

بررسی اثر تغییر اقلیم بر فراوانی وقوع رخداد‌های نامطلوب آب و هوایی طی دوره رشد محصول گندم (مطالعه موردی: مناطق عمده تولید گندم دیم (*Triticum aestivum* L.) در ایران)

مجتبی شکوهی¹، سید حسین ثنائی نژاد^{2*} و محمد بنایان اول³

تاریخ دریافت: 1397/07/12

تاریخ پذیرش: 1397/10/04

شکوهی، م.، ثنائی نژاد، س.ح.، و بنایان اول، م. 1398. بررسی اثر تغییر اقلیم بر فراوانی وقوع رخداد‌های نامطلوب آب و هوایی طی دوره رشد محصول گندم (مطالعه موردی: مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران). بوم‌شناسی کشاورزی، 11 (2): 601-618.

چکیده

یکی از پیامدهای تغییر اقلیم افزایش ریسک وقوع رخداد‌های وخیم اقلیمی است که باعث اختلال در تولید مواد غذایی خواهند شد و انتظار می‌رود فراوانی آنها در جهان افزایش یابد. تغییر اقلیم بر محیط تولید محصولات زراعی از جمله مناطق عمده تولید گندم دیم (*Triticum aestivum* L.) در ایران (استان‌های اردبیل، کردستان، کرمانشاه، گلستان، همدان و زنجان) اثرگذار خواهد بود و می‌تواند در این مناطق امنیت غذایی را با خطر مواجه سازد. احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب اقلیمی تأثیرگذار بر عملکرد محصول طی مراحل مختلف رشد و نمو برای سه رقم زودرس، دیررس و میان‌رس تعیین شد. برای تعریف پدیده‌های نامطلوب از شاخص‌های اگروکلیمایی (13 شاخص) در مقیاس روزانه که بر مبنای خروجی مجموعه مدل‌های به روز CMIP5 و سناریوهای انتشار RCP2.6 و RCP8.5 است، استفاده شد. خروجی روزانه هفت مدل GCM انتخابی متناسب با منطقه برای دو دوره زمانی 2045-2065 و 2080-2100 با روش تصحیح خطای نگاهت هم فاصله تابع توزیع تجمعی EDCDFm تصحیح و سپس بکارگیری شد. بیشترین افزایش دمای متوسط طی دوره رشد مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره 2080-2100 و رقم دیررس به مقدار 3/1 درجه سانتی‌گراد خواهد بود. تاریخ مناسب کاشت برای تمام سناریوها در آینده نسب به دوره پایه دیرتر رخ داده و به اواخر پاییز منتقل می‌شود. به علت افزایش متوسط دما طی دوره رشد مراحل گل‌دهی و رسیدن زودتر رخ داده و در نتیجه متوسط طول دوره رشد برای تمام سناریوها در مقایسه با دوره پایه کوتاه‌تر می‌شود. متوسط مجموع تبخیر و تعرق محصول (ETc) طی دوره رشد در اکثر ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به مطلوب‌تر شدن کاهش نسبی عملکرد (YD) و تابش خورشیدی مؤثر طی دوره رشد برای اکثر ایستگاه‌ها می‌توان گفت که این شاخص‌های عملکردی محصول نسبت به دوره پایه بهبود می‌یابند. اما آنچه در این میان نامطلوب به نظر می‌آید افزایش فراوانی وقوع پدیده‌های نامطلوب نسبت به دوره پایه است و نکته نگران‌کننده‌تر افزایش احتمال وقوع حداقل یک، دو و سه پدیده نامطلوب طی دوره رشد است که می‌تواند شرایط اقلیمی را به ضرر تولید گندم تغییر دهد. انتخاب یک رقم زودرس جهت کاشت در آینده در مقایسه با رقم‌های دیررس و میان‌رس، رقم مناسب‌تری خواهد بود و می‌تواند شرایط اقلیمی آینده را به نفع تولید گندم دیم در اکثر مناطق به‌ویژه مناطق سردسیر تغییر دهد.

واژه‌های کلیدی: تصحیح خطای EDCDFm، سناریوهای انتشار RCP، شاخص‌های اگروکلیمایی، مدل‌های CMIP5

یکی از پیامدهای افزایش دمای جهانی افزایش ریسک وقوع رخداد‌های وخیم اقلیمی است (IPCC, 2014). رویدادهای وخیم

مقدمه

1، 2 و 3- به ترتیب دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشیار گروه مهندسی آب و استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(Email: Mojtabashokohi@gmail.com) * - نویسنده مسئول
Doi:10.22067/jag.v11i2.75744

می‌شود (Hansen & Jones, 2000). همچنین مدل‌های زراعی نمی‌توانند اثر رویدادهای وخیم آب و هوایی (مانند بارش سنگین، تنش‌های حرارتی) را بر عملکرد نهایی محصول لحاظ کنند (Rotter et al., 2011). بنابراین گاهی اوقات به‌کارگیری شاخص‌های اگروکلیمایی برای ارائه یک تصویر جامع‌تر از تأثیر تغییر اقلیم بر شرایط اگروکلیمایی مفید واقع می‌شود (Alexandrov et al., 2008). به‌طور کلی شاخص‌های اگروکلیمایی به دلیل توانمندی، محاسبه و تفسیر نسبتاً ساده (Sillmann et al., 2013) می‌تواند برای بررسی چگونگی تأثیر شرایط اقلیمی بر تولید محصول و اتخاذ شیوه‌های مدیریت زراعی به کار گرفته شوند (Fernández-Long et al., 2013). بنابراین در این مطالعه از رهیافت شاخص‌های اگروکلیمایی برای ارزیابی‌های پیش رو استفاده شد.

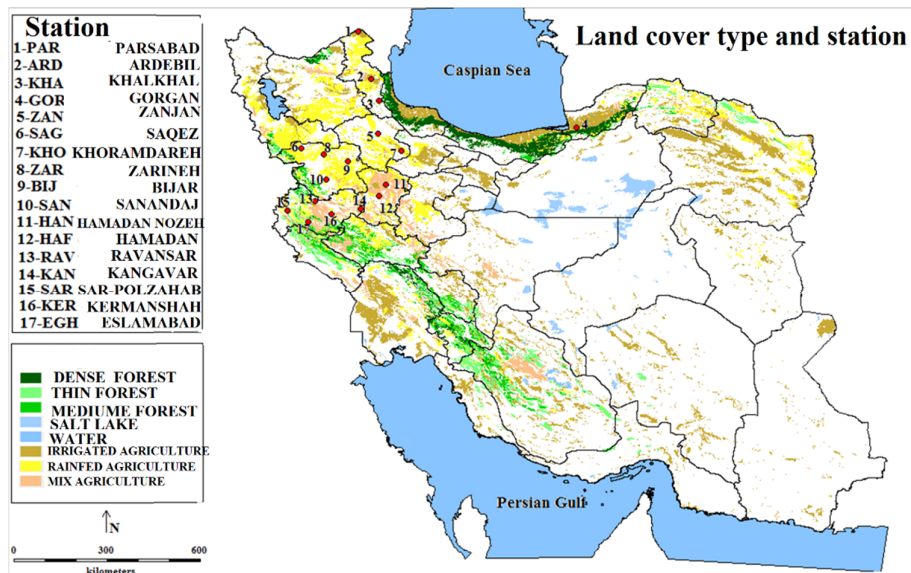
پاسخ گیاه گندم به شرایط نامطلوب اقلیمی (تنش رطوبتی و حرارتی) ارتباط تنگاتنگی با طول دوره رشد دارد (McMaster & Wilhelm, 2003) به‌طوری‌که همزمانی وقوع رخداد‌های نامطلوب با مراحل حساس نمو (مثل تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل دهی) اثر شدیدتری بر محصول می‌گذارد (Shokouhi & Sanaei, 2014). حال این سوال مطرح می‌شود که احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب آب و هوایی طی مراحل رشد و نمو محصول در مناطق عمده تولید گندم در ایران چگونه تغییر خواهد کرد؟ بنابراین هدف این مطالعه ارزیابی این است که آیا تحت پیش‌نگری-های اقلیمی آینده (دوره 2046-2065 و دوره 2081-2100) شرایط اگروکلیمایی در مناطق عمده تولید گندم در کشور به نفع تولید محصول هستند یا به ضرر آن و احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب طی مراحل مختلف رشد و نمو محصول چگونه تغییر خواهد کرد. برای نشان دادن وقوع پدیده‌های نامطلوب در مراحل مختلف رشد و نمو از شاخص‌های اگروکلیمایی در مقیاس روزانه استفاده می‌کنیم که بر مبنای خروجی مجموعه مدل‌های به-روز CMIP5¹ (Taylor et al., 2012) و سناریوهای انتشار² RCPS (Moss et al., 2010) است. با کمی کردن ریسک وقوع پدیده‌های نامطلوب در هر منطقه می‌توان سیاست‌های سازگاری مناسب‌تری (مثل توسعه رقم‌های جدید یا شیوه‌های مدیریت زراعی) برای هر منطقه اتخاذ کرد.

