

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عملکرد محصولات دیمی گندم، جو و یونجه با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان و

برنامه‌ریزی ژنتیک

سولماز پناهی^۱، سعید صمدیان فرد*^۲، امیرحسین ناظمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.samadian@tabrizu.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم، افزایش دمای جهانی، بحران آب و رشد جمعیت جهان موجب شده است که تأمین غذای مردم دنیا تبدیل به یک چالش در بین پژوهشگران شود. برهمین اساس پیش‌بینی و شبیه‌سازی تولیدات گیاهی متناسب با شرایط آب و هوایی، امری ضروری است. در تحقیق حاضر، ارتباط عوامل اقلیمی و شاخص‌های خشکسالی با میزان تولید گیاهان گندم، جو و یونجه که به صورت دیم زیر کشت قرار گرفته‌اند، در سه منطقه در استان آذربایجان شرقی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، برای هر یک از متغیرهای دما، بارندگی، تبخیر-تعرق و شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI، بازه‌های زمانی سه تا نه ماهه در دوره زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ در نظر گرفته شد و با استفاده از روش‌های داده محور رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)، مقدار تولید سه گیاه مذکور پیش‌بینی گردید. علاوه بر این، دقت روش‌های مذکور در پیش‌بینی عملکرد محصولات کشت دیم، با استفاده از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در شهر تبریز برای محصول یونجه روش GP با $RMSE=0.17$ ($kg\ ha^{-1}$)، در شهر مراغه برای محصول یونجه روش SVR با $kg\ ha^{-1}$ و در شهر سراب برای محصول جو روش SVR با $RMSE=0.20$ ($kg\ ha^{-1}$) پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه کرده‌اند. می‌توان بیان داشت استفاده از عوامل آب و هوایی و شاخص‌های خشکسالی در دوره‌های زمانی پاییز-زمستان-بهار تاثیر بسزایی بر افزایش دقت روش‌های داده محور در پیش‌بینی عملکرد محصولات دیم دارد.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هواشناسی، دیم، کاهش تولید، محاسبات نرم، مدل‌سازی.

Modeling the Yield of Rain-fed Wheat, Barley and Alfalfa Products Using Support Vector Regression and Genetic Programming

S Panahi¹, S Samadianfard^{2*}, AH Nazemi³

Accepted: September 23, 2019

Received: March 16, 2021

1- MSc., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

2- Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

3- Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: s.samadian@tabrizu.ac.ir

Abstract

Climate change, the rise of global temperature, the water crisis, along with the growth of the world's population have made the world's food supply a challenge for researchers. For this reason, it is necessary to predict and simulate plant products in accordance with the climatic conditions. In this study, the relationships of meteorological parameters and standard precipitation index (SPI) and reconnaissance drought index (RDI) with yields of the rain-fed wheat, barley and alfalfa plants were studied in three regions in East Azerbaijan province. For each of the temperature, rainfall, evapotranspiration and SPI and RDI parameters, the time intervals of three to nine months were considered in the time period from 2004 to 2014. Then, using support vector regression (SVR) and genetic and programming (GP), the production amounts of the three studied plants were predicted. In addition, the accuracy of the mentioned methods in predicting the performance of dry crop products was evaluated using root mean squared error (RMSE) and mean absolute error (MAE) statistics. Results showed that in Tabriz for alfalfa, GP method with $RMSE=0.17$ ($kg\ ha^{-1}$), in Maragheh for the alfalfa, SVR with $RMSE=0.56$ ($kg\ ha^{-1}$) and in Sarab for barely, SVR method with $RMSE=0.20$ ($kg\ ha^{-1}$) had more precise predictions. It can be stated that the use of climatic factors and drought indicators of autumn, winter and spring seasons have significant effects on increasing the accuracy of soft computing techniques in predicting the performance of rain-fed products.

Keywords: Meteorological parameters, Modeling, Production reduction, Rainfed products, Soft computing.

مقدمه

کند تا بهترین شرایط را برای مدیریت محصولات خود در این زمینه، با توجه به شرایط آب و هوایی، ارزیابی کنند (باتیستی و همکاران ۲۰۱۷). به گزارش پاداکندلا (۲۰۱۶)، با گرمایش زمین در ۵۰ سال اخیر تولید محصولات به شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفته‌اند. از طرفی گیاهان مختلف به افزایش دما و کاهش بارندگی واکنش‌های متفاوتی داشتند. خشکسالی کشاورزی عمدتاً در نتیجه کمبود بارندگی، اختلاف بین تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی و همچنین کمبود آب خاک رخ می‌دهد. بنابراین، تأثیر خشکسالی با توجه به شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های بیولوژیک گیاهان و

با رشد روز افزون جمعیت جهان تقاضا برای تأمین مواد غذایی افزایش می‌یابد و از طرفی افزایش تولید محصولات کشاورزی در مناطقی که آبیاری گسترش یافته است، باعث تخریب محیط‌زیست می‌شود (کانگ و همکاران ۲۰۰۹). استفاده پایدار از اراضی و مناطقی که تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار دارند، نیازمند آگاهی از پویایی سیستم است. بنابراین، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مناسب به منظور بررسی روند تغییرات این سیستم‌های پیچیده در آینده است (تیتجن و جلس ۲۰۰۷). مدل‌های شبیه‌سازی محصول می‌تواند به محققین، سازمان‌های دولتی و تولیدکنندگان کمک

تأثیر دما بر گندم زمستانه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دما باعث تغییر معنی داری در مراحل رشد و مصرف آب گندم زمستانه در مناطق نیمه‌خشک شمال‌غربی چین می‌شود. ولی‌زاده و همکاران (۲۰۱۴)، در منطقه سیستان و بلوچستان با مدل‌سازی‌های مختلف روی گیاه گندم به این نتیجه رسیدند که شرایط آب و هوایی و خشکسالی‌ها موجب کاهش سطح پوشش گیاه و محصول شده و با ادامه‌ی این روند در آینده نیز کاهش خواهد یافت. با توجه به یافته‌های این محققین از بین عوامل آب و هوایی بررسی شده، افزایش دما بیش‌ترین تأثیر را در کاهش محصول در این منطقه دارد. همچنین، در تحقیقی که در کشور چین توسط هوئی و همکاران (۲۰۱۳)، با توجه به تغییرات آب و هوایی و افزایش دما همراه با کاهش بارندگی انجام گرفت، مشخص گردید که با تشدید سرما در اوایل بهار و خشکسالی در طول دوره‌ی رشد گندم، تولیدات غلات به‌خصوص گیاه گندم کاهش یافته است. طبق نتایج به دست آمده از پژوهش رحمانی و همکاران (۲۰۰۸) به منظور پیش‌بینی عملکرد محصول، دقت مدل‌های چند متغیره (شاخص‌های خشکسالی و پارامترهای هواشناسی) بیشتر از مدل‌های تک متغیره (استفاده از یک پارامتر برای پیش‌بینی) ارزیابی شد. در پژوهشی دیگر، زارع ابیانه (۲۰۱۲) عملکرد محصولات دیم گندم، جو، هندوانه و نخود را در دو منطقه بیرجند و مشهد و با استفاده از ده پارامتر هواشناسی و هفت شاخص خشکسالی در قالب سه ساختار اطلاعاتی در ورودی مدل‌های رگرسیونی چند متغیره به انجام رساند. نتایج پژوهش مذکور در پیش‌بینی عملکرد محصولات حاکی از برتری مدل چند متغیره با ساختار اطلاعاتی همه عوامل هواشناسی و شاخص‌های خشکسالی بود. نوسانات بازده تولیدات گیاهی محصولات دیم در ارتباط با عوامل آب و هوایی سبب گردیده تا شناخت معیارهای اقلیمی موثر بر میزان محصول و با تهیه مدل‌هایی برای پیش‌بینی، برنامه‌ریزی‌های لازم را برای

