

ABSTRACT

Background and Objectives: In arid and semi-arid climates which the rainfed farming is of high importance, it is necessary to pay special attention to the factors affecting the performance of rainfed crops, as well as its prediction. In this meantime, paying special attention to tolerant crops such as barley is inevitable. The aim of the current study was to assess the possibility of rainfed barley annual yield prediction using some drought indices in a semi-arid climate.

Materials and Methods: By calculating SPEI, EDDI and SPI drought indices for four growth stages of rainfed barley including sowing-emerge, emerge-tillering, tillering-stem and stem-flowering at the Sararoud-Kermanshah station, a number of 12 time series of these indices were extracted during 2000-2015 period. The cross-tabulation was used to evaluating the overall relationship between drought indices and rainfed barley annual yield and to model the rainfed barley annual yield based on drought indices, the best subset-based multiple linear regression model and Principal Component Regression (PCR) were applied at two different stages. The modelling procedure performed in two overall cases including considering a unique drought index and considering a combination of three different drought indices cases.

Results: The results of cross-tabulation technique showed an appropriate relationship between rainfed barley annual yield and drought indices. Therefore, a potential is available to use drought indices to predict rainfed barley annual yield. Based on the results of considering a unique drought index case, the highest (63.6%) and lowest (54.1%) values of coefficient of determination between rainfed barley annual yield and drought indices were for SPEI and EDDI indices, respectively and a value between them (62.4%) for SPI. The values of these indices were appeared at the model during the sowing-emerge and tillering-stem stages for SPEI and SPI and sowing-emerge and stem-flowering stages for EDDI. By considering the combination of three different drought indices case, the results revealed that the best multiple linear regression model is obtained by presence of SPEI (during tillering-stem and stem-flowering stages) and EDDI (during sowing-emerge and tillering-stem stages) indices in the model with a good coefficient of determination ($R^2=78.7\%$ and $R^2_{adj}=69.2\%$). However, the high value of Variance Inflation Factor (VIF) revealed that it is necessary to solve this issue by considering the Principal Component Regression (PCR) model. By applying PCR model to predict rainfed barley annual yield, the coefficient of determination for the PCR (78.2%) showed a

negligible decrease compared to the multiple regression model. However, the adjusted coefficient of determination properly improved to 71.7%. By considering the PCR model as the final model of predicting rainfed barley annual yield, the cross-validation results of this model led to obtaining $R^2=58.5\%$ and $RMSE=572.3$ kg/hect (equal to 22% of the mean of annual yield).

Conclusion: The overall results of this research showed that applying different drought indices could lead to increase in the explained variance of rainfed barley annual yield. The overall results of this research showed that the occurrence of drought during the emerge-tillering stage does not have a considerable impact on the rainfed barley annual yield. With respect to the higher role of the tillering-stem stage in the regression models, this stage was detected as the most important effective period on the rainfed barley annual yield. Therefore, among different growth stages, occurring drought in the tillering-stem period is expected to lead to a lesser amount of annual yield.

Cite this article: Khoshkhoo, Younes. 2022. Feasibility study of rainfed barley annual yield prediction based on different drought indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (2), 1-24.




© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2022.20549.3579

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

امکان‌سنجی پیش‌بینی میزان عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های مختلف خشک‌سالی

یونس خوشخو* 

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: y.khoshkho@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که کشت دیم از اهمیت و جایگاه بالایی برخوردار است لازم است به طور ویژه‌ای ضمن بررسی فاکتورهای مؤثر بر عملکرد محصولات دیم، پیش‌بینی آن نیز مورد توجه قرار گیرد. در این میان، توجه ویژه به گیاهان زراعی تحمل‌پذیر مانند جو اجتناب‌ناپذیر است. پژوهش حاضر با هدف امکان‌سنجی پیش‌بینی میزان عملکرد سالانه جو دیم بر اساس چند شاخص خشک‌سالی در یک اقلیم نیمه‌خشک به انجام رسید.
تاریخ دریافت: ۰۱/۰۴/۰۱ تاریخ ویرایش: ۰۱/۰۵/۱۷ تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۵/۳۰	مواد و روش‌ها: با محاسبه سه شاخص خشک‌سالی SPEI، EDDI و SPI برای چهار دوره رشد جو دیم شامل کاشت- سبز شدن، سبز شدن- پنبه‌زنی، پنبه‌زنی- ساقه‌دهی و ساقه‌دهی- گل‌دهی در ایستگاه سرارود کرمانشاه، ۱۲ سری زمانی از مقادیر این شاخص‌ها طی دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۰۰ استخراج گردید. جهت ارزیابی ارتباط کلی بین شاخص‌های خشک‌سالی و عملکرد سالانه جو دیم از جدول متقاطع استفاده شد و جهت مدل‌سازی میزان عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی، در وهله اول از مدل رگرسیون چندگانه خطی مبتنی بر شناسایی بهترین زیرمجموعه و در مرحله تکمیلی از مدل رگرسیون مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی (PCR) استفاده شد. فرایند مدل‌سازی رگرسیون خطی چندگانه با در نظر گرفتن دو رویکرد کلی شامل استفاده از هر شاخص خشک‌سالی بصورت واحد و استفاده تلفیقی از سه شاخص مختلف انجام شد.
واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی متقابل، ایستگاه سرارود، شاخص EDDI، شاخص SPEI، مدل PCR	یافته‌ها: بر اساس نتایج حاصل از جدول متقاطع، ارتباط مناسبی بین عملکرد سالانه جو دیم و شاخص‌های خشک‌سالی مشاهده شد و نتیجه‌گیری شد که این پتانسیل وجود دارد که از شاخص‌های خشک‌سالی جهت پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم استفاده شود. نتایج حاصل از به‌کارگیری هر شاخص خشک‌سالی به‌صورت واحد نشان داد که بالاترین ضریب تعیین بین عملکرد سالانه جو دیم با شاخص‌های خشک‌سالی با در نظر گرفتن SPEI (۶۳/۶ درصد) و

کم‌ترین مقدار آن با در نظر گرفتن EDDI (۵۴/۱ درصد) و برای شاخص SPI (۶۲/۴ درصد) در حد بینابین آن‌ها حاصل آمد که این شاخص‌ها برای SPEI و SPI طی دوره‌های کاشت-سبزشدن و پنجه‌زنی-ساقه‌دهی و برای EDDI طی دوره‌های کاشت-سبزشدن و ساقه‌دهی-گل‌دهی در مدل حضور یافتند. نتایج حاصل از به کارگیری تلفیقی هر سه شاخص خشک‌سالی نشان داد که بهترین مدل رگرسیون چندگانه خطی با ضریب تعیین ۷۸/۷ درصد و ضریب تعیین تعدیل شده ۶۹/۲ درصد با حضور شاخص SPEI در دوره‌های پنجه‌زنی-ساقه‌دهی و ساقه‌دهی-گل‌دهی و هم‌چنین شاخص EDDI در دوره‌های کاشت-سبزشدن و پنجه‌زنی-ساقه‌دهی حاصل آمد اما بالا بودن شاخص تورم واریانس (VIF) ضرورت به کارگیری مدل رگرسیونی مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی (PCR) را آشکار ساخت. نتایج حاصل از به کارگیری مدل PCR جهت مدل‌سازی عملکرد سالانه جو دیم نشان داد که ضریب تعیین مدل در این حالت در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندگانه با افتی ناچیز به ۷۸/۲ درصد رسید اما ضریب تعیین تعدیل شده به ۷۱/۷ درصد بهبود یافت. با در نظر گرفتن مدل PCR به‌عنوان مدل نهایی پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم و با بکارگیری روش اعتبارسنجی متقابل جهت سنجش قابلیت پیش‌بینی این مدل، مقدار دو شاخص R^2 و RMSE به ترتیب برابر با ۵۸/۵ درصد و ۵۷۲/۳ کیلوگرم در هکتار (معادل با ۲۲ درصد میانگین عملکرد سالانه جو دیم) حاصل آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی این پژوهش نشان داد که بکارگیری شاخص‌های خشک‌سالی با ماهیت متفاوت می‌تواند سبب افزایش توجه‌پذیری واریانس عملکرد سالانه جو دیم گردد. بر اساس نتایج کلی حاصل از این پژوهش، وقوع یا عدم وقوع خشک‌سالی در دوره سبزشدن-پنجه‌زنی تأثیر قابل‌توجهی بر میزان عملکرد سالانه جو دیم ندارد و با توجه به آنکه دوره پنجه‌زنی-ساقه‌دهی نقش پررنگ‌تری در مدل‌ها داشت به‌عنوان بااهمیت‌ترین دوره مؤثر بر میزان عملکرد سالانه جو دیم شناسایی شد. بنابراین در سال‌هایی که خشک‌سالی در دوره پنجه‌زنی-ساقه‌دهی رخ دهد انتظار افت عملکرد سالانه بیش‌تری در مقایسه با وقوع خشک‌سالی در سایر دوره‌ها می‌توان داشت.

استناد: خوشخو، یونس (۱۴۰۱). امکان‌سنجی پیش‌بینی میزان عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های مختلف خشک‌سالی.

پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۹ (۲)، ۲۴-۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2022.20549.3579



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

رشد فزاینده جمعیت و موضوع تأمین امنیت غذایی در سطح جهانی همواره به‌عنوان یک چالش اساسی و مهم مطرح بوده است (۱ و ۲). تأسیس سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO^۱) در سال ۱۹۴۵ و فعالیت مستمر و اقدامات گسترده آن از چند دهه گذشته تاکنون در راستای پرداختن به این چالش و تلاش جهت رفع و تعدیل آن بوده است. در کنار رشد جمعیت جهان، عواملی مانند وقوع تغییرات اقلیمی، وقوع ناامنی‌ها و بی‌ثباتی‌ها در مقیاس جهانی و ... به نگرانی‌های فزاینده در این خصوص دامن زده است. پرداختن به بحث امنیت غذایی در مناطق با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. با توجه به این‌که بخش وسیعی از ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است و در چنین اقلیم‌هایی به دلیل مشکل کم‌آبی کشت دیم از اهمیت و جایگاه بالایی برخوردار است لازم است به‌طور ویژه‌ای ضمن بررسی عوامل و فاکتورهای مؤثر بر عملکرد محصولات دیم، پیش‌بینی آن نیز مورد اهتمام و توجه قرار گیرد. در این میان، توجه ویژه به گیاهان زراعی مانند جو که تحمل آن‌ها نسبت به تنش‌های محیطی بیش‌تر است اجتناب‌ناپذیر است (۳). عوامل اقلیمی جزو مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرپذیری‌های سالانه میزان عملکرد محصولات محسوب می‌شوند (۴) و شناخت عوامل اقلیمی و اثرات آن‌ها روی گیاهان و به‌طور ویژه روی محصولات دیم یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش یا کاهش عملکرد است (۵). به‌عنوان نمونه میزان تابش خالص جذب‌شده توسط گیاه طی دوره‌های مختلف رشد به‌طور چشم‌گیری بر میزان بیوماس و عملکرد نهایی محصول اثرگذار است (۶) و (۷). تنش‌های محیطی ناشی از وقوع خشک‌سالی‌ها نیز

یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر عملکرد محصولات زراعی به‌حساب می‌آیند. به‌طور خاص‌تر در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که هم ضریب تغییرات بارش بالاتر است و هم فراوانی وقوع و شدت خشک‌سالی‌ها بیش‌تر است عملکرد سالانه محصولات کشاورزی به‌ویژه جو و گندم از عوامل اقلیمی و تنش‌های محیطی اثرپذیری بیش‌تری دارد (۸). مطالعات پیشین بیانگر آن است که تغییرپذیری‌های سالانه در فراوانی و شدت خشک‌سالی میزان عملکرد محصولات دیم را به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۹). از آن‌جایی‌که وقوع خشک‌سالی با کمبود بارش آغاز شده و پیامدهای بعدی دیگری از جمله کاهش رطوبت خاک را با خود به همراه دارد بنابراین اثرات قابل‌توجهی می‌تواند بر میزان عملکرد محصولات دیم داشته باشد به‌گونه‌ای که با سوق دادن رطوبت منطقه توسعه ریشه گیاه به پایین‌تر از نقطه پژمردگی و در پی آن کمبود آب قابل‌دسترس گیاه و درنتیجه بسته شدن روزنه‌ها و کاهش یا توقف فتوسنتز سبب افت عملکرد محصول می‌شود (۱۰). خشک‌سالی هم‌چنین ظرفیت جذب تابش فعال فتوسنتزی را توسط سطح تاج‌پوشش گیاه کاهش می‌دهد و از این طریق نیز می‌تواند بر روی کاهش عملکرد محصول اثرگذار باشد (۱۱). در پژوهش‌های پیشین از برخی شاخص‌های خشک‌سالی مانند SPI، SPEI و SPDI بعنوان ابزارهایی کارا و مؤثر جهت ارزیابی اثرات خشک‌سالی بر رشد و عملکرد محصولات مختلف دیم در مناطق مختلف جهان از جمله استرالیا (۱۲)، اروپا (۱۳)، آسیا (۱۴) و آمریکا (۱۱) استفاده شده است. در زمره پژوهش‌های انجام شده در ایران نیز می‌توان از مدل‌سازی عملکرد گندم و جو دیم بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی و متغیرهای هواشناسی (۸)، بررسی اثرات خشک‌سالی بر عملکرد گندم آبی و دیم در منطقه بجنورد (۱۵)،

1- Food and Agriculture Organization of the United Nations

گردد و ارزیابی شود که با بهینه‌سازی اثر تلفیقی این چند شاخص خشک‌سالی، تغییرپذیری‌های سال به سال عملکرد محصول تا چه اندازه می‌تواند با استفاده از این شاخص‌های خشک‌سالی توجیه گردد.

مواد و روش‌ها

در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی که وابسته به سازمان هواشناسی کشور بوده و به‌صورت یک شبکه هماهنگ در سراسر کشور فعال هستند در کنار اندازه‌گیری متغیرهای مختلف هواشناسی، دیدبانی‌های فنولوژیکی و اندازه‌گیری‌های بیومتری نیز به‌طور منظم برای محصولات استراتژیک و غالب هر منطقه طی مراحل مختلف رشد گیاه از کاشت تا برداشت تحت استانداردهای به‌خصوصی انجام می‌شود. داده‌های حاصل از این ایستگاه‌ها را می‌توان جزو تخصصی‌ترین مرجع داده‌های مربوط به مراحل مختلف رشد و عملکرد گیاهان در ایران دانست. اندازه‌گیری میزان عملکرد محصولات زراعی در این ایستگاه‌ها مبتنی بر کاشت گیاه در کرت‌های متعدد بوده و محاسبه عملکرد نهایی محصول با میانگین‌گیری از این کرت‌ها و با دقت بالایی صورت می‌گیرد. ایستگاه سرارود کرمانشاه به طول جغرافیایی ۱۷° ۴۷' شرقی، عرض جغرافیایی ۲۰° ۳۴' شمالی و ارتفاع ۱۳۶۱/۷ متر از تراز سطح دریا یکی از قدیمی‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی کشور است که در سیستم طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک بوده و تمرکز آن بر روی دو محصول استراتژیک غرب کشور (گندم دیم و جو دیم) است. در مطالعه حاضر که معطوف به مدل‌سازی عملکرد سالانه جو دیم بر اساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه سرارود است در کنار در نظر گرفتن داده‌های روزانه متغیرهای مختلف هواشناسی شامل دمای هوا،

بررسی اثر خشک‌سالی هواشناسی- کشاورزی بر عملکرد گندم دیم در ایران با استفاده از شاخص SPEI (۵)، ارزیابی شاخص خشک‌سالی رطوبت محصول بر عملکرد گندم دیم در حوضه آبریز سیمینه‌رود (۱۶) و مدل‌سازی عملکرد چند محصول دیمی با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی ژنتیک (۱۷) اشاره کرد. از آنجایی‌که درجه تأثیر خشک‌سالی بر میزان عملکرد محصولات دیم به عواملی مانند نوع محصول و مرحله رشد گیاه مرتبط است (۱۸) برای بررسی اثرات خشک‌سالی بر عملکرد سالانه محصولات دیم منطقی‌تر به نظر می‌رسد که شاخص‌های خشک‌سالی طی مراحل مختلف رشد استخراج شده و اثرات خشک‌سالی طی دوره‌های مختلف رشد بر عملکرد سالانه محصول مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گیرد. به‌عنوان نمونه جونگرانک و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کرده‌اند که تنش‌های ناشی از خشک‌سالی‌های اواسط دوره رشد تأثیر بیش‌تری بر کاهش عملکرد محصول دارند (۱۹). در کنار استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی سیستم خاک- گیاه- اتمسفر (SVAT)^۱ که نیاز به داده‌های ورودی بسیار زیاد و با جزئیات بالایی دارند و به‌کارگیری آن‌ها در عمل با محدودیت‌هایی همراه است روش‌های آماری مبتنی بر تحلیل‌های چندمتغیره نیز از قابلیت مناسبی جهت انجام چنین تحلیل‌هایی برخوردارند. در پژوهش حاضر سعی شده است با یک نگرشی نو و مبتنی بر در نظر گرفتن هم‌زمان و تلفیقی چند شاخص خشک‌سالی که از جنبه‌های متفاوتی پدیده خشک‌سالی را مد نظر قرار می‌دهند و محاسبه مقدار آن‌ها طی مراحل مختلف رشد محصول (دوره‌های کاشت- سبزشدن، سبزشدن- پنجه‌زنی و ...) جهت پیش‌بینی عملکرد سالانه یک محصول دیم با به‌کارگیری تحلیل‌های آماری چندمتغیره استفاده

معین از رشد گیاه (شامل کاشت- سبز شدن، سبز شدن- پنجه‌زنی، پنجه‌زنی- ساقه‌دهی و ساقه‌دهی- گل‌دهی) طی سال‌های مختلف استخراج شدند و برای هر کدام از این دوره‌های رشد، یک سری زمانی از شاخص‌های خشک‌سالی مذکور طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ تهیه شد. با انجام این کار در مجموع ۱۲ سری زمانی از شاخص‌های خشک‌سالی (با در نظر گرفتن ۴ دوره مختلف رشد گیاه و ۳ شاخص خشک‌سالی) طی دوره آماری مذکور استخراج شد که در حقیقت نقش متغیرهای پیش‌بینی‌کننده را برای متغیر هدف (که همان عملکرد سالانه جو دیم است) ایفاء کردند. سؤال اساسی در این بخش این بود که شاخص‌های خشک‌سالی مذکور در وهله اول به‌صورت تک‌تک و در وهله دوم به‌صورت تلفیقی (استفاده هم‌زمان از هر سه شاخص خشک‌سالی به‌طور یکجا) تا چه اندازه قادر به پیش‌بینی میزان عملکرد سالانه جو دیم هستند و چند درصد از واریانس عملکرد سالانه جو دیم توسط آن‌ها قابل توجیه است؟ جهت مدل‌سازی میزان عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی مذکور از دو رویکرد کلی شامل استفاده از هر شاخص خشک‌سالی به‌صورت واحد و استفاده تلفیقی و هم‌زمان از هر سه شاخص خشک‌سالی بهره گرفته شد. در هر دو رویکرد فوق، مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی برای ۴ دوره مختلف از رشد گیاه طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ استخراج شدند و از آن‌ها جهت پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم استفاده شد.