اقلیمی مانند دوره‌های با دمای بسیار بالا، خشکسالی و سیل باعث تغییر اکوسیستم طبیعی، اختلال در تولید مواد غذایی و منابع آبی خواهند شد و انتظار می‌رود فراوانی وقوع این رخدادها در جهان افزایش یابد (IPCC, 2013). تغییر الگوهای توزیع دمایی و بارش، بر محیط تولید محصولات زراعی از جمله گندم اثرگذار خواهد بود. تا سال 2030 مناطق کشت گندم در جهان که با خطر وقوع دماهای بسیار بالا طی مراحل حساس رشد و نمو تهدید می‌شوند به دو برابر افزایش می‌یابد و تا سال 2050 به سه برابر افزایش خواهد یافت (Gourdji et al., 2013). محصول گندم غذای غالب ایرانیان (Yazdanshenas et al., 2011) به‌ویژه به شکل نان است و به-عنوان یک محصول راهبردی و تأثیرگذار بر امنیت غذایی حائز اهمیت است طبق آخرین آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی (Ahmadi et al., 2017)، مقدار تولید گندم آبی و دیم کشور به ترتیب 8843253 و 5748750 می‌باشد که استان‌های اردبیل، کردستان، کرمانشاه، گلستان، همدان و زنجان به عنوان مناطق عمده تولید گندم دیم با تولید 3175755 تن گندم دیم بیش از 55 درصد از کل تولید گندم دیم کشور را به خود اختصاص داده‌اند. لذا تغییر اقلیم می‌تواند بر تولید گندم دیم در این مناطق تأثیرگذار بوده و تبعات اجتماعی و اقتصادی در پی داشته باشد. بنابراین برای دولت‌ها و دانشمندان، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی و تامین امنیت غذایی دارای اهمیت ویژه‌ای است.

مطالعات ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصول از خروجی‌های مدل‌های اقلیمی (GCM) در مدل‌های شبیه‌سازی زراعی استفاده می‌کنند، و یا با استفاده از روش‌های آماری از روابط پاسخ محصول به شرایط اقلیمی گذشته به‌عنوان عاملی برای پیش-بینی عملکرد محصول در آینده استفاده می‌نمایند (Asseng, 2017). اگرچه اکثر مدل‌های شبیه‌سازی محصول قادر به شبیه‌سازی اثرات افزایش غلظت CO₂ و شیوه‌های مدیریتی بر زیست‌توده و عملکرد دانه هستند اما از طرفی این مدل‌ها نیاز به داده‌های ورودی زیادی دارند (داده‌های خاک، آب و هوا، مشخصات رقم و شیوه‌های زراعی) (Angulo et al., 2013) و برای یک محیط همگن (یک سایت) طراحی شده و مناسب تحلیل‌ها در مقیاس مزرعه هستند (Priya & Shibasaki, 2001). بنابراین استفاده‌ی آنها در نواحی بزرگ مانند مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم به علت تغییرات داده‌های ورودی و ناهمگنی در منطقه با مشکل روبه‌رو است و سبب خطا در شبیه‌سازی

1-Coupled Model Intercomparison Project phase 5

2-Representative Concentration Pathways (RCPs)



شکل 1- نمای کلی از مکان ایستگاهها و نوع پوشش زراعی مناطق مورد مطالعه
 Fig.1- Overview of the location of the stations and type of crop coverage in study areas

جدول 1- مدلها و گروههای هر مدل، که به کارگیری شده در این مطالعه
 Table 1- Climate models, experiments, ensemble members, used in this study

نام مدل Model Name	مرکز مدل سازی Research Centre	اندازه تفکیک Horizontal Resolution (latitude × longitude)	گروهها و اعضای مدل Experiments and Ensemble Members
CNRM-CM5	مرکز ملی تحقیقات هواشناسی فرانسه Centre National de Recherches Meteorologiques, France	1.401×1.406	hist. r[1-10]i1p1, RCP26 r1i1p1, RCP85 r[1,2,4,6,10]i1p1
CSIRO-Mk3-6-0	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک المنافع / مرکز تغییر آب و هوا در کوئینزلند استرالیا Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Queensland Climate Change Centre of Excellence Australia	1.865×1.875	r[1-10]i1p1
EC-EARTH	مدل سیستم زمینی اروپایی، هلند / ایرلند European Earth System Model, Netherlands/Ireland	1.121×1.125	hist. r[1,2,6,7,8,9,12,13,14]i1p1, RCP26 r[8,12]i1p1, RCP85 r[1,2,6,8,9,11,12,13]i1p1
HadGEM2-ES	دفتر مرکزی هواشناسی هدلی بریتانیا Met Office Hadley Centre, UK	1.25×1.875	r[1-4]i1p1
IPSL-CM5A-MR	موسسه پیر سیمون لاپلاس، پاریس، فرانسه Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France	1.268×2.5	hist. r[1-3]i1p1, RCP26 & RCP85 r1i1p1
MIROC5	موسسه تحقیقات جو و اقیانوس، دانشگاه (JAMSTEC) آژانس علوم و فنون زمین دریایی ژاپن توکیو، و انستیتوی ملی مطالعات زیست محیطی، ژاپن Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, and National Institute for Environmental Studies, Japan	1.401×1.406	hist. r[1-5]i1p1, RCP26 & RCP85 r[1-3]i1p1
MPI-ESM-LR	موسسه هواشناسی ماکس پلانک، آلمان Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.865×1.875	r[1-3]i1p1

مواد و روشها

همدان و اردبیل) است که طبق آخرین آمار و اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی بیش از 55 درصد تولید گندم دیم متعلق به این مناطق است (شکل 1). از اینرو داده‌های روزانه متغیرهای اقلیمی دمای

تمرکز این مطالعه، بر روی استان‌های عمده تولید گندم دیم پاییزه در ایران (استان‌های کردستان، کرمانشاه، گلستان، زنجان،

نتایج بعدی خواهد بود. برای نشان دادن میزان نسبی عدم قطعیت در پیش‌نگری‌های اقلیمی هفت مدل اقلیمی انتخابی در هر ایستگاه از نمودار جعبه‌ای⁵ در شکل‌ها استفاده شد. به منظور بررسی و مقایسه اثرات همزمانی وقوع پدیده‌های نامطلوب با مراحل حساس رشد و نموی در دوره‌های D1 و D2 با دوره پایه سه رقم، با طول دوره رشد کوتاه (زودرس (Ea)، متوسط (میان‌رس (Me) و طولانی مدت (دیررس (La) لحاظ شد (جدول 2). تاریخ وقوع مراحل رشد و نمو این ارقام با توجه به پارامترهای توصیه شده در هر مرحله (Trnka et al., 2014) (جدول 2)، با استفاده از روش (Olesen et al., 2012) تعیین شد (جدول 2). برای هر ایستگاه در بازه زمانی 31 شهریور الی 20 آذر چنانچه اولین روز بعد از اینکه دمای متوسط، حداقل برای پنج روز متوالی کمتر از 13 °C و رطوبت خاک بیش از یک سوم حداکثر ظرفیت زراعی خاک (θ_{FC}) باشد، به عنوان "تاریخ مناسب کاشت" در نظر گرفته شد و اگر این شرایط محقق نشد روز 21 آذر به عنوان "تاریخ مناسب کاشت" لحاظ شد. بررسی‌ها نیز نشان داد در پایان قرن حاضر 20 آذر تاریخ مناسب کاشت گندم در ایستگاه اهواز خواهد بود (Delghandi et al., 2016).

از آنجا که برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه (ETo)⁶ به روش پنمن-مونتیت اطلاعات قابل اطمینان (مثل سرعت باد و رطوبت نسبی) در دسترس نیست از روش‌های پیشنهادی دیگر استفاده شد. برای ایستگاه‌های گرگان، همدان فرودگاه و همدان نوژه روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده⁷، و برای مابقی ایستگاه‌ها روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده¹ انتخاب شد (Valipour, 2014). تبخیر و تعرق روزانه محصول در شرایط استاندارد (ET_c)⁸ با استفاده از روش (Allen et al., 1998) محاسبه شد. ضرایب گیاهی یگانه گندم (Kc) از 0/3 در مراحل اولیه رشد تا 1/15 در مرحله گل دهی و در نهایت تا 0/25 در زمان رسیدن لحاظ شد (Rahimi et al., 2014). تبخیر و تعرق روزانه محصول در شرایط تنش رطوبتی (ET_{c-adj})⁹ و رطوبت خاک نیز با استفاده از روش (Allen et al., 1998) محاسبه شد.