مراحل رشد آن‌ها متفاوت است (ارشد و همکاران ۲۰۱۲). شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۱ به علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه، و قابلیت بسیار زیاد در مقایسه مکانی، به عنوان مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل خشکسالی شناخته می‌شود (مساعدی و قبایی ۲۰۱۱). علاوه بر این، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)^۲ توسط ساکرینس و ونگلیس (۲۰۰۴ و ۲۰۰۵) معرفی شده است که بر مبنای بارندگی و تبخیر و تعرق محاسبه می‌شود (الاقیب و الحاق ۲۰۱۱). بنایان و همکاران (۲۰۱۰)، ارتباط بین شاخص خشکی و عملکرد محصولات گندم و جو در شرایط دیم را برای استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی و اثر شاخص‌های اقلیمی را بررسی نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها ارتباط معنی‌داری بین شاخص خشکی و عملکرد محصولات گندم و جو در مناطق مورد بررسی مشاهده شد، به نحوی که این ارتباط برای محصول جو قابل ملاحظه بود. در مطالعه‌ای دیگر، مساعدی و همکاران (۲۰۱۵) عملکرد گندم و جو دیم را بر اساس شاخص‌های خشکسالی و متغیرهای هواشناسی مدل‌سازی کردند. در این تحقیق ارتباط بین عملکرد محصولات گندم و جو دیم با متغیرهای آب و هوایی دمای حداقل، دمای میانگین، دمای حداکثر، بارندگی، تبخیر و تعرق و شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI در ایستگاه‌های بجنورد، مشهد و بیرجند مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر درجه حرارت و مقدار آب مورد نیاز گیاه بر عملکرد محصول توسط زیمرمن و همکاران (۲۰۱۷) در چند منطقه از اروپا مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج بررسی‌ها نشان داد به طور کلی تغییرات نسبی در تولید محصولات با محدودیت آب به دلیل تغییرات آب و هوایی افزایش یافته است. ژیاو و همکاران (۲۰۱۰)

1. Standardized precipitation index
2. Reconnaissance Drought index

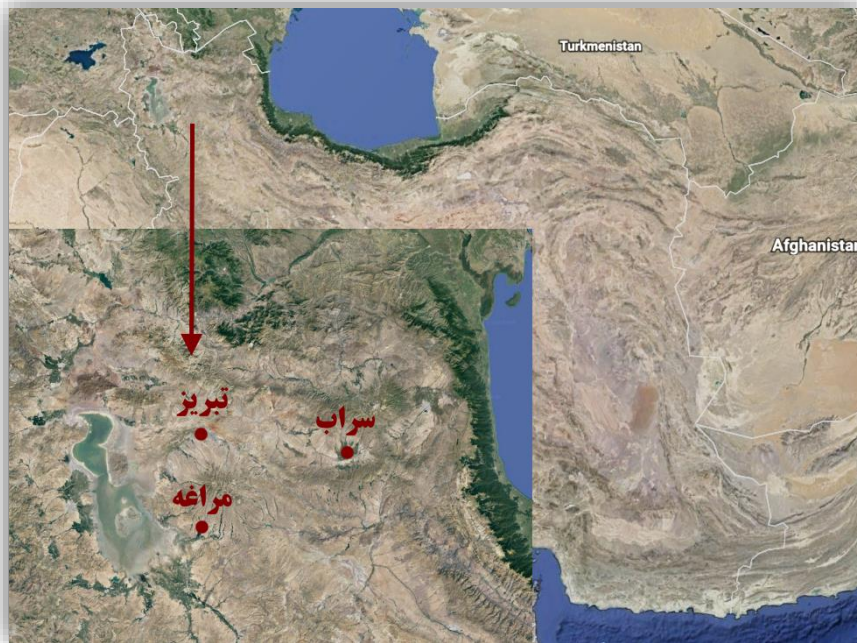
(شکل ۱). شهرستان تبریز در مرکز استان آذربایجان شرقی با داشتن عرض جغرافیایی $38^{\circ}05'$ و طول جغرافیایی $46^{\circ}17'$ ، در ارتفاع ۱۳۶۱ متری از سطح دریا واقع شده است. میانگین بارش شهر تبریز با توجه به داده‌های ده ساله‌ی مورد مطالعه در حدود ۲۸۲ میلی‌متر است. همچنین، شهرستان سراب واقع در جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی با ارتفاع ۱۶۸۲ متر از سطح دریا، دارای طول جغرافیایی $47^{\circ}23'$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ}56'$ است. میانگین بارش این شهرستان برابر ۲۴۴ میلی‌متر می‌باشد. علاوه بر این، شهرستان مراغه با طول جغرافیایی $46^{\circ}12'$ ، عرض جغرافیایی $37^{\circ}21'$ و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۴۴ متر در استان آذربایجان شرقی واقع شده و از میانگین بارش ۲۹۱ میلی‌متری برخوردار است.

تامین نیازهای مرتبط انجام داد. با توجه به اینکه تاکنون مطالعه عمده‌ای در مورد بررسی و مدل‌سازی عملکرد محصولات دیم در استان آذربایجان شرقی به انجام نرسیده است، در این پژوهش سعی گردید تا با استفاده از روش‌های محاسبات نرم، اقدام به مدل‌سازی عملکرد محصولات گندم، جو و یونجه و بررسی توانایی روش‌های مذکور گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان آذربایجان شرقی یک منطقه سردسیر و کوهستانی است و از لحاظ تقسیم‌بندی‌های اقلیمی جزو مناطق نیمه‌خشک به حساب می‌آید، ولی به علت تنوع توپوگرافیکی از اقلیم‌های متفاوتی برخوردار است



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی.

عملکرد آن‌ها برای داده‌های موجود از سال ۱۳۸۳-۱۳۹۳ در سه شهر مورد مطالعه ارائه شده است. لازم

در جدول ۱ مقادیر میانگین تولید کل سه محصول گندم، جو و یونجه و سطح زیر کشت و

به ذکر است که داده‌های مذکور از سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی اخذ گردیدند.

جدول ۱- سطح زیر کشت، تولید کل و عملکرد گندم، جو و یونجه دیم در مناطق مورد مطالعه.

