

Assessment of Effective Factors on Duration of Rainfed Barley Phenological Stages in Semi-Arid Climate Using Principal Component Analysis

Y. Khoshkhoo^{1*}, N. Jahannemaei²

1. Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
2. M.Sc. in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

* Corresponding Author: y.khoshkho@uok.ac.ir

Received date: 23/08/2022

Accepted date: 15/10/2022



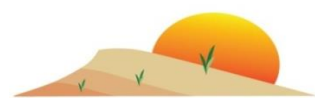
[10.22034/JDMAL.2022.560761.1394](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2022.560761.1394)

Abstract

Due to the water shortages in arid and semi-arid climates, rainfed agriculture faces severe challenges. It is therefore essential to carry out specific studies on the efficiency factors of rain-fed crop growth. The purpose of this study was to assess the factors affecting the duration of the different phenological stages of rain-fed barley in a semi-arid region. For this purpose, duration of phenological stages for five different growth periods of rain-fed barley including sowing-emerge, emerge-tillering, tillering-stem, stem-flowering, and flowering-maturity were extracted at the Sararoud station, Kermanshah, during the period of 2000-2015. By calculating 12 variables for these periods, the variables with significant impacts were detected for each of them and Principal Component Analysis (PCA) technique was used to assess the impact of these variables on different phenological stages duration. The results showed that between different selected variables, the degree-days-based variables (GDD and PTU) and absorb radiation-based (net radiation and daily mean soil surface temperature) showed the highest impact on all of the phenological stages duration. Each of the evapotranspiration-based variables, soil moisture supply variables and complementary variables influenced duration of two growth stages. The highest variability of the different growth periods which explained by the selected variables in the current research using principal component analysis was obtained for sowing-emerge stage. The overall results showed that the principal component analysis not only has a high capability to detecting effective factors on the different phenological stages duration, but also is a powerful tool to regulate the interrelate impacts between variables.

Keywords: Growing degree days; Net radiation; Phenology; Photo-thermal units; Sararoud station





تعیین عوامل مؤثر بر دوره زمانی فنولوژی جو دیم در اقلیم نیمه خشک برپایه تحلیل مؤلفه‌های اصلی

یونس خوشخو^{۱*}، نشاط جهان نمایی^۲

۱. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
* نویسنده مسئول: y.khoshkho@uok.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

doi: [10.22034/JDMAL.2022.560761.1394](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2022.560761.1394)

چکیده

در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، که به دلیل مشکل کم‌آبی کشت دیم با چالش‌هایی مواجه است؛ لازم است به‌طور ویژه عوامل مؤثر بر رشد بررسی شود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی نقش عوامل مؤثر بر طول دوره زمانی مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم در یک منطقه با اقلیم نیمه‌خشک انجام شد. برای این منظور، مدت زمان مراحل مختلف فنولوژیک پنج دوره مختلف رشد جو دیم از قبیل: کاشت-سبزشدن، سبزشدن-پنجه‌زنی، پنجه‌زنی-ساقه‌دهی، ساقه‌دهی-گل‌دهی و گل‌دهی-رسیدن کامل در ایستگاه سرارود کرمانشاه طی دوره ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۴ استخراج شد. با محاسبه ۱۲ متغیر مختلف برای هر کدام از این دوره‌ها، متغیرهایی که دارای تأثیر معنی‌دار بر روی طول هر کدام از این دوره‌ها بودند شناسایی شد. برای ارزیابی تأثیر آنها بر طول هر کدام از مراحل فنولوژیک از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. یافته‌ها نشان داد که از بین متغیرهای انتخاب‌شده در پژوهش حاضر، متغیرهای مبتنی بر درجه روز رشد شامل شاخص‌های GDD و PTU و متغیرهای مبتنی بر تابش جذب‌شده از جمله تابش خالص و میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک دارای بیشترین تأثیر بر طول مراحل مختلف رشد جو دیم دارند. متغیرهای مبتنی بر تبخیر-تعرق، تأمین رطوبت خاک و متغیر تکمیلی بر روی طول دو مرحله از رشد تأثیرگذار بودند. بیشترین مقدار تغییرپذیری طول دوره‌های مختلف رشد که در قالب روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی توجیه شده بود، برای دوره کاشت-سبزشدن به دست آمد. یافته‌های کلی نشان داد که روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی در کنار قابلیت زیادی که برای شناسایی عوامل مؤثر بر طول مراحل مختلف فنولوژیک دارد، به خوبی قادر به سامان‌دهی اثر متقابل بین این عوامل نیز است.

واژگان کلیدی: ایستگاه سرارود؛ تابش خالص؛ درجه روز رشد؛ فنولوژی؛ واحدهای نوری-حرارتی



■ مقدمه

در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که به دلیل مشکل کم آبی کشت دیم با چالش‌هایی مواجه است نیاز است تا عوامل و متغیرهای مؤثر بر رشد محصول دیم مورد بررسی و تحلیل قرارگیرد. در چنین اقلیم‌هایی، توجه ویژه به گیاهان زراعی نظیر جو که تحمل آن‌ها نسبت به تنش‌های محیطی بیشتر است اجتناب ناپذیر است (۱). به‌طور معمول برای توصیف مراحل مختلف رشد و توسعه گیاهان زراعی از کاشت تا برداشت از واژه فنولوژی^۱ استفاده می‌شود (۱۶). طول مراحل مختلف فنولوژیک گیاه و طول کل دوره رشد گیاه بر روی مقدار عملکرد پایانی محصول تأثیر مهمی دارد (۳۲). در مقیاس کلان‌تر، مراحل فنولوژیک گیاهان چرخه جرم و انرژی در مقیاس کل زیست‌کره را زیر تأثیر خود قرار می‌دهند؛ زیرا دوره‌های به‌خصوصی از رشد گیاهان نظیر زمان آغاز پیدایش برگ‌های گیاه و همچنین طول زمان فعالیت سبزی‌نگی آن‌ها تعیین‌کننده چرخه‌های فعالیت دی‌اکسیدکربن بین سطح زمین و جو می‌باشند؛ که در پی این فعالیت‌ها، چرخه جهانی کربن نیز به‌طور قابل توجهی تأثیر می‌پذیرد (۲۹). بررسی طول مراحل فنولوژیک گیاهان همچنین به‌عنوان یکی از آشکارکننده‌های اصلی وقوع تغییرات اقلیمی مطرح است (۱۸). شرایط محیطی عامل اصلی تعیین‌کننده طول مراحل فنولوژیک گیاهان است. بخش مهمی از این شرایط محیطی به تغییرپذیری‌های کوتاه‌مدت شرایط آب و هوایی و در مقیاس طولانی‌مدت‌تر به تغییرپذیری شرایط اقلیمی مربوط می‌شود. عوامل دیگری مانند شیوه اعمال مدیریت زراعی نیز می‌توانند طول مراحل مختلف فنولوژیک گیاهان را تحت تأثیر قرار دهند (۱۰، ۱۱). در زمره مهم‌ترین عوامل اقلیمی که بر روی طول دوره‌های مختلف فنولوژیک گیاهان اثر می‌گذارند می‌توان از دمای هوا و طول ساعات آفتابی و همچنین تابش خورشید (۱۵، ۳۵) و بارش (۲۸) نام برد. بر پایه این عوامل اقلیمی که بر روی رشد و توسعه گیاهان اثر می‌گذارند شاخص‌های گوناگونی که دارای مفهوم‌های ویژه و

نزدیک‌تری با فرایندهای مربوط به رشد گیاه هستند توسط محققان مختلف ارائه شده‌اند که در زمره برخی از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان از شاخص‌های GDD^۲ و PTU^۳ (۱۳، ۳۶)، شاخص‌های خشکسالی نظیر SPI^۴ و SPEI^۵ (۱۴، ۱۹، ۳۴)، تبخیرتغرق پتانسیل (۳۰) و تابش خالص نام برد. در ارتباط با شاخص GDD، از آنجایی که بطور معمول رشد و توسعه گیاه در دامنه‌های بخصوصی از دماهای بهینه با سرعت بالاتری اتفاق می‌افتد و با فاصله گرفتن از این دماهای بهینه، رشد گیاه نیز کند می‌شود (۸، ۳۵) لذا با در نظرگرفتن یک دمای پایه مناسب، که مقدار آن وابسته به عواملی نظیر مرحله فنولوژیک و نوع گیاه است، جمع تجمعی مقدارهای دمای هوای بیشتر از این دمای پایه محاسبه و به‌عنوان درجه-روز رشد (GDD) لحاظ می‌شود (۳۳). انتخاب دمای پایه مناسب در محاسبه GDD بسیار مهم و حیاتی است زیرا به لحاظ فیزیولوژیک چنین فرض می‌شود که در دماهای کمتر از دمای پایه، فرایند رشد گیاه متوقف می‌شود. در ارتباط با اثر شرایط رطوبتی خاک بر طول مراحل فنولوژیک، در برخی پژوهش‌ها اثر خود بارش (۲۸) و در برخی دیگر اثر شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر بارش (۳۴) بر طول دوره رشد مورد ارزیابی قرار گرفته است. بطور کلی با توجه به نقش بسیار پررنگی که عوامل اقلیمی بر طول دوره‌های مختلف رشد گیاهان دارند در مطالعات متعددی به شناسایی و تبیین ارتباط بین عوامل مختلف اقلیمی با مراحل فنولوژیک رشد گیاه پرداخته شده‌است (۲۷، ۳۷). در برخی مطالعات نیز تحلیل روند تغییرات زمانی مراحل فنولوژیک گیاهان طی دهه‌های گذشته که می‌تواند با وقوع تغییرات اقلیمی در ارتباط باشد برای نواحی مختلف جهان از جمله چین (۱۱)، آلمان (۳۵)، سراسر اروپا (۱۸) و همچنین استرالیا و آرژانتین (۳۲) مورد توجه قرار گرفته است. برخی محققان دیگر نیز به پیش‌نگری و بررسی طول دوره رشد گیاهان مختلف تحت شرایط تغییر اقلیم آتی پرداخته‌اند (۳، ۷، ۱۹، ۲۵). اهمیت مطالعه طول مراحل فنولوژیک گیاهان مختلف تا آنجاست

^۴ Standardized Precipitation Index

^۵ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

^۱ Phenology

^۲ Growing Degree Days

^۳ Photo-thermal Units

گرفتن متغیرهای مختلف ارزیابی شد که برای دوره‌های مختلف رشد جو دیم، چه متغیرهایی دارای بیشترین تأثیر بر طول هر دوره هستند.