برای محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی در این پژوهش از سه شاخص SPEI (مبتنی بر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل)، EDDI (مبتنی بر تبخیر و تعرق پتانسیل) و SPI (مبتنی بر بارش) جهت مدل‌سازی و

بارش، سرعت باد، طول ساعات آفتابی و رطوبت نسبی، داده‌های عملکرد سالانه جو دیم طی سال‌های زارعی ۲۰۰۰-۱۹۹۹ تا ۲۰۱۵-۲۰۱۴ و همچنین تاریخ وقوع مراحل مختلف فنولوژیک رشد گیاه (شامل دوره‌های کاشت- سبز شدن^۱، سبز شدن- پنجه‌زنی^۲، پنجه‌زنی- ساقه‌دهی^۳ و ساقه‌دهی- گل‌دهی^۴) طی دوره مذکور نیز جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به این‌که از بین سه شاخص خشک‌سالی در نظر گرفته‌شده در این تحقیق (شاخص‌های SPEI^۵، EDDI^۶ و SPI^۷)، جهت محاسبه دو شاخص SPEI و EDDI لازم است که تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شود بنابراین از داده‌های هواشناسی در وهله اول جهت محاسبه مقادیر روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل به روش فائو-پنمن-مانتیت و در ادامه جهت استخراج شاخص‌های خشک‌سالی در گام‌های زمانی مختلف (یک‌ماهه، دو‌ماهه، سه‌ماهه و ...) استفاده شد. با توجه به این‌که هدف از انجام این پژوهش، مدل‌سازی عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های مختلف خشک‌سالی طی مراحل مختلف رشد بوده است بنابراین با در نظر گرفتن تاریخ‌های وقوع مراحل مختلف فنولوژی جو دیم طی سال‌های مختلف، بسته به طول هر مرحله فنولوژی، مقدار شاخص خشک‌سالی در گام زمانی متناسب با طول آن دوره از رشد استخراج شد و مبنای تحلیل‌های بعدی قرار گرفت. بر این اساس، در وهله اول مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل و در ادامه شاخص‌های خشک‌سالی SPEI، EDDI و SPI برای هر دوره

- 1- Sowing-emerge
- 2- Emerge-tillering
- 3- Tillering-stem elongation
- 4- Stem elongation-flowering
- 5- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
- 6- Evaporative Demand Drought Index
- 7- Standardized Precipitation Index

جهت محاسبه شاخص SPI ابتدا تابع چگالی احتمال گاما^۱ بر سری زمانی بارش در هر گام زمانی دلخواه (یک‌ماهه، دوماهه، سه‌ماهه و ...) که محاسبه شاخص SPI برای آن گام زمانی مدنظر باشد برآزش داده می‌شود سپس شاخص SPI بر اساس روابط ۱ و ۲ (که در واقع مبتنی بر یک تقریب می‌باشند) قابل محاسبه است (۲۰):

پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم استفاده شده است. مبنای در نظر گرفتن این سه شاخص خشک‌سالی، مبتنی بودن آن‌ها بر اساس متغیرهای متفاوت بوده است و فرضیه اولیه بر این اساس شکل گرفت که با توجه به ساختار متفاوت این سه شاخص، انتظار بر آن است که هر کدام از آن‌ها بتوانند جنبه‌های متفاوتی از میزان عملکرد سالانه جو دیم را توجیه کنند و در نتیجه استفاده تلفیقی از آنها بتواند منجر به بهبود مدل‌سازی عملکرد سالانه جو دیم گردد.

$$SPI = -\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (1)$$

$$SPI = +\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{for } 0.5 < H(x) < 1 \quad (2)$$

یکی از دو رابطه ۳ یا ۴ به دست می‌آید:

که در آن، $H(x)$ توزیع تجمعی گاما است و t نیز بسته به مقدار احتمال تجمعی بر اساس توزیع گاما از

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1-H(x))^2} \right]} \quad \text{for } 0.5 < H(x) < 1 \quad (4)$$

($ET0_i$) در آن گام زمانی محاسبه می‌شود ($D_i = P_i - ET0_i$) سپس احتمال تجمعی مقادیر D_i با برآزش دادن یک تابع چگالی احتمال (به‌طور معمول تابع لوگ لجستیک^۲) بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شود (۲۱):

ضرایب C_0, C_1, C_2, d_1, d_2 و d_3 نیز ضرایب ثابت معادله هستند و مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۵۱۵۵۱۷، ۰/۸۰۲۸۵۳، ۰/۰۱۰۳۲۸، ۰/۴۳۲۷۸۸، ۰/۱۸۹۲۶۹ و ۰/۰۱۳۰۸ لحاظ می‌شود.

جهت محاسبه شاخص SPEI در هر گام زمانی دلخواه i (یک‌ماهه، دوماهه و ...) ابتدا اختلاف بین مقادیر تجمعی بارش (P_i) و تبخیر و تعرق پتانسیل

1- Gamma
2- Log-logistic

$$F(x) = \left[\left(1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^\beta \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (6)$$

W با در نظر گرفتن رابطه $P(D) = 1 - F(x)$ و برای حالتی که $0 < P(D) \leq 0.5$ باشد از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W = \sqrt{-2 \ln P(D)} \quad (7)$$

چندماهه و ... با به‌کارگیری تابع توکی^۱ تجربی محاسبه می‌شود (۲۵) سپس مشابه با محاسبه شاخص SPEI از رابطه ۶ برای محاسبه شاخص EDDI نیز استفاده می‌شود تنها با این تفاوت که در محاسبه شاخص EDDI به جای به‌کارگیری $P(D)$ از $P(ET_0)$ استفاده می‌شود (۲۲).

محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_0): تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت بر اساس معادله زیر محاسبه شد (۲۳):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G_s) + \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (8)$$

بر حسب $(Mj.m^{-2}.day^{-1})$ ، T میانگین دمای هوا بر حسب $^{\circ}C$ ، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب (m/s) ، e_s و e_a به ترتیب فشار بخار

که در آن‌ها، $F(x)$ تابع توزیع احتمال تجمعی سری زمانی D_i (به تعبیری دیگر احتمال تجاوز از یک مقدار D_i معین) است و پارامترهای α ، β و γ نیز پارامترهای تجربی تابع توزیع احتمال هستند. مقدار

برای حالتی که $P(D) > 0.5$ باشد نیز کافیست در رابطه فوق ابتدا به جای $P(D)$ مقدار $1 - P(D)$ را جایگزین کرد سپس بعد از قرار دادن W حاصله در رابطه ۶، علامت SPEI باید عوض شود (اگر منفی است مثبت شود و برعکس). مقادیر ضرایب C_0 ، C_1 ، C_2 ، d_1 ، d_2 و d_3 نیز همان مقادیری هستند که برای شاخص SPI لحاظ شدند.

جهت محاسبه شاخص EDDI نیز پس از محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل (به روش فائو-پنمن-مانتیت)، مقادیر احتمال تجمعی تبخیر و تعرق پتانسیل $P(ET_0)$ در هر بازه زمانی دلخواه (هفتگی، یک‌ماهه،

که در آن، ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل بر حسب (mm/day) ، R_n تابش خالص بر حسب $(Mj.m^{-2}.day^{-1})$ ، G_s چگالی شار گرمایی خاک

1- Tukey

اشباع و فشار بخار واقعی بر حسب (kpa) ، Δ شیب منحنی فشار بخار در مقابل درجه حرارت بر حسب $(kPa \cdot ^\circ C^{-1})$ و γ ثابت سایکرومتری بر حسب $(kPa \cdot ^\circ C)$ است (۲۴).

تحلیل‌های آماری به صورت سلسله مراتبی و در سه مرحله کلی شامل به کارگیری جدول متقاطع، استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره و استفاده از رگرسیون مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی انجام شد. قبل از انجام مدل‌سازی عملکرد سالانه جو دیم بر اساس مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی طی دوره‌های مختلف رشد گیاه، به جهت انجام یک ارزیابی اولیه از چگونگی ارتباط کلی بین شاخص‌های خشک‌سالی با عملکرد جو دیم، ابتدا مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی با گام زمانی ۶ ماهه (طی دوره کاشت تا گل‌دهی که به طور متوسط یک دوره شش ماهه بین ماه‌های نوامبر تا آوریل را شامل می‌شود) طی سال‌های مختلف استخراج شدند و ارتباط آن‌ها با عملکرد سالانه جو دیم با استفاده از جدول متقاطع^۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. از جدول متقاطع در پژوهش‌های متنوعی از جمله توسط ویسته سرانو و همکاران (۲۰۱۵) جهت ارزیابی میزان همروندی بین شاخص خشک‌سالی SPEI با شاخص NDVI استفاده شده است (۲۵). شیوه استفاده از جدول متقاطع در پژوهش حاضر بدین گونه بود که ابتدا عملکرد سالانه جو دیم بسته به دامنه تغییرپذیری آن طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ به ۵ طبقه مختلف شامل عملکرد پایین، عملکرد نسبتاً پایین، عملکرد نرمال، عملکرد نسبتاً بالا و عملکرد بالا دسته‌بندی شد و درصد فراوانی نسبی هر طبقه با درصد فراوانی نسبی ۵ طبقه مختلف خشک‌سالی (شامل خشک‌سالی شدید، خشک‌سالی متوسط، شرایط نرمال، ترسالی متوسط و ترسالی شدید) در قالب یک جدول به صورت متقاطع مورد

مطابقت و تحلیل قرار گرفت. برای هر سه شاخص خشک‌سالی، ۵ طبقه مذکور به ترتیب با در نظر گرفتن مقادیر کم‌تر از $-1/5$ ، $-1/5$ تا $-0/5$ ، $-0/5$ تا $+0/5$ ، $+0/5$ تا $+1/5$ و مقادیر بیش‌تر از $+1/5$ در نظر گرفته شدند. هرچه تطابق بالاتری بین طبقات متناظر با هم شاخص‌های خشک‌سالی و عملکرد سالانه وجود داشته باشد نشان‌دهنده میزان بیش‌تری از همروندی بین این دو متغیر با یکدیگر و در نتیجه ارتباط قوی‌تر بین آن‌هاست. سنجش میزان تطابق بین طبقات هم با به کارگیری روش‌هایی مثل شاخص کاپای وزنی کوهن (۲۶) و هم با محاسبه روش‌های مبتنی بر محاسبه درصد‌های فراوانی نسبی امکان‌پذیر است که در پژوهش حاضر از محاسبه مجموع درصد‌های فراوانی نسبی در دو حالت مطابقت کامل و مطابقت با یک طبقه اختلاف استفاده شد.