شهر	محصول	عملکرد (kg ha ⁻¹)	تولید (Ton)	سطح (ha)
تبریز	گندم	۱۱۲۷	۴۵۲۶	۴۰۱۶
	جو	۸۸۳	۱۲۷۱	۱۴۴۰
	یونجه	۲۰۸۰	۳۰۵۹	۱۴۷۱
مراغه	گندم	۱۲۶۵	۳۷۷۶۰	۲۹۸۵۰
	جو	۸۵۹	۷۳۴	۸۵۵
	یونجه	۱۸۷۴	۲۵۲۰	۱۳۴۵
سراب	گندم	۷۸۵	۱۵۷۴۲	۲۰۰۵۴
	جو	۵۹۷	۲۹۶۶	۴۹۶۹
	یونجه	۲۴۲۲	۶۰۳۳	۲۴۹۱

روش فائو- پنمن- مانتیث

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص SPI توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳) جهت تعیین دوره‌های خشکسالی و ارزیابی شدت آن تدوین شد. از آنجایی که کمبود بارش در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت بر روی رطوبت خاک و در مقیاس زمانی بلند مدت بر روی رودخانه‌ها، مخازن آب و آب‌های زیرزمینی، اثر می‌گذارد، SPI قادر به محاسبه کمبود بارش در مقیاس‌های زمانی متفاوت ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه می‌باشد (استینمن ۲۰۰۳). شاخص SPI برای هر منطقه براساس ثبت بارندگی‌های طولانی‌مدت و براساس میانگین متحرک زمانی محاسبه می‌شود (میشرا و دیسای ۲۰۰۵).

در ابتدا توزیع آماری مناسبی بر آمار بارندگی بلند مدت برازش داده می‌شود که مک کی و همکاران (۱۹۹۳) توزیع گاما را مناسب‌ترین توزیع برای برازش داده‌های بارندگی نشان دادند. سپس تابع جمع‌ی توزیع به متغیر تصادفی توزیع نرمال استاندارد Z با میانگین صفر و انحراف معیار یک تبدیل می‌گردد (ادوارد و مک کی ۱۹۹۷). استخراج متغیر تصادفی SPI یا Z مربوط به هر مقدار بارندگی در سطوح هم احتمال از منحنی

آلن و همکاران (۱۹۹۸) رابطه ۱ را که به نام رابطه فائو- پنمن- مانتیث معروف است، به عنوان دقیق‌ترین روش برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع ارائه نموده‌اند.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad [1]$$

که در آن ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm \ day^{-1}$)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$)، G شار گرما به داخل خاک ($MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($^{\circ}C$)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($m \ s^{-1}$)، e_a فشار بخار واقعی (KPa)، e_s فشار بخار اشباع (KPa)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($KPa \ ^{\circ}C^{-1}$) و γ ضریب رطوبتی ($KPa \ ^{\circ}C^{-1}$) می‌باشد.

$$SPI = \frac{pi - \bar{p}}{SD} \quad [2]$$

هر سال با استفاده از شاخص SPI و محدوده‌های ارائه شده در جدول ۲ طبقه‌بندی می‌شود.

احتمالات تجمعی نرمال با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

که در آن، pi مقدار بارندگی درمقیاس زمانی i ام \bar{p} مقدار متوسط بارندگی در دوره‌ی آماری و SD ، انحراف معیار داده‌های بارندگی می‌باشد. وضعیت خشکسالی

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص خشکسالی SPI (مک کی و همکاران ۱۹۹۳).

طبقه‌ی خشکسالی	مقادیر SPI	طبقه‌ی خشکسالی	مقادیر SPI
کاملاً مرطوب	> 2	خشکسالی ملایم	$-0.799 - 0$
خیلی مرطوب	$1/99 - 1/5$	خشکسالی متوسط	-1 تا $-1/49$
نسبتاً مرطوب	$1/49 - 1$	خشکسالی شدید	$-1/5$ تا $-1/99$
مرطوب ملایم	$0.799 - 0$	خشکسالی بسیار شدید	< -2

$$RDI_n^{(i)} = \frac{\alpha(i)}{\bar{\alpha}_0} - 1 \quad [4]$$

در این رابطه $\bar{\alpha}_0$ میانگین حسابی مقادیر α_0 در سال‌های مورد بررسی است. عبارت سوم در محاسبه‌ی این شاخص، مقادیر RDI استاندارد شده (RDI_{st}) می‌باشند که با فرض این‌که مقادیر α_0 از توزیع لوگ‌نرمال پیروی می‌کنند، با استفاده از مقادیر α_0 سال‌های مختلف، مطابق با رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شوند. مقادیر طبقه‌های مختلف خشکسالی این روش مشابه با طبقه‌بندی ارائه شده توسط ادوارد و مک کی (۱۹۹۷) در جدول ۲ برای شاخص SPI می‌باشد.

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{yi - \bar{y}}{\bar{\sigma}_y} \quad [5]$$

در رابطه (۵)، $\bar{\sigma}_y$ انحراف معیار مقادیر yi می‌باشد.

رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

اطلاعات جامع از شاخص RDI به همراه نحوه‌ی محاسبه‌ی آن، توسط تساکریس و ونگلیس (۲۰۰۵) و تساکریس و همکاران (۲۰۰۷) انتشار یافت. این شاخص طی مراحل به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

برای هر بازه‌ی زمانی دلخواه یا سال‌های α ابتدا با استفاده از مقادیر نسبت بارندگی به تبخیر- تعرق پتانسیل، مقادیر اولیه‌ی مختلف مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\alpha_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}}, \quad i = 1:N \text{ and } j = 1:12 \quad [3]$$

در این رابطه، P_{ij} و PET_{ij} به ترتیب مقادیر تبخیر- تعرق مرجع و بارش سال i ام و ماه j ام می‌باشد. پارامتر N برابر طول دوره‌ی آماری است. لازم به ذکر است که روش محاسبه تبخیر- تعرق مرجع، روش فائو- پنمن- مانیتث می‌باشد. همچنین، مقادیر RDI نرمال شده (RDI_n) می‌باشند که با استفاده از α_0 برای سال‌های مختلف مطابق با رابطه ۴ محاسبه شده است:

مستقل توسط یک تابع معین f به علاوه یک مقدار اضافی نویز مشخص می‌شود:

$$y = f(x) + \text{noise} \quad [7]$$

یکی از روش‌های متداول برای حل مسائل غیرخطی، استفاده از توابع کرنل می‌باشد که بر اساس ضرب داخلی داده‌ها تعریف می‌شود. در واقع، با یک تبدیل غیرخطی از فضای ورودی به فضایی با ابعاد بیشتر (حتی نامتناهی) می‌توان مسائل را به صورت خطی، تفکیک پذیر ساخت. در تحقیق حاضر از سه تابع کرنل، که عموماً در کاربردهای مهندسی متداول هستند (جدول ۳)، استفاده شد (صمدیان فرد و اسدی ۲۰۱۸). به منظور بررسی امکان استفاده از ترکیب‌های متفاوتی از داده‌های هواشناسی برای پیش‌بینی عملکرد گیاه، با روش ماشین بردار پشتیبان SVR با استفاده از داده‌های هواشناسی و شاخص‌های خشکسالی از نرم‌افزار Weka، که در دانشگاه ویکاتو نیوزلند توسعه داده شده، محاسبات واسنجی بر روی دوسوم از داده‌ها و محاسبات صحت‌سنجی بر روی یک سوم داده‌های باقی‌مانده انجام پذیرفت.

ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری است که در سال ۱۹۹۲ میلادی توسط بوسر و همکاران (۱۹۹۲) بر پایه تئوری یادگیری آماری معرفی شد. آن‌ها طی سال‌های بعد تئوری ابر صفحه^۴ بهینه را به عنوان طبقه‌بندی کننده خطی ارائه داده و طبقه‌بندی کننده‌های غیرخطی را با کمک توابع کرنل معرفی نمودند. اصول اساسی آن چه که امروز به عنوان ماشین بردار پشتیبان شناخته می‌شود، نتایج کارهای بوسر و همکاران (۱۹۹۲) است و در نهایت گسترش ماشین بردار پشتیبان بر اساس رگرسیون نیز در سال ۱۹۹۵ توسط وپنیک به نتیجه رسید (وپنیک ۱۹۹۵). ماشین بردار پشتیبان مبتنی بر کمینه کردن ساختاری ریسک می‌باشد که از نظریه آموزش آماری گرفته شده است (وپنیک ۱۹۹۸). مدل‌های ماشین‌های بردار پشتیبان به دو گروه عمده الف) مدل طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و ب) مدل رگرسیون بردار پشتیبان تقسیم‌بندی می‌شوند. از مدل طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان جهت حل مسائل طبقه‌بندی داده‌هایی که در کلاس‌های مختلف قرار می‌گیرند، استفاده می‌گردد و مدل رگرسیون بردار پشتیبان در حل مسائل پیش‌بینی کاربرد دارد. در رگرسیون بردار پشتیبان از تابع خطایی استفاده می‌شود که خطاهایی که در یک ϵ -Insensitive به نام فاصله معین از مقادیر واقعی می‌باشند، را نادیده می‌گیرد (باساک و همکاران ۲۰۰۷). این تابع به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$(y, f(x, a)) = |y - f(x, a)|_{\epsilon} = \begin{cases} 0 & \text{for } |y - f(x, a)| \leq \epsilon \\ |y - f(x, a)| - \epsilon & \text{if } |y - f(x, a)| > \epsilon \end{cases} \quad [6]$$

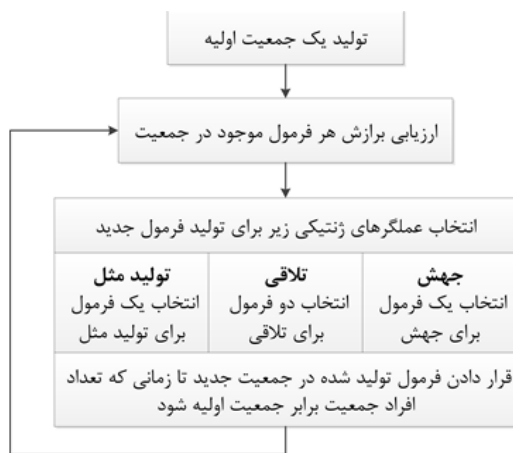
این تابع خطا مقادیر خطای کمتر از ϵ را در نظر نمی‌گیرد. در یک مدل رگرسیونی لازم است وابستگی تابع متغیر وابسته (y) به مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل (x) تخمین زده شود. فرض بر این است که مانند دیگر مسائل رگرسیونی، رابطه بین متغیرهای وابسته و

جدول ۳- توابع کرنل مورد استفاده در روش رگرسیون بردار پشتیبان.

رابطه ریاضی	توابع کرنل
$k(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + 1)^p$	تابع کرنل چند جمله‌ای
$k(x_i, x_j) = e^{-\gamma x_i - x_j ^2}$	تابع کرنل با پایه شعاعی
$k(x_i, x_j) = \frac{1}{1 + \left(2 \sqrt{\frac{1}{\omega}} \ x_i - x_j\ \right)^{2\omega}}$	تابع کرنل پیرسون

برنامه‌ریزی ژنتیک به صورت فلوچارت در شکل ۲ نشان داده شده است.

برنامه‌ریزی ژنتیک یک روش برنامه‌ریزی خودکار است که با استفاده از برنامه‌نویسی رایانه‌ای راه حل مساله را ارائه می‌دهد. در این مطالعه از نرم افزار GeneXproTools4 که به منظور بهره‌گیری از برنامه‌ریزی ژنتیک ارائه شده، برای شبیه‌سازی داده‌های عملکرد استفاده شده است.



شکل ۲- مروری بر شکل کلی گام‌های اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک (ست و بولارت ۲۰۰۱).

روش کار

به منظور بررسی امکان استفاده از ترکیب‌های متفاوتی از پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی دقیق‌تر عملکرد محصولات غالب کشت دیم در منطقه مورد مطالعه، شانزده سناریو مختلف، متشکل از داده‌های متفاوت هواشناسی و شاخص‌های خشکسالی تعریف

روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)^۵

در برنامه‌ریزی ژنتیک، ابتدا بلوک‌های موجود که شامل متغیرهای ورودی و هدف و نیز تابع ارتباط‌دهنده آن‌ها می‌باشد، تعریف گردیده و سپس ساختار مناسب مدل و ضرایب آن تعیین می‌شوند. این روش شامل یک معادله ارتباط‌دهنده بین متغیرهای ورودی و خروجی بوده و لذا قادر به انتخاب خودکار متغیرهای مناسب مدل و حذف متغیرهای غیر مرتبط است که این امر سبب کاهش ابعاد متغیرهای ورودی خواهد شد.

انتخاب ورودی‌های مناسب مدل یکی از مهم‌ترین مواردی است که بایستی در این روش مورد توجه قرارگیرد. این امر در شرایطی که از داده‌های ورودی ثانویه نیز بهره برده شود، از اهمیت مضاعفی برخوردار خواهد بود، زیرا ارائه داده‌های ورودی غیر مرتبط، سبب کاهش دقت مدل و ایجاد مدل‌های پیچیده‌تری می‌شود که تفسیر آن‌ها با دشواری‌های بیشتری مواجه می‌گردد. در کاربردهای مهندسی، از برنامه‌ریزی ژنتیک به‌طور وسیعی در مدل‌سازی مسائل مربوط به تعیین ساختار پدیده‌ها استفاده به عمل می‌آید (بورلی و همکاران ۲۰۰۶). در این روش در ابتدای فرآیند هیچ‌گونه رابطه تابعی در نظر گرفته نشده و این روش قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن می‌باشد. مراحل گام به گام محاسباتی

فصلی و بارش (P) به صورت مقدار تجمعی فصلی در نظر گرفته شده و تبخیر- تعرق مرجع (ET)، به صورت روزانه با استفاده از رابطه فائو- پنمن-مانتیت محاسبه شده و به صورت مقدار تجمعی فصلی در محاسبات پیش‌بینی عملکرد وارد شده است. در مرحله بعدی، این سناریوها در روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و رگرسیون بردار پشتیبان برای تخمین مقدار عملکرد گیاهان مورد مطالعه در سه منطقه تبریز، سراب و مراغه به کار گرفته شدند.