■ مواد و روش

ایستگاه مورد بررسی و داده‌های مورد استفاده

ایستگاه هواشناسی کشاورزی سرارود واقع در استان کرمانشاه به طول جغرافیایی $25^{\circ} 19' 47''$ شرقی، عرض جغرافیایی $53^{\circ} 19' 34''$ شمالی و ارتفاع $1361/7$ m از تراز سطح دریا برای انجام پژوهش حاضر انتخاب شد. این ایستگاه در سیستم طبقه‌بندی اقلیمی دو مارتن با ضریب خشکی $16/1$ دارای اقلیم نیمه‌خشک می‌باشد. در این ایستگاه در کنار اندازه‌گیری متغیرهای مختلف هواشناسی، هر ساله چند محصول دیم شامل ارقام مختلفی از گندم و جو نیز در مجاورت ایستگاه کشت شده و دیدبانی‌های فنولوژیک و اندازه‌گیری‌های زیست‌سنجی این محصولات طی مراحل مختلف رشد آن‌ها ثبت می‌شود. از داده‌های این ایستگاه جهت انجام مطالعات گوناگونی از جمله برآورد دمای پایه در مراحل مختلف رشد گندم دیم، اثر تغییر اقلیم بر زمان کاشت و طول دوره رشد گندم دوروم و برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک با بکارگیری مدل بیلان انرژی و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است (۲۶، ۲۳، ۱۶). برای انجام پژوهش حاضر، محصول جو دیم که در یک بازه زمانی نسبتاً طولانی مدت بین سال‌های زراعی ۱۳۷۸-۱۳۷۹ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۳ در این ایستگاه کشت شده است و آمار مربوط به تاریخ‌های وقوع مراحل مختلف فنولوژیک آن در دسترس می‌باشد، انتخاب شد. در انجام پژوهش حاضر از داده‌های هواشناسی شامل مقادیر کمینه و بیشینه دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، بارش، طول ساعات آفتابی، دمای سطح خاک در مقیاس روزانه و همچنین تاریخ وقوع مراحل مختلف فنولوژیک طی ۵ دوره مختلف رشد گیاه شامل دوره‌های کاشت^۴-سبز شدن^۵، سبز شدن^۶-پنجه‌زنی^۶، پنجه‌زنی^۶-ساقه^۷، ساقه^۷-گل‌دهی^۸ و

که در سراسر اروپا شبکه‌ای گسترده که شامل بیش از ۹۰ ایستگاه مطالعاتی تحت عنوان باغ‌های فنولوژیک بین‌المللی^۱ (IPG) است احداث شده‌اند تا زمان وقوع مراحل فنولوژیک گیاهان مختلف را در سراسر اروپا رصد و مورد پایش قرار دهند. در کنار این شبکه، شبکه دیگری نیز تحت عنوان برنامه پایش مراحل فنولوژیک جهانی گیاهان^۲ (GPM) با هدف رصد کردن زمان وقوع مراحل فنولوژیک در سراسر جهان ایجاد شده است (۶). در ایران نیز بررسی‌های زیادی انجام شده است که می‌توان از کاربرد درجه روز رشد در تعیین مراحل فنولوژیک چهار گونه از گندمیان در ایستگاه تحقیقات مراتع همدان آبرسد، بررسی تغییر اقلیم بر طول دوره رشد و مراحل فنولوژیک رشد گندم در منطقه زابل، شبیه‌سازی اثر افزایش دما بر طول مراحل فنولوژیک و عملکرد گندم در اهواز، تعیین مراحل فنولوژیک یکی از گونه‌های مرتعی در دو ایستگاه در اصفهان و مقایسه درجه روز رشد مراحل فنولوژیک برنج رقم هاشمی در استان گیلان نام برد (۲۲، ۲۴، ۴، ۳۱).

برای ارزیابی طول مراحل فنولوژیک گیاهان، در کنار مدل‌های با ماهیت فیزیکی نظیر مدل‌های STICS (۵) و CERES (۱۰) که در صورت داشتن اطلاعات تفصیلی قادر به شبیه‌سازی دوره‌های مختلف رشد گیاه هستند از تکنیک‌های با ماهیت آماری نیز در برخی از مطالعات بعنوان ابزاری کارآمد جهت ارزیابی مؤلفه‌های مؤثر بر طول دوره‌های فنولوژیک استفاده شده است (۳۷). یکی از این تکنیک‌ها روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA^۳) است که از طریق خلاصه کردن متغیرهای همبسته اولیه در قالب چند مؤلفه اصلی مستقل و محدود و پیاده‌سازی موقعیت فضایی متغیرهای پیش‌بینی کننده اولیه و متغیر پیش‌بینی شونده بصورت یک دیاگرام دو بعدی یا سه بعدی از مؤلفه‌های اصلی، امکان بررسی فاکتورهای مؤثر بر متغیر پیش‌بینی شونده را فراهم می‌آورد. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عوامل مؤثر بر طول مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم در مناطق نیمه‌خشک با بکارگیری روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی انجام شد و با در نظر

⁵ Emerge

⁶ Tillering

⁷ Stem elongation

⁸ Flowering

¹ International Phenology Gardens

² Global Phenological Monitoring Program

³ Principal Components Analysis

⁴ Sowing

که در آن، Sunshine طول ساعات آفتابی، T_{max} بیشینه شبانه‌روزی دمای هوا، T_{min} کمینه شبانه‌روزی دمای هوا و T_{base} نیز دمای پایه است. اندیس d معرف روزهای مختلف طی هر مرحله فنولوژیک از روز اول (d_b) تا روز آخر (d_e) می‌باشد. تابع Max به این خاطر در فرمول محاسبه GDD گنجانده شده است تا در مواردی که میانگین شبانه‌روزی دمای هوا از دمای پایه کمتر باشد مقدار درجه روز رشد بصورت یک عدد منفی در محاسبه GDD ظاهر نشود و مقدار درجه روز رشد در آن روز برابر با صفر لحاظ شود.

محاسبه تابش خالص (R_n)

تابش خالص با بکارگیری رابطه (۳) محاسبه شد (۹):

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - R_{l,o} + R_{l,i} \quad (3)$$

که R_s : تابش رسیده به سطح زمین با طول موج کوتاه، $R_{l,o}$: تابش گسیل‌شده از سطح زمین با طول موج بلند، $R_{l,i}$: تابش رسیده با طول موج بلند از جو به سطح زمین و α سپیدای (آلبدو) سطح است. محاسبه $R_{l,o}$ با به‌کارگیری قانون استفان-بولتزمن و برآورد $R_{l,i}$ با بهره‌گیری از یک رابطه تجربی مبتنی بر دمای هوا، فشار بخار و ابرناکی محاسبه شد.

محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل (ET_0)

تبخیر تعرق پتانسیل با استفاده از روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد (۲):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G_s) + \frac{900}{T + 273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

که ET_0 : تبخیر تعرق پتانسیل بر حسب mm/day، R_n : تابش خالص بر حسب $Mj.m^{-2}.day^{-1}$ ، G_s : چگالی شار گرمایی خاک بر حسب $Mj.m^{-2}.day^{-1}$ ، T : میانگین دمای هوا بر حسب $^{\circ}C$ ، U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲m بر حسب m/s ، e_s : فشار بخار اشباع بر حسب kpa، e_a : فشار بخار

گل‌دهی-رسیدن کامل^۱ استفاده شد. بر اساس داده‌های هواشناسی ثبت‌شده در این ایستگاه، متغیرهای متعددی شامل شاخص درجه روز رشد (GDD)، شاخص واحدهای حرارتی-نوری (PTU) شاخص خشکسالی SPI، تابش خالص^۲، مقدار تبخیر تعرق پتانسیل^۳، دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا، میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک، کمبود اشباع، سرعت باد در ارتفاع ۲m، طول ساعات آفتابی، مقدار اولین بارش بیش از ۱۰mm در هر مرحله فنولوژیک و تعداد روزهای بین شروع هر مرحله فنولوژیک تا وقوع اولین بارش بیشتر از ۱۰mm محاسبه شدند و از آن‌ها در انجام تحلیل‌های بعدی استفاده شد. روند کلی انجام کار به این ترتیب بود که پس از استخراج تاریخ‌های وقوع مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم برای ۵ دوره فنولوژیک مذکور طی دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۴ برای این بازه زمانی تمامی متغیرهای مذکور نیز به تفکیک برای هر مرحله فنولوژیک محاسبه و استخراج شدند سپس با بهره‌گیری از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ارزیابی شد که برای هر کدام از این ۵ مرحله فنولوژیک، کدام متغیرها بیشترین تأثیر را بر طول آن مرحله فنولوژیک داشته‌اند و به چه مقداری توجیه‌کننده تغییرپذیری‌های سال‌به‌سال آن هستند.