پس از کسب اطمینان از وجود درجه مناسبی از ارتباط کلی بین شاخص‌های خشک‌سالی با عملکرد سالانه جو دیم با بهره‌گیری از جدول متقاطع، جهت مدل‌سازی عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی در وهله اول از مدل رگرسیون چندگانه خطی مبتنی بر شناسایی بهترین زیرمجموعه^۲ از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (با این قید که تمامی متغیرهای موجود در مدل دارای اثر معنی‌داری در سطح اطمینان $\alpha=0/1$ بر روی عملکرد سالانه جو دیم باشند) و در مرحله تکمیلی و نهایی، از مدل رگرسیون مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی (PCR^۳) بهره گرفته شد. در مدل PCR که با هدف از بین بردن همبستگی بین متغیرهای مستقل انجام می‌شود ابتدا داده‌های اولیه با به کارگیری روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA^۴) به چندین مؤلفه متعامد و غیرهمبسته (که این مؤلفه‌ها در واقع یک ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند) تبدیل می‌شوند سپس مدل

2- Best subset
3- Principal Components Regression
4- Principal Components Analysis

1- Cross Tabulation

فرایند واسنجی و اعتبارسنجی مدل، تمامی داده‌های موجود نقش دارند (۲۷). برای به‌کارگیری این روش که برای هر کدام از مدل‌های رگرسیونی به تفکیک و طی مراحل گوناگونی انجام شد در هر مرحله داده‌های مربوط به یک سال مشخص حذف شد و مدل رگرسیونی بر اساس سال‌های باقی‌مانده ساخته شد و از این مدل رگرسیونی ساخته‌شده برای پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم برای آن سالی که داده‌های آن حذف شده بود استفاده شد. این فرایند به تعداد کل سال‌ها و برای هر مدل رگرسیونی به تفکیک انجام شد و در نهایت درجه تطابق مقادیر پیش‌بینی‌شده عملکرد سالانه جو دیم که برای هر کدام از سال‌ها توسط یک مدل رگرسیونی مخصوص به خود برآورد شده بود با به‌کارگیری شاخص‌های آماری با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. جهت سنجش عملکرد مدل‌های رگرسیونی از دو شاخص ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) مطابق با روابط زیر استفاده شد که در آن‌ها C_i و O_i به ترتیب مقادیر محاسباتی و مشاهداتی، n تعداد کل داده‌ها و \bar{C} و \bar{O} هم به ترتیب میانگین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی هستند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \right)^2 \quad (10)$$

رگرسیون خطی چندگانه بر روی این مؤلفه‌های اصلی اعمال می‌گردد. دلیل به‌کارگیری مدل PCR در این پژوهش وجود همبستگی بالای بین برخی از متغیرهای مستقل پیش‌بینی‌کننده (شاخص‌های مختلف خشک‌سالی) بود که سبب بالا رفتن شاخص عامل تورم واریانس^۱ (VIF) و به‌وجود آمدن اثر همراستایی چندگانه^۲ گردید. مقدار شاخص VIF در حالت مطلوب خود که نشان‌دهنده عدم وجود مشکل همراستایی چندگانه است حول و حوش عدد ۱ می‌باشد و هرچه این شاخص مقدار بیش‌تری به خود اختصاص دهد نشان‌دهنده همبستگی بالاتر بین متغیرهای مستقل موجود در مدل و در نتیجه شدیدتر بودن اثر همراستایی خطی چندگانه می‌باشد. بالا رفتن شاخص VIF می‌تواند مدل رگرسیون چندگانه خطی را از درجه اعتبار ساقط کند. در مدل PCR چون متغیرهای اولیه تبدیل به مؤلفه‌های جدید و غیرهمبسته می‌شوند بنابراین پایین آوردن شاخص VIF، مشکل همراستایی چندگانه توسط این روش حل می‌شود.

جهت سنجش درجه اعتبار مدل‌های پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی از روش اعتبارسنجی متقابل^۳ بهره گرفته شد. نقطه قوت اصلی این روش آن است که در هر دو

-
- 1- Variance Inflation Factor
 - 2- Colinearity
 - 3- Cross validation
 - 4- Root of Mean Square Error

نتایج و بحث

نتایج حاصل از به‌کارگیری جدول مقاطع جهت ارزیابی درجه همروندی و ارتباط بین شاخص‌های خشک‌سالی با میزان عملکرد سالانه جو دیم در جدول ۱ منعکس شده است. بر اساس اعداد داخل این جدول که معرف درصد فراوانی نسبی هستند می‌توان تشخیص داد که تغییرپذیری شاخص‌های خشک‌سالی طی سال‌های مختلف تا چه اندازه با تغییرپذیری عملکرد سالانه جو دیم هم‌نوا و هم‌روند بوده است. حالت ایده‌آل از ارتباط بین این دو متغیر زمانی رخ می‌دهد که در تمامی سال‌ها، حالت خشک‌سالی شدید با عملکرد پایین، خشک‌سالی متوسط با عملکرد متوسط، شرایط نرمال خشک‌سالی با عملکرد نرمال، ترسالی متوسط با عملکرد نسبتاً بالا و ترسالی شدید با عملکرد بالا همراه باشد. بر این اساس، به عنوان مثال برای سال‌هایی که وضعیت خشک‌سالی در شرایط نرمال بوده است حالت ایده‌آل زمانی رخ می‌دهد که درصد فراوانی نسبی در جدول مقاطع برای عملکرد نرمال بیش‌ترین مقدار و برای چهار طبقه دیگر (عملکردهای پایین، نسبتاً پایین، نسبتاً بالا و بالا) برابر با صفر باشد. از آنجایی که چنین حالت ایده‌آلی به‌ندرت رخ می‌دهد هرچه اختلاف بین طبقات خشک‌سالی و طبقات عملکرد کم‌تر باشد نشان‌دهنده همروندی بیش‌تر و ارتباط قوی‌تر بین این دو متغیر است. در جدول ۱ درصدهای فراوانی نسبی برای همه طبقات خشک‌سالی و عملکرد به‌صورت مقاطع نشان داده شده است. ستون آخر و سطر آخر این جدول نیز به ترتیب بیانگر مجموع درصد فراوانی نسبی شاخص خشک‌سالی در هر طبقه و مجموع درصد فراوانی نسبی عملکرد سالانه جو دیم در هر طبقه می‌باشد. با ارزیابی میزان مطابقت کلی بین طبقات مختلف شاخص خشک‌سالی و عملکرد سالانه جو دیم در این جدول دیده می‌شود که به‌عنوان مثال در ۴۲/۹٪ از

سال‌ها که شاخص خشک‌سالی SPEI حاکم بودن شرایط خشک‌سالی متوسط را نشان داده است در طی این سال‌ها در ۱۴/۳٪، ۲۱/۴٪ و ۷/۱٪ موارد عملکرد سالانه جو دیم به‌ترتیب پایین، نسبتاً پایین و نرمال بوده است. چون به لحاظ طبقه‌بندی انجام شده، شرایط خشک‌سالی متوسط با عملکرد نسبتاً پایین متناظر است بنابراین حالت ایده‌آل از وجود ارتباط قوی بین این دو متغیر زمانی رخ می‌دهد که در تمامی طی سال‌هایی که خشک‌سالی متوسط حاکم بوده است عملکرد هم نسبتاً پایین باشد. دیده می‌شود که از ۴۲/۹ درصد کل، در نیمی از حالات (۲۱/۴ درصد) خشک‌سالی متوسط با عملکرد نسبتاً پایین همراه بوده است که به معنای مطابقت طبقاتی کامل بین این دو متغیر است و برای نصف حالات باقی‌مانده هم که شامل ۱۴/۳ درصد با عملکرد پایین و ۷/۱ درصد با عملکرد نرمال بوده است چون این دو طبقه هر دو در مجاورت عملکرد نسبتاً پایین هستند و هر دو تنها یک طبقه با آن اختلاف دارند بنابراین می‌توان گفت که در مجموع همروندی و ارتباط مناسبی در این حالت بین این دو متغیر وجود داشته است. به همین منوال، درجه مطابقت بین طبقات مختلف عملکرد با طبقات مختلف خشک‌سالی بر اساس هر سه شاخص خشک‌سالی به تفکیک محاسبه شد و مشاهده شد که با در نظر گرفتن همه حالات متناظر با هم، در هیچ حالتی حداکثر اختلاف بین طبقات عملکرد با طبقات خشک‌سالی به بیش از ۲ طبقه نرسیده است. به این معنی که فرضاً در هیچ سالی چنین حالتی اتفاق نیفتاده است که عملکرد بالا با وقوع خشک‌سالی شدید یا حتی خشک‌سالی متوسط همراه بوده باشد. با جمع‌بندی همه حالات مقاطع ممکن در جدول ۱ در نهایت چنین نتیجه‌گیری می‌شود که برای هر سه شاخص خشک‌سالی به تفکیک، در ۳۵/۷ درصد از حالات مطابقت کاملی بین طبقات شاخص

دو متغیر باشد رخ نداده است که نشان‌دهنده آن است که ارتباط کلی بین شاخص‌های خشک‌سالی با عملکرد سالانه در هیچ کدام از سال‌ها ضعیف نبوده است.

خشک‌سالی با عملکرد سالانه جو دیم رخ داده است و در ۴۲/۹ درصد و ۲۱/۴ درصد حالات نیز این مطابقت به ترتیب با یک طبقه اختلاف و دو طبقه اختلاف روی داده است. بنابراین در هیچ‌یک از سال‌ها موردی که بیانگر سه طبقه اختلاف یا بیش‌تر بین این

جدول ۱- جدول متقاطع بین طبقات مختلف شاخص‌های خشک‌سالی و طبقات مختلف عملکرد سالانه جو دیم.

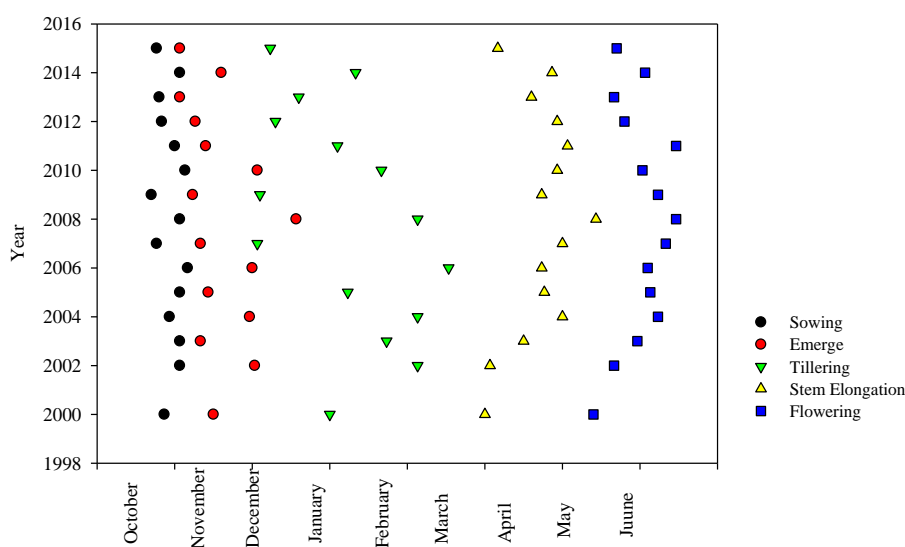
Table 1. Cross tabulation between different drought indices categories and different rainfed barley annual yield categories.

