

بررسی کمی تأثیر خشک‌سالی بر عملکرد محصول جو در آذربایجان شرقی به روش رگرسیون چندمتغیره

الهام رحمانی^{۱*}، علی خلیلی^۲ و عبدالمجید لیاقت^۲

(تاریخ دریافت: ۸۵/۱۱/۷؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۷/۸)

چکیده

متغیرهای آب و هوایی به ویژه بارندگی در سال زراعی نقش اصلی را در پیش‌بینی عملکرد محصول ایفا می‌کنند. هدف از این تحقیق تخمین عملکرد محصول با استفاده از پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی به روش کلاسیک بود. برای رسیدن به این هدف در ابتدا ده پارامتر هواشناسی و دوازده شاخص خشک‌سالی در ایستگاه‌های تبریز و میانه از نظر نرمال بودن و هم‌راستایی سنجش شدند. سپس تحلیل هم‌بستگی یک و چندمتغیره بین عملکرد محصول جو با پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی انجام گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که از بین شاخص‌های مطالعه شده، شاخص‌های نگوین، ترانسو تغییر یافته، استاندارد شده بارش ۲۴ ماهه و ناهنجاری بارش بیشترین اثر را بر عملکرد دارند. همچنین مشخص شد که برای پیش‌بینی عملکرد محصول، مدل‌های چندمتغیره بسیار بهتر از مدل‌های یک متغیره می‌باشند. در نهایت روابط به دست آمده در این تحقیق براساس شاخص‌های آماری R و RMSE و MBE رتبه‌بندی شدند که رابطه چند متغیره بین پارامترهای متوسط سرعت باد، بارش، مجموع دمای بیش از ۱۰ درجه، تعداد ساعات آفتابی، شاخص نگوین و عملکرد جو دیم در میانه با دوره آماری ۱۷ سال بهترین مدل شناخته شد. در این رابطه پارامترهای سرعت متوسط باد و شاخص خشک‌سالی نگوین با داشتن ضرایب بزرگ‌تری نسبت به بقیه پارامترها بیشترین اثر را بر عملکرد دارا می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: خشک‌سالی، عملکرد جو، شاخص‌های خشک‌سالی، پارامترهای هواشناسی، روش‌های کلاسیک

مقدمه

خسارات شدیدی به محصولات کشاورزی وارد آورده و در نتیجه، عملکرد محصولات کاهش می‌یابد (۷). تاکنون بیش از ۱۵۰ تعریف مختلف برای خشک‌سالی ارائه شده است که همگی آنها بر اساس میزان باران نازل شده استوار هستند (۷). به عبارتی، در تمامی شاخص‌های معرف خشک‌سالی، بارندگی جایگاه اصلی را به خود اختصاص می‌دهد (۵). دانشمندان تنها روی تعاریف بسیار کلی خشک‌سالی اتفاق نظر دارند. به‌عنوان مثال یکی از تعاریف، مشخصه اصلی خشک‌سالی را کاهش

خشک‌سالی کشاورزی از پیچیده‌ترین و مهم‌ترین بلایای طبیعی است که مناطق وسیعی را تحت تأثیر خود قرار داده و باعث کاهش و افت شدید در تولیدات غذایی می‌شود. پیش‌بینی این پدیده بسیار مشکل است (۷). بررسی‌های آماری نشان داده که ۱۱٪ بلایای طبیعی مربوط به خشک‌سالی‌ها در جهان است (۵). به‌طور کلی، از نظر مفهومی خشک‌سالی کشاورزی عبارت است از یک دوره کمبود بارندگی که

۱. کارشناس ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

۲. به ترتیب استاد و دانشیار مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: erahmani@daad-alumni.de

دسترسی به آب در یک دوره زمانی مشخص و در یک ناحیه مشخص می‌داند (۷). تعریف دیگر، خشک‌سالی را کمبود رطوبت مستمر و غیرطبیعی می‌داند (۷). در این تعریف واژه مستمر، بیانگر زمان آغاز تا پایان خشک‌سالی یا زمان تداوم بوده و واژه غیرطبیعی، به انحراف یا نوسان منفی نسبت به شرایط میانگین طبیعی دلالت دارد. داده‌های آب و هوایی به‌طور معمول برای تخمین عملکرد محصول و خشک‌سالی کشاورزی استفاده می‌شود ولی با توجه به شدت و دوام خشک‌سالی که ممکن است بر عملکرد سال‌های بعد نیز تأثیر بگذارد در نقاط مختلف جهان سعی شده که به نوعی رابطه این بلیه طبیعی را با عملکرد محصولات مختلف یافته و به نحوی آن را کنترل نمایند (۷).

