



بررسی تولید کلزا در شرایط خشکی و تغییر اقلیم

سروناز فرهنگ فر^۱ - محمد بنایان^{۲*} - حمیدرضا خزاعی^۲ - محمد موسوی بایگی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸

چکیده

خشکی دائماً تولیدات کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آسیب‌پذیری کشاورزی به‌عنوان آستانه‌ای شناخته می‌شود که در آن بیشترین احتمال صدمه دیدن سیستم‌های کشاورزی در اثر خشکی وجود دارد. در این تحقیق آسیب‌پذیری کلزا در اثر خشکی در شهرستان‌های مشهد، سبزوار و تربت‌حیدریه و تأثیر تغییر اقلیم بر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه شاخص خشکی UNEP در راستای ارزیابی خشکی مورد استفاده قرار گرفت. اثرات تغییر اقلیم توسط مدل‌های HadCM3 و IPCM4 تحت سه سناریو (A1B، A2 و B1 برای سه دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰، ۲۰۱۱-۲۰۶۵ و ۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰) توسط مولد آب و هوایی LARS شبیه‌سازی شدند. عملکرد پتانسیل کلزا توسط مدل WOFOST شبیه‌سازی شد. برای کمی نمودن آسیب‌پذیری نسبت به شرایط خشکی، آسیب‌پذیری به‌عنوان تابعی از حساسیت (SEN)، وضعیت سلامت نسبت به آستانه تخریب و در معرض خطر قرار گرفتن در نظر گرفته شد. آسیب‌پذیری با در نظر گرفتن خشکی‌های شدید (V_{EXPL} و V_{EXPS}) در سال‌های منتخب و آسیب‌پذیری مورد انتظار (EV_{EXP}) با در نظر گرفتن فراوانی مورد انتظار خشکی محاسبه شد. نتایج نشان داد که در تمامی مناطق مورد مطالعه تولید کلزا طی دوره پایه نسبت به خشکی بسیار حساس بوده و مقایره تخمین زده شده بیشتر از ۲۰۰ بودند. همین روند در سال‌های شبیه‌سازی شده نیز مشاهده شد. همچنین پیش‌بینی شد که کلزا در دوره‌های آینده همانند دوره پایه نسبت به خشکی بسیار آسیب‌پذیر بوده و مقادیر آسیب‌پذیری بالاتر از ۲۰ تخمین زده شدند (EV_{EXP} و V_{EXPS} ، $V_{EXPL} > 20$).

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، حساسیت‌پذیری، مدل WOFOST

مقدمه

گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. آسیب‌پذیری مفهومی است که در زمین‌های متفاوت علل و بر اساس جنبه‌های مختلف تحقیق، به صورت مختلف تعریف شده است (Boruff et al., 2005). به‌طور کلی آسیب‌پذیری به‌عنوان "کیفیت یا وضعیت آسیب‌پذیر بودن" تعریف می‌شود (Gove, 1981). "پتانسیل از دست دادن" به‌عنوان خصوصیت ذاتی موجود در یک فرد، یا به‌عنوان ترکیبی از حساسیت فردی و عامل تنش، در نظر گرفته می‌شود. در حال حاضر آسیب‌پذیری عمدتاً تابعی از سه جز حساسیت‌پذیری، ظرفیت انطباق‌پذیری و قرار گرفتن در معرض خطر تعریف شده و به‌طور گسترده‌ای مورد قبول واقع شده است (IPCC, 2001; Turner et al., 2003; Brooks et al., 2005; Alberini et al., 2006). حساسیت‌پذیری اشاره به مرحله‌ای دارد که در آن سیستم به نوسانات تنش پاسخ داده و پتانسیل صدمه دیدن از عامل تنش را در بر می‌گیرد (Tao et al., 2002 and Dixon, 2005). ظرفیت انطباق‌پذیری به‌عنوان برگشت‌پذیری (Turner et al., 2003) یا ظرفیت کنار آمدن (Gallopini, 2006) مطرح شده و به ظرفیت یک سیستم برای تعدیل یا جبران صدمه یا بهره بردن از نوسانات تنش اشاره دارد که اغلب با راهکارهای مدیریتی همراه است (Luers et al., 2003; Smit and

طی دو دهه گذشته، نگرانی‌های جهانی در رابطه با پایداری بلندمدت در بخش کشاورزی به‌وجود آمده است (Humphreys et al., 2006). نوسانات اقلیمی ناشی از فرآیندهای طبیعی و تداخلات انسانی مهم‌ترین مسائل محیطی هستند که جهان را طی قرن بیست و یکم تحت تأثیر قرار می‌دهند (Kenny et al., 2010). انتظار می‌رود که تغییر اقلیم منجر به افزایش تبخیر و تفرق همراه با نوسانات بیشتر بارندگی و افزایش فراوانی خشکی شود (Burke and Brown, 2010). تغییرات اقلیمی در سطوح محلی، توزیع کشت و سیستم‌های کشاورزی را تحت تأثیر قرار خواهند داد. در حال حاضر ارزیابی آسیب‌پذیری به‌عنوان یک روش مؤثر برای تسهیل درک اثر متقابل میان خطرات یا موانع و سیستم‌های در معرض تنش، به‌طور

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه بوم‌شناسی زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* نویسنده مسئول: (Email: mobannayan@yahoo.com)

DOI: 10.22067/gsc.v15i2.50856

مهم است که به دلیل داشتن اسید چرب غیراشباع زیاد و پروتئین به‌عنوان یکی از سالم‌ترین روغن‌های خوراکی کاربرد دارد. این روغن حاوی امگاتری بوده و سرشار از ویتامین‌ها و مواد معدنی ضروری است (Zomorodian et al., 2010). روغن کانولا بسته به رقم و شرایط تولید دارای حدود پنج تا شش درصد اسیدهای چرب اشباع بوده و فاقد کلسترول می‌باشد. کلزا بعد از سویا با تولید ۵۶/۵ میلیون تن دومین گیاه روغنی دنیا است (FAO, 2015). با توجه به این که معمولاً در اکثر مطالعات مرتبط با این زمینه تأثیر خشکی بر محصولات دیم مورد بررسی قرار می‌گیرد، در این مطالعه، کلزا در شرایط آبی مورد بررسی قرار گرفت. در کشت آبی نیاز آبی گیاهان از طریق آبیاری تأمین گردد و از این طریق تأثیر خشکی بر محصول کاهش می‌یابد. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر خشکی هواشناسی بر عملکرد کلزا در شرایط آبی می‌باشد تا در شرایطی که امکان تأمین نیاز آبی گیاه از طریق آبیاری وجود دارد میزان خسارت و آسیب‌پذیری ارزیابی گردد. یکی دیگر از اهداف این مطالعه برآورد آسیب‌پذیری کلزا به‌صورت تأثیر خشکی بر بهترین حالت عملکرد (عملکرد پتانسیل) بود که در آن درجه تأثیر خشکی بر مطلوب‌ترین حالت عملکرد از طریق کمی نمودن درجه حساسیت‌پذیری و آسیب‌پذیری عملکرد کلزا نسبت به خشکی در شرایط پتانسیل، مورد مطالعه قرار گرفت. در راستای نیل به این اهداف عملکرد پتانسیل توسط مدل گیاهی شبیه‌سازی شده و سپس تأثیر خشکی بر این متغیر در غالب آسیب‌پذیری در مشهد، سبزوار و تربت‌حیدریه برای دوره پایه و سال‌های شبیه‌سازی شده در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از توابع ریاضی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد نیاز

این تحقیق در شهرستان‌های مشهد، سبزوار و تربت‌حیدریه انجام شد. در این مطالعه داده‌های بلند مدت اقلیمی شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر (درجه سانتی‌گراد)، بارندگی (میلی‌متر) و تشعشع خورشیدی (مگاژول در مترمربع در روز) برای سال‌های ۲۰۰۹-۱۹۶۱ برای هر منطقه از ایستگاه هوا و اقلیم‌شناسی جمع‌آوری شد. اطلاعات مربوط به عملکرد کلزا در شرایط کشت آبی نیز برای شهرستان‌های مورد مطالعه از سازمان جهاد کشاورزی جمع‌آوری شد. متغیرهای گیاهی مورد نیاز برای تعیین اعتبار مدل رشد کلزا از آزمایشات مزرعه‌ای انجام شده در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد و مراکز تحقیقات در شهرستان‌های استان خراسان جمع‌آوری شدند.