محاسبه شاخص‌های مبتنی بر درجه روز رشد

دو شاخص مجموع درجه روز رشد (GDD) و مجموع واحدهای حرارتی-نوری (PTU) به تفکیک برای تمامی مراحل فنولوژیک با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه شدند (۳۵، ۲۱):

$$GDD = \sum_{d=d_b}^{d_e} Max \left\{ \left(\frac{T_{max_d} + T_{min_d}}{2} - T_{base} \right), 0 \right\} \quad (1)$$

$$PTU = \sum_{d=d_b}^{d_e} Sunshine_d \times Max \left\{ \left(\frac{T_{max_d} + T_{min_d}}{2} - T_{base} \right), 0 \right\} \quad (2)$$

³ Potential evapotranspiration

¹ Maturity

² Net radiation

از ساخت مؤلفه‌های اصلی، مقدار واریانس توجیه شده توسط هر مؤلفه نیز محاسبه شد و با انتخاب چند مؤلفه اصلی اول که بخش قابل توجهی از واریانس کل داده‌ها را توجیه کردند و حذف مؤلفه‌های اصلی بعدی، تحلیل‌های بعدی انجام شد. انجام این کار در دو مرحله کلی صورت گرفت. در مرحله اول ارزیابی شد که آیا بکارگیری روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در خلاصه‌سازی و کاهش داده‌های اولیه بطور مؤثری مفید است یا خیر؟ پس از انجام این ارزیابی و کسب اطمینان از مؤثر بودن این تکنیک، در مرحله دوم برای هر کدام از مراحل فنولوژیک جو دیم به تفکیک بررسی شد که کدام عوامل بر روی طول مراحل فنولوژیک مختلف جو دیم اثرگذاری بیشتری دارند و با ترسیم نمودارهای دوگانه^۳ بین دو مؤلفه اصلی و پلات کردن موقعیت متغیرهای مستقل و وابسته در داخل این پلات، تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌هایی نهایی انجام شد. کلیه تحلیل‌های فوق با کدنویسی در محیط برنامه نویسی R ویرایش 4.1.2 انجام شد.

نتایج

مراحل فنولوژیک جو دیم

به منظور ارائه دید کلی از زمان وقوع مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم شامل زمان کاشت و تاریخ‌های شروع مراحل سبز شدن، پنجه‌زنی، به ساقه رفتن، گل‌دهی و رسیدن کامل طی سال‌های مختلف، تغییرپذیری سال به سال این مراحل طی دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۴ ارائه شده است (شکل ۱). میانگین طول دوره کاشت-سبز شدن ۱۸ روز و ضریب تغییرات آن ۵۶/۷٪، میانگین طول دوره سبز شدن-پنجه‌زنی ۵۱ روز و ضریب تغییرات آن ۳۲٪، میانگین طول دوره پنجه‌زنی-ساقه ۷۵ روز و ضریب تغییرات آن ۳۴/۹٪، میانگین طول دوره ساقه-گل‌دهی ۳۹ روز و ضریب تغییرات آن ۱۵/۴٪ و میانگین طول دوره گل‌دهی-رسیدن ۴۳ روز و ضریب تغییرات آن ۱۳٪ به دست آمد که نشان‌دهنده آن است که بیشترین میانگین طول دوره مربوط به مرحله پنجه‌زنی-ساقه و بیشترین ضریب تغییرات مربوط به مرحله کاشت-سبز شدن می‌باشد.

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 (۱۲).

محاسبه شاخص خشکسالی SPI

جهت محاسبه شاخص SPI ابتدا تابع چگالی احتمال گاما^۱ بر سری زمانی بارش در گام‌های زمانی مختلف یک‌ماهه، دو ماهه، سه‌ماهه و ... برازش داده شد سپس شاخص SPI بر اساس رابطه (۵) محاسبه گردید (۱۷):

$$SPI = +\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) : \quad (5)$$

$$0.5 < H(x) < 1$$

در این رابطه‌ها، مقدار ضریب C_0 برابر با ۲/۵۱۵، ضریب C_1 برابر با ۰/۸۰۲۸، ضریب C_2 برابر با ۰/۰۱۰۳، ضریب d_1 برابر با ۱/۴۳۲۷، ضریب d_2 برابر با ۰/۱۸۹۲ و ضریب d_3 برابر با ۰/۰۰۱۳ لحاظ شد. $H(x)$ هم توزیع تجمعی گاما است و t نیز بسته به مقدار احتمال تجمعی بر اساس توزیع گاما از یکی از دو رابطه (۶) و (۷) بدست آمد:

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (6)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1-H(x))^2} \right]} \quad \text{for } 0.5 < H(x) < 1 \quad (7)$$

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)

برای شناسایی مؤلفه‌های تأثیرگذار بر طول دوره‌های مختلف رشد جو دیم، از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. برای پیاده‌سازی این روش، در آغاز متغیرهای اولیه x_1, x_2, \dots, x_p استاندارد شدند و هر کدام از این متغیرها دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک شدند. در ادامه ماتریس کوواریانس یا ماتریس همبستگی محاسبه شد و برای تک‌تک مؤلفه‌ها به تفکیک مقادیر ویژه و سپس بردارهای ویژه^۲ استخراج شد (۲۰). در ادامه این بردارهای ویژه بر روی داده‌های اولیه به فرم یک ترکیب خطی اعمال شدند و بر اساس آن‌ها مؤلفه‌های اصلی تولید شدند. پس

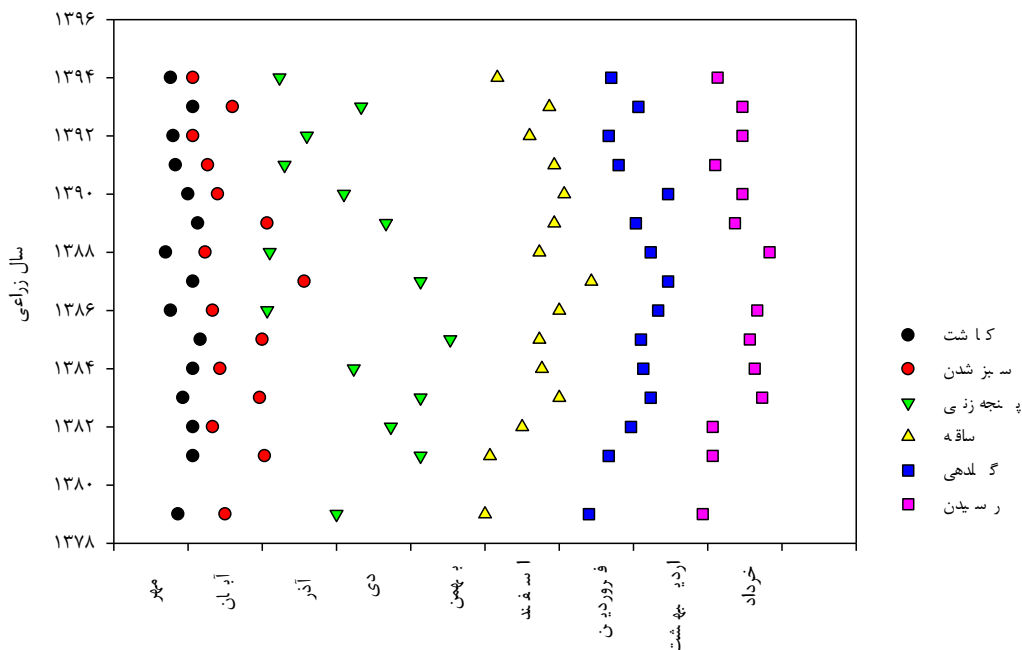
³ Biplot

¹ Gamma

² Eigenvectors

ضریب‌های همبستگی منفی در شکل (۲) بیان‌کننده رابطه معکوس بین میانگین GDD و طول دوره رشد تمامی مراحل فنولوژیک جو دیم است. به تعبیری دیگر هر چه میانگین GDD برای یک دوره موردنظر رشد گیاه بیشتر باشد طول مرحله فنولوژیک کوتاه‌تر و آن دوره رشد سریعتر طی خواهد شد.

در ادامه تلاش شد تا مؤثرترین دماهای پایه جهت محاسبه شاخص GDD برای هر کدام از مراحل فنولوژیک به تفکیک شناسایی گردد. جهت انجام این کار، شاخص GDD بر اساس دامنه‌ای از دماهای پایه مختلف شامل صفر تا ۱۰°C برای هر مرحله فنولوژیک به تفکیک طی دوره آماري ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۴ محاسبه شد و ضریب همبستگی بین هر کدام از این GDDها با طول هر مرحله فنولوژیک محاسبه شد (شکل ۲).