گردید (جدول ۴). برای این منظور از داده‌های دوره‌ی زمانی فصل‌های پاییز، زمستان، بهار، پاییز- زمستان، زمستان- بهار، پاییز- زمستان- بهار استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به دوره‌ی رشد محصولات مورد مطالعه در آذربایجان شرقی داده‌های مربوط به فصل تابستان مورد بررسی قرار نگرفت. علاوه بر این، داده‌های مربوط به سال‌های ۹۰-۱۳۸۳ برای یادگیری و داده‌های ۹۳-۱۳۹۰ برای آزمون روش‌های مورد مطالعه استفاده شدند. همچنین، در محاسبات انجام شده، دمای میانگین (T) به صورت

جدول ۴- ترکیب‌های مختلف داده ورودی در روش‌های SVR و GP.

شماره سناریو	پارامترهای ورودی	شماره سناریو	پارامترهای ورودی
۱	ET,P	۹	ET,T
۲	ET,P,RDI	۱۰	ET,T,RDI
۳	ET,P,SPI	۱۱	ET,T,SPI
۴	ET,P,T	۱۲	P,T,RDI
۵	ET,P,T,RDI	۱۳	SPI,RDI,P
۶	ET,P,T,SPI	۱۴	SPI,RDI,T
۷	ET,SPI	۱۵	T,SPI
۸	ET,SPI,RDI	۱۶	ET,P,T,RDI,RDI

توابع عملکرد

نتایج و بحث

محاسبات با استفاده از سناریوهای تعریف شده در جدول ۴ برای روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و رگرسیون بردار پشتیبان به منظور تخمین مقدار عملکرد گیاهان مورد مطالعه در سه منطقه تبریز، سراب و مراغه به انجام رسید و نتایج کلی حاصل شده در جدول‌های ۵ تا ۷ ارائه شده است. قابل توجه است که برای هر یک از روش‌های پیش‌بینی عملکرد محصول، ۸۴۶ مورد محاسبه صورت گرفت. به عنوان مثال برای شهر تبریز محصول گندم برای شش دوره‌ی یک تا سه فصل زراعی ذکر شده با استفاده از دو روش SVR و GP، ۱۹۲ سری مدل‌سازی صورت گرفت.

به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های GP و SVR از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد.

[۸]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

[۹]

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$$

در روابط ۸ و ۹، N تعداد داده‌ها، O_i مقادیر مشاهداتی و P_i مقادیر تخمینی از روش‌های مورد مطالعه می‌باشند.

جدول ۵- مشخصات و شاخص‌های آماری مربوط به بهترین سناریو در محصول گندم.

MAE(kg ha ⁻¹)	RMSE (kg ha ⁻¹)	فصول	پارامترهای ورودی	روش	گندم
۰/۳۲	۰/۴۳	پاییز- زمستان- بهار	ET,P,T,RDI	SVR	تبریز
۰/۴۵	۰/۶۶	پاییز- زمستان- بهار	ET,T,SPI	GP	مراغه
۰/۷۶	۰/۵۶	پاییز- زمستان- بهار	P,T,RDI	SVR	سراب
۱/۲۹	۱/۵۱	پاییز- زمستان- بهار	P,T,RDI	GP	
۰/۴۰	۰/۶۱	پاییز- زمستان- بهار	ET,P,SPI	SVR	
۰/۵۳	۰/۷۶	پاییز- زمستان	ET,T,P,RDI,SPI	GP	

جدول ۶- مشخصات و شاخص‌های آماری مربوط به بهترین سناریو در محصول جو.

MAE(kg ha ⁻¹)	RMSE (kg ha ⁻¹)	فصول	پارامترهای ورودی	روش	جو
۰/۳۰	۰/۳۱	پاییز- زمستان	ET,P,RDI,T	SVR	تبریز
۰/۲۵	۰/۳۰	پاییز- زمستان- بهار	ET,T,SPI	GP	مراغه
۰/۴۶	۰/۶۲	پاییز- زمستان	ET,P,T	SVR	سراب
۱/۶۶	۱/۴۲	پاییز	ET,T,RDI	GP	
۰/۱۶	۰/۲۰	پاییز- زمستان- بهار	P,T,RDI	SVR	
۱/۲۶	۱/۲۳	زمستان	ET,P,T,RDI	GP	

جدول ۷- مشخصات و شاخص‌های آماری مربوط به بهترین سناریو در محصول یونجه.

MAE(kg ha ⁻¹)	RMSE (kg ha ⁻¹)	فصول	پارامترهای ورودی	روش	یونجه
۰/۱۶	۰/۱۷	پاییز- زمستان	ET,P,T	SVR	تبریز
۰/۱۳	۰/۱۷	پاییز- زمستان	ET,SPI,RDI	GP	مراغه
۰/۷۳	۰/۹۱	زمستان- بهار	ET,P,T,SPI	SVR	سراب
۱/۱۵	۱/۷۱	زمستان- بهار	SPI,RDI,P	GP	
۰/۹۵	۱/۰۵	پاییز- زمستان- بهار	ET,SPI	SVR	
۱/۶۸	۱/۹۷	پاییز- زمستان- بهار	ET,P,T,RDI	GP	

منطقه مورد مطالعه و نوع محصول مختلف که واکنش-های مختلفی در دوره‌های مختلف رشد بر شرایط آب و هوایی نشان می‌دهند، مدل‌های برتر متفاوت و نتایج مختلفی داشته‌اند. بنابراین، به بررسی اجمالی عملکرد روش‌های مورد مطالعه در مورد محصولات گندم، یونجه و جو در مناطق مورد بررسی پرداخته شده است.

گندم

بهترین مدل برای شهر تبریز با استفاده از روش SVR با احتساب داده‌های سه فصل پاییز- زمستان- بهار و پارامترهای تبخیر- تعرق، دما، بارش و شاخص خشکسالی RDI با $RMSE=0/43$ (kg ha⁻¹) و $MAE=0/32$ می‌توان دریافت که پارامترهای

در روش SVR، تابع کرنل پیرسون که رابطه‌ی آن در جدول ۳ ارائه شده است، بهترین نتایج را ارائه کرده است. مقایسه تک به تک نتایج هر سناریو در هر شهر و هر محصول نشان داد که روش SVR نتایج بهتر و قابل قبول‌تری نسبت به روش GP به غیر از جو- تبریز و یونجه- تبریز ارائه کرده است. علت این امر می‌تواند ناشی از استفاده رگرسیون بردار پشتیبان از تابع کرنل غیرخطی پیرسون باشد که توانایی بالاتری در رفتارشناسی روابط پیچیده تولید محصول در حالت دیم را از خود نشان داده است. مدل‌های ترکیبی حاصل از پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشکسالی نشان داد که نتایج پیش‌بینی عملکرد بر اساس فصل‌های مختلف متفاوت بوده است. همچنین با توجه به اقلیم

[۱۰]

در رابطه ۱۰، Y عملکرد محصول (kg ha^{-1})، E_i تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیت (mm)، T_i دما ($^{\circ}\text{C}$)، P_i بارش (mm)، SPI_i شاخص بارش استاندارد شده و RDI_i شاخص شناسایی خشکسالی است که $i=1,2,3$ به ترتیب مربوط به فصل پاییز، زمستان و بهار می‌باشند. لازم به ذکر است که آرگومان توابع مثلثاتی به رادیان می‌باشند.