(Wandel, 2006). در معرض قرار گرفتن اغلب به‌عنوان احتمال این که یک سیستم در معرض تغییرات تنش قرار گیرد، تعریف می‌شود (IPCC, 2001).

بررسی حساسیت‌پذیری ذرت و سورگوم به گرمایش جهانی در کشور توسوانا نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم عملکردهای شبیه‌سازی شده تا ۳۶ درصد در مورد ذرت و ۳۱ درصد در مورد سورگوم در مرزهای شنی کاهش خواهد یافت. کاهش عملکرد در مرزهایی با بافت سخت برای ذرت و سورگوم ۱۰ درصد برآورد شد (Chipanshi et al., 2003). مطالعه آسیب‌پذیری و سازگاری تولید گندم در چهار منطقه اقلیمی پاکستان در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل گندم CSM-Cropsim-CERES نشان داد که افزایش درجه حرارت در مناطق خشک، نیمه-خشک و نیمه-مرطوب منجر به کاهش عملکرد خواهد شد (Sultana et al., 2009). مطالعه آسیب‌پذیری و سازگاری کشاورزی مصر نسبت به تغییر اقلیم نشان داد که تغییر اقلیم کشاورزی را به ویژه در دوره زمانی ۲۰۳۰-۲۰۶۰ تحت تأثیر منفی قرار خواهد داد (McCarl et al., 2013). ارزیابی تغییر اقلیم، آسیب‌پذیری و سازگاری در شمال آفریقا به‌ویژه در موروکو نشان داد که تغییر اقلیم احتمالاً بیشترین تأثیر را در موروکو خواهد داشت که در آن کشاورزی یکی از بخش‌های مهم برای اقتصاد کشور و به‌ویژه برای مردم فقیر است (Schilling et al., 2012). بررسی آسیب‌پذیری تولید محصول نسبت به خشکی در کشور غنا واقع در جنوب صحرای آفریقا، با استفاده از داده‌های بارندگی، عملکرد و داده‌های اقتصادی-اجتماعی در سطوح ملی و محلی نشان داد که مناطق شمالی، ارتفاعات غربی و شرقی آسیب‌پذیرترین مناطق هستند (Antwi Agyei et al., 2012). این موضوع به دلیل توسعه ضعیف اقتصادی-اجتماعی در این مناطق بود که منجر به ایجاد پایین‌ترین ظرفیت انطباق‌پذیری شده و اقتصاد آنها را به کشاورزی دیم وابسته ساخته است. بررسی آسیب‌پذیری و ظرفیت انطباق‌پذیری گندم زمستانه نسبت به خشکی در کشور چین نشان‌دهنده کاهش عملکرد گندم زمستانه در اثر خشکی به‌ویژه در سال ۲۰۳۰ (۲۰۵۰-۲۰۱۰) بود (Li et al., 2015).

ایران کشوری با اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان‌های طولانی خشک و بارندگی زمستانه می‌باشد. میزان کلی بارندگی ایران از یک سوم میانگین جهانی کمتر بوده و ۷۰ درصد کل بارندگی بی‌استفاده بوده و قبل از ورود به چرخه آبی تبخیر می‌شود. میزان بارندگی از ۵۰ میلی‌متر در بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی کشور تا ۱۵۰۰ میلی‌متر در بخش‌های غربی و شمالی در نوسان است. با در نظر گرفتن شرایط موجود اقلیمی، درک روابط متقابل سیستم‌های کشاورزی و کمبود آب ناشی از خشکی در راستای طراحی معیارهای صحیح برای کاهش خسارت احتمالی، امری ضروری است. کلزا یکی از گیاهان روغنی

$$KT = 0.00185(TD)^2 - 0.0433(TD) + 0.4023 \quad (۳)$$

$$TD = T_{\max} - T_{\min} \quad (۴)$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق بالقوه (میلی-متر)، TD اختلاف درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)، T_{\max} و T_{\min} به ترتیب دمای حداکثر و حداقل (درجه سانتی‌گراد) می‌باشند. R_a تابش فرازمینی بر حسب مگاژول بوده و بر اساس عرض جغرافیایی برای هر ماه عدد مشخصی است.

شبیه‌سازی عملکرد گیاهان مورد مطالعه

با توجه به این که یکی از اهداف این مطالعه برآورد تأثیر خشکی بر عملکرد پتانسیل کلزا و سپس برآورد میزان آسیب‌پذیری ناشی از آن بر روی این محصول با استفاده از روش ارائه شده می‌باشد. در این مطالعه در راستای برآورد آسیب‌پذیری کلزا ناشی از خشکی در دوره‌های آینده ابتدا عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شد. در تحقیق حاضر برای ارزیابی عملکرد پتانسیل کلزا از مدل WOFOST¹ (Supit et al., 1994) استفاده شد. مدل WOFOST، رشد و تجمع ماده خشک گیاه را بر مبنای سرعت روزانه فتوسنتز کانوپی شبیه‌سازی می‌کند. در بررسی حاضر از WOFOST ver 7.1 استفاده شد، که

توسط مرکز تحقیقات آگروبیولوژی و حاصلخیزی خاک و مرکز تحقیقات کشاورزی هلند در دانشگاه واگنینگن ساخته شده است (Boogaard et al., 1998). WOFOST مدلی از گروه مدل‌های دویت است که از مدل دیگری به نام SUCROS مشتق شده و برای شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی یک‌ساله و گراس‌ها در طول فصل رشد برای شرایط پتانسیل، محدودیت آب و عناصر غذایی ساخته شده است. این مدل از پارامترها و توابع برای توصیف اثرات درجه حرارت، تشعشع و تنش آبی بر فرآیندهای اصلی رشد محصول استفاده می‌کند. خروجی‌های مدل شامل عملکرد نهایی، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، میزان تجمع ماده خشک در هر یک از اندام‌ها و مراحل نمو با فواصل یک روزه هستند.

تعیین اعتبار مدل‌ها

دقت مدل WOFOST و برنامه LARS توسط شاخص‌های متفاوتی برای بررسی تفاوت داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی^۲ قرار گرفت. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای اندازه‌گیری ارتباط بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده مورد استفاده قرار گرفت، درحالی‌که انحراف میانگین (RMD) برای محاسبه انحراف سیستماتیک مدل استفاده شد. کارایی مدل (EF) برای

مدل و سناریوهای اقلیمی

در این مطالعه برای بررسی چگونگی تغییر اقلیم در مناطق مورد نظر در سال‌های آینده از مدل‌های HadCM3 و IPCM4 تحت سه سناریوی A2، B1 و A1B استفاده شد. با توجه به اینکه برای شبیه‌سازی رشد گیاه نیاز به داده‌های روزانه است، از برنامه مولد تصادفی آب و هوا (LARS) (Semenov and Brooks, 1999) برای ایجاد داده‌های اقلیمی روزانه برای سال‌های آینده در سه دوره زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ استفاده شد که یکی از معروف‌ترین برنامه‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که برای تولید مقادیر بارش، تابش و دماهای بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه برای اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود (Lashkari et al., 2011).