حداکثر، حداقل، بارش و تابش خورشیدی (یا ساعات آفتابی) در این استان‌ها، برای 17 ایستگاه سینوپتیک (شکل 1، دوایر شماره‌دار) که دارای بیشترین دوره آماری هستند از سازمان هواشناسی کشور فراهم گردید. یکی از مسائل حائز اهمیت در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم انتخاب مدل‌های گردش عمومی GCM¹ متناسب با منطقه هست (Shokouhi et al., 2018). بنابراین از هفت مدل GCM انتخابی (جدول 1) از مجموع مدل‌های به روز CMIP5 برای مناطق مورد مطالعه استفاده شد (Shokouhi et al., 2018) و داده‌های روزانه متغیرهای اقلیمی مورد نظر از وب سایت مرکز توزیع داده (DDC)² هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)³ فراهم گردید. برای هر یک از گروه‌ها و اعضای مدل‌های GCM (جدول 1) روش تصحیح خطای نگاشت هم فاصله تابع توزیع تجمعی (EDCDFm)⁴ برای هر متغیر اقلیمی در هر منطقه اعمال شد و سپس متوسط تمام گروه‌های هر مدل به عنوان خروجی آن مدل برای آن متغیر اقلیمی لحاظ شد (Shokouhi et al., 2018). شایان ذکر است، داده‌های اقلیمی در اجرای مدل‌های CMIP5 تا پایان سال 2005 میلادی به عنوان دوره تاریخی و از اول ژانویه 2006 تا 31 دسامبر 2100 میلادی برای سناریوهای انتشار آینده در نظر گرفته شده است. لذا به منظور مقایسه نتایج تحلیل‌های آماری ایستگاه‌های سینوپتیک، با مدل‌های CMIP5، دوره آماری 1975-2005 به عنوان دوره تاریخی (دوره پایه) لحاظ شد. از سناریوی انتشار RCP8.5 و RCP2.6 برای شبیه‌سازی (پیش‌نگری) تغییرات دما، بارش و تابش در دوره‌های 2045-2065 (آینده نزدیک، D₁) و 2100-2080 (آینده دور، D₂) استفاده شد.

به منظور بررسی وقوع پدیده‌های نامطلوب آب و هوایی طی مراحل حساس رشد و نمو محصول، 300 سال داده روزانه آب و هوایی برای دوره پایه، آینده نزدیک (D₁) و آینده دور (D₂) برای هر مدل و هر ایستگاه، توسط مدل تولید آب و هوایی LARS-WG 5.5 تولید شد. این سری‌های تولید شده 300 ساله داده‌های روزانه، برای دوره پایه و سناریوهای انتشار در دوره D₁ و D₂ مبنای تحلیل‌ها و

5 -Box plot

6- Reference Evapotranspiration

7 -Modified Hargreaves-Samani 4

8- Crop evapotranspiration under standard conditions

9 -Crop evapotranspiration under soil water stress conditions

1- General Circulation Model

2- Data Distribution Centre (DDC) http://www.ipcc.org/sim/gcm_monthly/AR5/Reference-Archive.html

3- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

4 -Equidistant Cumulative Distribution Function matching (EDCDFm)

جدول 2- پارامترهای مربوط به مراحل رشد و نمو ارقام مختلف گندم و روش استفاده شده جهت تعیین تاریخ وقوع مراحل رشد و نمو
Table 2- Phenological parameters related to cultivars wheat and the method used to determine the date of occurrence of phenological stages

رقم محصول Cultivar type	مراحل رشد و نمو Phenological stages		
	از کاشت تا جوانه‌زنی Sowing - emergence	از جوانه‌زنی تا گل‌دهی Emergence - anthesis	از گل‌دهی تا رسیدن Anthesis - maturity
زودرس Early(Ea.)	$T_{sum} = \sum(T_i - T_b)_+ \times \alpha$	$T_b = 4 \text{ } ^\circ\text{C}, T_{sum} = 380 \text{ } ^\circ\text{Cd}$	$T_b = 6 \text{ } ^\circ\text{C}, T_{sum} = 280 \text{ } ^\circ\text{Cd}$
میان‌رس Medium(Me.)	$T_b = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{sum} = 125 \text{ } ^\circ\text{Cd}$ $T_{sum} = \sum(T_i - T_b)_+ \times \alpha$	$T_b = 4 \text{ } ^\circ\text{C}, T_{sum} = 460 \text{ } ^\circ\text{Cd}$	$T_{sum} = \sum(T_i - T_b)_+$ $T_b = 6 \text{ } ^\circ\text{C}, T_{sum} = 420 \text{ } ^\circ\text{Cd}$
دیررس Late (La.)	$= \min \left[1, \frac{(\lambda - 6.5)_+}{12} \right]$	$T_b = 4 \text{ } ^\circ\text{C}, T_{sum} = 540 \text{ } ^\circ\text{Cd}$	$T_b = 6 \text{ } ^\circ\text{C}, T_{sum} = 560 \text{ } ^\circ\text{Cd}$

T_{sum} : مجموع تجمعی درجه روزهای رشد برای تکمیل مراحل رشد و نمو (درجه -روز $^\circ\text{Cd}$), T_b : دمای پایه, T_i : دمای متوسط روزانه, علامت "+" نشان دهنده ترم‌های مثبت در محاسبات است. α : پاسخ فتوپریودیکی (پاسخ عامل طول روز) و λ طول روز حسب ساعت.

T_{sum} : is the temperature sum demand ($^\circ\text{Cd}$) for the given phenological phase, T_b is base temperature, T_i is daily mean temperature, "+" denotes that only positive contributions are considered; α is a photoperiodic response, λ is day length (h).

(2011).

به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر فراوانی وقوع پدیده‌های نامطلوب آب و هوایی طی دوره رشد محصول گندم پاییزه، از 13 شاخص استفاده شد، تا مهمترین عوامل مؤثر بر کاهش شدید عملکرد محصول را بیان نماید (جدول 3). این شاخص‌ها در 4 گروه شاخص‌های تعیین‌کننده اثر دمای حداقل، دمای حداکثر، شرایط رطوبتی و شرایط نامطلوب در زمان کاشت و برداشت قرار می‌گیرند (جدول 3). همچنین مجموع تابش خورشیدی مؤثر در طول دوره رشد به عنوان معیاری از پتانسیل تولید محصول در نظر گرفته شد (مجموع تجمعی تابش خورشیدی روزانه برای روزهای با شرایط 1-، دمای متوسط بیش از $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ و 2- دمای حداقل بالاتر از $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ و 3- ET_{c-adj}/ET_c بیشتر از 0/4 باشد) (Trnka et al., 2014). چنانچه در یک دوره رشد، شرایط شاخص‌های تعریف شده در جدول 3 رخ دهد، پدیده نامطلوب مربوطه در آن فصل رشد لحاظ می‌شود و در نهایت احتمال وقوع پدیده نامطلوب طی سال‌های مورد بررسی (از 300 سال، 50 سال اول را به علت ارزش دهی شرایط آغازین کنار گذاشته و 250 سال بعدی به عنوان سری داده‌های روزانه مورد بررسی قرار گرفت) محاسبه می‌گردد. در ادامه احتمال رخداد حداقل یک، دو و سه پدیده نامطلوب طی دوره رشد محصول برای 8 حالت مختلف (در دوره‌های D_1 و D_2 برای سناریوهای انتشار RCP8.5 و RCP2.6 و ارقام زودرس Ea. و دیررس La.) محاسبه شد.

به علت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر برای دوره‌های آینده انتظار می‌رود تبخیر و تعرق گیاه کاهش یابد، که این کاهش با یک ضریب تعدیل، در محاسبات تبخیر و تعرق اعمال می‌شود (Kruij et al., 2008).