در مناطق شمالی مکزیک برای تعیین کمیت خشک‌سالی کشاورزی، یک سری روابط کمی بین SPI-x و عملکرد محصولات لوبیا و ذرت به دست آمد (x نشان‌دهنده دوره برگشت ۳، ۴، ۵ و ۶ ماهه است). از بین آنها فقط روابط بین SPI-3 و عملکرد دارای ضریب تبیین بهتری (۰/۵۴- - ۰/۲۶) بود. در این تحقیق اظهار شد که دلیل ممکن برای پایین بودن ضریب هم‌بستگی این است که مقادیر SPI برای کل ایالت میانگین‌گیری شده است و یکی از راه‌های اصلاح این است که ایالت به مناطق محلی تقسیم شده و سپس آنالیز هم‌بستگی بین عملکرد محلی و مقادیر SPI انجام شود. دلیل دیگر چنین مطرح شد که SPI تنها به بارندگی بستگی دارد که آن هم یکی از چندین پارامتر اثرگذار روی عملکرد محصول است. در این تحقیق هم چنین نتیجه‌گیری شد که شاخص ساده SPI نمی‌تواند به تنهایی جهت پیش‌بینی عملکرد محصول و تعیین مقدار کمی خشک‌سالی در مکزیک موفقیت‌آمیز باشد و شاخص دیگری نیاز است تا بتواند جهت پیش‌بینی خشک‌سالی کشاورزی و عملکرد محصولات عمده، مورد استفاده قرار گیرد (۷).

در تحقیقی دیگر، از یک مدل بیلان آبی برای بررسی اثرات خشک‌سالی کشاورزی روی گیاه ارزن در کشور نیجریه استفاده شد. بررسی‌های انجام شده در نیجریه کارایی مدل را برای مطالعه رخدادهای تاریخی خشک‌سالی کشاورزی تأیید نمود،

اما به‌کارگیری آن جهت پیش‌آگاهی خشک‌سالی کشاورزی و قحطی نیازمند بررسی‌های بیشتر در زمینه تبخیر و تعرق و تنش آبی گیاه طی مرحله جوانه‌زنی و سبز شدن می‌باشد (۷). شاخص Palmer نیز برای برزیل تعدیل و تغییر یافته و در ایالت سائوپائولو (Saopaulo) جهت پایش شرایط خشک‌سالی ماهانه و دهه‌ای مورد استفاده قرار گرفته و رابطه بین عملکرد ذرت و شاخص PDSI (پالمر) نیز در آنجا به دست آمده است (۷).

از شاخص خشکی پالمر کالیبره شده جهت پایش خشک‌سالی کشاورزی در لهستان نیز استفاده شد، و یک شاخص دیگری که بتواند نشان‌دهنده بهتری برای خشک‌سالی نسبت به بارندگی باشد نیز استفاده گردید. این شاخص به صورت $\frac{EP}{P_{veg}}$ تعریف شده است که EP، تبخیر تعرق پتانسیل و P_{veg} میانگین مجموع بارندگی در طول فصل رشد (April-September) می‌باشد (۷).

یانگ و تیان مدل تعادل آبی که موازنه آبی برای منطقه ریشه در یک ستون خاک می‌باشد را جهت پایش خشک‌سالی در چین مورد استفاده قرار داد (۱۵).

گیتلسون و همکاران (۱۹۹۸) رابطه شاخص‌های VCI و NDVI را با تراکم و توده گیاهان و بازتابش به دست آورده و آنها را بررسی نمودند. ایشان اعلام کردند که شاخص VCI تغییرات NDVI در اثر تغییرات آب و هوا در بین سال‌ها را نشان می‌دهد و معیاری برای بیان اثر آب و هوا بر پوشش می‌باشد. این مطالعه در نواحی مختلفی از قزاقستان با اقلیم‌های متفاوت واقع در نواحی نیمه بیابانی و استپی - جنگلی و ارتفاع‌های متفاوت از سطح دریا انجام گردید. این مطالعه برای نخستین بار نشان داد که می‌توان از شاخص VCI برای ارزیابی کمی وضعیت پوشش گیاهی و تراکم آن استفاده نمود (۸).

سایر و همکاران از دو شاخص VCI و TCI برای پایش خشک‌سالی در آرژانتین استفاده کردند. نتایج مطالعه نشان دادند که ۷۱٪ از تغییرات عملکرد محصول ذرت به میانگین

دما را در بخش‌های مرکزی گریت پلینزو ایالت کانزاس ایالات متحده مورد بررسی قرار دادند. رابطه مقادیر NDVI دو هفته‌ای با بارندگی کل دو هفته‌ای در همان دوره زمانی بررسی گردید و هم‌بستگی قابل توجه‌ای به‌دست آمد. نتایج نشان دادند که بین شروع بارندگی و پاسخ NDVI تأخیر زمانی یک تا دو هفته‌ای وجود دارد (۱۴).

در این تحقیق جو مانند گندم در مناطق مختلف که دارای شرایط آب و هوایی متفاوت می‌باشند رشد کرده و محصول تولید می‌نماید. مقاومت آن در برابر گرما بیش از گندم بوده و گیاهی است که برای رشد و نمو احتیاج به روزهای بلند دارد و در مناطقی که طول روز ۱۲ تا ۱۳ ساعت باشد، بهتر رشد می‌نماید. جو در هر دو نیم‌کره شمالی و جنوبی در اقلیم‌های مختلف کشت می‌گردد و در مقایسه با گندم مقاومت بیشتری به خشکی و بیماری‌ها دارد. در شرایط نامساعد محیطی و کمبود بارندگی، عملکرد آن بیشتر از گندم است. از آنجا که قیمت جو در بازار به مراتب پایین‌تر از گندم می‌باشد، کشت آن را به نقاط کم باران و خاک‌های فقیری که برای رشد و نمو گندم مساعد نیستند اختصاص می‌دهند. حداقل بارندگی موردنیاز آن نیز حدود ۲۵۰-۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. جو در مقابل تغییرات ارتفاع از سطح دریا نیز مقاومت زیادی دارد و تا ارتفاع ۴۰۰۰ متری به خوبی رشد و نمو کرده و محصول تولید می‌نماید. کمترین درجه حرارت برای تولید جوانه جو حدود ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد و دمای مناسب برای رشد آن ۲۰-۱۵ درجه سانتی‌گراد و حداکثر رشد در دمای ۳۱°C است. در مقایسه با سایر غلات، جو نسبت به شوری خاک، چه در مرحله جوانه‌زنی و چه در مراحل بعدی رشد، مقاوم‌تر است. البته درجه مقاومت واریته‌های جو در این مورد هم متفاوت و تابع ویژگی‌های ژنتیکی واریته‌ها است (۲، ۳ و ۶).