شاخص خشکی

در این تحقیق برای کمی نمودن خشکی، شاخص خشکی AI_U محاسبه شد که توسط یو ان ای پی (UNEP, 1992) ارائه شده و نشان‌دهنده تغییرات همزمان بارندگی و تبخیر و تعرق است. فرمول کلی محاسبه این شاخص در معادله (۱) ارائه شده است:

$$AI_U = \frac{P}{PET} \quad (۱)$$

که در آن P بارندگی (میلی‌متر) و PET تبخیر و تعرق بالقوه (میلی‌متر) می‌باشد. دامنه تعریف شده این شاخص در جدول ۱ نشان داده شده است. این شاخص در راستای ارزیابی آسیب‌پذیری برای فصل رشد کلزا (مهر تا تیر) مورد محاسبه قرار گرفت.

جدول ۱- دامنه شاخص خشکی AI_U
Table 1- The classes of aridity index AI_U

محدوده اقلیمی	محدوده AI_U
Climate classes	AI_U classes
بسیار خشک	$AI_U < 0.05$
Hyper-arid	
خشک	$0.05 < AI_U < 0.2$
Arid	
نیمه-خشک	$0.2 < AI_U < 0.5$
Semi-arid	
نیمه-مرطوب	$0.5 < AI_U < 0.65$
Sub-humid	
مرطوب	$AI_U > 0.65$
Humid	

یکی از اجزای محاسبه AI_U تبخیر و تعرق بالقوه است، که یک متغیر اقلیمی بوده و قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر را نشان می‌دهد. در این تحقیق تبخیر و تعرق بالقوه با استفاده از روش Hargreaves and Samani (1985) محاسبه شد:

$$ET_0 = 0.0135(KT)R_a(TD)^{0.5}(T + 17.8) \quad (۲)$$

1- World Food Studies

2- Validation

$$Y_0 \text{ به‌عنوان آستانه نسبی آسیب، } W_i/W_0 = Y_i/Y_0$$

شناسایی می‌شود که از یک مکان به مکان دیگر متفاوت است. Y_i عملکرد در یک سال معین و Y_0 میانگین عملکرد در طول سال‌های منتخب هستند.

$$EXP = N_x/N_T \quad (۱۲)$$

N_x تعداد سال‌هایی که مقدار AI_U در آنها از یک حد آستانه پایین‌تر است (در یک دوره زمانی معین) کل تعداد سال‌های مورد نظر

در این مطالعه مقدار در معرض قرار گیری با در نظر گرفتن فراوانی وقوع دو سطح مختلف مقدار AI_U و در دو دوره زمانی مختلف برای هر یک از سری داده‌ها در نظر گرفته شد:

EXP_L : فراوانی وقوع خشکی شدید از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹، از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰، از سال ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ و از سال ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۹ به‌عنوان بخشی از سال‌ها که $AI_U \geq 0.2$ در این سال‌ها داشتند، تعریف شد.

EXP_S : فراوانی وقوع خشکی شدید از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۹، از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰، از سال ۲۰۵۶ تا ۲۰۶۵ و از سال ۲۰۹۰ تا ۲۰۹۹ به‌عنوان بخشی از سال‌ها که $AI_U \geq 0.2$ در این سال‌ها داشتند، تعریف شد.

EXP_L : فراوانی وقوع خشکی متوسط از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹، از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰، از سال ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ و از سال ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۹ به‌عنوان بخشی از سال‌ها که $AI_U \geq 0.5$ در این سال‌ها داشتند، تعریف شد.

$$T_{EXP} = EXP_S/EXP_L \quad (۱۳)$$

T_{EXP} نشان‌دهنده افزایش یا کاهش خشکی شدید در سال‌های اخیر است.

$$EEXP = EXP_S \times T_{EXP} \quad (۱۴)$$

این متغیر در معرض قرار گیری اخیر و تغییر احتمالی در معرض قرار گیری را نشان می‌دهد.

$$EV_{EXP} = V_{NEXP} \times EEXP \quad (۱۵)$$

این متغیر نشان‌دهنده آسیب‌پذیری مورد انتظار با در نظر گرفتن فراوانی مورد انتظار خشکی است.

واحد آسیب‌پذیری تخمین زده شده، همان واحد عامل سلامت تقسیم بر واحد سنجش تنش است. بنابراین واحد آسیب‌پذیری همان واحد عملکرد است، زیرا AI_U شاخصی بدون واحد و استاندارد شده است. طبقه‌بندی SEN ، V_{EXPL} ، V_{EXPS} ، $EEXP$ و EV_{EXP} در جدول ۲ نشان داده شده‌اند (Nash and Sutcliffe, 1970).

تخمین عملکرد مدل در ارتباط با میانگین مشاهده‌شده محاسبه شد (Nash and Sutcliffe, 1970). مقادیر بهینه برای EF برابر ۱ بوده و مقادیر منفی واریانس بالایی را در نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با مشاهدات نشان می‌دهند. دقت شبیه‌سازی مدل هنگامی افزایش می‌یابد که مقادیر RMSE و RMD نزدیک به صفر باشد. همچنین رگرسیون خطی برای تشخیص ارتباط متقابل بین شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد:

$$RMSE = \frac{100}{\sigma} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

$$RMD = \frac{100}{\sigma} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - O_i}{n} \quad (۶)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\sigma - O_i)^2} \quad (۷)$$

که در این معادلات P و O به ترتیب داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، \bar{O} میانگین داده‌های مشاهده شده و n تعداد مشاهدات است.

ارزیابی آسیب‌پذیری

روش مورد استفاده در این تحقیق برای کمی کردن آسیب‌پذیری، روش معرفی شده توسط رن و همکاران (Ren, 2007) بود که در آن آسیب‌پذیری تابعی از سه عامل حساسیت، وضعیت سلامت نسبت به آستانه آسیب و در معرض آسیب قرار گرفتن تعریف شد:

$$V_{NEXPi} = SEN \times W_i/W_0 \quad (۸)$$

$$V_{NEXP} = \bar{V}_{NEXPi} \quad (۹)$$

$$V_{EXP} = V_{NEXP} \times EXP \quad (۱۰)$$

که در آن V_{NEXPi} مقدار آسیب‌پذیری بدون در نظر گرفتن فراوانی وقوع سطح مورد بررسی تنش در یک سال معین، SEN حساسیت سیستم و W_i/W_0 نزدیکی نسبی سلامت سیستم به آستانه تخریب و آسیب آن است.

V_{NEXP} میانگین V_{NEXPi} در چندین سال مختلف است که نشان‌دهنده سطح کلی تنش در یک سیستم که در معرض آن قرار دارد، می‌باشد. V_{EXP} مقدار آسیب‌پذیری با در نظر گرفتن فراوانی وقوع سطح مورد بررسی تنش است. EXP مقدار در معرض قرار گرفتن است که به‌عنوان فراوانی وقوع سطح مورد بررسی تنش است.

$$SEN = Slope_Y/AI = \frac{n AI \times Y (AI)(Y)}{n (AI)^2 - (AI)^2} \quad (۱۱)$$

Slope شیب خط رگرسیون، با در نظر گرفتن نظریه حداقل مربعات، n تعداد کل سال‌ها، Y میزان عملکرد و AI_U شاخص خشکی است.