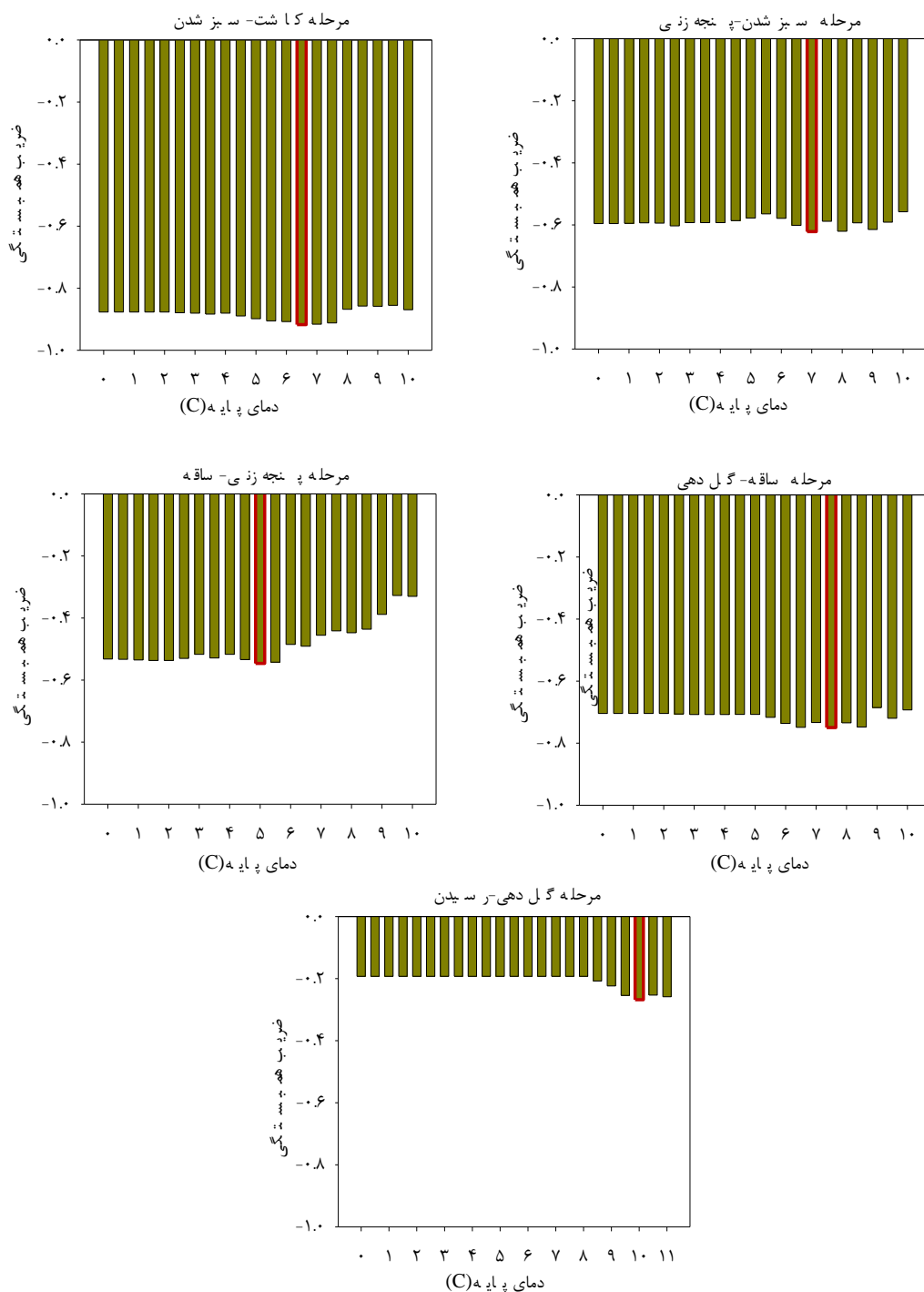
شکل. Error! No text of specified style in document. زمان وقوع مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم طی سال‌های مختلف

جدول ۱. متغیرهای دارای همبستگی معنی‌دار با طول دوره‌های مختلف فنولوژیک جو دیم

متغیرها	واحد متغیرها	کاشت - سبزشدن	سبزشدن - پانجه‌زنی	پانجه‌زنی - ساقه	ساقه - گل‌دهی	گل‌دهی - رسیدن
شاخص PTU	degree-day-hour	*	*	*	*	*
تابش خالص (R _n)	J.m ⁻² .day ⁻¹	*	*	*	*	*
شاخص GDD	degree-day	*	*	*	*	*
میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک (SST)	°C	*	*	*	*	*
تبخیر تعرق مرجع (ET ₀)	mm.day ⁻¹	*	*	*	*	*
دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا (DT)	°C	*	*	*	*	*
شاخص SPI	-	*	*	*	*	*
تعداد روزهای بین شروع مرحله فنولوژیک تا وقوع اولین بارش بیش از ۱۰ mm (First-Rain-Duration)	-	*	*	*	*	*
مقدار اولین بارش بیش از ۱۰ mm (First-Rain-Value)	mm	*	*	*	*	*
کمبود اشباع (VD)	hectopascal	*	*	*	*	*
سرعت باد (WS)	m.sec ⁻¹	*	*	*	*	*
طول ساعات آفتابی (Sunshine)	hour	*	*	*	*	*

داده است. لذا به هنگام بکارگیری شاخص‌های GDD و PTU در روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، از دماهای پایه مذکور بهره گرفته شد. همچنین بیشترین همبستگی بین GDD و طول مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم برای دوره کاشت-سبزشدن و ضعیف‌ترین همبستگی برای مرحله گل‌دهی-رسیدن به دست آمد.

ستون‌هایی که برای هر مرحله فنولوژیک به رنگ قرمز مشخص شده است نمایانگر بیشترین ضریب همبستگی و در نتیجه مؤثرترین دمای پایه برای آن مرحله فنولوژیک می‌باشد. دیده می‌شود که بیشترین ضریب همبستگی برای دوره کاشت-سبزشدن با دمای $6/5^{\circ}\text{C}$ ، سبزشدن-پنجه‌زنی با دمای 7°C ، پنجه‌زنی-ساقه با دمای 5°C ، ساقه-گل‌دهی با دمای $7/5^{\circ}\text{C}$ و گل‌دهی-رسیدن با دمای 10°C رخ



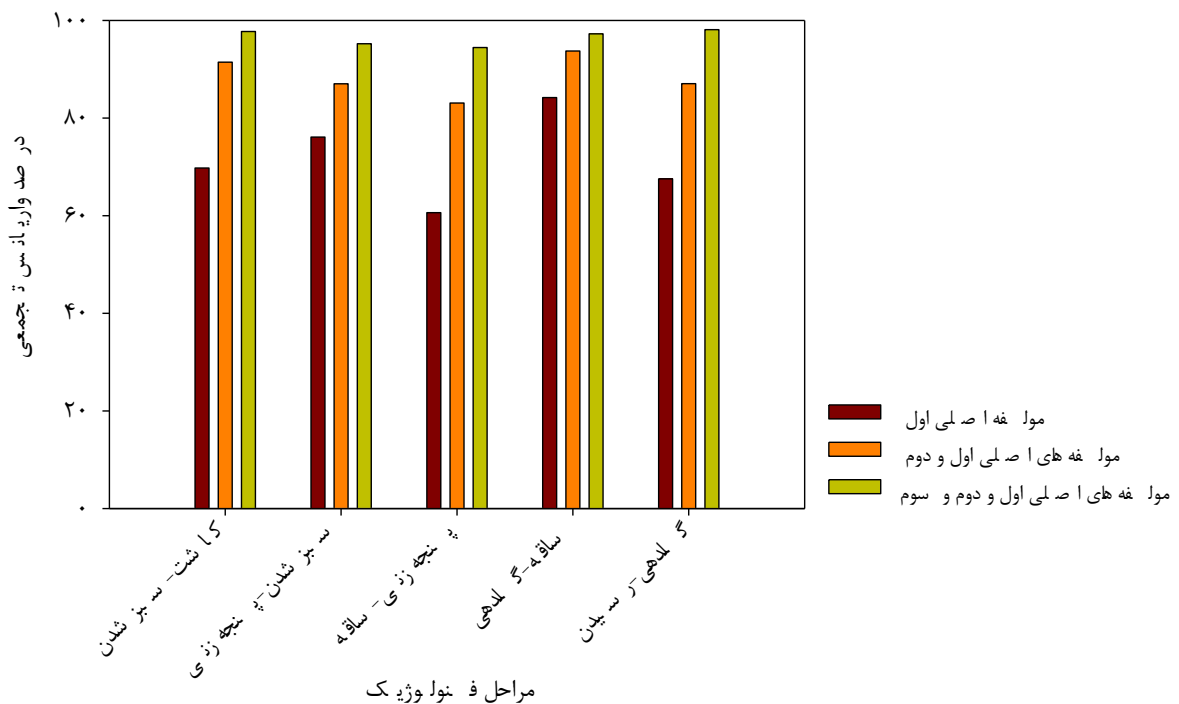
شکل ۲. ضرایب همبستگی بین طول مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم با میانگین GDDهای با دماهای پایه مختلف

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

پس از مشخص شدن اینکه کدام متغیرها بر روی هر کدام از مراحل فنولوژیک جو دارای اثر معنی‌دار هستند (جدول ۱) برای تک‌تک مراحل فنولوژیک به تفکیک روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر روی آن‌ها انجام شد. مقدارهای واریانس تجمعی برای سه مؤلفه اصلی اول برای تک‌تک مراحل فنولوژیک به تفکیک در شکل ۳ نشان داده شده است. دیده می‌شود که برای کلیه مراحل فنولوژیک، درصد بسیار زیادی از واریانس کل داده‌های اولیه توسط سه مؤلفه اصلی اول توجیه شده است که حکایت از مؤثر بودن بکارگیری روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای کاهش و خلاصه‌سازی داده‌های اولیه دارد.

پس از کسب اطمینان از مؤثر بودن بکارگیری روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی جهت خلاصه‌سازی و کاهش داده‌ها، با اعمال ترکیب‌هایی خطی از متغیرهای اولیه مقادیر سه مؤلفه اصلی PCA1، PCA2 و PCA3 برای تک‌تک سال‌ها و برای هر کدام از مراحل فنولوژیک محاسبه شد سپس برای هر مرحله فنولوژیک، با محاسبه ضریب تعیین (R^2) بین هر کدام از سه مؤلفه اصلی با طول آن مرحله فنولوژیک ارزیابی شد که مؤلفه‌های اصلی تا چه اندازه قادر به توجیه واریانس طول آن مرحله فنولوژیک

هستند. این کار با استخراج بردارهای ویژه و اعمال آن‌ها بر روی متغیرهای اولیه انجام شد (جدول ۲). برای مرحله‌های کاشت-سبزشدن، ساقه-گل‌دهی و گل‌دهی-رسیدن، مؤلفه‌های اول و سوم و برای مرحله‌های سبزشدن-پنجه‌زنی و پنجه‌زنی-ساقه مؤلفه اصلی اول و دوم بیشترین ضرایب تعیین را به خود اختصاص دادند. با محاسبه مجموع ضرایب تعیین برای این مؤلفه‌ها (ستون آخر جدول ۲)، بیشینه واریانس توجیه شده توسط آن‌ها برای طول مراحل کاشت-سبزشدن $94/7\%$ ، سبزشدن-پنجه‌زنی $60/8\%$ ، پنجه‌زنی-ساقه $65/4\%$ ، ساقه-گل‌دهی $67/1\%$ و گل‌دهی-رسیدن $69/1\%$ بدست آمد که حاکی از آن است که برای مرحله کاشت-سبزشدن بخشی بسیار زیاد و برای چهار مرحله دیگر نیز بخشی قابل توجه از واریانس طول مراحل فنولوژیک تنها با در نظر گرفتن دو مؤلفه اصلی توجیه شد. آن مقدار از واریانس باقی‌مانده که توسط این مؤلفه‌ها توجیه نشده است را می‌توان به عوامل دیگری غیر از متغیرها و شاخص‌هایی که در پژوهش حاضر لحاظ شده‌اند نسبت داد. از جمله این عوامل دیگر می‌توان به تاریخ کاشت، فاصله بین ردیف‌های کاشت، میزان مواد مغذی خاک، آیش بودن یا آیش نبودن زمین در سال ماقبل، میزان کود داده‌شده و ... اشاره کرد.