در اغلب مطالعات انجام شده جهت پیش‌خشک‌سالی و عملکرد رابطه یکی از شاخص‌های خشک‌سالی با عملکرد محصول مطالعه شده است. حال آن‌که در این پژوهش هدف این است که با استفاده از روش کلاسیک، رابطه چندین شاخص

شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در ماه‌های ژانویه و فوریه مربوط بود. استفاده از شاخص‌های VCI و TCI برای ارزیابی مشخصات مکانی، مدت و شدت خشک‌سالی مفید بود و رابطه خوبی بین این شاخص‌ها و داده‌های بارندگی به‌دست آمد (۱۱). وگت و همکاران ضمن بررسی وضعیت فعلی پیش‌خشک‌سالی در جهان و روند آینده آن، دو روش استفاده از داده‌های ماهواره‌ای یعنی استفاده از شاخص‌های گیاهی و مدل تعادل انرژی را در دو استان اندلس اسپانیا و سیسیل ایتالیا مورد توجه قرار داده‌اند. هر دو روش مورد مطالعه رابطه خوبی با شاخص اقلیمی SPI نشان دادند. این پژوهشگران مهم‌ترین مزیت استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای را گستردگی دامنه اطلاعات ماهواره‌ای و امکان تهیه نقشه از وضعیت خشک‌سالی اعلام کرده‌اند (۱۳).

هایم ضمن مروری بر شاخص‌های اقلیمی و شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور، مزایا و معایب هر یک از این شاخص‌ها را برشمرده و چگونگی تحول استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی را معرفی می‌نماید (۹).

سینگ و همکاران از شاخص وضعیت دمایی (TCI) حاصل از تصاویر AVHRR برای پیش‌خشک‌سالی در هندوستان استفاده کرده‌اند. ایشان اظهار می‌دارند که در دوره‌هایی که به‌طور غیرطبیعی مرطوب هستند مقادیر NDVI و VCI کم برآورد خواهند شد که می‌تواند به اشتباه نشانگر وقوع خشک‌سالی باشد. در چنین مواردی استفاده از شاخص TCI می‌تواند در تشخیص خشک‌سالی واقعی مفید واقع گردد (۱۲).

کارابولوت به بررسی رابطه پوششی گیاهی و الگوهای مختلف بارندگی در منطقه بلک هیلز آمریکا پرداخته است. ایشان اظهار می‌دارند که در بررسی رابطه بارندگی و NDVI باید ماه‌های قبل را نیز در نظر گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقادیر NDVI هم‌بستگی قوی‌تری را با بارندگی همان ماه به اضافه دو ماه قبل نسبت به بارندگی همان ماه و ماه قبل به تنهایی، نشان داده است (۱۰).

وانگ و همکاران پاسخ زمانی شاخص NDVI به بارندگی و

خشک‌سالی و پارامتر هواشناسی به‌طور هم‌زمان بر روی عملکرد محصول بررسی گردد.

مواد و روش‌ها

تحلیل رگرسیونی روشی است که جهت مطالعه روابط بین متغیرها و به‌ویژه نحوه وابستگی یک متغیر به متغیرهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. واژه رگرسیون، اغلب جهت رساندن مفهوم بازگشت به یک مقدار متوسط یا میانگین به‌کار برده می‌شود.

تحلیل رگرسیونی، تحلیلی جهت کمی نمودن ارتباط بین یک متغیر وابسته و یک یا چندمتغیر مستقل می‌باشد.

به‌طور کلی این تکنیک را می‌توان جهت دو مقصود اساسی به‌کار گرفت:

- پیش‌بینی متغیر وابسته بر مبنای مقادیر متغیرهای مستقل
- فهم نحوه ارتباط یا تأثیرگذاری متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته

رگرسیون چندمتغیری نیز روشی برای تحلیل مشارکت جمعی و فردی دو یا چندمتغیر مستقل در تغییرات یک متغیر وابسته است. جهت تعمیم رگرسیون برای مطالعه مسائلی که دارای تعدادی دلخواه متغیر مستقل است.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل

یکی از شاخص‌های آماری که برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از آن استفاده می‌شود، ضریب هم‌بستگی می‌باشد که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 (O_i - \bar{O})^2}}, \quad -1 \leq r \leq 1 \quad [1]$$

در رابطه فوق، r ضریب هم‌بستگی، P_i مقدار پیش‌بینی شده برای سال i ام، \bar{P} : متوسط مقادیر پیش‌بینی در دوره n ساله، O_i : مقدار مشاهده شده برای سال i ام و \bar{O} : متوسط مقادیر مشاهده شده در

دوره n ساله می‌باشند.