جدول ۲- طبقه‌بندی SEN، V_{EXPL} ، V_{EXPS} ، $EEXP$ و EV_{EXP}
 Table 2- The classes of SEN, V_{EXPL} , V_{EXPS} , $EEXP$ and EV_{EXP}

$EEXP$	V_{EXPL}	V_{EXPS}	EV_{EXP}	SEN	
0-1	کم Low	< 5	کم Low	< 50	کم Low
1.5-1	جزئی Slight	5-10	جزئی Slight	50-100	جزئی Slight
1.5-2	متوسط Moderate	10-15	متوسط Moderate	100-150	متوسط Moderate
2-2.5	زیاد High	15-20	زیاد High	150-200	زیاد High
> 2.5	بسیار زیاد High	> 20	بسیار زیاد High	> 200	بسیار زیاد High

نتایج و بحث

تعیین اعتبار مدل‌ها

نتایج ارزیابی برنامه LARS نشان داد که این مدل از دقت خوبی در شبیه‌سازی مقادیر ماهانه درجه حرارت حداقل و حداکثر برای دوره پایه، برخوردار است (جدول ۳). مقدار RMSE برای مقادیر ماهانه

درجه حرارت حداقل و حداکثر در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از ۳ درصد برآورد شد، درحالی‌که این مقدار برای بارندگی کمتر از ۷ درصد بود. همچنین در اکثر موارد همبستگی قابل توجهی میان مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده وجود داشت.

جدول ۳- مقایسه درجه حرارت حداقل، حداکثر و بارندگی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده با استفاده از آماره‌های ارزیابی

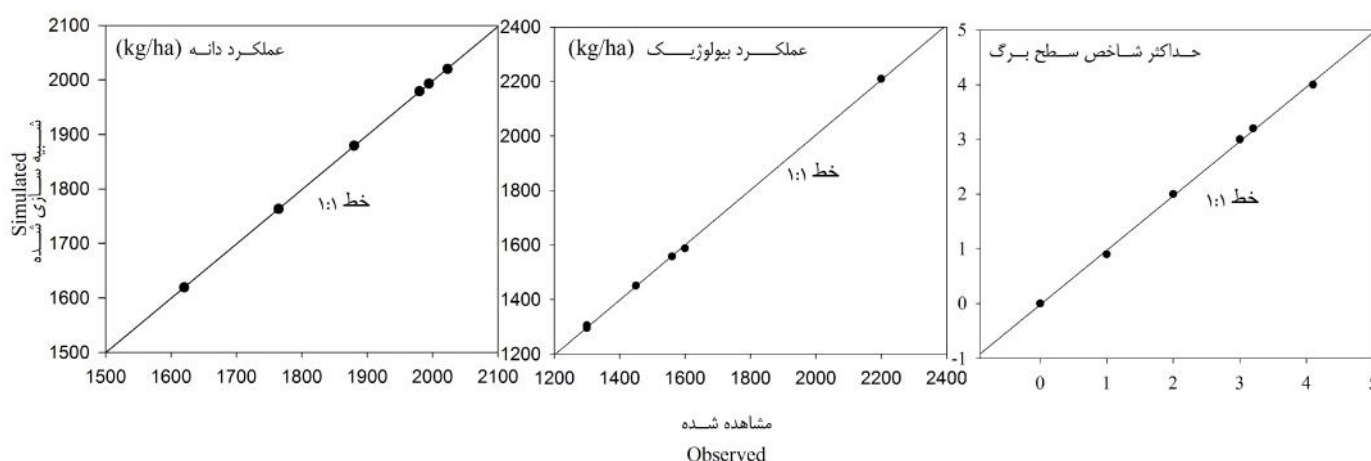
Table 3- Comparison of simulated and observed minimum and maximum temperatures and precipitation using evaluation criteria

ایستگاه Station	پارامترها Parameters	RMSE (%)	RMD (%)	R^2
مشهد Mashhad	حداقل T_{min}	2.41	0.57	0.89
	حداکثر T_{max}	1.71	0.61	0.74
	بارندگی Precipitation	3.43	9.71	0.93
	حداقل T_{min}	1.46	0.24	0.48
سبزوار Sabzevar	حداکثر T_{max}	1.26	0.38	0.78
	بارندگی Precipitation	6.34	6.98	0.96
	حداقل T_{min}	2.72	0.74	0.96
	حداکثر T_{max}	1.16	0.28	0.75
تربت حیدریه Torbat Heydarieh	بارندگی Precipitation	6.38	8.50	0.96

جدول ۴- مقایسه عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و حداکثر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی و مشاهده شده در شرایط پتانسیل با استفاده از آماره‌های ارزیابی

Table 4- Comparison of simulated and observed potential grain and biological yield and maximum leaf area index using evaluation criteria

پارامترها Parameters	RMSE (%)	RMD (%)	EF	R ²
عملکرد دانه Grain yield	9.20	5.60	0.2	0.90
عملکرد بیولوژیک Biological yield	6.70	6.70	0.50	0.86
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index	7.90	9.50	0.46	0.88



شکل ۱- مقایسه مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص سطح برگ در شرایط پتانسیل کلزا در شرایط پتانسیل

Figure 1- Comparison of simulated and observed potential grain and biological yield and leaf area index for canola in potential condition

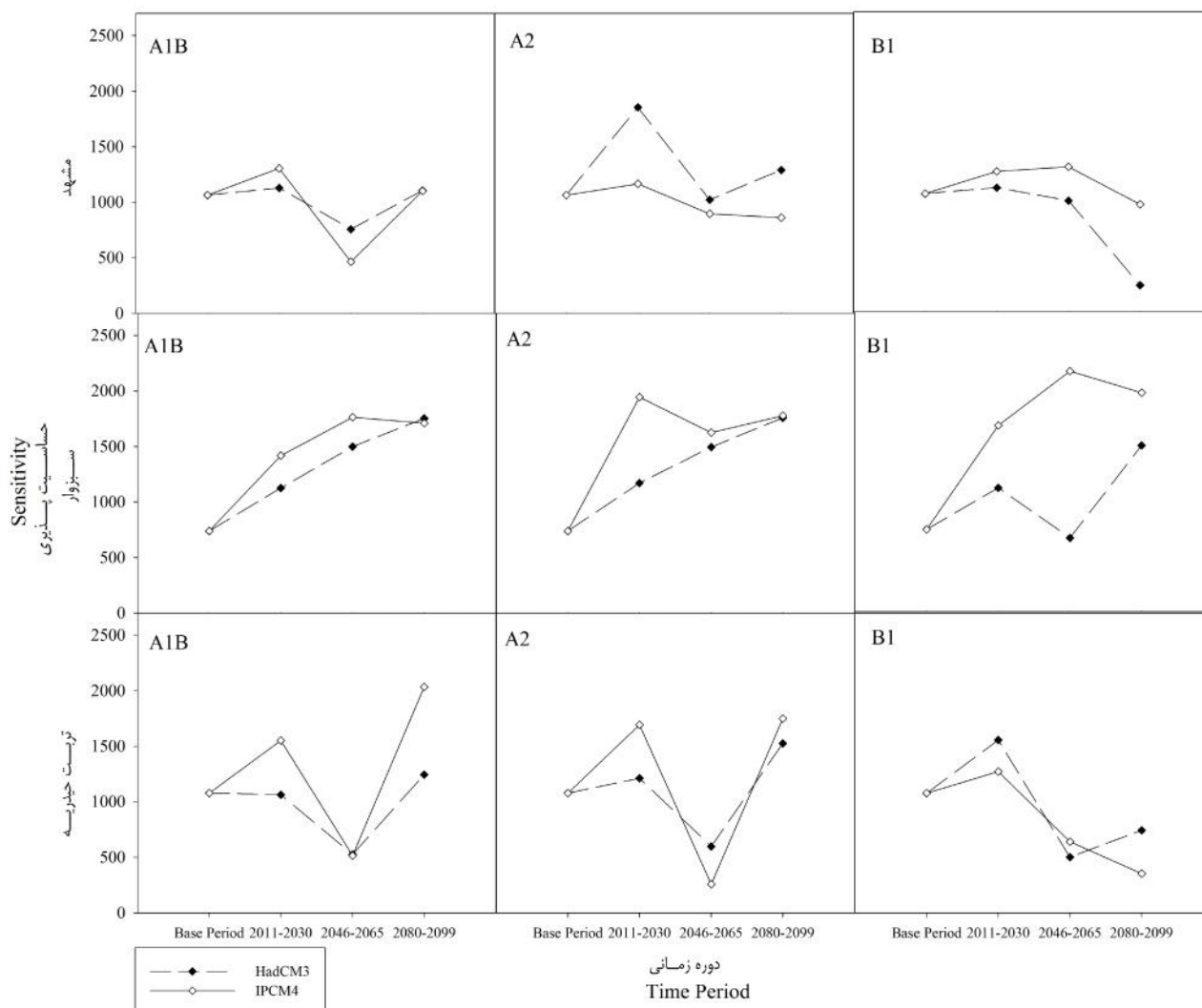
و تولید کلزا در جنوب استرالیا با استفاده از مدل APSIM نشان داد که جذر میانگین مربعات عملکرد دانه شبیه‌سازی شده ۳۳ kg/ha بوده و جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) ۱۴ درصد برآورد شد که از دقت قابل قبولی برخوردار است. شیب رگرسیون خطی یک و مقدار همبستگی نیز ۰/۸۵ برآورد گردید (Zelege *et al.*, 2012).