لذا بر اساس نتایج مطالعات (Kruij et al., 2008) و سناریوهای انتشار RCP، این ضرایب تعدیلی برای سناریوی انتشار RCP8.5 و RCP2.6 در دوره D_1 به ترتیب 0/94 و 0/97 و در دوره D_2 به ترتیب 0/84 و 0/97 تعیین گردید. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم و مقایسه بهتر و راحت‌تر بین ایستگاه‌ها، در محاسبه رطوبت خاک با استفاده از روش تعادل آب و خاک (Allen et al., 1998)، از ترم-های رواناب و نفوذ عمقی صرف نظر شد و خاکی با بافت متوسط (با خصوصیات θ_{FC} برابر 275 mm.m^{-1} ، رطوبت در نقطه پژمردگی (θ_{WP}) برابر 100 mm.m^{-1} و حداکثر عمق ریشه 1/3 متر) برای تمام مناطق یکسان فرض شد. برای ارزیابی تنش رطوبتی بر عملکرد گندم از تابع تولید خطی ارائه شده توسط (Allen et al., 1998) از معادله 1 استفاده شد.

$$Y_D = K_y \times \left(1 - \frac{\sum ET_{c-adj}}{\sum ET_c} \right) \quad (1)$$

که در آن Y_D کاهش نسبی عملکرد تحت شرایط تنش رطوبتی و K_y ضریب حساسیت گیاه می‌باشد که مقدار آن برای کل دوره رشد گندم برابر با یک لحاظ شد (Soleymani Nanadegani et al.,).

جدول ۳- شاخص‌های اگرو-کلیماتی استفاده شده که نشان دهنده وقوع پدیده‌های نامطلوب هستند.
Table 3- 13 agro-climatic indices used to indicate unfavorable events

نام شاخص Index name*	توضیحات Index description
بغ زدگی Frost(F.R)	زمانیکه دمای حداقل طی دوره رشد برای حداقل یک روز کمتر مساوی با -20°C باشد، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered when the T_{\min} is equal to or below -20°C for at least one day
آخرین یخبندان Late frost(L.F.R)	بعد از یک دوره حداقل ۵ روزه ی متوالی با دمای متوسط بیشتر مساوی با 10°C ، دمای حداقل کمتر مساوی 3°C شود، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered when the T_{\min} is equal to or below -2°C after the start of the following window, determined as the period when the mean air temperature is continuously equal to or above 10°C for at least five days
افزایش دمای شبانه در زمان پر شدن دانه Grain-filling extreme night temperature exposure(G.F.N.H)	زمانیکه دمای حداکثر طی ۵ روز قبل از گل دهی تا ۵ روز بعد از آن، حداقل برای دو روز بیش از 31°C باشد، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered when the T_{\max} is above $+31^{\circ}\text{C}$ for at least two days during the period ± 5 days around anthesis
تنش حرارتی در زمان گل دهی Anthesis heat stress(A.H.S)	زمانیکه دمای حداکثر طی ۵ روز بعد از گل دهی تا ۵ روز پیش از آن، دمای متوسط مساوی با 20°C باشد، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered when the T_{\min} is equal to or above 20°C for at least 9 days during the period from anthesis to maturity
تنش حرارتی شدید در زمان پر شدن دانه Grain-filling extreme heat exposure(G.F.H)	زمانیکه دمای حداکثر طی ۵ روز بعد از آن، حداقل برای دو روز بیش از 35°C باشد این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered when the T_{\max} is above $+35^{\circ}\text{C}$ for at least three days during the period from five days after anthesis to maturity
افزایش دمای حداکثر پیش از شروع رستمان گذاری گیاه before hibernation extreme heat exposure(B.H.H)	چنانچه پیش از یک دوره حداقل شش روزه ی متوالی با دمای متوسط کمتر از 3°C دمای حداکثر، حداقل برای ۹ روز بیش از 18°C باشد، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered when the T_{\max} is above 18°C for at least 9 days before the start of the following window, determined as the period when the mean air temperature is continuously below 3°C for at least six days
رطوبت بیش از حد Extremely wet(E.X.W)	اگر از کاشت تا گل دهی، برای روزهایی پادامه متوسط بیش از 4°C ، رطوبت خاک برای حداقل ۶۰ روز برابر یا بیشتر از ظرفیت زراعی باشد. Event is triggered if the soil moisture is at or above the field capacity for more than 60 days from sowing to anthesis. Days with a mean temperature below 3°C are not counted
شاخص بوس Lodging event (L.O.G)	چنانچه طی مرحله گل دهی تا ۵ روز قبل از مرحله رسیدن، حداقل برای دو روز بارندگی بیش از 40 میلی متر رخ دهد، یا اگر در روزی بارندگی بیش از 20 میلی متر رخ دهد و در روز قبل از آن رطوبت خاک برابر یا بیشتر از ظرفیت زراعی باشد، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered if there are at least two days in the season with a daily precipitation on the given day above 40 mm or if the daily precipitation is above 20 mm and the soil moisture on the preceding day is at or above the field capacity; the period from anthesis to five days before maturity is considered
خشکی شدید طی دوره کاشت تا گل دهی Severe drought event sowing-anthesis(D.S.A)	اگر از زمان کاشت تا مرحله گل دهی، برای روزهایی با حداقل دمای متوسط 3°C ، $ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}} - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ حداقل برای 10 روز متوالی کمتر از 0.15 باشد. Event is triggered if $ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}} - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ is less than 0.15 for at least ten consecutive days between sowing and anthesis; the days with a mean temperature below 3°C are not considered
خشکی شدید طی دوره گل دهی تا رسیدن Severe drought event anthesis-maturity(D.A.M)	چنانچه از زمان گل دهی تا رسیدن، $ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}} - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ حداقل برای 10 روز متوالی کمتر از 0.15 باشد، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered if $ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}} - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ is less than 0.15 for at least ten consecutive days between anthesis and maturity
خشکی شدید طی دوره کاشت تا رسیدن Severely dry season sowing-maturity(D.S.M)	چنانچه از زمان کاشت تا مرحله رسیدن، برای روزهایی با حداقل دمای متوسط 3°C ، $ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}} - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ برای 21 روز کمتر از 0.15 باشد، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered if $ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}} - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ is less than 0.15 for at least 21 days during the period from sowing to maturity; the days with a mean temperature below 3°C are not considered
شرایط نامطلوب در زمان کاشت Adverse conditions at sowing(A.C.S)	چنانچه در دوره مناسب کاشت (بجز رطوبت نامفی ± 15 روز از تاریخ مناسب کاشت)، حداقل سه روز با شرایط $1 - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ کمتر از 0.75 ، $2 - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ کمتر از 0.5 ، $3 - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ کمتر از 0.5 میلی متر، موجود نباشد، پدیده لحاظ می شود. Event is triggered when there are no more than three days during the sowing window (sowing date ± 15 days) with the soil moisture below 90% but above 5% and rain on the given day is below 5 mm and not more than 10 mm on the preceding day
شرایط نامطلوب در زمان برداشت Adverse conditions at harvest(A.C.H)	چنانچه در دوره مناسب برداشت (۵ تا 75 روز بعد از تاریخ رسیدن)، حداقل سه روز با شرایط $1 - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ کمتر از 0.75 ، $2 - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ کمتر از 0.5 ، $3 - ET_{\text{c}}/ET_{\text{c}}$ کمتر از 0.5 میلی متر، موجود نباشد، این پدیده لحاظ می شود. Event is triggered when there are fewer than three days during the harvest window (maturity date + five days up to maturity + 25 days) with the soil moisture in the top layer below 85% and rain on the given day is below 0.5 mm and not more than 5 mm on the preceding day

* این شاخص‌ها بر اساس مقالات محققان (Shokouhi & Sanaei nejad, 2014; Trnka et al., 2014) تعریف شده است

* These indicators are defined based on researchers (Shokouhi and Sanaei nejad, 2014; Trnka et al., 2014)

جدول 4- متوسط زمان وقوع مراحل نمو، طول دوره رشد و میانگین دمای متوسط و بارش طی دوره رشد برای تمام ایستگاهها تحت سناریوهای مختلف

Table 4- The average time of occurrence of phenological stages, duration of growth and mean average temperature and precipitation during the growing season for all stations under different scenarios