از آنجا که مقادیر ضریب هم‌بستگی همواره در بازه $[-1, 1]$ قرار می‌گیرند، قضاوت از روی این ضریب ساده است و ممکن است به‌نظر رسد که ضریب هم‌بستگی می‌تواند معیار مناسبی در ارزیابی مدل باشد. با این حال، بایستی توجه داشت که ضریب هم‌بستگی نمی‌تواند به تنهایی شاخص مناسبی برای ارزیابی مدل‌ها باشد. زیرا، ممکن است در یک مدل فرضی مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده دارای اختلاف فاحشی باشند ولی این اشتباهات به گونه‌ای باشد که از یک روند یک‌نواخت پیروی نماید. بنابراین، گرچه ضریب هم‌بستگی به خوبی نشان‌دهنده میزان هم‌آهنگی روند تغییرات مقادیر مشاهده شده نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد اما گویای تطابق آنها نیست.

شاخص‌های کمی دیگری که می‌توان در برآورد دقت مدل استفاده نمود، عبارت‌اند از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد انحراف جذر میانگین مربعات خطا از میانگین (%RMSE)، میانگین خطای اریبی (Mean Bias Error) (MBE) و درصد انحراف MBE از میانگین که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (C_i - \bar{M})^2}{n}} \quad [2]$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{M}} \times 100 \quad [3]$$

$$MBE = \frac{\sum (C_i - M_i)}{n} \quad [4]$$

$$\%MBE = \frac{MBE}{\bar{M}} \times 100 \quad [5]$$

که در آنها: C_i ، مقدار محاسبه شده، M_i مقدار مشاهده شده، \bar{M} میانگین حسابی داده‌های مشاهده شده و n ، تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار RMSE یا %RMSE سنج‌های برای میزان درستی و اعتبار مدل‌ها می‌باشد و هر چه مقدار آن کمتر باشد، دقت مدل بیشتر است. مقادیر مثبت MBE یا %MBE نشان‌دهنده بیش برآورد کردن مقادیر توسط مدل و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده کم برآورد کردن مدل می‌باشد.

جهت انتخاب مکان تحقیق، ابتدا اقدام به جمع‌آوری آمار عملکرد جو از استان آذربایجان شرقی گردید و سپس شهرهای

است (۷).

شاخص ناهنجاری بارش (RAI): چنانچه داده‌های بارندگی از میانگین دراز مدت بیشتر باشد یا ناهنجاری مثبت باشد، این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RAI = 3[(P - P_n)/(m - P_n)] \quad [6]$$

و اگر داده‌های بارندگی از میانگین دراز مدت کمتر باشد و یا ناهنجاری منفی باشد رابطه به صورت زیر است:

$$RAI = -3[(P - P_n)/(x - P_n)] \quad [7]$$

P_n میانگین دراز مدت بارندگی و m میانگین ۱۰ مورد از بزرگ‌ترین مقادیر بارش اتفاق افتاده در دوره مطالعاتی و x میانگین ۱۰ مورد از کمترین مقادیر بارش اتفاق افتاده در دوره مطالعاتی می‌باشد (۱).

شاخص استاندارد شده بارش (SPI) (در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ و ۹ و ۱۲ و ۲۴ ماهه و با داده‌های بارندگی از سال ۱۹۷۲ محاسبه شده است (۱)).

شاخص رطوبتی شاشکو (md): از نسبت بین بارش بر فشار بخار آب هوا به هکتوپاسکال در هر سال محاسبه شده است (۷).
شاخص ترانسو (I_H) تغییر یافته: از نسبت متوسط بارش سالانه بر متوسط تبخیر سالانه حاصل می‌شود (۷).

پارامترهای هواشناسی به کار گرفته شده

پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق که در دوره رشد محصول در سال‌های زراعی مربوطه تعیین شده‌اند، عبارت‌اند از: بارندگی، میانگین دمای ماکزیمم، میانگین دمای مینیمم، میانگین دمای متوسط، مجموع دماهای بیش از $10^{\circ}C$ ، تبخیر، فشار بخار آب هوا، متوسط سرعت باد و تعداد ساعت‌های آفتابی و رطوبت نسبی (تمامی این پارامترها از آمار روزانه استخراج شده‌اند).

نتایج

(۱) بررسی نرمال بودن و اثر هم‌راستایی (اثر متقابل)

بر اساس فرض اولیه نرمال بودن پارامترهای مورد استفاده در

تبریز و میانه، به علت تفاوت آب و هوایی و پوشش دادن بخش‌های مرکزی و جنوبی استان و دارا بودن آمار مکفی عملکرد، جهت مقایسه انتخاب شدند. در این تحقیق از آمار هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک زیر نیز استفاده گردید:

۱- ایستگاه تبریز با دوره آماری ۳۰ ساله

۲- ایستگاه‌های تبریز و میانه با دوره آماری ۱۷ ساله

قابل ذکر است که شهر تبریز در ۳۸ درجه عرض شمالی و ۴۶ درجه طول شرقی با ارتفاع متوسط ۱۳۵۱/۴ متر از سطح دریا و در ناحیه سردسیر استان واقع است که در مسیر بادهای مرطوب قرار دارد و شهر میانه در ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی در ارتفاع ۱۱۰۰ متری از سطح دریا و در ناحیه معتدل واقع شده است. با توجه به دوره رشد محصول جو پاییزه در شهرستان تبریز که در اواخر مهرماه هر سال کشت و در دهه اول تیر ماه سال بعد برداشت می‌شود، طبق ماه‌های میلادی این دوره از دهم اکتبر هر سال لغایت سی‌ام ژوئن سال بعد، و در شهرستان میانه نیز این دوره از دهم اکتبر هر سال لغایت ۱۵م ژوئن سال بعد، به‌طور پیوسته، در هر سال زراعی در نظر گرفته شده است. شکل ۱ نیز پراکنش شهرها و ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی را در استان آذربایجان شرقی نشان می‌دهد.