شکل ۳. مقادیر درصد واریانس تجمعی حاصل از سه مؤلفه اصلی اول برای مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم

با توجه به اینکه جهت شناسایی عوامل مؤثر بر طول هر کدام از مراحل فنولوژیک از نمودارهای دوگانه که مبتنی بر دو مؤلفه اصلی هستند استفاده شده است لذا برای هر کدام از مراحل فنولوژیک، دو مؤلفه‌ای که واریانس بیشتری از تغییرپذیری طول مراحل فنولوژیک را توجیه کردند و دارای ضرایب تعیین بیشتری بودند انتخاب شدند و از آن دو مؤلفه اصلی جهت ترسیم نمودارهای دوگانه استفاده شد و بر اساس این نمودارها، عوامل مؤثر بر طول هر کدام از مراحل فنولوژیک شناسایی شد.

از آنجایی که مؤلفه‌های اصلی برای هر کدام از مراحل فنولوژیک در واقع بر اساس ترکیب‌های خطی از متغیرهای اولیه (جدول ۱) ایجاد شده‌اند، با تشکیل نمودار متغیرهای اولیه و طول مراحل فنولوژیک در داخل نمودارهای دوگانه به تحلیل عوامل مؤثر بر طول هر کدام از مراحل فنولوژیک پرداخته شد. نتایج حاصله برای پنج دوره مختلف فنولوژیک به تفکیک ارائه شده است (شکل‌های ۴-الف تا ۴-ه) که در آنها محورهای افقی و عمودی مؤلفه‌های اصلی، متغیرهای اولیه با بردارهای به رنگ آبی و طول مراحل فنولوژیک با بردار قرمز رنگ نشان داده شده‌اند. بردار مربوط به متغیرهایی که در راستای محور افقی مقادیر قابل توجه‌تری داشته‌اند سهم قوی‌تری در محاسبه مؤلفه اصلی اول دارند و متغیرهایی که بردار مربوط به آنها در راستای محور عمودی مقادیر قابل توجه‌تری به خود اختصاص داده‌اند سهم و اثر قوی‌تر در محاسبه مؤلفه اصلی دوم دارد.

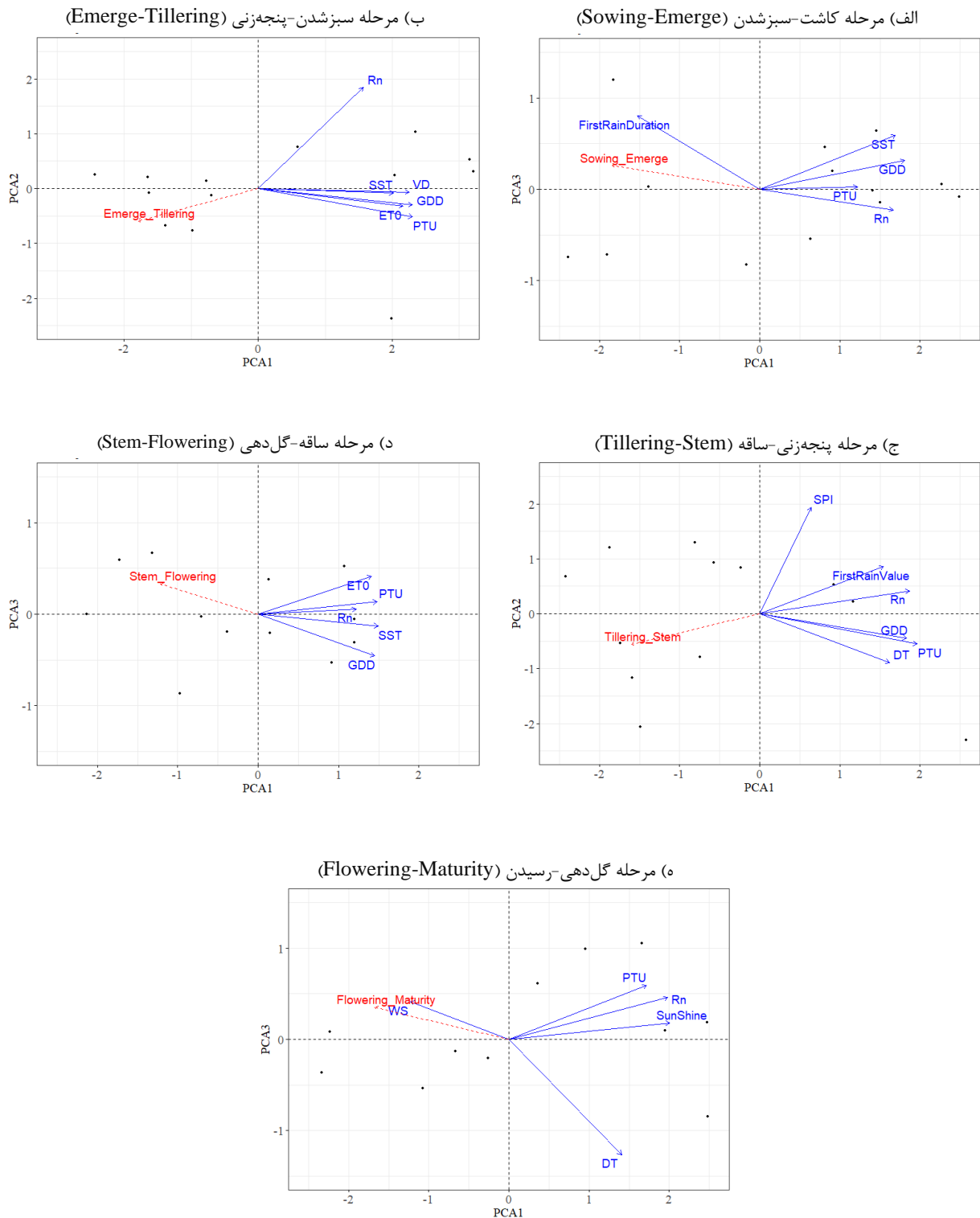
مرحله کاشت-سبزشدن

با ارزیابی موقعیت و جهت‌گیری بردار قرمز رنگ مربوط

به طول دوره کاشت-سبزشدن، از آنجایی که تمایل این بردار بیشتر در راستای محور xها بوده است چنین نتیجه‌گیری می‌شود که نقش مؤلفه اصلی اول در طول این دوره خیلی برجسته‌تر از مؤلفه اصلی دوم است و با توجه به اینکه مؤلفه دوم در مقایسه با مؤلفه اول سهم بسیار کمی داشته است، لذا می‌توان از آن صرف‌نظر کرد (شکل ۴-الف). همچنین مؤلفه اول ۹۲/۸۷٪ از تغییرات کل را توجیه کرده است در حالی که مؤلفه دوم که بعد از مؤلفه اول بیشترین ضریب تعیین را داشته است تنها ۱/۸٪ از تغییرات را توجیه کرده است (جدول ۲). بر این اساس، متغیرهای اولیه‌ای که در محاسبه مؤلفه اصلی اول تأثیرگذار بوده‌اند بر طول دوره کاشت-سبزشدن نیز دارای اثر هستند. جهت شناسایی دقیق‌تر عوامل مؤثر بر طول دوره کاشت-سبزشدن بر اساس مؤلفه اصلی اول، علاوه بر طول بردارهای مربوط به متغیرهای اولیه در راستای محور x باید به جهت مثبت یا منفی آنها نیز توجه کرد. بدیهی است متغیرهای همسو با جهت بردار قرمز رنگ مربوط به طول دوره کاشت-سبزشدن دارای اثری مستقیم و متغیرهای غیرهمسو دارای اثری معکوس روی آن هستند. دیده می‌شود که تمامی متغیرهای منتخب شامل میانگین GDD با دمای پایه $6/5^{\circ}\text{C}$ ، میانگین PTU با دمای پایه $6/5^{\circ}\text{C}$ ، میانگین تابش خالص، میانگین دمای سطح زمین و تعداد روزهای بین تاریخ کاشت تا وقوع اولین بارش بیش از ۱۰mm بر روی طول دوره کاشت-سبزشدن دارای تأثیر بوده‌اند که بیشترین میزان این تأثیر متعلق به GDD و کمترین میزان آن متعلق به PTU بوده است.