پارامتر Parameter	D1 (2045-2065)				D2 (2080-2100)			
	RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5	
	رقم زودرس Early cultivar	رقم دیررس Late cultivar	رقم زودرس Early cultivar	رقم دیررس Late cultivar	رقم زودرس Early cultivar	رقم دیررس Late cultivar	رقم زودرس Early cultivar	رقم دیررس Late cultivar
زمان کاشت Sowing(DOY)	333±13 (↑3)	333±13 (↑3)	334±12 (↑5)	334±12 (↑5)	333±13 (↑4)	333±13 (↑4)	339±8 (↑10)	339±8 (↑10)
زمان گل دهی Anthesis (DOY)	138±9 (↓10)	155±9 (↓9)	138±8 (↓10)	154±8 (↓10)	139±9 (↓10)	155±9 (↓9)	121±8 (↓27)	137±8 (↓27)
زمان رسیدن Maturity (DOY)	159±10 (↓10)	188±11(↓10)	158±9 (↓11)	187±11 (↓11)	160±10 (↓9)	188±11 (↓10)	141±9 (↓28)	168±10 (↓30)
طول دوره رشد (day) Duration of growth	192±22 (↓13)	220±23 (↓14)	190±25 (↓15)	217±25(↓17)	191±22 (↓13)	220±23 (↓14)	167±21 (↓38)	194±21(↓39)
دمای متوسط °C Mean temperature	8.6±2.1 (↑0.9)	10.5±2 (↑0.9)	8.7±2.2 (↑1.1)	10.7±2.2 (↑1.1)	8.5±2.1 (↑0.9)	10.5±2.1 (↑0.9)	10.7±2.2 (↑3)	12.6±2.2 (↑3.1)
مجموع بارش mm Precipitation	357±118 (↑44)	367±121 (↑48)	314±87 (↑1)	324±92 (↑5)	367±121 (↑48)	379±122 (↑54)	316±123 (↑3)	337±137 (↑18)

* مقادیر داخل پرانتز نشان دهنده مقدار تغییر مطلق پارامتر و علامت ↑ ↓ به ترتیب نشان دهنده افزایش یا کاهش مطلق پارامتر نسبت به دوره پایه است

* The value in parentheses and the ↑ ↓ marks represent the amount of absolute change in each parameter and an increase or decrease of each parameter compared to the baseline, respectively

نتایج و بحث

به اوایل فصل پاییز منتقل می‌شود (Mohammadi et al., 2014). تاریخ وقوع مرحله گل‌دهی و رسیدن برای تمام سناریوها نسبت به دوره پایه زودتر رخ می‌دهد (جدول 4). به علت افزایش متوسط دما طی دوره رشد برای تمام سناریوها، واحدهای حرارتی هر مرحله سریعتر و در بازه زمانی کمتری تأمین شده و در نتیجه آهنگ رشد و نمو محصول افزایش یافته و در پی آن مراحل گل‌دهی و رسیدن زودتر رخ می‌دهند. بنابراین با دیرتر شدن زمان کاشت و زودتر شدن وقوع مراحل رشد و نمو، متوسط طول دوره رشد برای تمام سناریوها در مقایسه با دوره پایه کوتاه‌تر می‌شود (جدول 4). متوسط کوتاه‌ترین طول دوره رشد برای کل منطقه در بین سناریوها مربوط به RCP2.6- RCP8.5-D2-Ea با 167 روز و طولانی‌ترین مربوط به RCP2.6- RCP8.5-D2-La با 220 روز (جدول 4). است. تحقیقات متعدد در نقاط مختلف کشور نیز حاکی از کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد در شرایط اقلیمی آینده است (Mohammadi et al., 2014; Saadati et al., 2016).

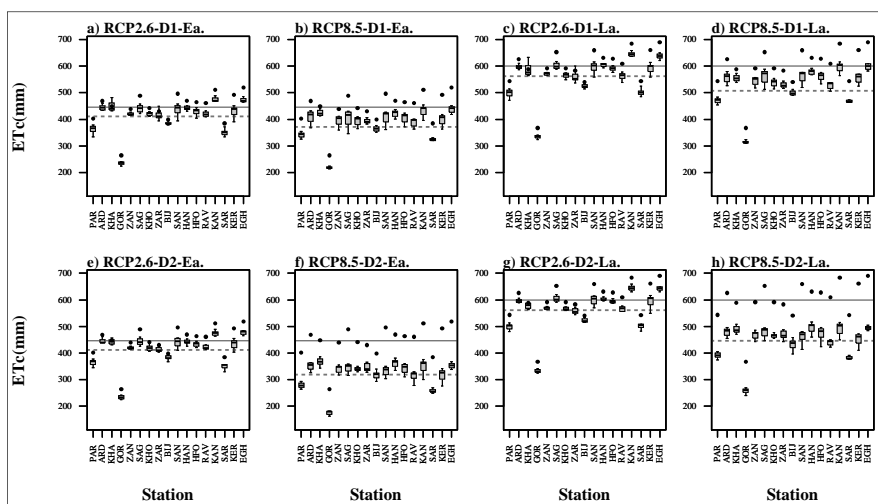
عدم قطعیت در پیش‌نگری متغیر دما برای مدل‌های GCM انتخابی اندک است (Shokouhi et al., 2018)، و از آنجا که دما تنها متغیر اقلیمی بکار رفته در محاسبه تبخیر و تعرق است لذا عدم قطعیت

پیش‌نگری هفت مدل GCM نشان داد به طور کلی دمای متوسط طی دوره رشد برای تمام سناریوها و دوره‌ها و ارقام، افزایش یافته به طوری که بیشترین افزایش دمای متوسط طی دوره رشد مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره D2 و رقم دیررس به مقدار 3/1 درجه- سانتی‌گراد است (جدول 4). نتایج نشان داد با وجود عدم قطعیت قابل توجه در پیش‌نگری مدل‌های GCM در شبیه‌سازی بارش، به طور متوسط برای کل منطقه مجموع بارش طی دوره رشد کم و بیش افزایش خواهد یافت (جدول 4) و این افزایش برای مناطق شمالی‌تر مشهودتر است این در حالی است که مناطق جنوبی‌تر کم و بیش بدون تغییر، یا با کاهش بارش مواجه خواهند بود.

نتایج نشان داد تاریخ مناسب کاشت برای تمام سناریوها نسبت به دوره پایه دیرتر رخ می‌دهد (جدول 4). به عقب افتادن تاریخ کاشت، بیشتر به علت مناسب نبودن شرایط کاشت (بیشتر به علت کمتر بودن شرایط رطوبتی خاک) است. نتایج محققین دیگر نیز نشان داد که در مناطقی که شرایط بارشی (رطوبتی) مناسب نباشد تاریخ کاشت دیرتر و به اواخر پاییز منتقل می‌شود (Delavar et al., 2017) و چنانچه شرایط بارشی (و یا رطوبت خاک) مناسب باشد تاریخ کاشت زودتر و

متوسط برای کل منطقه کمترین و بیشترین مقدار ETC دوره رشد به ترتیب مربوط به سناریوی RCP8.5-D2-Ea (320mm) و RCP2.6-D2-La (562mm) است که به ترتیب در مقایسه با دوره پایه 38 و 126 میلی‌متر کاهش می‌یابد (شکل 2-gf).

در پیش‌نگری تبخیر و تعرق اندک است (شکل 2). متوسط مجموع تبخیر و تعرق محصول (ETc) کل منطقه طی دوره رشد برای رقم زودرس و دیررس در دوره D1 و D2 و برای سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در مقایسه با دوره پایه کم‌تر خواهد شد (شکل 2). به طور

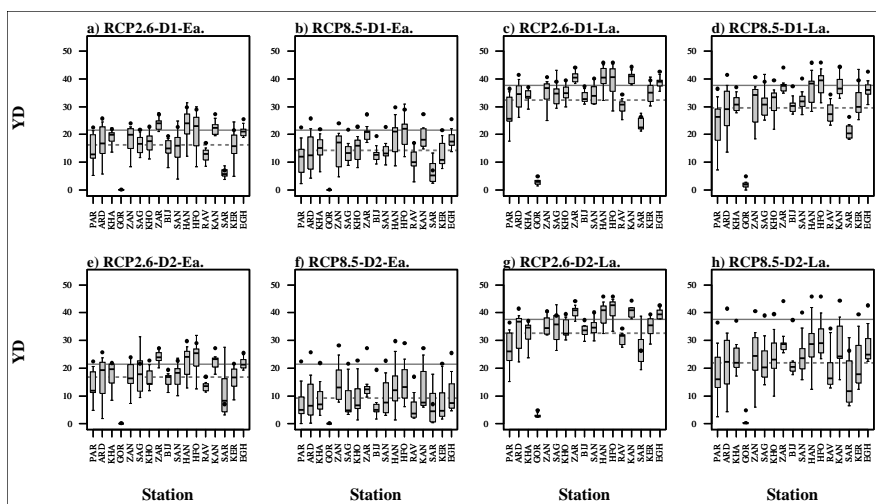


شکل 2- نمودار جعبه‌ای متوسط مجموع تبخیر و تعرق محصول (ETc) طی دوره رشد برای دوره پایه 1975-2005 (دایره‌های توپر) و پیش‌نگری‌های اقلیمی هفت مدل GCM برای هر ایستگاه. a, b, c, d و مربوط به دوره D1 (2045-2065) و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و ارقام زودرس (Ea.) و دیررس (La.). به همین ترتیب برای e, f, g, h اما برای دوره D2 (2080-2100). میانگین متوسط مجموع تبخیر و تعرق محصول (ETc) طی دوره رشد تمام ایستگاه‌ها در دوره پایه و آینده به ترتیب با خطوط ممتد و منقطع در هر نمودار نشان داده شده است