همچنین، بهترین مدل برای محصول جو در شهر مراغه با استفاده از روش SVR ، محاسبه شده با پارامترهای تبخیر-تعرق، بارش و دما در فصول پاییز و زمستان با $\text{RMSE}=0/62$ (kg ha^{-1}) و $\text{MAE}=0/46$ (kg ha^{-1}) می‌باشد. در مدل‌های برتر محصول جو در شهر مراغه پارامتر دما عامل تاثیرگذار و پررنگ‌تری در پیش‌بینی بوده است. تبخیر-تعرق مرجع که خود متأثر از دما می‌باشد، بر میزان پیش‌بینی گندم در شهر سراب تأثیر بسزایی داشته است. علاوه بر این، SVR بهترین مدل پیش‌بینی مقدار عملکرد جو در شهر سراب در فصول پاییز-زمستان-بهار با توجه به پارامترهای اقلیمی بارش، دما و شاخص RDI می‌باشد، که دارای (kg ha^{-1}) $\text{RMSE}=0/20$ و $\text{MAE}=0/16$ (kg ha^{-1}) می‌باشد. برای محصول جو در منطقه سراب، با توجه سناریوهای برتر پارامترهایی که بیش‌ترین اثرگذاری را بر پیش‌بینی محصول داشته‌اند، بارش و شاخص خشکسالی RDI می‌باشند. بارش تأثیرگذاری بالایی در عملکرد محصول جو در شهر سراب داشته است. شاخص RDI نیز خود دارای عنصر بارش بوده و می‌توان دلیل فوق را بر مؤثر بودن این پارامتر در پیش‌بینی این مدل ذکر کرد.

یونجه

در شهر تبریز برای محصول یونجه روش GP با بهترین $\text{MAE}=0/13$ (kg ha^{-1}) و $\text{RMSE}=0/17$ (kg ha^{-1})

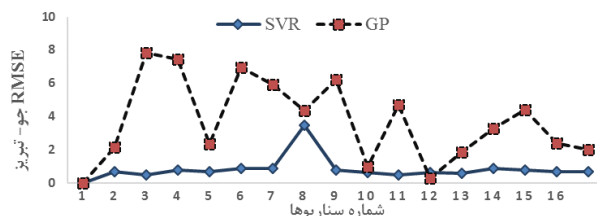
دما و تبخیر-تعرق جزو موارد اصلی و لازم برای شبیه سازی عملکرد گندم در شهر تبریز می‌باشند. می‌توان علت مؤثر بودن دما در این پیش‌بینی را تأثیر مهم پارامتر دما در جوانه‌زنی محصول پیش از فصل یخبندان عنوان کرد. همچنین، روش SVR در شهر مراغه نیز بهترین نتیجه را با توجه به پارامترهای بارش، دما و شاخص خشکسالی SPI در فصول پاییز-زمستان-بهار با $\text{RMSE}=0/56$ (kg ha^{-1}) و $\text{MAE}=0/76$ (kg ha^{-1}) ارائه کرد. علاوه بر این، داده‌های پاییز-زمستان-بهار به وسیله‌ی پارامترهای تبخیر-تعرق، بارش و شاخص SPI سه ماهه، بهترین نتیجه را برای منطقه سراب به دست می‌دهد. $\text{RMSE}=0/61$ (kg ha^{-1}) و $\text{MAE}=0/40$ (kg ha^{-1}) مقادیر خطای این مدل می‌باشند. در شهر سراب نیز تبخیر-تعرق عامل تأثیرگذاری بر افزایش دقت پیش‌بینی عملکرد گندم بوده است.

جو

نتایج به دست آمده از جدول ۶ نشان داد که GP بهترین نتیجه را برای پیش‌بینی محصول جو در شهر تبریز ارائه کرده است، به نحوی که میزان خطا در این مدل با توجه به پارامترهای تبخیر-تعرق، دما و شاخص SPI در فصول پاییز-زمستان-بهار (kg ha^{-1}) $\text{RMSE}=0/30$ و $\text{MAE}=0/25$ (kg ha^{-1}) در این پیش‌بینی نیز میزان عملکرد محصول ارتباط بسیار زیادی با میزان تبخیر-تعرق و دما داشته است. این روش برای بهترین مدل هر محصول در هر شهر رابطه‌ای بر اساس پارامترهای آب و هوایی ارائه داده است. مدل ریاضی ارائه شده برای محصول جو در شهر تبریز در رابطه ۸ نشان داده شده است.

$$Y = 18.3914 + E1 + 2E3 \frac{9.25333}{\text{SPI3}} + \text{SPI3} - 84.5611 \text{SPI3}^2 - T2 + \text{SPI2} (9.99573 + \text{SPI3} + (3.01572 - \text{SPI1} - T1)^2 - T2 + T3) + (\text{SPI2} - T2)(3T3 - 13.45 \text{Cos}[T2]) - \text{Sin}[E1] + \text{Sin}[3.51318 + E1] + \text{SPI1}(-3.40918 + E1 - \text{SPI3} - T1 - \text{Sin}[\text{SPI2}^3]) + \text{Tan}[\text{Sin}[9.24246 - 2.15333 E2 - \text{PI2}]]$$

افزایش تولید کلی و عملکرد مطلوب‌تر گیاه شده می‌شود. از این رو دما و تبخیر- تعرق دو عاملی هستند که عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار داده و باعث بهبود پیش‌بینی محصول یونجه در شهر مراغه می‌شوند. علاوه بر این، فصل پاییز به تنهایی دوره‌ی زمانی مؤثر در پیش‌بینی محصول یونجه در شهر سراب بوده است. در منطقه سراب، پارامترهای تبخیر- تعرق و شاخص SPI با استفاده از روش SVR بهترین نتایج را ارائه کرده‌اند. پارامترهای خطا در این مدل (kg ha^{-1}) $RMSE=1/0.5$ و $MAE=0/97$ (kg ha^{-1}) بوده است. شهر سراب بارش بیشتری نسبت به دو شهر دیگر مورد مطالعه دارد. اگر شدت بارش ملایم بوده و مدت آن زیاد باشد و بارش در وقتی ببارد که گیاه واقعا به آن نیاز داشته باشد، باعث تأمین نیاز آبی گیاه می‌شود. از طرفی، تبخیر- تعرق جزء اصلی نیاز آبی گیاه است. بدین ترتیب می‌توان تأثیرگذاری پارامتر تبخیر- تعرق را توضیح داد. در شکل ۲ تغییرات سناریوهای مورد مطالعه با استفاده از نتایج داده‌های صحت‌سنجی با تابع عملکرد $RMSE$ در سری فصول پاییز، زمستان و بهار محاسبه و به عنوان نمونه برای مقایسه نتایج صحت‌سنجی روش‌های SVR و GP ارائه شده است. همانطوری که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، به غیر از چند نقطه، در همه‌ی سناریوها نتایج روش SVR بهتر از GP بوده است.