آسیب‌پذیری

مقادیر تخمین‌زده شده حساسیت‌پذیری کلزا به خشکی طی سال‌های پایه و شبیه‌سازی شده در تمامی مناطق به خشکی بسیار بالا بود (شکل ۲) و بالاتر از ۲۰۰ برآورد شد. همین روند در سال‌های شبیه‌سازی شده توسط دو مدل اقلیمی نیز مشاهده شد.

مقادیر تخمین‌زده شده RMSE شاخص سطح برگ کلزا در مدل WOFOST، $\pm 7/90$ درصد بود و یک همبستگی معنی‌دار میان مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده برای این متغیر به دست آمد ($R^2=0/88$). همچنین عملکرد دانه کلزا به ترتیب $\pm 9/20$ درصد مقادیر مشاهده شده شبیه‌سازی شد و همبستگی زیادی ($R^2=0/90$) میان مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده وجود داشت. عملکرد بیولوژیک نیز $\pm 6/70$ درصد مقادیر مشاهده شده شبیه‌سازی شد و همبستگی زیادی ($R^2=0/86$) میان مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده برای این پارامتر مشاهده شد (جدول ۴ و شکل ۱). مدلی برای تولید دانه کلزا با استفاده از نرم‌افزار Model Maker در مشهد توسط Mirhashemi and Bannayan, 2012 توسعه یافت. نتایج نشان داد که مدل، شاخص سطح برگ کلزا را در شرایط پتانسیل در حدود $\pm 9/33$ درصد پیش‌بینی کرده و همبستگی معنی‌داری میان مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده وجود داشت ($R^2=0/91$). جذر میانگین مربعات برای عملکرد دانه نیز ± 17 درصد با همبستگی معنی‌دار ۰/۷۳ گزارش شد. بررسی تأثیر شرایط آب خاک بر عملکرد

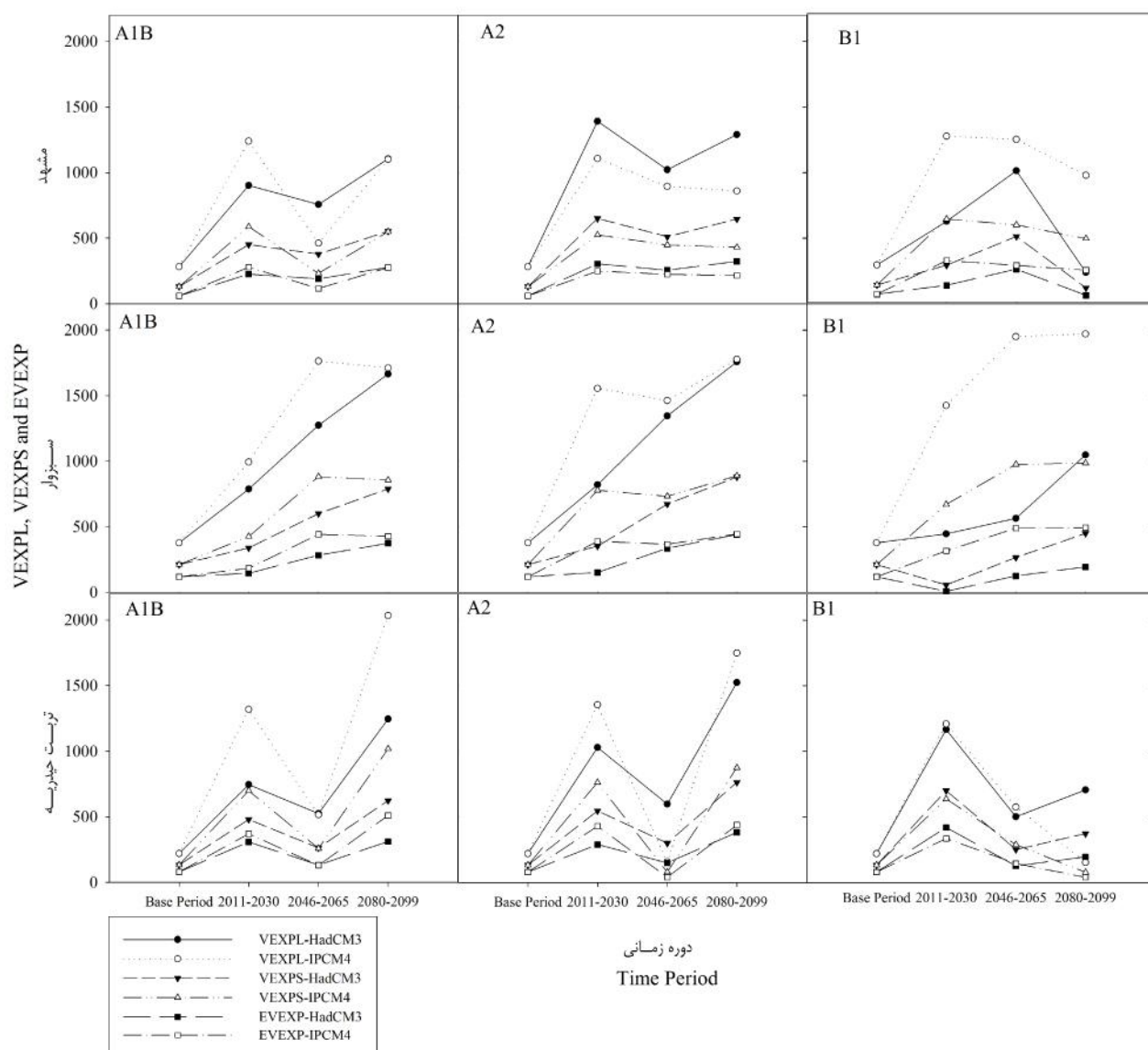
1- Normalized Root Mean Square Error



شکل ۲- حساسیت‌پذیری کلزا به خشکی طی سال‌های پایه و شرایط تغییر اقلیم
Figure 2- Sensitivity of canola to aridity during the baseline period and the projected years

نشان‌دهنده آسیب‌پذیری مورد انتظار کلزا در سال‌های آینده است. مقادیر تخمین زده شده EEXP در تمامی مناطق طی سال‌های پایه و سال‌های شبیه‌سازی شده کمتر از یک بوده و در کلاس کم قرار داشت (شکل ۴). هرچند EEXP ممکن است نتواند شرایط خشکی در آینده را نشان دهد، اما می‌تواند شرایط اقلیمی آینده را تا حدودی واضح‌تر سازد. انتظار می‌رود که خشکی تولید کلزا را در این مناطق طی سال‌های شبیه‌سازی شده همانند سال‌های پایه تحت تأثیر قرار دهد.