Fig.2- Average total crop evapotranspiration (ETc) during the growing season for baseline 1975-2005 (solid circles) and projected climate of the seven GCM models (box plot) at each station. a, b, c, and d plots represent period D1 (2045-2065) for RCP2.6 and RCP8.5 climate scenarios and early (Ea.) and late (La.) cultivars. In the same manner for e, f, g, and h plots but for period D2 (2080-2100). Mean average total crop evapotranspiration (ETc) during the growing season of all stations in baseline and projected climate is shown by continuous and discontinuous lines in each station, respectively

هر سناریویی نسب به دوره پایه که در آن طول دوره رشد کوتاه‌تر و غلظت دی‌اکسیدکربن بیشتر باشد مقدار مجموع تبخیر و تعرق محصول طی دوره رشد در آن سناریو کمتر خواهد بود. به طور متوسط کمترین و بیشترین مقدار کاهش نسبی عملکرد ناشی از تنش رطوبتی (YD) به ترتیب مربوط به سناریوی RCP8.5-D2-Ea (9٪) و RCP2.6-D2-La (33٪) است که به ترتیب در مقایسه با دوره پایه 13 و 5 درصد کاهش می‌یابد (شکل 3). به طور کلی متوسط کاهش نسبی عملکرد ناشی از تنش رطوبتی (YD) برای تمام سناریوها نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد به عبارتی در تمام سناریوها به طور متوسط، تنش رطوبتی طی دوره رشد محصول نسبت به دوره پایه کمتر خواهد بود (شکل 3-a تا h).

علیرغم افزایش دما طی دوره رشد نسبت به دوره پایه در تمام سناریوها، اما مجموع تبخیر و تعرق محصول ETc طی دوره رشد کاهش می‌یابد که این می‌تواند به این دلیل باشد که از یک طرف طول دوره رشد کاهش یافته و از طرف دیگر اعمال ضریب تعدیل در محاسبات تبخیر و تعرق به علت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در دهه‌های آتی باشد. در آزمایشی نشان داده شد، بر اثر دو برابر شدن غلظت دی‌اکسیدکربن مقاومت روزنه‌های گیاه افزایش یافته (هدایت روزنه‌ای کاهش) و به دنبال آن تعرق گیاه کاهش می‌یابد (Saadati et al., 2016). نتایج محققان در دیگر نقاط ایران نیز مؤید این نکته است که مجموع تبخیر و تعرق محصول طی دهه‌های آتی کاهش خواهد یافت (Rahmani et al., 2016; Saadati et al., 2016;). به طور کلی می‌توان گفت برای



شکل 3- همانند شکل 2 با این تفاوت که برای متوسط کاهش نسبی عملکرد تحت شرایط تنش رطوبتی (YD) در هر فصل رشد

Fig.3- As described in Fig.2, but for average relative reduction in crop yield due to water stress (YD) in each growing season

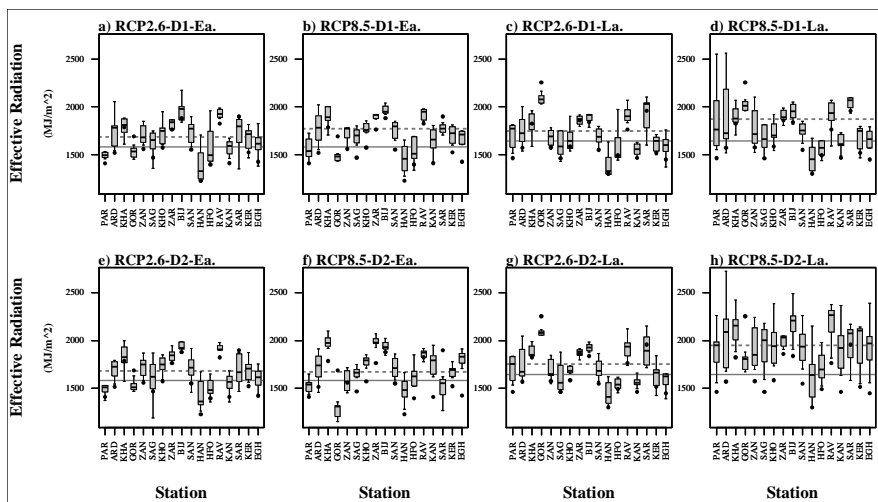
افزایش خواهد یافت.

نتایج دیگر محققان نیز مؤید این نکته است که به طور کلی تابش خورشیدی طی دوره رشد گندم در نقاط دیگر ایران در آینده افزایش یابد (Dashti et al., 2018; Saadati et al., 2016). کاهش مجموع تابش خورشیدی مؤثر طی دوره رشد نسبت به دوره پایه در ایستگاه گرگان و سرپل ذهاب در تمام سناریوها به علت واقع شدن روزهای مؤثر در رشد ونمو در روزهایی با طول روز بسیار کوتاه- تر در آینده است.

با توجه به مطلوب تر شدن کاهش نسبی عملکرد (YD) و تابش خورشیدی مؤثر طی دوره رشد برای اکثر ایستگاهها در تمام سناریوها به طور متوسط می توان گفت که این شاخصهای عملکردی محصول نسبت به دوره پایه بهبود یافته است. اما آیا می توان گفت که عملکرد محصول افزایش پیدا خواهد کرد. جواب به این پرسش کمی انسان را دچار تردید می کند زیرا که برخی از محققین در مناطق مختلف ایران (و گاهی حتی منطقه ای مشترک)، شرایط اقلیمی آینده را به نفع عملکرد محصول گندم تفسیر می نمایند (Amirnejad & Asadpour, 2017; Kordi, 2017; Dashti et al., 2018; Farshadi et al., 2017) و برخی دیگر کاهش عملکرد محصول گندم را پیش بینی می کنند (Koocheki & Kamali, 2010; Koocheki & Nassiri, 2016). (Mahallati, 2016)

مطلوب تر شدن شرایط تنش رطوبتی طی دوره رشد بیشتر به علت کاهش طول دوره رشد و تغییر تاریخ مراحل پایانی رشد از ماه های گرم پایانی بهار و اولیه تابستان به ماه های نسبتاً خنک تر و پر بارش تر اولیه بهار است. همچنین از طرف دیگر کاهش مقدار تبخیر و تعرق محصول و افزایش بارش در طی دوره رشد محصول، همگی این عوامل سبب شده برای تمام سناریوها نسبت به دوره پایه، شاهد کاهش تنش رطوبتی محصول و به تبعه آن کمتر شدن کاهش نسبی عملکرد (YD) باشیم (شکل 3- a تا h).

به طور متوسط بیشترین و کمترین مقدار متوسط مجموع تابش خورشیدی مؤثر طی دوره رشد به ترتیب مربوط به سناریوی RCP8.5-D2- La. (1951 MJ/m²) و RCP8.5-D2- Ea. (1676 MJ/m²) است که به ترتیب در مقایسه با دوره پایه 308 و 93 مگا ژول بر متر مربع افزایش می یابد (شکل 4). متوسط مجموع تابش خورشیدی مؤثر به عنوان شاخصی از پتانسیل تولید محصول طی دوره رشد در اکثر ایستگاهها (به جز گرگان و سرپل ذهاب) برای تمام سناریوها نسبت به دوره پایه به طور متوسط افزایش می یابد (شکل 4). با کاهش طول دوره رشد در تمام سناریوها انتظار می رفت که تابش خورشیدی مؤثر نسبت به دوره پایه کاهش یابد اما به دلیل افزایش تعداد روزهای مؤثر در رشد ونمو (روزهای با دمای متوسط بیشتر از 3 °C و دمای حداقل بیشتر از 0 °C و ET_{c-adj} بیشتر از 4) افزایش یافته و در نتیجه می توان گفت پتانسیل تولید محصول نیز



شکل 4- همانند شکل 2 با این تفاوت که برای متوسط مجموع تابش خورشیدی مؤثر طی دوره رشد

Fig.4- As described in Fig.2, but for average total effective solar radiation during the growing season

مشخص شده که اثر این رخدادها بر عملکرد محصول بسیار حائز اهمیت است (Reyer et al., 2013). شاید در نگاه اول شرایط اقلیمی آینده بهبود شاخص‌های عملکردی را نشان دهد اما می‌بایستی تغییرات ریسک وقوع پدیده‌های نامطلوب اقلیمی را نیز بررسی نمود تا بتوان پاسخ جامعی به پرسش، آیا شرایط اقلیمی آینده به نفع تولید محصول گندم دیم است، داد.