شاخص‌های خشک‌سالی Drought Indices	طبقات خشک‌سالی Drought categories	عملکرد پایین low-yield	عملکرد نسبتاً پایین relatively-low-yield	عملکرد نرمال normal-yield	عملکرد نسبتاً بالا relatively-high-yield	عملکرد بالا high-yield	مجموع درصد فراوانی نسبی شاخص خشک‌سالی Sum of relative frequency of drought indices (%)
SPEI	خشک‌سالی شدید Severe drought	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	خشک‌سالی متوسط Moderate drought	14.3%	21.4%	7.1%	0.0%	0.0%	42.9%
	شرایط نرمال Normal condition	0.0%	0.0%	14.3%	14.3%	7.1%	35.7%
	ترسالی متوسط Moderately wet	0.0%	14.3%	0.0%	0.0%	7.1%	21.4%
	ترسالی شدید Severely wet	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	خشک‌سالی شدید Severe drought	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
EDDI	خشک‌سالی متوسط Moderate drought	7.1%	21.4%	7.1%	7.1%	0.0%	42.9%
	شرایط نرمال Normal condition	7.1%	14.3%	7.1%	0.0%	7.1%	35.7%
	ترسالی متوسط Moderately wet	0.0%	0.0%	7.1%	7.1%	7.1%	21.4%
	ترسالی شدید Severely wet	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	خشک‌سالی شدید Severe drought	7.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.1%
	خشک‌سالی متوسط Moderate drought	7.1%	7.1%	7.1%	0.0%	0.0%	21.4%
SPI	شرایط نرمال Normal condition	0.0%	14.3%	14.3%	7.1%	7.1%	42.9%
	ترسالی متوسط Moderately wet	0.0%	14.3%	0.0%	7.1%	7.1%	28.6%
	ترسالی شدید Severely wet	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	خشک‌سالی شدید Severe drought	7.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.1%
	خشک‌سالی متوسط Moderate drought	7.1%	7.1%	7.1%	0.0%	0.0%	21.4%
	شرایط نرمال Normal condition	0.0%	14.3%	14.3%	7.1%	7.1%	42.9%
مجموع درصد فراوانی نسبی عملکرد سالانه جو دیم Sum of relative frequency of rainfed barley annual yield (%)		14.3%	35.7%	21.4%	14.3%	14.3%	100%

خشک‌سالی با عملکرد سالانه جو دیم، مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی برای مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم به تفکیک استخراج شدند و براساس آن‌ها، میزان عملکرد سالانه جو دیم مدل‌سازی شد. به جهت ارائه یک دید کلی از زمان وقوع مراحل مختلف فنولوژیکی جو دیم شامل زمان کاشت و تاریخ‌های شروع مراحل سبز شدن، پنجه‌زنی، به ساقه‌رفتن و گل‌دهی طی سال‌های مختلف، در شکل ۱ تغییرپذیری سال به سال این مراحل طی سال‌های زراعی ۲۰۰۰-۱۹۹۹ تا ۲۰۱۵-۲۰۱۴ ارائه شده است. میانگین طول دوره‌های کاشت-سبز شدن، سبز شدن-پنجه‌زنی، پنجه‌زنی-ساقه‌دهی و گل‌دهی نیز طی سال‌های مختلف به ترتیب برابر با ۱۸، ۵۱، ۷۵، ۳۹ و ۴۳ روز و انحراف معیار آن‌ها به ترتیب برابر با ۱۰/۲، ۱۶/۳، ۲۶/۲، ۶ و ۵/۶ بوده است که نشان‌دهنده آن است در بین مراحل فنولوژیک مذکور، هم بیش‌ترین طول دوره و هم بیش‌ترین تغییرپذیری سال به سال مربوط به مرحله پنجه‌زنی-ساقه‌دهی می‌باشد. در یک بیان کلی، طول مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم طی سال‌های مختلف از کم‌تر از یک ماه (چند هفته) تا حداکثر ۴ ماه در نوسان بوده است.

با محاسبه مجموع درصد‌های فراوانی نسبی در دو حالت مطابقت کامل و مطابقت با یک طبقه اختلاف نتایج نشان می‌دهد که با به‌کارگیری هر سه شاخص خشک‌سالی به تفکیک، در ۷۸/۶ درصد از سال‌ها حداکثر یک طبقه اختلاف بین طبقات عملکرد سالانه و طبقات شاخص‌های خشک‌سالی رخ داده است که درصد قابل قبول و مطلوبی قلمداد می‌شود. شایان ذکر است که با در نظر گرفتن همه حالات متقاطع ممکن با هم اگرچه چنین بنظر می‌رسد که هر سه شاخص خشک‌سالی کاملاً مشابه با یکدیگر عمل کرده‌اند اما همان‌گونه که از جدول ۱ پیداست رفتار این شاخص‌ها طی سال‌های مختلف یکسان نبوده است و تفاوت‌هایی بین آن‌ها قابل مشاهده می‌باشد اما به هنگام جمع‌بندی همه حالات، نتایج مشابهی توسط هر سه شاخص حاصل آمده است.

پس از کسب اطمینان از وجود یک ارتباط کلی بین شاخص‌های خشک‌سالی و عملکرد سالانه جو دیم که با به‌کارگیری روش جدول متقاطع انجام شد و بر مبنای این ارتباط مشخص شد که این پتانسیل وجود دارد که از شاخص‌های خشک‌سالی جهت پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم استفاده شود در ادامه جهت ارزیابی ارتباط دقیق‌تر بین شاخص‌های

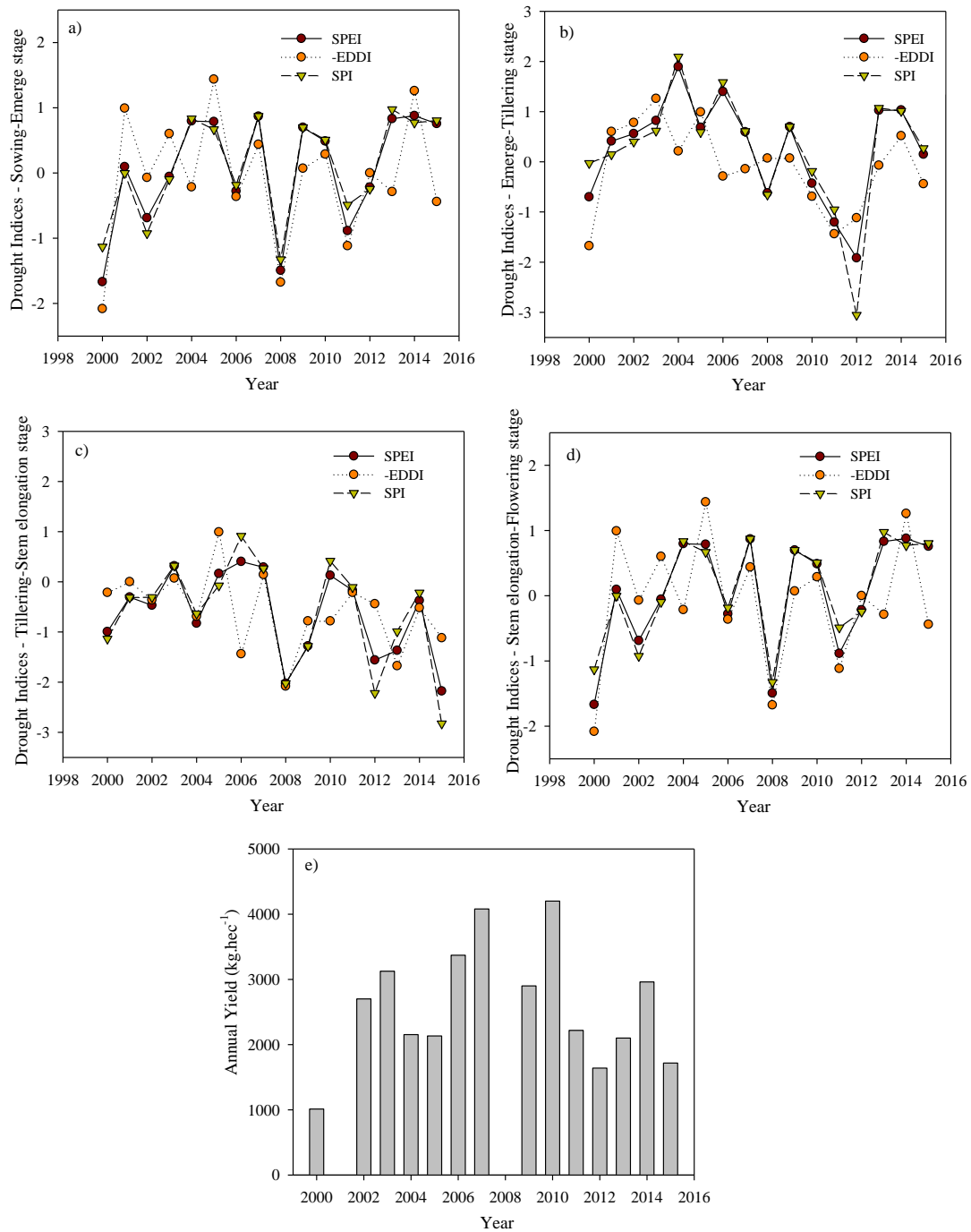


شکل ۱- زمان وقوع مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم طی سال‌های مختلف.

Figure 1. The occurrence date of different phenological stages of rainfed barley during different years.