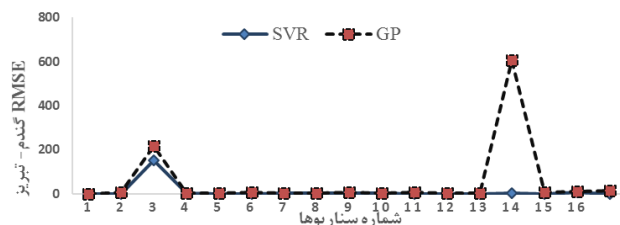


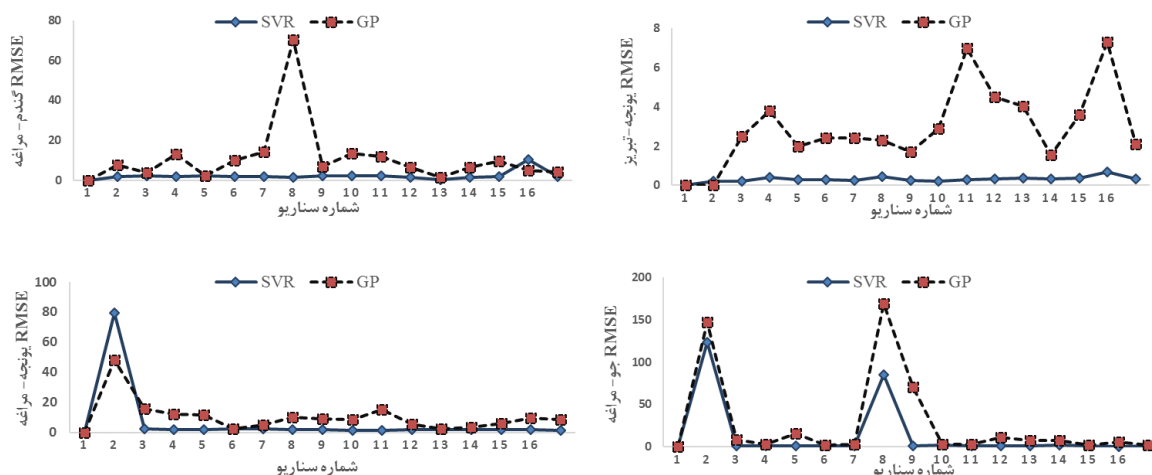
عملکرد را از خود نشان داده است. پارامترهای دخیل در این سناریو تبخیر- تعرق، شاخص SPI و شاخص RDI در فصول پاییز- زمستان می‌باشند. رابطه ۹، فرمول ریاضی ارائه شده مدل GP را نشان می‌دهد.

$$Y = -e^{RDI2} + (-E1 + \sqrt{-1.33023^{RDI1} + E1^2})E2^2 - RDI2 - \frac{4.73898}{RDI1+RDI2+SPI1+SPI2^2} + (44.7469 + RDI1 - RDI2 + ArcTan[E2^{SPI2}])^2 + 47.4921(-SPI1 + ARCTan[Cos[E2]])^2 + Log[E1^3(4.94718 + RDI1 + 3.04285 SPI1^3)] \sin[E2] + Tan[E2 - RDI2] - Tan[2.48096 + RDI2]Tan[E2 + RDI2]$$

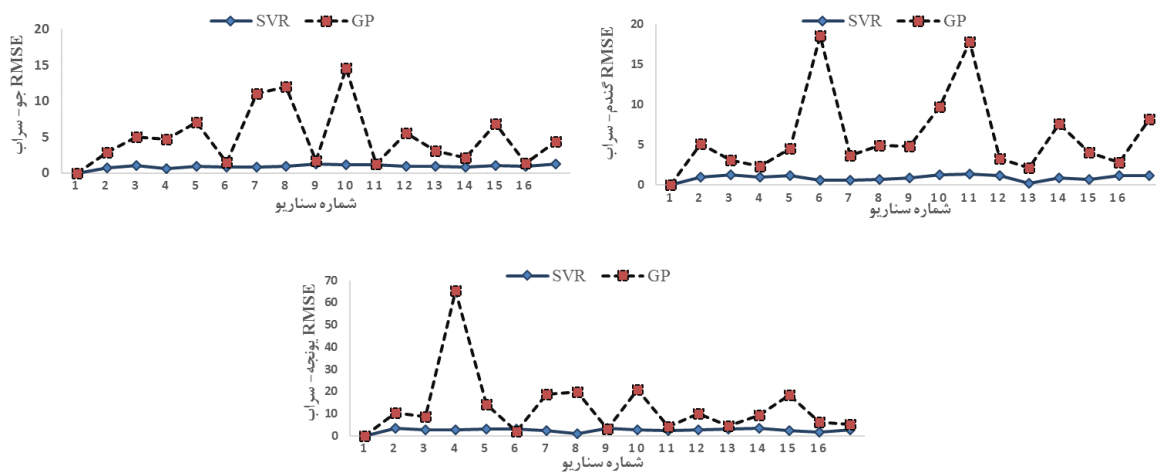
[۱۱]

در رابطه ۱۱، Y عملکرد محصول (kg ha^{-1})، E_i تبخیر- تعرق مرجع به روش فائو- پنمن- مانیتث (mm)، T_i دما ($^{\circ}\text{C}$)، P_i بارش (mm)، SPI_i شاخص بارش استاندارد شده و RDI_i شاخص شناسایی خشکسالی است که $i=1,2,3$ به ترتیب مربوط به فصل پاییز، زمستان و بهار می‌باشند. همچنین، روش SVR در شهر مراغه برای محصول یونجه با استفاده از پارامترهای تبخیر- تعرق، دما، بارش و شاخص SPI در فصول زمستان- بهار دارای بالاترین عملکرد با (kg ha^{-1}) $MAE=0/73$ و $RMSE=0/91$ می‌باشد. فصل بهار پر بارش‌ترین فصل در این شهر است، از طرفی دیگر دما نیز افزایش می‌یابد. این دو عامل باعث بهتر شدن رشد و نمو محصول شده که در نهایت باعث





شکل ۳: نمودارهای تغییرات RMSE (kg ha⁻¹) در سناریوهای مورد مطالعه برای روش‌های SVR و GP.



شکل ۳: ادامه .

روابط به جای محاسبات کلی و بررسی تک به تک پارامترها بهره برد.