آنچه در مطالعات این محققین مشترک است استفاده از مدل‌های گیاهی-زراعی در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم است. درحالی که ارزیابی اثرات نامطلوب تغییر اقلیم نیازمند روشی جامع‌تر از آن است که معمولاً در مدل‌های گیاهی-زراعی بکار گرفته می‌شود چنانچه که در اغلب این مدل‌های گیاهی-زراعی اثرات رخداد‌های وخیم اقلیمی لحاظ نمی‌شود (Rotter et al., 2011) در حالی که

جدول 5- متوسط احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب برای تمام ایستگاه‌ها و مدل‌های GCM تحت سناریوهای مختلف

Table 5- The average probability of the occurrence of the extreme events for all GCM models under different scenarios

نام شاخص Index name	D1(2045-2065)				D2 (2080-2100)			
	RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5	
	رقم زودرس	رقم دیررس	رقم زودرس	رقم دیررس	رقم زودرس	رقم دیررس	رقم زودرس	رقم دیررس
A.H.S	0.443 (↑0.185)*	0.891 (↑0.108)	0.418 (↑0.16)	0.8 (↑0.018)	0.427 (↑0.169)	0.899 (↑0.116)	0.634 (↑0.376)	0.966 (↑0.184)
G.F.H	0.048 (↑0.038)	0.794 (↑0.174)	0.05 (↑0.039)	0.729 (↑0.109)	0.053 (↑0.043)	0.794 (↑0.174)	0.086 (↑0.076)	0.936 (↑0.317)
F.R	0.377 (↓0.049)	0.382 (↓0.044)	0.337 (↓0.089)	0.341 (↓0.085)	0.397 (↓0.029)	0.404 (↓0.022)	0.258 (↓0.168)	0.258 (↓0.168)
A.C.S	0.218 (↑0.161)	0.21 (↑0.17)	0.252 (↑0.195)	0.252 (↑0.212)	0.256 (↑0.199)	0.247 (↑0.208)	0.315 (↑0.258)	0.31 (↑0.27)
D.A.M	0.027 (↓0.015)	0.501 (↓0.237)	0.036 (↓0.007)	0.377 (↓0.361)	0.046 (↑0.003)	0.515 (↓0.223)	0.02 (↓0.023)	0.138 (↓0.6)
L.F.R	0.183 (↑0.055)	0.187 (↑0.059)	0.152 (↑0.023)	0.152 (↑0.024)	0.18 (↑0.052)	0.181 (↑0.053)	0.225 (↑0.097)	0.225 (↑0.097)
D.S.M	0.014 (↑0.009)	0.351 (↓0.261)	0.021 (↑0.016)	0.244 (↓0.369)	0.027 (↑0.022)	0.368 (↓0.245)	0.002 (↓0.003)	0.085 (↓0.527)
B.H.H	0.064 (↑0.038)	0.062 (↑0.037)	0.047 (↑0.021)	0.045 (↑0.02)	0.074 (↑0.049)	0.071 (↑0.046)	0.051 (↑0.025)	0.048 (↑0.023)
G.F.N.H	0 (0)	0.029 (↑0.023)	0.002 (↑0.002)	0.113 (↑0.108)	0 (0)	0.032 (↑0.026)	0 (0)	0.103 (↑0.097)
A.C.H	0.012 (↑0.008)	0.003 (↑0.003)	0.016 (↑0.013)	0.005 (↑0.005)	0.017 (↑0.014)	0.003 (↑0.003)	0.051 (↑0.047)	0.01 (↑0.009)
L.O.G	0.005 (↑0.005)	0.004 (↑0.004)	0.005 (↑0.005)	0.004 (↑0.004)	0.005 (↑0.005)	0.005 (↑0.005)	0.014 (↑0.014)	0.015 (↑0.015)
D.S.A	0 (0)	0.013 (↑0.003)	0 (0)	0.012 (↑0.002)	0 (0)	0.019 (↑0.009)	0 (0)	0.001 (↓0.009)
E.X.W	0.003 (↑0.003)	0.003 (↑0.003)	0.001 (↑0.001)	0.001 (↑0.001)	0.002 (↑0.002)	0.002 (↑0.002)	0 (0)	0 (0)

* مقادیر داخل پرانتز نشان دهنده مقدار تغییر مطلق شاخص و علامت ↑ ↓ به ترتیب نشان دهنده افزایش یا کاهش مطلق شاخص نسبت به دوره پایه است

* The value in parentheses and the ↑ ↓ marks represent the amount of absolute change in the index and an increase or decrease of each index compared to the baseline, respectively

و در کل کاهش تنش رطوبتی در اکثر سناریوها انتظار می‌رود احتمال

با افزایش بارش و کاهش تبخیر و تعرق طی دوره رشد محصول

زمستان تمام نشده و احتمال اینکه دماهای کمتر از 2°C رخ دهد هنوز وجود دارد در نتیجه علیرغم افزایش دمای متوسط و دمای حداقل نسبت به دوره پایه احتمال وقوع پدیده نامطلوب آخرین یخبندان (L.F.R) افزایش می‌یابد (جدول 5).

به طور کلی بیشترین خطری که کل منطقه را تهدید می‌کند وقوع تنش‌های حرارتی به ویژه در مرحله گل‌دهی است که این تنش‌ها در آینده به ویژه برای رقم دیررس بسیار بیشتر خواهد شد (جدول 5). احتمال وقوع تنش حرارتی در مرحله رسیدن دانه برای رقم دیررس نسبت به رقم زودرس بسیار بیشتر خواهد شد (جدول 5). به عنوان مثال احتمال وقوع پدیده تنش حرارتی در زمان رسیدن دانه در دوره D_2 و برای سناریوی انتشار RCP8.5 برای رقم زودرس 0/086 است در حالی که برای رقم دیررس با طول دوره رشد 27 روز بیشتر حدوداً 11 برابر شده و به 0/936 می‌رسد (جدول 5). مرحله گل‌دهی یکی از حساس‌ترین مراحل به تنش حرارتی و رطوبتی است که همزمانی این دو پدیده اثر شدیدتری بر گیاه داشته و باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود. به‌طور کلی در منطقه احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی طی مرحله گل‌دهی تا رسیدن دانه (A.H.S) و (D.A.M) بالا است (جدول 5). اما نکته قابل توجه، افزایش چندین برابری این احتمال برای رقم دیررس نسبت به زودرس است (جدول 5) به‌طوری‌که با افزایش طول دوره رشد (به‌طور متوسط 26 روز) احتمال وقوع تنش حرارتی و رطوبتی طی مرحله گل‌دهی و رسیدن چندین و چند برابر افزایش خواهد یافت.

وقوع پدیده‌های نامطلوب خشکی شدید طی دوره گل‌دهی تا رسیدن (D.A.M) و کاشت تا رسیدن (D.S.M) کاهش یابد (جدول 5). احتمال وقوع پدیده نامطلوب خشکی شدید طی دوره کاشت تا گل‌دهی (D.S.A) در اکثر سناریوها نسبت به دوره پایه تقریباً بدون تغییر بوده و احتمال وقوع آن نسبت به شاخص‌های D.S.M و D.A.M بسیار پایین‌تر است (جدول 5). به طور کلی با افزایش دمای متوسط و دمای حداقل در آینده نسبت به دوره پایه، انتظار می‌رود احتمال وقوع پدیده نامطلوب یخ‌زدگی (F.R) به طور متوسط برای کل منطقه و تمام سناریوها نسبت به دوره پایه کاهش یابد (جدول 5). به غیر از پدیده‌های ذکر شده، احتمال وقوع سایر پدیده‌های نامطلوب کم و بیش افزایش می‌یابد (جدول 5).