جدول ۲. درصد ضریب تعیین بین طول هر کدام از مراحل فنولوژیک جو دیم با سه مؤلفه اصلی اول

مرحله فنولوژیک	مؤلفه اصلی اول	مؤلفه اصلی دوم	مؤلفه اصلی سوم	بیشینه مجموع دو مؤلفه اصلی
کاشت-سبزشدن	۹۲/۸۷	۰/۷۵	۱/۸۰	۹۴/۷
سبزشدن-پنجه‌زنی	۵۴/۸۷	۵/۹۳	۴/۵۵	۶۰/۸
پنجه‌زنی-ساقه	۵۸/۳۵	۷/۰۹	۲/۵۹	۶۵/۴
ساقه-گل‌دهی	۶۲/۲۴	۰/۶۶	۴/۸۴	۶۷/۱
گل‌دهی-رسیدن	۶۶/۲۴	۱/۳۸	۲/۹۱	۶۹/۱



شکل ۴. نمودارهای دوگانه جهت تحلیل فاکتورهای مؤثر بر طول مراحل فنولوژیک جو دیم بر اساس دو مؤلفه اصلی (در این شکل‌ها GDD: درجه روز رشد، PTU: مجموع واحدهای حرارتی-نوری، R_n : تابش خالص، SST: میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک، First-Rain-Duration: تعداد روزهای بین تاریخ کاشت تا وقوع اولین بارش بیش از ۱۰mm، ET0: تبخیر تعرق پتانسیل، VD: کمبود اشباع، DT: دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا، شاخص SPI: شاخص خشکسالی، First-Rain-Value: مقدار اولین بارش بیش از ۱۰mm از شروع دوره پنجه‌زنی، WS: سرعت باد، SunShine: طول ساعات آفتابی)

از نظر تأثیر مستقیم و معکوس هم به استثنای متغیر تعداد روزهای بین تاریخ کاشت تا وقوع اولین بارش بیش از ۱۰ mm که اثر مستقیمی بر روی طول دوره کاشت-سبزشدن داشته است چهار متغیر دیگر اثر معکوسی داشته‌اند. به تعبیری دیگر، در سال‌هایی که مقادیر میانگین شاخص GDD، میانگین شاخص PTU، میانگین تابش خالص و میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک در طی دوره کاشت-سبزشدن بیشتر و تعداد روزهای بین تاریخ کاشت تا وقوع اولین بارش بیش از ۱۰ mm کمتر بوده است طول دوره کاشت-سبزشدن کوتاه‌تر بوده است. با در نظر گرفتن ضریب تعیین بین مؤلفه اصلی اول با طول دوره کاشت-سبزشدن نیز می‌توان گفت که متغیرهای مذکور قادرند ۹۲/۸۷٪ از تغییرپذیری سال به سال طول دوره کاشت-سبزشدن را توجیه نمایند و مابقی این تغییرپذیری به عوامل دیگری نسبت داده می‌شود. شیوه استنتاج کلی فوق را می‌توان برای چهار دوره دیگر رشد نیز اعمال کرد.

مرحله سبزشدن-پنجه‌زنی

با در نظر گرفتن بردار قرمز رنگ مربوط به طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی دیده می‌شود که اگرچه نقش مؤلفه اصلی اول برجسته‌تر از مؤلفه اصلی دوم بوده است و طول این بردار در راستای محور افقی بیشتر از طول آن در راستای محور عمودی است اما نقش مؤلفه اصلی دوم نیز می‌تواند حائز اهمیت باشد (شکل ۴-ب). همچنین ضریب تعیین مربوط به مؤلفه‌های اول برابر با ۵۴/۸۷٪ و برای مؤلفه دوم برابر با ۵/۹۳٪ بدست آمد که در مجموع قادر به توجیه ۶۰/۸٪ از کل تغییرپذیری طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی بودند (جدول ۲). در ارتباط با مؤلفه اصلی اول، دیده می‌شود که کلیه متغیرهای منتخب شامل شاخص GDD، شاخص PTU، تابش خالص، کمبود اشباع، تبخیرتقرق پتانسیل و میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک بطور هم‌جهت بر روی شکل‌گیری مؤلفه اصلی اول و به تبع آن طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی دارای اثری قابل توجه بوده‌اند که البته میزان این تأثیر برای تابش خالص قدری کمتر از سایر متغیرها بوده است. مقایسه جهت بردارهای این متغیرها با جهت بردار قرمز رنگ مربوط به طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی نیز حاکی از اثر معکوس

همه این متغیرها بر روی طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی است. بر این اساس، برای واکاوی تأثیر فاکتورهای مؤثر بر طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی بر اساس مؤلفه اصلی اول چنین نتیجه‌گیری می‌شود که با توجه به اثر معکوس تمامی متغیرهای منتخب شامل شاخص GDD با دمای پایه 7°C ، شاخص PTU، تابش خالص، میانگین دمای سطح خاک، تبخیرتقرق پتانسیل و کمبود اشباع بر روی طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی، در سال‌هایی که مقدارهای این متغیرها طی دوره سبزشدن-پنجه‌زنی بیشتر بوده است طول این دوره نیز کوتاه‌تر بوده است. در ارتباط با تأثیر مؤلفه اصلی دوم بر روی طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی نیز دیده می‌شود که مؤلفه دوم بر روی تابش خالص تأکید بالایی داشته است و سایر متغیرها در راستای محور عمودی مقدار ناچیزی داشته‌اند. از آنجائی که جهت‌گیری بردار تابش خالص در راستای محور عمودی در خلاف جهت‌گیری بردار مربوط به طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی است لذا چنین نتیجه‌گیری می‌شود که اگر در طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی مقدار تابش خالص بالا باشد اگر مقدار دیگر متغیرهای دیگر شامل شاخص GDD، شاخص PTU، کمبود اشباع، تبخیرتقرق پتانسیل و میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک چندان بالا هم نباشد در چنین حالتی نیز می‌توان این انتظار را داشت که طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی کوتاه باشد.

مرحله پنجه‌زنی-به ساقه‌رفتن

در خصوص دوره پنجه‌زنی-ساقه، با توجه به تشابه بالایی که بین موقعیت و جهت‌گیری بردار مربوط به طول این دوره با بردار مربوط به طول دوره سبزشدن-پنجه‌زنی وجود دارد لذا برای این دوره هم هر دو مؤلفه اصلی اول با ضریب تعیین ۵۸/۳۵٪ و مؤلفه اصلی دوم با ضریب تعیین ۷/۰۹٪ باید در نظر گرفته شوند (شکل ۴-ج). این دو مؤلفه در مجموع ۶۵/۴٪ از کل تغییرات طول دوره پنجه‌زنی-ساقه را توجیه می‌کنند (جدول ۲). در ارتباط با نقش مؤلفه اصلی اول دیده می‌شود که کلیه متغیرهای منتخب شامل شاخص GDD، شاخص PTU، تابش خالص، شاخص خشکسالی SPI، دامنه تغییرات شبانه‌روزی و مقدار اولین بارش بیش از ۱۰ mm بطور هم‌جهت و هماهنگ بر روی

هیچکدام از این متغیرها در راستای محور عمودی جهت‌گیری چشمگیری از خود نشان نداده‌اند (شکل ۴-د). بر این اساس، از نقش مؤلفه دوم در ارزیابی اثر فاکتورهای مؤثر بر طول مرحله ساقه-گل‌دهی می‌توان صرف‌نظر کرد و صرفاً مؤلفه اصلی اول را دخیل کرد. در ارتباط با نقش مؤلفه اصلی اول چنانکه پیداست کلیه متغیرهای منتخب شامل شاخص GDD، شاخص PTU، تابش خالص، میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک و تبخیرتقرق پتانسیل بطور هم‌جهت بر روی شکل‌گیری مؤلفه اصلی اول و به‌تبع آن طول دوره ساقه-گل‌دهی دارای اثری قابل توجه بوده‌اند که البته مقدار این تأثیر برای تابش خالص قدری کمتر از سایر متغیرها بوده است. مقایسه جهت بردارهای این متغیرها با جهت بردار مربوط به طول دوره ساقه-گل‌دهی نیز حاکی از اثر معکوس همه این متغیرها بر روی طول این دوره است. بر این اساس، جهت تحلیل اثر فاکتورهای مؤثر بر طول دوره ساقه-گل‌دهی که بر اساس مؤلفه اصلی اول انجام می‌شود چنین نتیجه‌گیری می‌شود که بیشتر بودن مقدار متغیرهای منتخب با هم شامل GDD با دمای پایه $7/5^{\circ}\text{C}$ ، تابش خالص، میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک و تبخیرتقرق پتانسیل طی دوره ساقه-گل‌دهی با طی شدن سریع و کوتاه‌بودن این دوره همراه خواهد بود.

مرحله گل‌دهی-رسیدن

در خصوص دوره گل‌دهی-رسیدن، ضریب تعیین مربوط به مؤلفه اصلی اول برابر با $62/24\%$ و برای مؤلفه اصلی دوم $2/91\%$ بدست آمده است و لذا مؤلفه دوم سهم بسیار کمتری در مقایسه با مؤلفه اول داشته است (جدول ۲). همچنین جهت‌گیری و تمایل بردار مربوط به طول دوره گل‌دهی-رسیدن در راستای محور عمودی بسیار کم بوده است (شکل ۴-ه). لذا می‌توان از نقش مؤلفه دوم چشم‌پوشی کرده و برای ارزیابی فاکتورهای مؤثر بر طول این دوره، فقط از مؤلفه اصلی اول استفاده کرد. چنان‌که پیداست کلیه متغیرهای منتخب شامل شاخص PTU، تابش خالص، دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا، سرعت باد و طول ساعات آفتابی بر روی شکل‌گیری مؤلفه اصلی

شکل‌گیری مؤلفه اصلی اول و به‌تبع آن طول دوره پنجه‌زنی-ساقه‌دارای تأثیر بوده‌اند که البته میزان این اثر برای شاخص خشکسالی SPI قدری کمتر از سایر متغیرها بوده است. مقایسه جهت بردارهای این متغیرها با جهت بردار مربوط به طول دوره پنجه‌زنی-ساقه نیز حاکی از اثر معکوس همه این متغیرها بر طول این دوره است. بر این اساس، جهت تحلیل اثر فاکتورهای مؤثر بر طول دوره پنجه‌زنی-ساقه بر اساس مؤلفه اصلی اول می‌توان چنین اظهار داشت که مقادیر زیاد تمامی متغیرهای منتخب شامل GDD با دمای پایه 5°C ، تابش خالص، دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا، مقدار اولین بارش بیش از 10mm و شاخص خشکسالی SPI طی دوره پنجه‌زنی-ساقه با کوتاه‌شدن و طی شدن سریع این دوره همراه خواهد بود. در ارتباط با تأثیر مؤلفه اصلی دوم بر روی طول این دوره نیز دیده می‌شود که شاخص خشکسالی SPI بیشترین سهم و نقش را در مؤلفه دوم داراست و سایر متغیرها در راستای محور عمودی اگرچه تا حدودی نقش داشته‌اند اما سهمشان کمتر بوده است. بر این اساس در خصوص نقش و تأثیر مؤلفه دوم در طول مرحله پنجه‌زنی-ساقه که با در نظرگرفتن جهت بردارها در راستای محور عمودی انجام می‌شود می‌توان گفت که اگر در مواردی مقدار شاخص خشکسالی SPI طی دوره پنجه‌زنی-ساقه به‌طور چشمگیری بالا و شرایط ترسالی شدید طی این دوره حاکم باشد و در کنار آن مقدار اولین بارش بیش از 10mm و همچنین میزان تابش خالص نیز به مقدار کمی بالا باشند اگر سایر متغیرهای دیگر شامل شاخص GDD، شاخص PTU و دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا مقدارشان پایین هم باشد باز می‌توان انتظار داشت که طول این دوره در مدت زمان کوتاهی رخ دهد.