شاخص‌های خشک‌سالی محاسبه شده

شاخص درصد از نرمال (PNPI) یا (E): از تقسیم بارندگی به بارش نرمال حاصل می‌شود (۱).

شاخص بارندگی سالانه استاندارد (SIAP): از تقسیم تفاضل بارش در هر سال از میانگین بلندمدت آن بر انحراف استاندارد بارش حاصل می‌شود (۱).

شاخص هیدروترمال سلیمانینف (HT) تغییر یافته: از تقسیم مجموع بارش ماهانه بر حاصل ضرب مجموع دماهای بیش از ده درجه ضرب در ضریب ۰/۱ حاصل می‌شود (۷).

شاخص نگوین (K_m): از تقسیم تبخیر تعرق سالانه بر بارش سالانه حاصل می‌شود که در این‌جا به دلیل در دسترس نبودن آمار روزانه تبخیر تعرق از آمار روزانه تبخیر استفاده شده

ایستگاه‌های کليمتولوژی



ایستگاه‌های سینوپتیک



شکل ۱. پراکنش شهرها و ایستگاه‌های سینوپتیک و کليمتولوژی استان آذربایجان شرقی

روابط چندمتغیره را برای این دو شهر نشان می‌دهند. همان‌طور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود بیشترین تأثیر را در حالت دیم، بارندگی و ساعات آفتابی و شاخص نگوین و در حالت آبی، سرعت متوسط با دو تبخیر بر عملکرد دارند و شاخص‌های خشک‌سالی با عملکرد آبی روابط چندانی ندارند که منطقی به نظر می‌رسد. با توجه به جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود که ضرایب هم‌بستگی در مدل‌های دیم ۳۰ ساله که تنوع واریته‌ها بیشتر شده کمتر از ۱۷ سال می‌باشد و پایین بودن ضرایب هم‌بستگی ممکن است به دلیل مختلف بودن واریته‌های جو در طول ۱۷ یا ۳۰ سال باشد.

با توجه به جداول ۳ و ۴ درمی‌یابیم که روابط چندمتغیره با پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی با عملکرد دیم رابطه بهتری دارند و در این حالت نیز ضرایب هم‌بستگی در مدل‌های دیم ۳۰ ساله که تنوع واریته‌ها بیشتر شده کمتر از ۱۷ ساله می‌باشد.

بررسی‌های رگرسیونی، ابتدا تمامی پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی و عملکردهای جودیم و آبی جهت نرمال بودن بررسی می‌کنند و این نتیجه حاصل شد که تمامی آنها از فرم نرمال تبعیت شدند. اثر هم‌راستایی پارامترها نیز برهم با ضریب هم‌بستگی پیرسون و مقدار P (به منظور تعیین معنی‌دار بودن یا نبودن ضریب پیرسون) بررسی شد تا این که از تشدید اثر برخی پارامترها بر هم و بالا بردن مصنوعی ضریب تبیین جلوگیری شود، و پارامترها و شاخص‌هایی که بر هم اثر متقابل قابل توجه داشتند، یک‌جا آورده نشدند.

۲) بررسی مدل‌های آماری کلاسیک (هم‌بستگی یک متغیره و چندمتغیره)

نتایج ضرایب تبیین این مدل‌ها در جداول ۱ تا ۴ آورده شده است. جداول ۱ و ۲ ضرایب تبیین روابط یک متغیره بین عملکرد دیم و آبی را به ترتیب برای تبریز و میانه و جداول‌های ۳ و ۴

جدول ۱. ضرایب تبیین روابط یک متغیره بین عملکرد دیم و آبی و شاخص‌های خشک‌سالی و پارامترهای هواشناسی در تبریز با دوره آماری ۳۰ سال (۱۹۷۴ الی ۲۰۰۴)

عملکرد جو آبی (استانداردشده)	عملکرد جو دیم (استاندارد شده)	پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی
R2 = 0.113	R2 = 0.1898	دمای فعال بیش از ۱۰ C
×	R2 = 0.3486	بارندگی
R2 = 0.1942	×	رطوبت نسبی
R2 = 0.6137	×	سرعت متوسط باد (نات)
×	R2 = 0.2719	تعداد ساعات آفتابی
R2 = 0.1797	R2 = 0.1342	متوسط دمای مینیمم
R2 = 0.1299	×	متوسط دمای ماکزیمم
R2 = 0.1608	×	متوسط دمای میانگین
R2 = 0.5602	×	تبخیر
×	×	فشار بخار آب
×	R2 = 0.3103	شاخص هیدروترمال HT
×	R2 = 0.2969	شاخص رطوبتی ششکو Md
R2 = 0.2296	R2 = 0.471	شاخص نگوین K
×	×	شاخص ترانسو Ih
×	R2 = 0.3486	شاخص بارندگی SIAP
×	R2 = 0.3486	شاخص درصد از نرمال PNPI
×	R2 = 0.3571	شاخص ناهنجاری بارش RAI
×	R2 = 0.2126	شاخص SPI 3
×	×	شاخص SPI 6
×	×	شاخص SPI 9
×	×	شاخص SPI 12
×	×	شاخص SPI 24