نتیجه گیری کلی

تدوین سیاست‌ها و راهبردهای کشاورزی پایدار نقش مهمی را در پایداری نظام کشاورزی و منابع طبیعی ایفا می‌کند. از همین رو پیش‌بینی و تحلیل عوامل اقلیمی موثر بر محصولات کشاورزی، به خصوص تولیدات دیم که به طور مستقیم تحت تاثیر عوامل اقلیمی می‌باشند، نقش موثری در اتخاذ سیاست‌های اصولی برای توسعه و بهبود کشاورزی دارد. در این راستا این

نتایج حاصل شده از پژوهش مشابهی که توسط رحمانی و همکاران (۲۰۰۸) جهت پیش‌بینی عملکرد محصول انجام گردید، نشان داد که مدل‌های چند متغیره که شامل شاخص‌های خشکسالی و پارامترهای هواشناسی بودند، دقت بالاتری در مقایسه با مدل‌های تک متغیره داشتند. نتایج حاصل شده از پژوهش حاضر نیز در تطابق کامل با یافته‌های رحمانی و همکاران (۲۰۰۸) می‌باشد. رابطه‌های ارائه شده توسط GP برای برترین مدل‌ها می‌تواند مقدار محصول را با مجموعه‌ای از پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشکسالی پیش‌بینی کند، به همین منظور می‌توان از این

در فصول پاییز- زمستان- بهار (kg ha^{-1}) $\text{RMSE}=0/56$ و $\text{MAE}=0/76$ (kg ha^{-1}) و در شهر سراب روش SVR با ترکیب عامل بارش، دما و شاخص RDI در فصول پاییز- زمستان- بهار (kg ha^{-1}) $\text{RMSE}=0/20$ و $\text{MAE}=0/16$ (kg ha^{-1}) پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه کردند. بررسی محاسبات و مدل‌سازی-های انجام شده نشان داد که در اکثر مواقع روش SVR نتیجه‌ی بهتری ارائه داده و عملکرد محصول را بهتر پیش‌بینی کرده است. همچنین از نتایج کلی چنین به دست می‌آید که سری فصول پاییز- زمستان- بهار به دلیل دارا بودن کل دوره‌ی رشد گیاه در اکثر مواقع دارای نتایج بهتری بوده است.

پژوهش به بررسی عوامل اقلیمی و شاخص‌های خشکسالی منفرد و ترکیبی با مدل‌های پیش‌بینی مقدار تولید محصول پرداخته است. بررسی میزان عملکرد محصولات دیم گندم، جو و یونجه درسه شهر تبریز، مراغه و سراب با استفاده از پارامترهای اقلیمی و شاخص‌های خشکسالی در فصول زراعی با شبیه‌سازی به وسیله‌ی روش‌های GP و SVR نشان داد که در شهر تبریز برای محصول یونجه، GP با ترکیب عامل تبخیر- تعرق و شاخص‌های SPI و RDI برای فصول پاییز- زمستان (kg ha^{-1}) $\text{RMSE}=0/20$ و $\text{MAE}=0/16$ (kg ha^{-1})، در شهر مراغه برای محصول یونجه روش SVR با ترکیب عامل بارش، دما و شاخص RDI

منابع مورد استفاده

- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy.
- Arshad S, Morid S, Mobasheri MR and Agha Alikhani M, 2012. Monitoring and forecasting drought impact on dryland farming areas. *International Journal of Climatology* 33: 2068–2081.
- Bannayan M, Sanjani S, Alizadeh A, Sadeghi Lotfabadi S and Mohamadian A, 2010. Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran. *Field Crops Research* 118: 105–114.
- Basak D, Pal S and Patranabis DC, 2007. Support vector regression. *Neural Information Processing* 11: 203-225.
- Battisti R, Sentelhas P and Boote k, 2017. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. *Field Crops Research* 200: 28-37.
- Borelli A, DeFalco I, Della CA, Nicodemi M and Trautteur G, 2006. Performance of genetic programming to extract the trend in noisy data series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 370: 104-108.
- Boser BE, Guyon IM and Vapnik VN, 1992. A training algorithm for optimal margin classifiers. Pp. 144-152. In: D. Haussler (ed.), 5th Annual ACM Workshop on COLT, Pittsburgh.
- Edwards DC and McKee TB, 1997. Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. *Climatology Report Number 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins.
- Elagib NA and Elhag M, 2011. Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology* 409: 612-625.
- Hui JU, Er-da L, Wheeler T, Challinor A and Shuai J, 2013. Climate change modelling and its roles to Chinese crops yield. *Journal of Integrative Agriculture* 12: 892-902.
- Kang Y, Shahbaz Khan and Xiaoyi Ma, 2009. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review. *Journal of Progress in Natural Science* 19: 1665–1674.
- McKee TB, Doesken NJ and Kleist J, 1993. The relation of drought frequency and duration to time scales. Pp. 379-384, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California
- Mishra AK and Desai VR, 2005. Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati river basin, India. *International Journal of River Basin Management* 3: 31-41.

- Mosaedi A and Ghabaei Sough M, 2011. Modification of standardized precipitation index (SPI) based on relevant probability distribution function. *Journal of Water and Soil* 25(5): 1206-1216 (In Persian with English abstract).
- Mosaedi A, Mohammadi Moghaddam S and Ghabaei Sough M, 2015. Modeling rain-fed wheat and barley based on meteorological features and drought Indices. *Journal of Water and Soil* 29(3): 730-749 (In Persian with English abstract).
- Padakandla SJ, 2016. Climate sensitivity of crop yields in the former state of Andhra Pradesh, India. *Journal of Ecological Indicators* 70: 431-438.
- Rahmani E, Liaghat A and Khalili A, 2008. Estimating barley yield in Eastern Azerbaijan using drought indices and climatic parameters by artificial neural network (ANN). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 39(1): 47-56 (In Persian with English abstract).
- Samadianfard S and Asadi E, 2018. Prediction of SPI drought index using support vector and multiple linear regressions. *Journal of Water and Soil Resource Conservation* 6(4): 1-16 (In Persian with English abstract).
- Sette L and Boullart L, 2001. Genetic programming: principles and applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14(6): 727-736.
- Steinmann A, 2003. Drought indicators and triggers: a stochastic approach to evaluation. *Journal of the American Water Resources Association* 39: 1217-1233.
- Tietjen B and Jeltsch F, 2007. Semi-arid grazing systems and climate change: a survey of present modelling potential and future needs. *Journal of Applied Ecology* 44: 425-434.
- Tsakiris G and Vangelis H, 2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resources Management* 18: 1-12.
- Tsakiris G and Vangelis H, 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water* 9: 3-11.
- Tsakiris G, Pangalou D and Vangelis H, 2007. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resource Management* 21: 821-833.
- Valizadeh J, Ziaei M and Mazlounzadeh SM, 2014. Assessing climate change impacts on wheat production (a case study). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 13: 107-115.
- Vapnik VN, 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, New York.
- Vapnik VN, 1998. *Statistical Learning Theory*. Wiley, New York.
- Xiao G, Zhang Q, Li Y, Wang R, Yao Y, Zhao H and Bai H, 2010. Impact of temperature increase on the yield of winter wheat low and high altitudes in semiarid northwestern China. *Agricultural Water Management* 97: 1360-1364.
- Zare Abyaneh H, 2013. Evaluating roles of drought and climatic factors on variability of four dry farming yields in Mashhad and Birjand. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 23(1): 39-56 (In Persian with English abstract).
- Zimmermann A, Webber H, Zhao G, Ewert F, Kros J, Wolf J, Britz W and Vries W, 2017. Climate change impacts on crop yields, land use and environment in response to crop sowing dates and thermal time requirements. *Agricultural Systems* 157: 81-92.