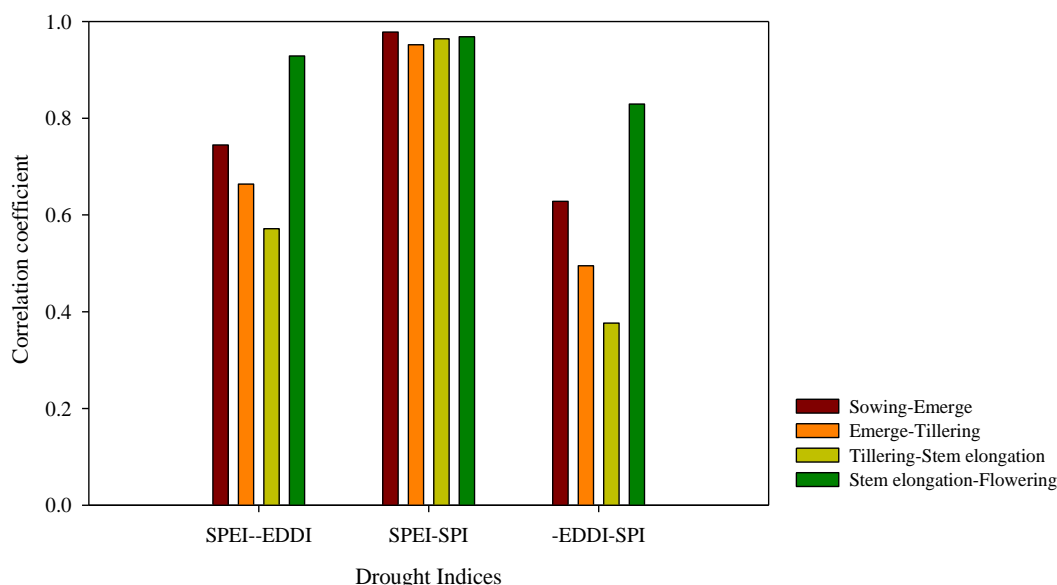
سال، شرایط تقریباً نرمال بوده است. هم‌چنین به لحاظ ارزیابی میزان مطابقت این سه شاخص در تعیین دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی نیز آن چنان‌که از این شکل پیداست دیده می‌شود که شاخص‌های SPEI (مبتنی بر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل) و SPI (تنها مبتنی بر بارش) مطابقت نسبتاً بالایی با هم دارند در حالی که شاخص EDDI- (تنها مبتنی بر تبخیر و تعرق پتانسیل) اگرچه مطابقت مناسبی با شاخص SPEI دارد اما مطابقت بین این شاخص با شاخص SPI چندان چشمگیر نیست. به جهت توصیف کمی این مسأله، ضریب همبستگی دو به دوی این سه شاخص طی چهار دوره مختلف رشد جو دیم محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله، همبستگی بین شاخص SPEI با شاخص SPI در هر چهار دوره رشد بسیار قوی (ضریب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۹) و با شاخص EDDI- فقط در دوره ساقه‌دهی - گل‌دهی بسیار قوی بوده است و در سه دوره دیگر رشد از درجه قوت آن کاسته شده است. در خصوص دو شاخص EDDI- و SPI که همبستگی نسبتاً ضعیف‌تری داشته‌اند نیز بالاترین ضریب همبستگی در مرحله ساقه‌دهی - گل‌دهی با مقدار بالاتر از ۰/۸ و کم‌ترین مقدار آن در مرحله پنجه‌زنی - ساقه‌دهی با ضریب همبستگی کم‌تر از ۰/۴ رخ داده است. وجود چنین تفاوت‌هایی بین رفتار شاخص‌های خشک‌سالی ناشی از آن است که این شاخص‌ها مبنای محاسباتی متفاوتی دارند. بر اساس این تفاوت‌های رفتاری بین شاخص‌ها، چنین انتظار می‌رود که هر کدام از شاخص‌های خشک‌سالی انتخاب‌شده در این پژوهش بتوانند جنبه‌های متفاوتی از واریانس عملکرد سالانه جو دیم را توجیه نمایند که این امر می‌تواند این پتانسیل را به صورت بالقوه ایجاد کند تا بتوان واریانس بیش‌تری از تغییرپذیری عملکرد سالانه محصول جو دیم را با به‌کارگیری مجموعه این شاخص‌های خشک‌سالی در کنار یکدیگر توجیه نمود.

با استخراج مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی طی مراحل مختلف فنولوژیکی جو دیم برای تک‌تک سال‌های زراعی مورد مطالعه، یک سری زمانی از مقادیر این شاخص‌ها طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ به تفکیک برای هر کدام از مراحل فنولوژیک استخراج شد. در شکل ۲ سری زمانی شاخص‌های خشک‌سالی SPEI، EDDI- و SPI برای چهار مرحله مختلف رشد جو دیم شامل کاشت - سبزشدن، سبزشدن - پنجه‌زنی، پنجه‌زنی - ساقه‌دهی و ساقه‌دهی - گل‌دهی در کنار مقادیر سالانه عملکرد جو دیم طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ نشان داده شده است. از آنجایی‌که بر اساس ماهیت شاخص‌های خشک‌سالی در نظر گرفته شده در این پژوهش، برای دو شاخص SPEI و SPI مقادیر منفی و کوچک‌تر و برای شاخص EDDI مقادیر مثبت و بزرگ‌تر نمایانگر شرایط خشک‌سالی هستند بنابراین به جهت سهولت بیش‌تر، به جای قرار دادن مقادیر واقعی شاخص EDDI، مقادیر این شاخص در عدد ۱- ضرب شدند (EDDI-) تا امکان مقایسه آن با دو شاخص دیگر با سهولت بیش‌تری فراهم گردد. در این شکل بسته به این‌که یک مرحله فنولوژیک در یک سال به‌خصوص چه مدت به طول انجامیده باشد متناسب با طول آن دوره از شاخص خشک‌سالی با گام زمانی یک‌ماهه، دو‌ماهه، سه‌ماهه و یا چهارماهه جهت تعیین وضعیت خشک‌سالی یا ترسالی آن مرحله فنولوژیک استفاده شده است. مقدار متوسط عملکرد سالانه جو دیم نیز برابر با ۲۵۹۳/۲ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. شکل ۲ بیانگر آن است که دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی در یک سال مشخص لزوماً برای هر چهار مرحله فنولوژیک به‌طور یکسان عمل نکرده‌اند. به‌عنوان مثال برای سال ۲۰۱۲ شرایط خشک‌سالی نسبتاً شدیدی طی دوره‌های سبزشدن - پنجه‌زنی و پنجه‌زنی - ساقه‌دهی حاکم بوده است در حالی‌که برای دوره‌های کاشت - سبزشدن و ساقه‌دهی - گل‌دهی در همین



شکل ۲- مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی SPEI، EDDI و SPI برای چهار دوره مختلف رشد گیاه جو دیم (a: کاشت- سبز شدن؛ b: سبز شدن- پنجه‌زنی؛ c: پنجه‌زنی- ساقه؛ d: ساقه- گل‌دهی) همراه با مقادیر عملکرد سالانه (شکل e) طی سال‌های مختلف.

Figure 2. The SPEI, EDDI and SPI drought indices values for four different growth periods of rainfed barley (a: sowing-emerge, b: emerge-tillering, c: tillering-stem, d: stem-flowering) along with annual yield (e) during different years.



شکل ۳- ضریب همبستگی دو به دوی شاخص‌های خشک‌سالی SPEI، -EDDI و SPI برای چهار دوره مختلف رشد گیاه جو دیم.
Figure 3. Correlation coefficient of mutual SPEI, -EDDI and SPI drought indices for four different growth periods of rainfed barley.

حضور شاخص‌های خشک‌سالی در این چهار دوره در مدل رگرسیونی بر اساس روش بهترین زیرمجموعه (best subset) صورت گرفته است به‌گونه‌ای که ضمن آن‌که باید بالاترین ضریب تعیین برای مدل رگرسیونی به‌دست آید تمامی متغیرهای مستقل حاضر در مدل نیز باید اثر معنی‌داری بر عملکرد محصول در سطح $\alpha=0.10$ داشته باشند به تعبیری دیگر p -value مربوط به همه متغیرهای مستقل در مدل باید کمتر از 0.1 باشد. بر اساس نتایج حاصله در جدول ۲، در حالت استفاده از یک شاخص خشک‌سالی واحد (سطرهای اول تا سوم جدول ۲) دیده می‌شود که برای شاخص‌های SPEI و SPI، مقادیر این شاخص‌ها در دوره‌های اول و سوم رشد (کاشت- سبز شدن و پنجه‌زنی- ساقه‌دهی) و برای شاخص EDDI در دوره‌های اول و چهارم رشد (کاشت- سبز شدن و ساقه‌دهی- گل‌دهی) در مدل رگرسیونی حضور یافته‌اند. بالاترین مقدار ضریب

جهت پیش‌بینی میزان عملکرد سالانه جو دیم براساس شاخص‌های خشک‌سالی در وهله اول از مدل رگرسیون خطی چندگانه و در ادامه بنا به ضرورت از مدل رگرسیون مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی (PCR) استفاده شد. در جدول ۲ نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل رگرسیون خطی چندگانه با در نظر گرفتن دو رویکرد کلی شامل استفاده از هر کدام از این سه شاخص خشک‌سالی به‌صورت واحد (سه سطر اول جدول) و استفاده ترکیبی از آن‌ها (سطر چهارم جدول) منعکس شده است. در این جدول شاخص‌های خشک‌سالی برای چهار دوره مختلف رشد با قرار دادن اعداد ۱ (دوره کاشت- سبز شدن)، ۲ (دوره سبز شدن- پنجه‌زنی)، ۳ (دوره پنجه‌زنی- ساقه‌دهی) و ۴ (دوره ساقه‌دهی- گل‌دهی) در کنار هر کدام از شاخص‌های خشک‌سالی مشخص شده‌اند. به‌عنوان مثال منظور از SPEI-1 مقدار این شاخص طی دوره کاشت- سبز شدن است. حضور یا عدم

اول و سوم رشد (دوره کاشت- سبزشدن و دوره پنجه‌زنی- ساقه‌دهی) حاصل آمده است. ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل‌شده برای این مدل به ترتیب $0.78/0.7$ و $0.69/0.2$ بوده است که در مقایسه با حالت استفاده از یک شاخص خشک‌سالی واحد، عملکرد مدل بهبود قابل‌توجهی پیدا کرده است. با وجود بالا بودن ضریب تعیین دیده می‌شود که شاخص VIF نیز افزایش یافته است و برای شاخص SPEI در مرحله سوم (پنجه‌زنی- ساقه‌دهی) این شاخص به بالای ۲ رسیده است. اگرچه مقادیر شاخص VIF به دست آمده بیانگر وجود همراستایی چندگانه خطی بسیار شدید در مدل نیست اما نمی‌توان آن را هم نادیده گرفت و در حد متوسطی ممکن است معتبر بودن مدل رگرسیونی را با مشکل مواجه کند. در حالت بروز چنین مشکلی، یا باید یکی از متغیرهای مستقل را که همبستگی بالاتری با سایر متغیرهای مستقل در مدل دارد را حذف کرد که انجام این کار ممکن است منجر به افت عملکرد مدل شود و یا این‌که باید به جای استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه به سراغ مدل رگرسیونی مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی (PCR) رفت که گزینه مناسب‌تر و منطقی‌تری به نظر می‌رسد زیرا ضمن حفظ تمامی متغیرهای مستقل در مدل و بدون افت عملکرد مدل، مشکل مربوط به وجود همبستگی بین متغیرها را می‌تواند با انجام چرخش‌های متعامد حل کند.