جدول ۲. ضرایب تبیین روابط یک متغیره بین عملکرد دیم و شاخص‌های خشک‌سالی و پارامترهای هواشناسی درمیانه و تبریز با دوره آماری ۱۷ سال (۱۹۸۷ الی ۲۰۰۴)

پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی	تبریز (۱۷ ساله) (دیم)	میانه (۱۷ ساله) (دیم)
دمای فعال بیش از $10^{\circ}C$	$R2 = 0.2958$	$R2 = 0.3087$
بارندگی	$R2 = 0.7578$	$R2 = 0.4825$
رطوبت نسبی	$R2 = 0.2661$	×
سرعت متوسط باد (نات)	×	×
تعداد ساعات آفتابی	$R2 = 0.4266$	$R2 = 0.5582$
متوسط دمای مینیمم	×	$R2 = 0.4585$
متوسط دمای ماکزیمم	×	×
متوسط دمای میانگین	×	×
تبخیر	×	$R2 = 0.4585$
فشار بخار آب	$R2 = 0.3149$	$R2 = 0.4426$
شاخص هیدروترمال HT	$R2 = 0.7211$	$R2 = 0.4963$
شاخص رطوبتی ششکو Md	$R2 = 0.6992$	$R2 = 0.4602$
شاخص نگوین K	$R2 = 0.6815$	×
شاخص ترانسو Ih	$R2 = 0.6969$	×
شاخص بارندگی استاندارد SIAP	$R2 = 0.75781$	$R2 = 0.4825$
شاخص درصد انحراف از نرمال PNPI	$R2 = 0.7578$	$R2 = 0.4825$
شاخص ناهنجاری بارش RAI	$R2 = 0.7588$	$R2 = 0.5011$
شاخص SPI 3	$R2 = 0.5184$	$R2 = 0.4054$
شاخص SPI 6	$R2 = 0.361$	×
شاخص SPI 9	$R2 = 0.4072$	×
شاخص SPI 12	$R2 = 0.394$	×
شاخص SPI 24	$R2 = 0.291$	×

جدول ۳. روابط چندمتغیره بین عملکرد دیم و شاخص‌های خشک‌سالی و پارامترهای هواشناسی در تبریز با دوره آماری ۳۰ سال (۱۹۷۴ الی ۲۰۰۴)

رابطه معنی‌دار در سطح ۹۹٪ با :	عملکرد جو دیم (استاندارد شده)	عملکرد جو آبی (استاندارد شده)
پارامترهای هواشناسی	$Y(z) = -2.33 + 0.0107 P + 0.0737 T_{min} - 0.00115 Sun + 0.00168 E$ R-Sq = 57.7% R-Sq(adj)=49.6%	$Y(abi) = -4.45 + 0.570 wind + 0.00135 E + 0.101 T_{min}$ R-Sq = 72.7% R-Sq(adj)=69.5%
شاخص‌های خشک‌سالی	$Y(z) = 0.639 - 1.36 I_h + 0.252 RAI + 0.0170 SPI_{24}$ R-Sq = 47.8% R-Sq(adj)=41.8%	$Y(abi) = -0.826 + 0.223 K - 0.0183 SPI_{24}$ R-Sq = 23.2% R-Sq(adj)=17.3%
پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی باهم	$Y(z) = 2.86 + 0.236 RAI - 1.11 I_h + 0.0615 T_{min} - 0.00162 Sun + 0.0131 SPI_{24}$ R-Sq = 65.4% R-Sq(adj)=56.3%	$Y(abi) = -5.87 - 0.0171 SPI_{24} + 0.00525 P + 0.626 Wind + 0.00133 E + 0.0926 T_{min}$ R-Sq = 78.4% R-Sq(adj)=72.7%

جدول ۴. روابط چندمتغیره بین عملکرد دیم با شاخص‌های خشک‌سالی و پارامترهای هواشناسی در میانه و تبریز با دوره آماری ۱۷ سال (۱۹۸۷ الی ۲۰۰۴)

رابطه معنی‌دار در سطح ۹۹٪ با :	تبریز	میانه
پارامترهای هواشناسی	$Y(Z) = -8.91 + 0.0100 P + 0.0919 RH + 0.250 wind$ R-Sq = 64.4% R-Sq(adj)=56.2%	$Y(Z) = -3.32 + 0.0124 P + 0.672 wind - 0.000974 sunshine$ R-Sq = 75.0% R-Sq(adj)=69.2%
شاخص‌های خشک‌سالی	$Y(Z) = 2.07 - 0.466 K + 0.0369 SPI_{24}$ R-Sq = 64.8% R-Sq(adj)=59.8%	$Y(Z) = -3.02 + 1.25 HT + 0.159 Md + 0.22 K$ R-Sq = 55.2% R-Sq(adj)=44.9%
پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی باهم	$Y(Z) = -3.52 + 0.0641 RH + 0.376 wind - 0.487 K + 0.0374 SPI_{24}$ R-Sq = 76.6% R-Sq(adj)=68.8%	$Y(Z) = 0.02 - 0.00103 T_{>=10} + 0.00981 P + 0.658 wind - 0.00109 sunshine - 0.403 K$ R-Sq = 76.8% R-Sq(adj)=66.3%