مرحله به ساقه‌رفتن-گل‌دهی

در خصوص دوره ساقه-گل‌دهی، ضریب تعیین مربوط به مؤلفه اصلی اول برابر با $62/24\%$ و برای مؤلفه اصلی دوم $4/84\%$ بوده است و در نتیجه مؤلفه دوم سهم کمی در مقایسه با مؤلفه اول داشته است (جدول ۲). جهت‌گیری متغیرهای اولیه هم غالباً در راستای محور X بوده است و

رطوبت خاک دربرگیرنده شاخص خشکسالی SPI، مقدار اولین بارش بیش از ۱۰mm و تعداد روزهای بین شروع مرحله فنولوژیک تا وقوع اولین بارش بیش از ۱۰mm، عوامل مبتنی بر تبخیرتغرق در برگیرنده تبخیرتغرق پتانسیل و کمبود اشباع و عوامل تکمیلی دربرگیرنده دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا، طول ساعات آفتابی و سرعت باد دسته‌بندی شوند چنین نتیجه‌گیری می‌شود عوامل مبتنی بر درجه روز رشد و عوامل مبتنی بر میزان تابش جذب‌شده مهم‌ترین عوامل مؤثر بر طول مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم می‌باشند. توضیح اینکه دو متغیر تابش خالص و شاخص PTU بر روی طول تمامی دوره‌های رشد، شاخص GDD بر طول چهار دوره رشد و میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک بر طول سه دوره رشد نقش و تأثیر داشتند. عوامل مبتنی بر تأمین رطوبت خاک در دو مرحله کاشت-سبزشدن و پنجه‌زنی-ساقه اثر چشمگیری بر طول این دو مرحله از خود نشان دادند و عدم تأمین شرایط رطوبتی خاک می‌تواند باعث افزایش طول این دو مرحله گردد. عوامل مبتنی بر تبخیرتغرق نیز در دو مرحله سبزشدن-پنجه‌زنی و ساقه-گل‌دهی بعنوان عواملی مؤثر بر طول دوره رشد شناسایی شدند و عوامل تکمیلی نیز در دو مرحله پنجه‌زنی-ساقه و گل‌دهی-رسیدن ایفای نقش کردند. به لحاظ اثرات مستقیم یا معکوس عوامل منتخب بر طول مراحل مختلف فنولوژیکی نیز نتایج نشان داد به استثنای دو متغیر تعداد روزهای بین شروع مرحله فنولوژیک تا وقوع اولین بارش بیش از ۱۰mm که با توجه به لزوم تأمین زود هنگام شرایط رطوبتی خاک جهت سبز شدن بذر اثری مستقیم بر طول دوره مرحله کاشت-سبز شدن داشت و نیز سرعت باد که در مرحله گل‌دهی-رسیدن با توجه به تأثیر آن روی ورس گیاه دارای تأثیری مستقیم بر طول این مرحله از رشد بود و در نتیجه با افزایش مقدار این دو متغیر، طول این دو دوره از رشد نیز افزایش یافت در سایر موارد، تمامی متغیرهای منتخب اثری معکوس بر طول دوره‌های مختلف رشد داشتند به گونه‌ای که با افزایش مقدار آنها، طول مراحل فنولوژیک کم شد.

با مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با پژوهش‌های پیشین می‌توان به وجه تشابه‌ها و تمایزهایی پی برد. به لحاظ وجه تشابه، تأثیر متغیرهایی نظیر درجه روز رشد،

اول و به تبع آن طول دوره ساقه-گل‌دهی دارای تأثیر قابل توجه بوده‌اند که البته مقدار آن برای دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا و سرعت باد قدری کمتر از سایر متغیرها بوده است و سرعت باد بر خلاف چهار متغیر دیگر که اثر معکوسی بر طول این دوره داشته‌اند اثر مستقیمی روی آن داشته است. بر این اساس، برای واکاوی تأثیر فاکتورهای مؤثر بر دوره ساقه-گل‌دهی بر اساس مؤلفه اصلی اول چنین نتیجه‌گیری می‌شود که بالا بودن متغیرهای شاخص PTU با دمای پایه 10°C ، تابش خالص، طول ساعات آفتابی و دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا طی این دوره در صورتی که با پایین بودن سرعت باد نیز همراه باشد کوتاه شدن طول دوره ساقه-گل‌دهی را موجب خواهد شد.

■ بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر از دو جنبه دارای اهمیت بود. جنبه اول به لحاظ کاهش داده و بکارگیری چند مؤلفه اصلی اول به جای کل داده‌های اولیه بود. از آنجائی که در این روش با ترکیب خطی از داده‌های مربوط به متغیرهای اولیه، چند مؤلفه اصلی غیرهمبسته و جدید ایجاد شدند با در نظر گرفتن این چند مؤلفه اصلی اول که درصد قابل توجهی از واریانس داده‌های اولیه را توجیه کردند با سهولت و تسلط بیشتری ارتباط بین طول هر مرحله فنولوژیک با چند مؤلفه اصلی مورد ارزیابی قرار گرفت و در ادامه بر اساس ماهیت هر کدام از این مؤلفه‌های اصلی، چگونگی این ارتباط بر اساس متغیرهای اولیه مجدداً توصیف شد. جنبه دوم هم معطوف به این بود که چون عدم همبستگی بین مؤلفه‌های اصلی سبب شد که هر کدام از این مؤلفه‌ها جنبه‌های متفاوتی از داده‌های اصلی را توجیه نمایند وجود این تفاوت در شناسایی عوامل گوناگون مؤثر بر طول دوره‌های مختلف رشد بسیار مؤثر و راهگشا بود. با یک نگاه کلی، در صورتی که عوامل مؤثر بر طول مراحل فنولوژیک دیم در قالب چهار دسته کلی شامل عوامل مبتنی بر درجه روز رشد دربرگیرنده شاخص‌های GDD و PTU، عوامل نمایانگر مقدار تابش جذب‌شده دربرگیرنده تابش خالص و میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک، عوامل مبتنی بر تأمین

صورت توجیه نشده باقی ماند و چنین به نظر می‌رسد که جهت نیل به شناسایی دقیق تر و تفصیلی تر عوامل مؤثر بر این تغییرپذیری‌ها ضروری است در صورت امکان دسترسی به داده‌های برخی عوامل دیگر نظیر بیلان نیتروژن خاک و همچنین شیوه اعمال مدیریت زراعی که از جنبه‌های دیگری طول دوره رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهند از این قبیل داده‌ها نیز در کنار عوامل مختلف اقلیمی بهره گرفته شود. از آنجایی که پژوهش حاضر مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده بصورت میدانی و مزرعه‌ای بوده است یک جنبه مؤثر دیگر نیز می‌تواند معطوف به بهره‌گیری از پتانسیل داده‌های ماهواره‌ای در کنار داده‌های میدانی باشد. نتایج کلی پژوهش حاضر نمایانگر آن است که روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در کنار قابلیت بالایی که برای شناسایی عامل‌های مؤثر بر طول مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم دارد به خوبی قادر به سامان‌دهی اثرات متقابل بین این عوامل نیز می‌باشد. اثرات متقابل بین متغیرهای مختلف بطور ویژه‌ای در دو مرحله سبز شدن-پنجه‌زنی و پنجه‌زنی-ساقه ظاهر شد و دو مؤلفه اصلی جنبه‌های متفاوتی از تغییرپذیری طول این دو دوره از رشد را توجیه نمودند. با توجه به اینکه عواملی که در پژوهش حاضر بعنوان عوامل مؤثر بر مراحل فنولوژیک مختلف جو دیم شناسایی شدند می‌توانند از وقوع تغییرات اقلیمی ناشی از تشدید اثرات گلخانه‌ای جو و گرمایش جهانی متأثر باشند لذا وقوع هر گونه تغییرات اقلیمی در منطقه مورد پژوهش می‌تواند بر طول مراحل فنولوژیک نیز دارای تأثیر باشد. لذا پایش مداوم طول مراحل فنولوژیکی گیاهان در دوره‌های آبی و مقایسه آن با دوره‌های گذشته را می‌توان بعنوان ابزاری مفید و کارآمد در خصوص پایش تغییرات اقلیمی در نظر گرفت و لازم است با اهتمام ویژه‌ای این موضوع برای محصولات مختلف و استراتژیک کشور مورد بررسی قرار گیرد زیرا به‌طور مستقیم و مؤثری با امنیت غذایی در شرایط آینده در ارتباط است.