مقادیر متغیرهای V_{EXPS} و V_{EXPL} و آسیب‌پذیری مورد انتظار (EV_{EXP}) طی سال‌های پایه و شبیه‌سازی شده در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مقادیر V_{EXPS} ، V_{EXPL} و EV_{EXP} طی سال‌های پایه و شبیه‌سازی شده در تمامی مناطق برای کلزا بیشتر از ۲۰ بوده و در کلاس بسیار زیاد قرار داشتند. تنها مورد استثنا در مدل HadCM3 در سبزواری تحت سناریوی B1 برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ مشاهده شد که مقدار آسیب‌پذیری مورد انتظار در کلاس جزئی قرار داشت. همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد در این مطالعه آسیب‌پذیری به خشکی با در نظر گرفتن مقادیر شاخص خشکی بالاتر از سطح آسیب در دوره مورد نظر، مورد ارزیابی قرار گرفت. V_{EXPL} آسیب‌پذیری را با در نظر گرفتن فراوانی شرایط خشکی شدید در بلندمدت توصیف می‌کند، درحالی‌که V_{EXPS} نشان‌دهنده اثرات فراوانی خشکی شدید در کوتاه مدت بر روی کلزا است. EV_{EXP} نیز



شکل ۳- مقادیر V_{EXPL} ، V_{EXPS} و EV_{EXP} کلزا طی سال‌های پایه و شبیه‌سازی شده

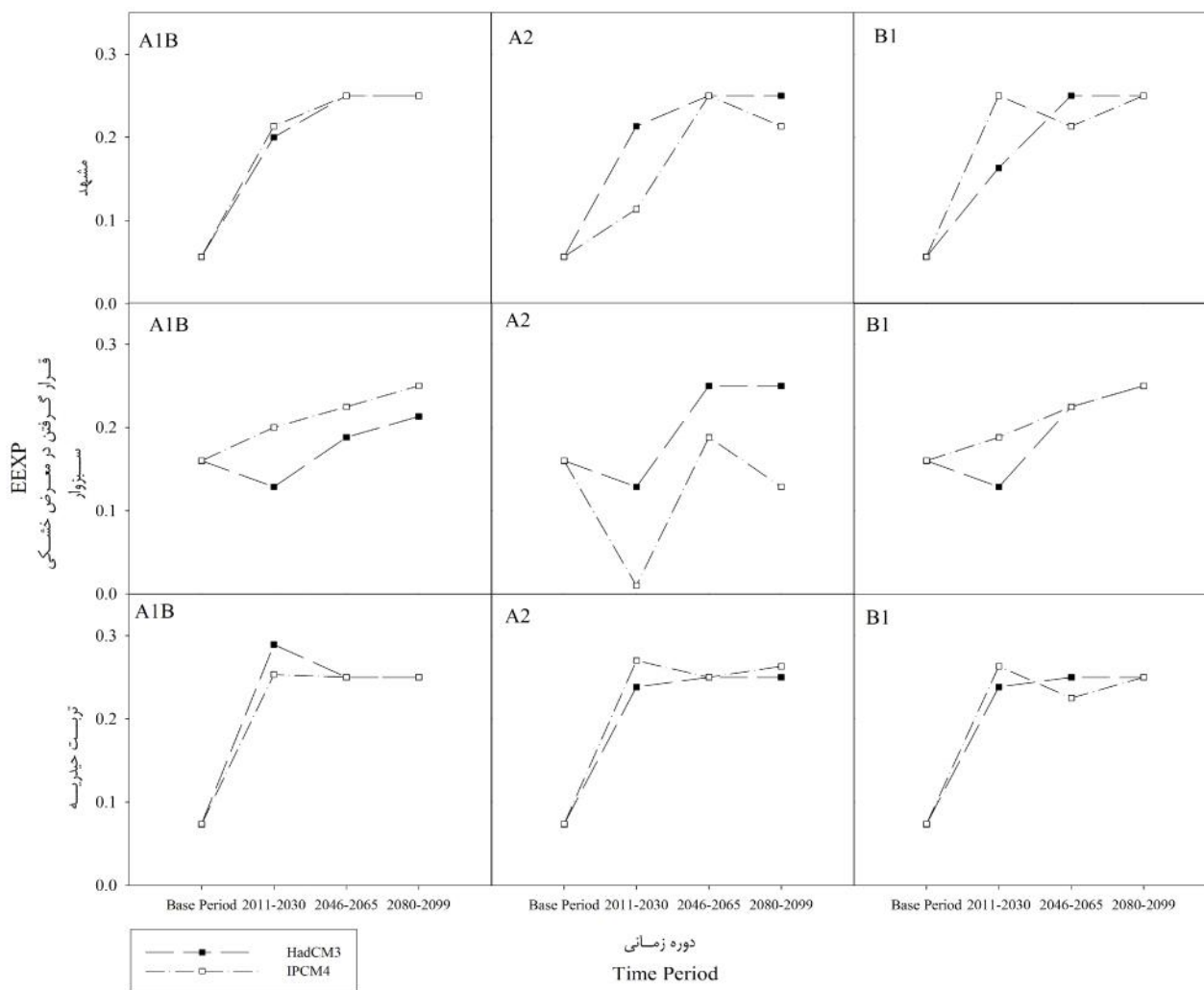
Figure 3- The values of V_{EXPL} ، V_{EXPS} and EV_{EXP} of canola during the baseline period and the projected years

می‌توان خشکی را به‌عنوان یکی از عوامل محدودکننده عملکرد در مناطق مورد مطالعه در نظر گرفت. این اثرات منفی ممکن است به کاهش میزان فتوسنتز و سرعت و میزان انتقال مواد پرورده در شرایط خشکی مربوط باشد که منجر به کاهش عملکرد و ماده خشک در محصول خواهد گردید (Emam *et al.*, 2007). خشکی همچنین گرده‌افشانی گیاه را تحت تأثیر قرار داده و منجر به عقیمی دانه‌گرده شده و تولید گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Roya *et al.*, 2006). تأثیر خشکی بر عملکرد دانه کلزا عمدتاً از طریق کاهش تعداد دانه در خورجین آشکار می‌شود (Daneshmand *et al.*, 2006). بر اساس نتایج محققین تعداد دانه کلزا در خورجین در اثر خشکی کاهش می‌یابد (Ma *et al.*, 2006). همچنین گزارش شده که طی