بوده که جهت آزمون آنها از دیگر سنجه‌های آماری استفاده گردید. نتایج این سنجش در جدول ۶ آمده است. جهت انتخاب بهترین مدل‌ها، براساس بیشترین ضریب هم‌بستگی و کمترین RMSE و MBEها به تمامی حالات از

۳) مقایسه کلیه مدل‌ها
کلیه مدل‌های آماری در جدول ۵ جهت مقایسه و رتبه‌بندی نام‌گذاری شده‌اند. مدل‌های مشخص شده با رنگ خاکستری نسبت به سایر مدل‌ها، دارای ضریب رگرسیونی معادله بالاتری

جدول ۵. نام گذاری کلیه مدل‌های آماری

میان‌ه (۱۷ساله)	تبریز (۱۷ساله)	تبریز (۳۰ساله) (آبی)	تبریز (۳۰ساله) (دیم)	مدل‌های مورد بررسی
3-1	2-1	1-1-A	1-1-D	دمای فعال بیش از ۱۰ درجه
3-2	2-2	1-2-A	1-2-D	بارندگی
3-3	2-3	1-3-A	1-3-D	رطوبت نسبی
3-4	2-4	1-4-A	1-4-D	سرعت متوسط باد (نات)
3-5	2-5	1-5-A	1-5-D	تعداد ساعات آفتابی
3-6	2-6	1-6-A	1-6-D	متوسط دمای مینیمم
3-7	2-7	1-7-A	1-7-D	متوسط دمای ماکزیمم
3-8	2-8	1-8-A	1-8-D	متوسط دمای میانگین
3-9	2-9	1-9-A	1-9-D	تبخیر
3-10	2-10	1-10-A	1-10-D	فشار بخار آب
3-11	2-11	1-11-A	1-11-D	شاخص هیدروترمال HT
3-12	2-12	1-12-A	1-12-D	شاخص رطوبتی ششکو Md
3-13	2-13	1-13-A	1-13-D	شاخص نگوین K
3-14	2-14	1-14-A	1-14-D	شاخص ترانسو Ih
3-15	2-15	1-15-A	1-15-D	شاخص بارندگی SIAP
3-16	2-16	1-16-A	1-16-D	شاخص درصداژنرمال PNPI
3-17	2-17	1-17-A	1-17-D	شاخص ناهنجاری بارش RAI
3-18	2-18	1-18-A	1-18-D	شاخص SPI 3
3-19	2-19	1-19-A	1-19-D	شاخص SPI 6
3-20	2-20	1-20-A	1-20-D	شاخص SPI 9
3-21	2-21	1-21-A	1-21-D	شاخص SPI 12
3-22	2-22	1-22-A	1-22-D	شاخص SPI 24
3-23	2-23	1-23-A	1-23-D	پارامترهای هواشناسی
3-24	2-24	1-24-A	1-24-D	شاخص‌های خشک‌سالی
3-25	2-25	1-25-A	1-25-D	پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشک‌سالی

جدول ۶. مقایسه مدل‌های منتخب با سنج‌های آماری

MBE (test)%	MBE (test)	RMSE (test)	R(test)	مدل‌های پیش‌بینی عملکرد جو
-۰/۶۳۲	۰/۲۳۴	۰/۵۶	۰/۷۳	1-25-D
-۰/۰۶۷	۰/۰۵۶	۰/۳۱۶	۰/۱	1-23-A
-۰/۳۸۳	۰/۳۱۸	۰/۳۱۹	۰/۵۲۹	1-25-A
-۶/۵۸	۰/۷۹	۰/۸۰۲	۰/۷۸۹	2-2
-۲/۱۱۷	۰/۲۵۴	۰/۶۳۴	۰/۶۹۵	2-11
-۲/۹	۰/۳۴۸	۰/۶۱۲	۰/۸۶۷	2-17
-۱/۲۵	۰/۱۵	۰/۸۱۶	۰/۹۳۷	2-25
-۰/۵۱۶	۰/۰۹۸	۰/۷۳۳	۰/۸۱۹	3-23
-۰/۱۸۹	۰/۰۳۶	۰/۷۲۴	۰/۷۹۵	3-25

جدول ۷. ارزش‌گذاری مدل‌ها جهت انتخاب مدل بهینه

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد جو	R (tset)	RMSE (test)	MBE (test)	جمع ارزش‌ها	پارامترهای متشکله در مدل‌های بهینه	بهترین مدل به ترتیب اولویت
1-25-D	۶	۳	۵	۱۴	T>=10 P wind sun K	3-25
1-23-A	۹	۱	۲	۱۲	wind E Tmin	1-23-A
1-25-A	۸	۲	۷	۱۷	P wind sun	3-23
2-2	۵	۸	۹	۲۲	RAI lh SPI24 Sun Tmin	1-25-D
2-11	۷	۵	۶	۱۸	RH wind K SPI24	2-25
2-17	۲	۴	۸	۱۴	RAI	2-17
2-25	۱	۹	۴	۱۴	SPI24 P Wind E Tmin	1-25-A
3-23	۳	۷	۳	۱۳	HT	2-11
3-25	۴	۶	۱	۱۱	P	2-2

بهترین تا بدترین آنها به ترتیب از ۱ تا ۹ ارزش داده شد و با جمع کردن این ارزش‌ها، مدل‌ها رتبه‌بندی گردید. برای این اساس کمترین حاصل جمع به عنوان بهترین مدل و بیشترین حاصل جمع به عنوان آخرین مدل مشخص شد. نتایج این رتبه‌بندی در جدول ۷ آورده شده است و حاکی از آن است که مدل‌های چندمتغیره بهتر از مدل‌های تک متغیره می‌باشند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود از ۹ مدل بهینه ارائه شده ۷ مدل مربوط به عملکرد دیم می‌باشند و مدل بهینه، مدل چندمتغیره پارامترها و شاخص‌ها با عملکرد دیم است.