طول ساعات آفتابی، تابش خورشید و بارش بر طول مراحل فنولوژیک در مطالعات پیشین مشابهی که در سطح بین‌المللی انجام شده‌اند نیز گزارش شده است (۲۸، ۳۵). با کنار هم قرار دادن نتایج حاصل از این پژوهش که برای جو دیم در یک منطقه با اقلیم نیمه‌خشک انجام شده است با دیگر پژوهش‌هایی که در ایران بر روی گیاهان دیگر از جمله گندم، برنج و گونه‌های مختلف مرتعی و تحت شرایط اقلیمی متفاوتی انجام شده است (۲۲، ۴، ۳۱) به وضوح می‌توان بر نقش برجسته و اثرگذار عوامل مبتنی بر درجه روز رشد بر طول مراحل فنولوژیک برای دامنه وسیعی از گیاهان در اقلیم‌های مختلف صحنه گذاشت. با این وجود، در کنار عوامل مبتنی بر درجه روز رشد، تأثیر عوامل دیگری که بر جنبه‌های مهمی نظیر میزان رطوبت در دسترس ریشه گیاه، مقدار تابش جذب شده توسط گیاه برای انجام فعالیت‌های فتوسنتزی و تبخیر تعرق گیاه دلالت دارند نیز مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که اثر تلفیقی و برهم‌کنش بین این عوامل نیز می‌تواند حائز اهمیت شایانی باشد لذا وجه تمایز پژوهش حاضر با بررسی‌های پیشین را می‌توان در نظر گرفتن مجموعه متنوعی از عوامل اقلیمی از یک سو و ارزیابی اثرات متقابل آنها با بکارگیری روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی از سوی دیگر دانست و همانگونه که نتایج پژوهش حاضر نشان داد در نظر گرفتن عوامل مبتنی بر درجه روز رشد در کنار لحاظ کردن میزان تابش جذب شده می‌تواند توجیه‌کننده بخش قابل توجهی از تغییرات طول مراحل مختلف فنولوژیک جو دیم باشد زیرا در کنار ضروری بودن تأمین شدن نیازهای دمایی گیاه برای سپری کردن مراحل مختلف رشد، میزان تابش خالصی که گیاه نیاز دارد تا برای انجام فرایندهای فتوسنتزی به مصرف برساند نیز می‌تواند نقشی مکمل را در این فرایند ایفاء نماید. بر اساس نتایج پژوهش حاضر دیده شد که علیرغم در نظر گرفتن عوامل اقلیمی گوناگون، جنبه‌هایی از تغییرپذیری طول مراحل مختلف رشد به

■ References

1. Alasti, O., Zeinali, E., Soltani, A. & Torabi, B. (2020). Estimation of yield gap and the potential of rainfed barley production increase in Iran. *Crop Production*, 13(3), 41-60. (in Farsi)

2. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements*. Rome, FAO.
3. Anwar, M.R., Li Liu, D., Farquharson, R., Macadam, I., Abadi, A., Finlayson, J., Wang, B. & Ramilan, T. (2015). Climate change impacts on phenology and yields of five broad acre crops at four climatologically distinct locations Australia. *Agricultural Systems*, 132, 133-144.
4. Azarnivand, H., Tarkesh Esfehiani, M., Basiri, M., Saeedfar, M., & Zarea Chahooki, M.A. (2010). Investigation on phenology of *Bromus tomentellus* using growing degree-day method. *Watershed Management Research Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 89, 1-6. (in Farsi)
5. Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P. & Bussière, F. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of agronomy*, 18(3-4), 309-332.
6. Chmielewski, F. M., Müller, A. & Bruns, E. (2004). Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 69-78.
7. Chmielewski, F. M., Heider, S., Moryson, S. & Bruns, E. (2013). *International phenological observation networks: concept of IPG and GPM*. In *Phenology: An integrative environmental science*. Dordrecht: Springer.
8. Craufurd, P. Q. & Wheeler, T. R. (2009). Climate change and the flowering time of annual crops. *Experimental botany*, 60(9), 2529-2539.
9. Esmaili, S., Khoshkhoo, Y., Babaei, K. & Asadi Oskouei, E. (2018). Estimating rice actual evapotranspiration using METRIC algorithm in a part of the North of Iran. *Water and Soil Conservation*. 24(6), 105-122. (in Farsi)
10. Gungula, D. T., Kling, J. G. & Togun, A. O. (2003). CERES-Maize predictions of maize phenology under nitrogen-stressed conditions in Nigeria. *Agronomy*, 95(4), 892-899.
11. He, L., Asseng, S., Zhao, G., Wu, D., Yang, X., Zhuang, W., Jin, N. & Yu, Q. (2015). Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200, 135-143.
12. Heydari Tasheh Kaboud, Sh. & 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. *Applied Researches in Geographical Sciences*, 19(53), 157-176. (in Farsi)
13. Horvath, E., Gombos, B. & Széles, A. (2021). Evaluation phenology, yield and quality of maize genotypes in drought stress and non-stress environments. *Agronomy Research*. 19(2), 408-422.
14. Javed, T., Li, Y., Feng, K., Ayantobo, O.O., Ahmad, S., Chen, X., Rashid, S. & Suon, S. (2021). Monitoring responses of vegetation phenology and productivity to extreme climatic conditions using remote sensing across different sub-regions of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3), 3644-3659.
15. Juskiw, P. E., Jame, Y. W. & Kryzanowski, L. (2001). Phenological development of spring barley in a short-season growing area. *Agronomy*, 93(2), 370-379.
16. Khoshkhoo Y. (2018). Evaluating soil surface energy balance model and satellite images to estimating mean daily soil surface temperature. *Water and Soil Conservation*. 25(3), 177-192. (in Farsi)
17. Lloyd-Hughes, B. & Saunders, M.A. (2002). A drought climatology for Europe. *Climatology*. 22(13), 1571–1592.
18. Ma, S., Churkina, G. & Trusilova, K. (2012). Investigating the impact of climate change on crop phenological events in Europe with a phenology model. *Biometeorology*, 56(4), 749-763.

19. Ma, X., Huete, A., Moran, S., Ponce-Campos, G. & Eamus, D. (2015). Abrupt shifts in phenology and vegetation productivity under climate extremes. *Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(10), 2036-2052.
20. Manly, B.F. & Alberto, J.A.N. (2016). *Multivariate statistical methods: a primer*. New York: Chapman and Hall/CRC.
21. McMaster, G. S. & Smika, D.E. (1988). Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43(1), 1-18.
22. Mirhaji, T., Sanadgol, A.A., Ghasemi, M. H. & Nouri, S. (2010). Application of growth degree-days in determining phenological stages of four grass species in Homand Absard Research Station. *Range and Desert Research*, 17(3), 362-376. (in Farsi)
23. Mohammadi, E., Yazdanpanah, H. & Mohammadi, F. (2014). Investigation the climate change event and its effect on cultivation time and length of growing period of wheat (rainfed), case study: Sararoud station of Kermanshah. *Natural Geography Research*, 46(2), 231-246. (in Farsi)
24. Mohammadi, H., Ramroudi, M., Bannayan, M. & Fanaee, H. R. (2018). Effect of climate change on phenological stages and growth stages of wheat in Zabol region. *Plant Ecophysiology*, 10(34), 181-191. (in Farsi)
25. Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Elsgaard, L., Palosuo, T., Rotter, R.P., Skjelvag, A.O. & Siebert, S. (2012). Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. *Food additives and contaminants*, 29(10), 1527-1542.
26. Parsamehr, Y., Mohammadi, H., Khoshakhlagh, F. & Bazgeer, S. (2022) Estimation of base temperature in different growth stages of wheat Case study: Sararood Station of Kermanshah. *Applied Research in Geography Science*, 22(64), 17-30. (in Farsi)
27. Peng, H., Xia, H., Chen, H., Zhi, P. & Xu, Z. (2021). Spatial variation characteristics of vegetation phenology and its influencing factors in the subtropical monsoon climate region of southern China. *PloS one*, 16(4), 1-19.
28. Peñuelas, J., Filella, I., Zhang, X., Llorens, L., Ogaya, R., Lloret, F., Comas, P., Estiarte, M. & Terradas, J. (2004). Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New phytologist*, 161(3), 837-846.
29. Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., Viovy, N. & Demarty, J. (2007). Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. *Glob Biogeochem Cycles*, 21(3), 1-22.
30. Ramos, M. C., & de Toda, F.M. (2020). Variability in the potential effects of climate change on phenology and on grape composition of Tempranillo in three zones of the Rioja DOCa (Spain). *European Journal of Agronomy*, 115, 1-12.
31. Sadidi Shal, S.M.T., Zohd Ghodsi, M. J., Asadi Oskouei, E. & Zahra, A.D. (2021). Comparison of Growing Degree Day of Different Phenological Stages of Hashemi Rice in Guilan Province. *Climate. Research*, 1400(45), 143-152. (in Farsi)
32. Sadras, V. O. & Monzon, J. P. (2006). Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field crops Research*, 99(2-3), 136-146.
33. Salazar-Gutierrez, M. R., Johnson, J., Chaves-Cordoba, B. & Hoogenboom, G. (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. *Plant Production*, 7(4), 741-762.
34. Sarto, M.V.M., Sarto, J. R. W., Rampim, L., Rosset, J. S., Bassegio, D., da Costa, P. F. & Inagaki, A. M. (2017). Wheat phenology and yield under drought: a review. *Australian Journal of Crop Science*, 11(8), 941-946.

35. Siebert, S. & 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.
36. Smith, P.C., De Noblet-Ducoudr, N., Ciais, P., Peylin, P., Viovy, N., Meurdesoif, Y. & Bondeau, A. (2010). European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: phenology and productivity, *Geophysics Research*, 115, 1-14.
37. Verdugo-Vásquez, N., Acevedo-Opazo, C., Valdés-Gómez, H., Ingram, B., García de Cortázar-Atauri, I. & Tisseyre, B. (2022). Identification of main factors affecting the within-field spatial variability of grapevine phenology and total soluble solids accumulation: towards the vineyard zoning using auxiliary information. *Precision Agriculture*, 23(1), 253-277.