تعیین مربوط به به‌کارگیری شاخص SPEI (با مقدار $63/6$ درصد) و کم‌ترین مقدار آن مربوط به به‌کارگیری شاخص EDDI (با مقدار $0.54/1$ درصد) بوده است. شاخص تورم واریانس (VIF) در این جدول نیز که معیاری جهت لحاظ کردن اثر همراستایی خطی چندگانه برای متغیرهای مستقل حاضر در مدل که همبستگی بالایی با یکدیگر داشته باشند است در هر سه حالت استفاده از تنها یک شاخص واحد بسیار نزدیک به عدد ۱ بوده است که نشانگر حالتی مطلوب به لحاظ عدم وجود همبستگی شدید بین متغیرهای مستقل حاضر در مدل و در نتیجه عدم وجود مشکل همراستایی خطی چندگانه در ساختار این سه مدل است. توضیح این‌که در حالت وجود مشکل همراستایی خطی چندگانه، اعتبار مدل رگرسیونی زیر سوال می‌رود. در سطر آخر جدول ۲ بهترین مدل رگرسیونی حاصل از ترکیبات متعدد مقادیر سه شاخص خشک‌سالی در چهار دوره مختلف رشد نشان داده شده است. در این حالت نیز استخراج بهترین مدل رگرسیونی مبتنی بر در نظر گرفتن دو قید شامل دستیابی به بالاترین ضریب تعیین و معنی‌دار بودن تمامی متغیرهای مستقل موجود در مدل در سطح $\alpha=0.10$ بوده است. دیده می‌شود که در حالت ترکیب شاخص‌های خشک‌سالی، بهترین مدل رگرسیونی با حضور شاخص SPEI در دو مرحله سوم و چهارم رشد (دوره پنجه‌زنی- ساقه‌دهی و دوره ساقه‌دهی- گل‌دهی) و شاخص EDDI در دو مرحله

جدول ۲- مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه به‌دست آمده جهت پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی مختلف (اندیس ۱: دوره کاشت- سبزشدن، اندیس ۲: دوره سبزشدن- پنجه‌زنی، اندیس ۳: دوره پنجه‌زنی- ساقه‌دهی، اندیس ۴: ساقه‌دهی- گل‌دهی).

Table 2. The obtained multiple linear regression models to predict rainfed barley annual yield based on different drought indices (1: sowing-emerge, 2: emerge-tillering, 3: tillering-stem, 4: stem-flowering).

شاخص خشک‌سالی Drought Index	مدل رگرسیونی Regression model	شاخص تورم واریانس VIF (Variance Inflation Factor)	ضریب تعیین R ²	ضریب تعیین تعدیل‌شده R ² _{Adjust}
SPEI	Yield = 2959 + 484*SPEI-1 + 787*SPEI-3	SPEI-1 : 1 SPEI-3 : 1	%63.6	%57
EDDI	Yield = 2702 + 397*EDDI-1 + 730*EDDI-4	EDDI-1 : 1.04 EDDI-4 : 1.04	%54.1	%45.7
SPI	Yield = 2850 + 472*SPI-1 + 639*SPI-3	SPI-1 : 1.01 SPI-3 : 1.01	%62.4	%55.6
حالت ترکیبی شاخص‌های مختلف Combination of different indices	Yield = 2610 + 471*EDDI-1 + 547*SPEI-3 - 651*EDDI-3 + 401*SPEI-4	EDDI-1 : 1.26 SPEI-3 : 2.05 EDDI-3 : 1.3 SPEI-4 : 1.66	%78.7	%69.2

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که مؤلفه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۵۲/۱، ۲۴/۴ و ۱۵/۶ درصد و در مجموع معادل با ۹۲/۱ از کل واریانس متغیرهای اولیه را توجیه می‌کنند. مقادیر بردارهای ویژه برای این سه مؤلفه اصلی اول در جدول ۳ نشان داده شده است.

جهت به‌کارگیری مدل PCR ابتدا تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر روی همان چهار متغیر مستقل موجود در مدل رگرسیون خطی چندگانه (سطر آخر جدول ۲) شامل EDDI-1، EDDI-3، SPEI-3 و SPEI-4 انجام شد و پس از استخراج مؤلفه‌های اصلی، مدل رگرسیون خطی چندگانه بر روی این مؤلفه‌ها پیاده‌سازی شد. نتایج حاصل از به‌کارگیری

جدول ۳- مقادیر بردارهای ویژه برای سه مؤلفه اصلی اول (اندیس ۱: دوره کاشت- سبزشدن، اندیس ۳: دوره پنجه‌زنی- ساقه‌دهی، اندیس ۴: ساقه‌دهی- گل‌دهی).

Table 3. Eigen vector values for three first principal components (1: sowing-emerge, 3: tillering-stem, 4: stem-flowering stages).

شاخص خشک‌سالی Drought index	مؤلفه اصلی اول PCA1	مؤلفه اصلی دوم PCA2	مؤلفه اصلی سوم PCA3
EDDI-1	0.395	-0.693	-0.543
SPEI-3	0.606	0.197	-0.173
EDDI-3	0.488	-0.306	0.808
SPEI-4	0.488	0.623	-0.153

چندگانه بین عملکرد سالانه جو دیم (Yield) و این سه سری داده جدید حاصل از سه مؤلفه اصلی اول که با عنوان‌های PCA1، PCA2 و PCA3 نام‌گذاری شدند مدل PCR به صورت رابطه کلی زیر حاصل آمد:

$$\text{Yield} = 2568 + 394*PCA1 + 227*PCA2 - 928*PCA3 \quad (11)$$

بهینه پیش‌بینی عملکرد جو دیم بر اساس ترکیبی از شاخص‌های مختلف خشک‌سالی در ایستگاه سرارود در نظر گرفت. جهت استفاده از این مدل برای پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم نیز از آنجایی که مؤلفه‌های PCA1 تا PCA3 خود ترکیب خطی از چهار شاخص خشک‌سالی (EDDI-1, EDDI-3, SPEI-3 و SPEI-4) هستند به راحتی می‌توان با اعمال بردارهای ویژه، مدل PCR را از فرم رابطه ۱۱ که مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی است بر اساس متغیرهای اولیه بازنویسی کرد. با انجام این کار، مدل کلی زیر جهت پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های مختلف خشک‌سالی برای ایستگاه سرارود کرمانشاه به دست می‌آید:

$$\text{Yield} = 2568 + 502.22*EDDI-1 + 444.03*SPEI-3 - 627.01*EDDI-3 + 475.68*SPEI-4 \quad (12)$$

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به انجام رسید. نتایج حاصله در شکل ۴ منعکس شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست بهترین مقادیر هر دو شاخص ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا در حالت استفاده ترکیبی از شاخص‌های خشک‌سالی با مدل PCR حاصل آمده است. مقدار دو

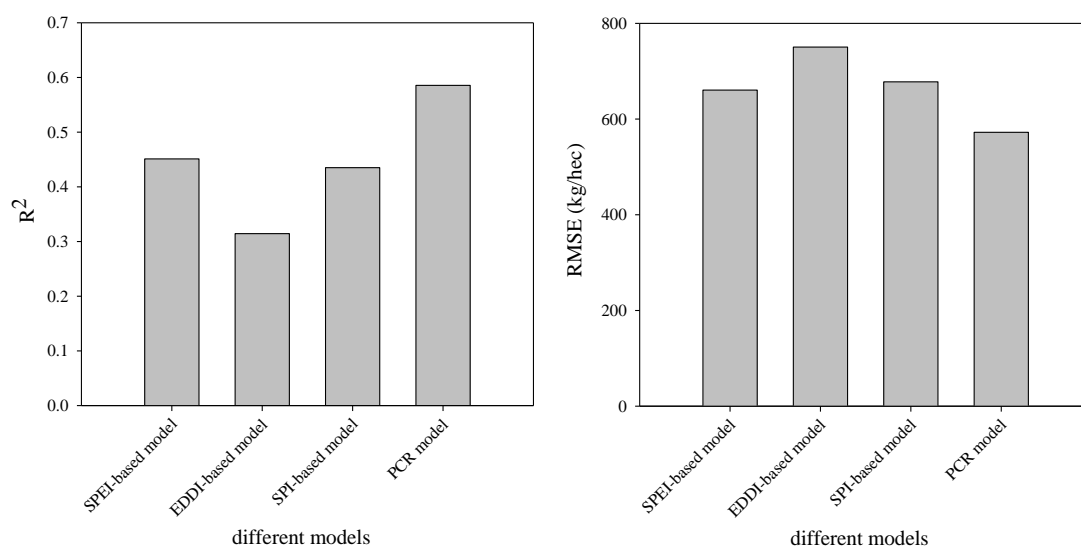
با در نظر گرفتن سه مؤلفه اصلی اول و بردارهای ویژه آن‌ها و انجام برخی ترکیبات خطی بر روی داده‌های اولیه، سه متغیر مستقل جدید به دست آمدند که ضمن آن‌ها هیچ‌گونه همبستگی با یکدیگر ندارند قادر به توجیه‌پذیری ۹۲/۱ درصد از واریانس داده‌های اولیه هستند. در نهایت با اعمال مدل رگرسیون خطی

مقادیر R^2 و R^2_{Adjust} برای این معادله به ترتیب برابر با ۷۸/۱۹٪ و ۷۱/۶۵٪ حاصل آمد که در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندگانه (سطر آخر جدول ۲)، اگرچه ضریب تعیین افت بسیار ناچیزی داشته است و از ۷۸/۷٪ به ۷۸/۲٪ رسیده است اما ضریب تعیین تعدیل یافته بهبود پیدا کرده است و از ۶۹/۲٪ به ۷۱/۷٪ رسیده است. نکته مهم‌تر این‌که به لحاظ حل مشکل همراستایی خطی چندگانه متغیرهای مستقل مدل، شاخص VIF برای سه مؤلفه اصلی اول به ترتیب برابر با ۱/۰۶، ۱/۰۳ و ۱/۰۸ حاصل آمده است که چون به عدد ۱ بسیار نزدیک هستند دلالت بر این دارد که مشکل همراستایی چندگانه نیز به خوبی با به‌کارگیری این مدل برطرف شده است. بر این اساس، مدل PCR حاصله را می‌توان به‌عنوان مدل

جهت اعتبارسنجی چهار مدل کلی (شامل سه مدل رگرسیون خطی چندگانه مبتنی بر یک شاخص خشک‌سالی واحد و یک مدل PCR مبتنی بر ترکیبی از شاخص‌های مختلف خشک‌سالی) برای مقاصد پیش‌بینی، از روش اعتبارسنجی متقابل بهره گرفته شد که با به‌کارگیری دو شاخص ضریب تعیین (R^2) و

۰/۴۵۱ و ریشه میانگین مربعات خطای ۶۶۰/۵ کیلوگرم در هکتار) و پایین‌ترین عملکرد مربوط به استفاده از شاخص EDDI (با ضریب تعیین ۰/۳۱۴ و ریشه میانگین مربعات خطای ۷۵۰/۴ کیلوگرم در هکتار) بوده است. ارتباط بالای بین شاخص SPEI با عملکرد محصولات دیم توسط پاسکوا و همکاران (۲۰۱۸) در جنوب غربی اروپا و توسط دهقانی سرگزی و همکاران (۲۰۲۱) در بخش‌های غربی و شمال غربی ایران نیز گزارش شده است (۵ و ۱۳).