نتیجه‌گیری

بیشتر بودن تأثیر بارندگی در میان پارامترهای هواشناسی بر عملکرد دیم منطقی به نظر می‌رسد. پایین بودن ضرایب هم‌بستگی ممکن است به دلیل مختلف بودن وارته‌های جو در طول ۱۷ یا ۳۰ سال باشد چنان که به نظر می‌رسد به همین دلیل، ضرایب هم‌بستگی در مدل‌های دیم ۳۰ ساله که تنوع وارته‌ها بیشتر شده کمتر از ۱۷ سال می‌باشد.

بهترین مدل کلاسیک، مدل چندمتغیره بین پارامترهای متوسط سرعت باد، بارش، مجموع دمای بیش از ۱۰ درجه، تعداد ساعات آفتابی، شاخص نگوین و عملکرد جو دیم در میانه با دوره آماری ۱۷ سال می‌باشد که پارامترهای سرعت متوسط باد و شاخص خشک‌سالی نگوین دارای تأثیر بیشتری بر عملکرد می‌باشند. جهت پیش‌بینی عملکرد محصول، مدل‌های چندمتغیره (شاخص‌های خشک‌سالی و پارامترهای هواشناسی توأم) بهتر از مدل‌های یک متغیره می‌باشند. از بین شاخص‌های مطالعه شده، شاخص‌های نگوین، ترانسو تغییر یافته، استاندارد شده بارش ۲۴ ماهه و ناهنجاری بارش بیشترین اثر را بر عملکرد دارند. همان‌طور که در مناطق شمالی مکزیک بهترین ضریب تبیین SPI-x و عملکرد لوییا و ذرت مربوط به SPI-3 با ضرایب (۰/۵۴- و ۰/۲۶) بود، این‌جا نیز در بین شاخص‌های SPI و عملکرد جو، بهترین ضریب تبیین مربوط به SPI-3 با ضرایب (۰/۵۲ و ۰/۴۱) در دو شهر تبریز و میانه می‌باشد.

منابع مورد استفاده

۱. خلیلی، ع. و ج. بذرافشان. ۱۳۸۲. ارزیابی کارایی برخی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در نمونه‌های مختلف اقلیمی ایران. مجله نیوار ۴۸: ۷۹-۹۳.
۲. خدابنده، ن. ۱۳۶۹. غلات. انتشارات دانشگاه تهران.
۳. عطایی، م. ۱۳۵۷. زراعت خصوصی غلات (جلد دوم). انتشارات دانشگاه تهران.
۴. کاظمی اربط، ح. ۱۳۷۴. زراعت خصوصی غلات (جلد اول). مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
۵. کمالی، غ. و ل. خزانه‌داری. ۱۳۸۱. تحلیل خشک‌سالی اخیر مشهد با به‌کارگیری برخی از شاخص‌های خشک‌سالی. مجله نیوار ۴۴، ۴۵: ۷۵-۹۳.
۶. معنون حسینی، ن. ۱۳۸۰. زراعت غلات (گندم، جو، برنج و ذرت). نشر نقش مهر.
7. Boken, K., P. Cracknell and L. Heathcote. 2005. Monitoring and predicting Agricultural Drought. First. ed., Oxford University Press Inc., London.
8. Gitelson, A.A., F. Kogan, E. Zakarin, L. Spivak and L. Lebed. 1998. Using AVHRR data for quantitative estimation of vegetation conditions: Calibrating and validation. Adv. Space Res. Vol. 22 (5): 673-676.
9. Heim, R.R., 2002. A review of twentieth century drought indices used in the United States. Bull. Am. Meteorol. Soc. 1149-1165.
10. Karabulut, M. 2003. An examination of relationships between vegetation and rainfall using maximum value composite AVHRRNDVI dat. Turk. J. Bot. 27: 93-101.
11. Seiler, R.A., F. Kogan, and J. Sullivan. 1998. AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. Adv. Space Res. 21(3): 481-484.
12. Singh R.P., S. Roy, and F. Kogan. 2003. Vegetation and temperature condition indices from noaaavhrr data for drought monitoring over India. Int. J. Remote Sens. 24 (22): 4393-4402.
13. Vogt, J.V., S. Niemeyer, F. Somma, I. Beaudin and A.A. Viau. 2000. Drought monitoring from space. In: Drought and drought mitigation in Europe, 167-183.
14. Wang, J., P. M. Rich and P. Price. 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central great plains, J. Remote Sen. 24(11): 2345-2364.
15. Yang, X. and G. Tian. 1991. A remote sensing model for wheat drought monitoring. In: proceedings of the 12th Asian conference on Remote sensing, Association of Asian Remote Sensing, Singapore.