از آنجایی که مقادیر حساسیت‌پذیری و آسیب‌پذیری برای محصول کلزا طی سال‌های پایه و شبیه‌سازی شده بسیار زیاد بودند به‌نظر می‌رسد که خشکی تولید این محصول را در مناطق مورد مطالعه تحت تأثیر قرار خواهد داد. بالا بودن مقادیر V_{EXPL} و V_{EXPS} برآورد شده طی سال‌های پایه بیانگر تأثیر خشکی بر عملکرد کلزا طی دوره‌های زمانی بلند و کوتاه مدت به یک درجه می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که خشکی شدید حتی طی دوره‌های زمانی کوتاه‌تر نیز می‌تواند عملکرد کلزا را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. همین روند تأثیر شدید خشکی بر عملکرد طی سال‌های شبیه‌سازی شده (EV_{EXP}) نیز ادامه خواهد داشت، به‌طوری‌که عملکرد کلزا در مناطق مورد مطالعه نسبت به خشکی کاملاً (۱۰۰ درصد) آسیب‌پذیر بوده و

به پتانسیل ژنتیکی از نظر ارتفاع بوته نسبت داد (Jamshidi *et al.*, 2012). بررسی خشکی و اثرات آن را بر عملکرد محصولات در اوکراین با استفاده از داده‌های هواشناسی و ماهواره‌ای نشان داد که نوسانات اقلیمی منجر به کاهش ۲۰ تا ۵۰ درصد عملکرد محصولات زمستانه و ۳۵ تا ۷۵ درصد کاهش محصولات تابستانه می‌گردد (Adamenko and Prokopenko, 2011). همچنین گزارش شده که خشکی منجر به کاهش عملکرد سویا تا ۵۶ درصد در منطقه کنتاکی آمریکا در قرن بیستم شده که ۷۷ درصد آن در نیمه اول قرن قبل روی داده است (Craft *et al.*, 2015).

سال‌های ۲۰۰۷-۱۹۸۰ عملکرد محصولات با وقوع خشکی هواشناسی در بخش غربی مرکز ایالات متحده طی دوره پر شدن دانه و رشد زایشی، همبستگی زیادی داشتند (Mishra and Cherkauer, 2010). گزارش شده که خشکی موجب کاهش معنی‌دار صفات مورفولوژیک کلزا (ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی و طول خورجین)، عملکرد دانه و اجزای عملکرد (تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه) و عملکرد روغن گیاه کلزا می‌شود (Hasanzadeh *et al.*, 2005). کاهش ارتفاع گیاه در اثر خشکی را می‌توان به کاهش تولید مواد فتوسنتزی جهت انتقال به بخش‌های در حال رشد گیاه و نهایتاً عدم دستیابی گیاه



شکل ۴- روند در معرض خشکی قرار گرفتن کلزا طی سال‌های پایه و شبیه‌سازی شده

Figure 4- Trend of exposure of canola during the baseline period and the projected years

خشکی بسیار آسیب‌پذیر بود. نتایج هر دو مدل در سال‌های شبیه‌سازی شده نیز مشابه سال‌های پایه بود، به طوری که این محصول نسبت به خشکی حساسیت‌پذیری و آسیب‌پذیری بسیار بالایی را نشان

نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری کلزا نسبت به خشکی نشان داد که این محصول طی سال‌های پایه تحت تأثیر خشکی قرار گرفته و نسبت به

به‌کارگیری ارقام پر تولید و مقاوم و ترویج گیاهان جدید گیاهان فراموش شده و کمتر استفاده شده، امکان‌پذیر است. این راهکارها می‌توانند تکمیل‌کننده یکدیگر بوده و همچنین بین آنها رابطه هم‌افزایی وجود دارد.

داد. نتایج این تحقیق بر اهمیت مطالعات بر روی کاهش و جلوگیری از اثرات نامطلوب تغییر اقلیم و خشکی ناشی از آن تأکید می‌کند. کاهش آثار تغییر اقلیم و سازگاری با آن با استفاده از راهکارهای متفاوتی همچون تغییر تاریخ کاشت، تغییر الگوی کشت،

References

1. Adamenko, T., and Prokopenko, T. 2011. Monitoring Droughts and Impacts on Crop Yield in Ukraine from Weather and Satellite Data. Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security 3-9.
2. Adger, W. N. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change* 16: 268-281.
3. Alberini, A., Chiabai, A., and Muehlenbachs, L. 2006. Using expert judgment to assess adaptive capacity to climate change: Evidence from a conjoint choice survey. *Global Environmental Change* 16(2): 123-144.
4. Antwi Agyei, P., Fraser, E. D. G., Dougill, A. J., Stringer, L. C., and Simelton, E. 2012. Mapping the vulnerability of crop production to drought in Ghana using rainfall, yield and socioeconomic data. *Applied Geography* 32 (2): 324-334.
5. Boogaard, H., Van Diepen, C., Roetter, R., Cabrera, J., and Van Laar, H. 1998. WOFOST 7.1 User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST control center 1.5. SC-DLO. Wageningen.
6. Boruff, B. J., Emrich, C., and Cutter, S. L. 2005. Erosion hazard vulnerability of US coastal countries. *Journal of Coastal Research* 21(5): 932-942.
7. Brooks, N., Adger, W. N., and Kelly, P. M. 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change* 15(2): 151-163.
8. Burke, E., and Brown, S. J. 2010. Regional drought over the UK and changes in the future. *Journal of Hydrology* 394(3-4): 471-485.
9. Chipanshi, A. C., Chanda, R., and Totolo, O. 2003. Vulnerability Assessment of the Maize and Sorghum Crops to Climate Change in Botswana. *Climatic Change* 61(3): 339-360.
10. Craft, K. E., Mahmood, R., King, S. A., Goodrich, G., and Yan, J. 2015. Twentieth century droughts and agriculture: Examples from impacts on soybean production in Kentucky, USA. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*.
11. Daneshmand, A. R., Shirani Rad, A. H., and Ardakani, M. R. 2006. Evaluation of water deficit stress on tolerance of spring rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes. *Agronomy Research* 1(1): 48-60. (in Persian).
12. Dixon, B. 2005. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground water vulnerability: a GIS based sensitivity analysis. *Journal of Hydrology* 309(1-4): 17-38.
13. Emam, Y., Ranjbari, A., and Behrani, M. J. 2007. Evaluation of drought stress effects on yield and yield components of wheat genotypes after flowering. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Sciences* 11(1): 317-328. (in Persian).
14. FAO statistics. 2015. <http://faostat.fao.org>. 6 May 2015.
15. Gallopin, GC. 2006. Linkage between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change* 16(3): 293-303.
16. Gove P. B. Ed. 1981. Webster's third new international dictionary of the English language.
17. Hargreaves, G. H., and Samani, A. Z. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2): 96-99.
18. Hasanzadeh, M., Naderi Darbaghshahi, M., and Shirani Rad, A. H. 2005. Evaluation of drought stress effects on yield and yield components of autumn rapeseed varieties in Isfahan region. *Research in Agricultural Sciences* 2(1): 51-62. (in Persian).
19. Humphreys, M. W., Yadav, R. S., Cairns, A. J., Turner, L. B., Humphreys, J., and Skot, L. 2006. A changing climate for grassland research. *New Phytologist* 169(1): 9-26.
20. IPCC. 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability climate change 2001. Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. UK.
21. Jamshidi, N., Shirani Rad, A. M., Takht Chin, F. Nazeri, P., and Ghaffari, M. 2012. Evaluation of canola varieties under drought stress. *Crop Ecophysiology* 6(3): 323-338. (in Persian).
22. Kenny, G. J., Ye, W., Flux, T., and Warrick, R. A. 2001. Climate variations and New Zealand agriculture: the CLIMPACTS system and issues of spatial and temporal scale. *Environment International* 27:189-194.
23. Lashkari, A., Alizadeh, A., and Bannayan, M. 2011. Investigation of mitigation of climate change impacts on maize production in Northeast of Iran. *Journal of water and soil* 25(4): 926-939.
24. Li, Y., Huang, H., Ju, H., Lin, E., Xiong, W., Han, X., Wang, H., Peng, Z., Wang, Y., Xu, J., Cao, Y., and Hu, W. 2015. Assessing vulnerability and adaptive capacity to potential drought for winter-wheat under the RCP 8.5