شاخص فوق برای این مدل به ترتیب برابر با ۵۸/۵ درصد و ۵۷۲/۳ کیلوگرم در هکتار (که معادل با ۲۲ درصد میانگین عملکرد سالانه جو دیم است) بدست آمد و دیده می‌شود که عملکرد مدل در حالت استفاده ترکیبی از شاخص‌های خشک‌سالی به طور نمایانی نسبت به حالت استفاده از یک شاخص خشک‌سالی واحد بهبود پیدا کرده است. به لحاظ مقایسه سه شاخص خشک‌سالی با یکدیگر در حالت استفاده از یک شاخص خشک‌سالی واحد نیز بهترین عملکرد مربوط به استفاده از شاخص SPEI (با ضریب تعیین



شکل ۴- مقادیر دو شاخص R^2 و RMSE حاصل از اعتبارسنجی متقابل مدل‌های مختلف پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم بر اساس شاخص‌های مختلف خشک‌سالی.

Figure 4. The obtained R^2 and RMSE indices values extracted from cross validation of different models to predict rainfed barley annual yield based on the different drought indices.

از این شاخص‌های خشک‌سالی به صورت واحد و استفاده ترکیبی و هم‌زمان از آن‌ها بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که بهترین مدل پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم در حالت استفاده ترکیبی از شاخص‌های خشک‌سالی و در قالب مدل رگرسیون مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی (مدل PCR) حاصل آمد. نتایج کلی نشان داد که به‌کارگیری شاخص‌های

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش که با هدف امکان‌سنجی پیش‌بینی عملکرد سالانه جو دیم با استفاده از چند شاخص خشک‌سالی با ماهیت متفاوت شامل شاخص‌های SPEI، EDDI و SPI با به‌کارگیری تحلیل‌های آماری چندمتغیره در یک ایستگاه با اقلیم نیمه‌خشک انجام شد از دو رویکرد کلی شامل استفاده از هرکدام

در مقایسه با وقوع خشک‌سالی در سایر دوره‌ها می‌توان داشت.

تقدیر و تشکر

نویسنده مقاله از داوران محترم این مقاله به جهت ارائه نظرات ارزشمند و پیشنهادهای سازنده کمال تشکر را دارد.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این پژوهش از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده‌اند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد.

تعارض منافع

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این پژوهش مراعات شده است.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مالی مستقیم برخوردار نبوده است.

خشک‌سالی با ماهیت متفاوت می‌تواند سبب افزایش توجیه‌پذیری واریانس عملکرد سالانه جو دیم توسط شاخص‌های خشک‌سالی گردد. نتایج هم‌چنین نشان داد که به‌کارگیری مدل رگرسیونی مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی در کنار حذف اثر هم‌راستایی خطی چندگانه بین شاخص‌های مختلف خشک‌سالی می‌تواند سبب افزایش ضریب تعیین تعدیل‌شده مدل نیز گردد. نتایج کلی نشان داد که هم بر اساس مدل رگرسیونی حاصل از به‌کارگیری یک شاخص خشک‌سالی واحد و هم با به‌کارگیری مدل رگرسیونی حاصل از استفاده ترکیبی از شاخص‌های مختلف خشک‌سالی چنین به‌نظر می‌رسد که وقوع خشک‌سالی در دوره دوم (سبز شدن - پنجه‌زنی) تأثیر ضعیف‌تری بر میزان عملکرد سالانه جو دیم دارد و سه دوره دیگر رشد (دوره‌های کاشت - سبز شدن، پنجه‌زنی - ساقه‌دهی و ساقه‌دهی - گل‌دهی) دارای اهمیت بیش‌تری هستند. از بین سه دوره باقی‌مانده نیز با توجه به آن‌که دوره پنجه‌زنی - ساقه‌دهی نقش و حضور پررنگ‌تری در مدل‌ها داشت به‌عنوان بااهمیت‌ترین دوره مؤثر بر میزان عملکرد سالانه جو دیم شناسایی شد. بنابراین در سال‌هایی که خشک‌سالی در دوره پنجه‌زنی - ساقه‌دهی رخ دهد انتظار افت عملکرد سالانه بیش‌تری

منابع

- Chaves, M.S., Martinelli, J.A., Wesp-Guterres, C., Graichen, F.A.S., Brammer, S.P., Scagliusi, S.M., and Chaves, A.L.S. 2013. The importance for food security of maintaining rust resistance in wheat. *Food security*. 5: 2. 157-176.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2010. *The State of Food Insecurity in the World: Addressing food insecurity in protracted crises*. 62p.
- Alasti, O., Zeinali, E., Soltani, A., and Torabi, B. 2020. Estimation of yield gap and the potential of rainfed barley production increase in Iran. *Journal of Crop Production*. 13: 3. 41-60.
- Sacks, W.J., and Kucharik, C.J. 2011. Crop management and phenology trends in the US Corn Belt: Impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151: 7. 882-894.
- Dehghani Sargazi, H., Bazrafshan, O., and Zamni, H. 2021. Investigation of the effect of meteorological-agricultural drought on rainfed wheat yield in Iran using SPEI. *Nivar*. 45: 114-115. 15-26. (In Persian)
- Chmielewski, F.M., Müller, A., and Bruns, E. 2004. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field

- crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121: 69-78.
7. Siebert, S., and Ewert, F. 2012. Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. *Agricultural and Forest Meteorology*. 152: 44-57.
 8. Mosaedi, A., Moghaddam, S.M., and Sough, M.G. 2016. Modeling rain-fed wheat and barley based on meteorological features and drought indices. *Iranian Journal of Water and Soil*. 29: 3. 730-749. (In Persian)
 9. Chen, T., Xia, G., Liu, T., Chen, W., and Chi, D. 2016. Assessment of drought impact on main cereal crops using a standardized precipitation evapotranspiration index in Liaoning Province, China. *Sustainability*. 8: 10. 1069-1082.
 10. Yao, N., Li, Y., Lei, T., and Peng, L. 2018. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961-2013. *Science of the Total Environment*. 616: 73-89.
 11. Pena-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., Quiring, S., Svoboda, M., Beguería, S., and Hannaford, J. 2018. Effectiveness of drought indices in identifying impacts on major crops across the USA. *Climate Research*. 75: 3. 221-240.
 12. Lobell, D.B., Schlenker, W., and Costa-Roberts, J. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*. 333: 616-620.
 13. Páscoa, P., Gouveia, C.M., Russo, A.C., Bojariu, R., Vicente-Serrano, S.M., and Trigo, R.M. 2018. Vegetation vulnerability to drought on southeastern Europe. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 38: 1-29.
 14. Kattelus, M., Salmivaara, A., Mellin, I., Varis, O., and Kumm, M. 2016. An evaluation of the Standardized Precipitation Index for assessing inter-annual rice yield variability in the Ganges-Brahmaputra-Meghna region. *International Journal of Climatology*. 36: 2210-2222.
 15. Naderianfar, M., and Heydari Gharae, E. 2021. Evaluation of drought impacts on irrigated and rainfed wheat yields in Bojnourd region. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*. 3: 1. 163-176. (In Persian)
 16. Nabizadeh Balkhanlou, A., Hajarizadeh, Z., and Khedmatzadeh, A. 2020. Assessment Drought Crop Moisture Index (CMI) Performance Dried wheat Case Study (Lake Urmia Simineh River Basin). *Geographical Engineering of Territory*. 4: 1. 205-192. (In Persian)
 17. Samadianfard, S., Panahi, S., and Nazemi, A.H. 2022. Modeling the yield of rainfed wheat, barley and alfalfa products using support vector regression and genetic programming. *Water and Soil Science*. 32: 2. 97-111. (In Persian)
 18. Karim, M.R., and Rahman, M.A. 2015. Drought risk management for increased cereal production in Asian least developed countries. *Weather and Climate Extremes*. 7: 24-35.
 19. Jongrungrklanga, N., Toomsana, B., Vorasoota, 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.
 20. Lloyd-Hughes, B., and Saunders, M.A. 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*. 22: 13. 1571-1592.
 21. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., and López-Moreno, J.I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climatology*. 23: 7. 1696-1718.
 22. Hobbins, M.T., Wood, A., McEvoy, D.J., Huntington, J.L., Morton, C., Anderson, M., and Hain, C. 2016. The evaporative demand drought index. Part I: Linking drought evolution to variations in evaporative demand. *Journal of Hydrometeorology*. 17: 6. 1745-1761.
 23. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper FAO56*, 300p.

24. Heydari Tasheh Kaboud, Sh., and Khoshkhoo, Y. 2019. Projection and prediction of the annual and seasonal future reference evapotranspiration time scales in the West of Iran under RCP emission scenarios. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*. 19: 53. 157-176. (In Persian)
25. Vicente-Serrano, S.M., Cabello, D., Tomás-Burguera, M., Martín-Hernández, N., Beguería, S., Azorin-Molina, C., and El Kenawy, A. 2015. Drought variability and land degradation in semiarid regions: Assessment using remote sensing data and drought indices (1982-2011). *Remote Sensing*. 7: 4. 4391-4423.
26. Shiukhy Soqanloo, S., and Nadi, M. 2021. Performance evaluation and modification of SPI in drought monitoring of arid and semi arid regions of Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 10: 2. 17-30. (In Persian)
27. Khoshkhoo, Y. Esmaili, S., and Abdollahi, M. 2018. Estimating daily and monthly air temperature parameters at Kurdistan province using MODIS sensor images. *Journal of Soil Water Research*. 49: 2. 413-423. (In Persian)