- scenario in the Huang-Huai-Hai Plain. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 209: 125-131.
25. Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., and Matson, P. A. 2003. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change* 13(4): 255-267.
 26. Ma, Q., Niknam, S. R., and Turner, D. W. 2006. Responses of osmotic adjustment and seed yield of *Brassica napus* and *B. juncea* to soil water deficit at different growth stages. *Australian Journal of Agricultural Research* 57(2): 221-226.
 27. McCarl, B. A., Musumba, M., Smith, J. B., Kirshen, P., Jones, R., El-Ganzori, A., Ali M. A., Kotb M., El-Shinnawy I., El-Agizy, M. Bayoumi, M., and Hynninen, R. 2013. Climate change vulnerability and adaptation strategies in Egypt's agricultural sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*.
 28. Mirhashemi, S. M., and Bannayan, M. 2012. Model for simulating canola yield under water stress conditions. *Journal of Water and Soil* 26(2): 392-403. (in Persian with English abstract).
 29. Mishra, V., and Cherkauer, K. A. 2010. Retrospective droughts in the crop growing season: Implications to corn and soybean yield in the Midwestern United States. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(7-8): 1030-1045.
 30. Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
 31. Ren, X. 2007. Agricultural vulnerability to drought in Southern Alberta: a quantitative assessment. MSc Thesis. University of Lethbridge. Canada.
 32. Royo, C., Alvaro, F., Martos, V., Ramdani, A., Isidro, J., Villegas, D., Luis, F., and Garcí'a del, M. 2006. Genetic changes in durum wheat yield components and associated traits in Italian and Spanish varieties during the 20th century. *Euphytica* 155: 259-270.
 33. Schilling, J., Freier, K. P., Hertig, E., and Scheffran, J. 2012. Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 156: 12-26.
 34. Semenov, M. A., and Brooks, R. J. 1999. Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climatic Research* 11:137-148.
 35. Smit, B., and Wandel, J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change* 16(3): 282-292.
 36. Sultana, H., Ali, N., Iqbal, M. M., Khan, A. M. 2009. Vulnerability and adaptability of wheat production in different climatic zones of Pakistan under climate change scenarios. *Climatic Change* 94(1-2): 123-142.
 37. Supit, I., Hooijer, A. A., and Van Diepen, C. A. 1994. System description of WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in GCMs. European Commission Joint Research Center. Luxembourg.
 38. Tao, F. L., Hayashi, Y., and Lin, E. D. 2002. Soil vulnerability and sensitivity to acid deposition in China. *Water Air and Soil Pollution* 140(1-4): 247-260.
 39. Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckleyg, N., Kaspersonb, J. X., Luerse, A., Martellog, M. L., Polskya, C., Pulsiphera, A., and Schillerb, A. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(14): 8074-8079.
 40. United Nations Environment Programme (UNEP). (1992). *World atlas of desertification*.
 41. Zeleke, K. T., Luckett, D. J., and Cowley, R. B. 2014. The influence of soil water conditions on canola yields and production in Southern Australia. *Agricultural Water Management* 144: 20-32.
 42. Zomorodian, A., Kavooosi, Z., and Momenzadeh, L. 2010. Determination of EMC isotherms and appropriate Mathematical models for canola. *Food and Bioproducts Processing* 89(4):407-413.



Evaluating Canola Yield under Arid and Climate Change Conditions

S. Farhangfar¹- M. Bannayan^{2*}- H. R. Khazaei²- M. Mousavi Baygi³

Received: 25-10-2015

Accepted: 06-04-2016

Introduction: Climate change has a profound influence on crop production sustainability in arid and semi-arid environments. A more arid climate is usually accompanied by a higher frequency and severity of droughts. Drought prevention and mitigation has become important content of promoting economic and social sustainable development. Assessing vulnerability of agricultural crops is an effective approach in understanding the impacts of climate change and extreme climatic events on agricultural systems. In recent years vulnerability was generally considered as a function of exposure, sensitivity and adaptive capacity. Sensitivity reflects the degree to which a given system responds to the fluctuations in stress. Adaptive capacity has been defined as the capacity of a system to adjust to the change and take advantage from it. Exposure is the possibility of the system being exposed to the concerned change in the stress. This study aims to achieve an understanding of the vulnerability of wheat and maize production, to various severities of drought conditions in the past and coming future years.

Materials and Methods: This study was performed in Mashhad, Sabzevar and Torbat Heydarieh. Daily historical weather data including maximum and minimum air temperature (°C), precipitation (mm) and solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) for the period of 1961-2008 were collected for each study location from their established climatologic stations. Two general circulation models including IPCM4 and HadCM3 were used under A1B, A2 and B1 emission scenarios using LARS-WG. Historical crop yields of canola were collected for study locations from the established Ministry of Agricultural. The potential canola yield was simulated by the crop growth model WOFOST version 7.1.7. For quantifying drought, Aridity Index (UNEP 1992) was calculated for canola growing season March-October. In this study vulnerability was considered as a function of sensitivity, well-being state relative to its damage threshold and exposure. Sensitivity was calculated as the slope value of the simulated trend line of yield and aridity index during the growing season of canola. The crop production well-being to its damage threshold was calculated as the proportion of the yield of a specific year to the average yield over the selected years. Exposure was calculated as the proportion of years having an AI_U value under the specified level within the concerned period.

Results and Discussion: The estimated agricultural sensitivity showed that in all the study locations canola was extremely sensitive to drought in the baseline; the same trend was obtained in the projected years by both HadCM3 and IPCM4 models ($\text{SEN} > 200$). For all the study locations the estimated values of V_{EXPL} , V_{EXPS} and EV_{EXP} in the baseline were extremely high (> 20), while EEXP was low. It seems that canola production in the baseline have suffered from severe drought. The results of both GCM models showed the same trend under all scenarios as the estimated values of SEN , V_{EXPL} , V_{EXPS} and EV_{EXP} during the coming future years were extremely high, while EEXP was low. It seems that in all study locations drought is going to affect canola production in the coming future years. These negative effects can be related to photosynthesis reduction and decline in the speed and amount of transportation assimilation under drought conditions that causes crop yield and dry matter reduction. Drought also affects plants pollination and causes pollen sterility, which affects crop production. It was reported by Daneshmand *et al.*, 2006 that drought usually affects the grains of canola by reducing the number of seeds in siliqua. It was stated by Ma *et al.*, 2006 that the number of seeds in the siliqua declines under drought conditions. According to the results of Mishra and Cherkauer, 2010 during 1980-2007 the yield of crops showed a strong correlation with drought during the seed filling and reproductive periods in western part of the center United States. It was also reported that drought reduces the morphological traits of canola (bush height, number of sub-branches and the length of siliqua), grain yield and its components (the number of siliqua in a bush, number of seeds in a siliqua and the weight of 1000 seeds) and the oil yield significantly.

1- Ph.D. Graduated Student of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- Professor of Meteorology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: mobannayan@yahoo.com)

Conclusions: Overall, this study results showed that canola production has affected from severe droughts during the baseline years. The results of both GCM models showed the same trend as the baseline. Canola production was extremely sensitive and vulnerable to drought during the baseline and projected years.

Keywords: Sensitivity, Vulnerability, WOFOST model