پدیده‌های نامطلوب بر اساس متوسط احتمال وقوع برای تمام سناریوها در کل منطقه از زیاد به کم در جدول 5 مرتب شده است. احتمال وقوع پدیده‌های تنش حرارتی در زمان گل‌دهی (A.H.S)، تنش حرارتی شدید در زمان پر شدن دانه (G.F.H)، یخ‌زدگی (F.R)، شرایط نامطلوب در زمان کاشت (A.C.S)، خشکی شدید طی دوره گل‌دهی تا رسیدن (D.A.M)، آخرین یخبندان (L.F.R) و خشکی شدید طی دوره کاشت تا رسیدن (D.S.M) به ترتیب نسبت به سایر پدیده‌های نامطلوب دیگر بیشتر است. با توجه به افزایش دمای متوسط احتمال اینکه روزهایی متوالی با دمای متوسط بیشتر از 10°C در فصل زمستان رخ دهد نسبت به دوره پایه بیشتر می‌شود و در نتیجه گیاه زودتر از خواب زمستانی خارج شده در حالی که هنوز فصل

جدول 6- متوسط احتمال وقوع حداقل سه (E.V.3)، دو (E.V.2) و یک (E.V.1) پدیده نامطلوب طی دوره رشد برای تمام ایستگاه‌ها
Table 6- The average probability of the occurrence of at least three (E.V.3), two (E.V.2) and one extreme event (E.V.1) during the growing season for all stations

احتمال Probability	D1(2045-2065)				D2 (2080-2100)			
	RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5	
	رقم زودرس Early cultivar	رقم دیررس Late cultivar	رقم زودرس Early cultivar	رقم دیررس Late cultivar	رقم زودرس Early cultivar	رقم دیررس Late cultivar	رقم زودرس Early cultivar	رقم دیررس Late cultivar
E.V.1	0.784 (±0.121)	0.988 (±0.007)	0.755 (±0.092)	0.981 (0)	0.795 (±0.131)	0.992 (±0.011)	0.851 (±0.188)	0.997 (±0.016)
E.V.2	0.419 (±0.175)	0.933 (±0.051)	0.381 (±0.137)	0.885 (±0.003)	0.443 (±0.199)	0.938 (±0.056)	0.521 (±0.277)	0.969 (±0.088)
E.V.3	0.143 (±0.099)	0.71 (±0.015)	0.139 (±0.095)	0.604 (±0.091)	0.172 (±0.128)	0.729 (±0.033)	0.215 (±0.171)	0.657 (±0.038)

↑ ↓ As described in table5

↑ ↓ همانند جدول 5

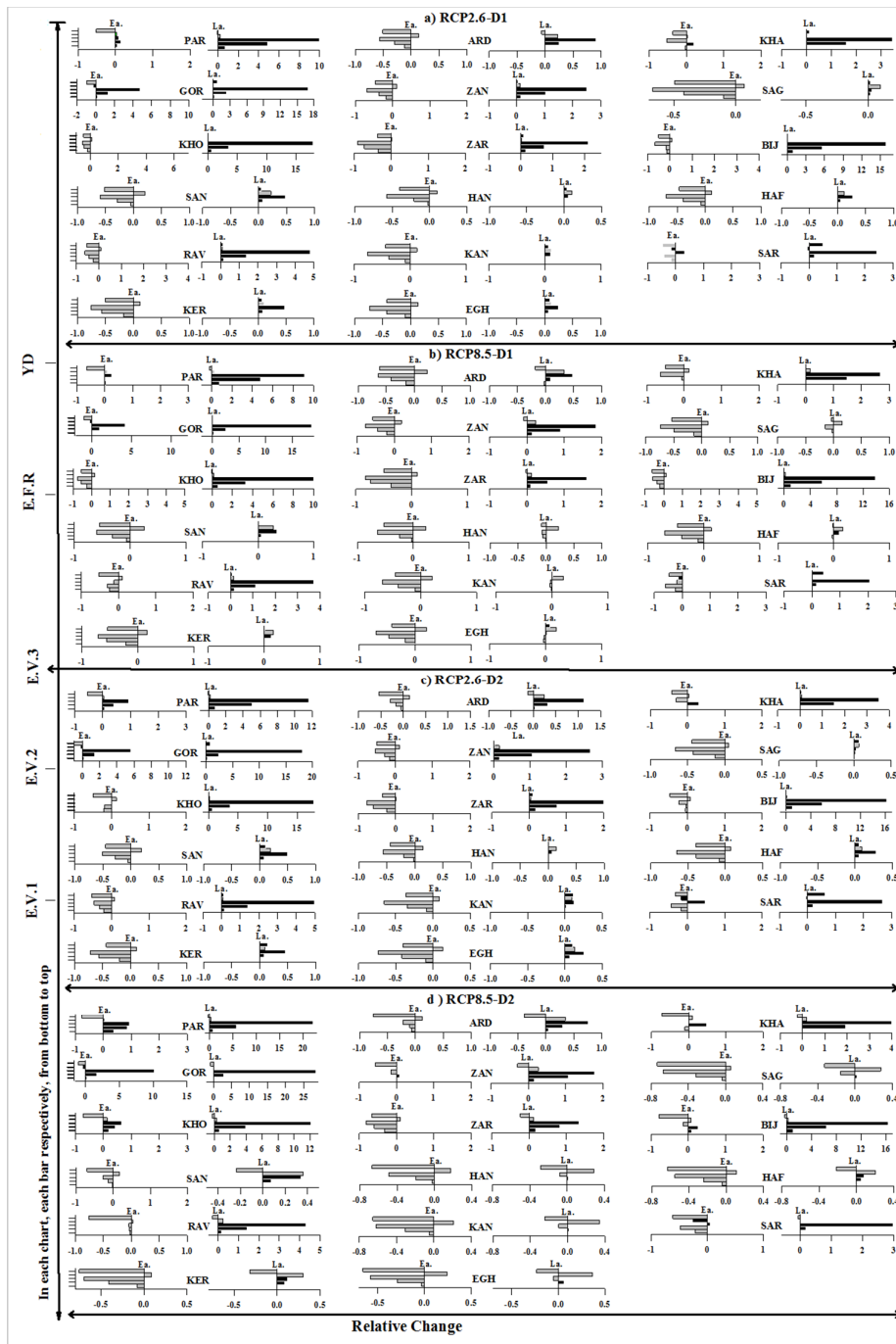
حرارتی) با طول دوره رشد است. به طوری که هر چه طول دوره رشد کوتاه‌تر باشد تاریخ وقوع مراحل حساس رشد ونمو به سمت اوایل بهار تغییر کرده (ماه‌های خنکتر با تنش رطوبتی کمتر) و در نتیجه احتمال همزمانی وقوع پدیده‌های نامطلوب (تنش حرارتی و رطوبتی) با مراحل

بنابراین می‌توان گفت احتمال وقوع پدیده‌های تنش حرارتی و رطوبتی در تمام سناریوها برای ارقام زودرس Ea نسبت به دیررس La بسیار کمتر است. بنابراین آنچه که مشخص است ارتباط تنگاتنگ احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب (تنش‌های رطوبتی و

حال با فرض کاشت یک رقم میان‌رس در دوره پایه این سؤال پیش می‌آید که در آینده از رقم زودرس و دیررس کدام یک انتخاب شود. بر اساس نتایج گفته شده در مرحله اول این پاسخ به ذهن می‌آید که انتخاب رقم زودرس به علت کمتر بودن احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب بهترین گزینه است. اما آیا انتخاب یک رقم با طول دوره رشد کوتاه‌تر سبب کاهش تابش خورشیدی مؤثر (E.F.R) و در نتیجه کاهش پتانسیل تولید محصول در آینده خواهد شد. بررسی و تصمیم‌گیری در مورد انتخاب رقم زودرس و دیررس بجای رقم میان‌رس در هر ایستگاه، با توجه به تغییرات نسبی تابش خورشیدی مؤثر (به عنوان شاخصی از پتانسیل تولید محصول)، کاهش نسبی عملکرد محصول تحت شرایط تنش رطوبتی Y_D و احتمال وقوع حداقل یک دو و سه پدیده نامطلوب طی دوره رشد نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه در شکل 5 نشان داده شده است. در اینجا نیز به دلایلی که پیشتر نیز بیان شد مقدار تابش خورشیدی مؤثر (E.F.R) در اکثر ایستگاه‌ها (بجز گرگان و سرپل‌ذهاب) برای رقم زودرس و دیررس نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه افزایش می‌یابد (شکل 5). کاهش نسبی عملکرد تحت شرایط تنش رطوبتی Y_D در اکثر ایستگاه‌ها برای تمام سناریوهای انتشار RCP برای رقم زودرس نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه در شرایط مطلوب‌تری قرار می‌گیرد (شکل 5). در حالیکه برای رقم دیررس در بعضی از ایستگاه‌ها مطلوب‌تر و در برخی دیگر نامطلوب‌تر می‌شود (شکل 5). در اکثر ایستگاه‌ها تقریباً برای تمام سناریوهای انتشار RCP (به جز ایستگاه پارس آباد، گرگان و سرپل‌ذهاب) احتمال وقوع حداقل سه E.V.3، دو E.V.2 و یک E.V.1 پدیده نامطلوب برای رقم زودرس نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه کاهش یافته و در شرایط مطلوب‌تری قرار می‌گیرد (شکل 5). اما در مقابل، وضعیت برای رقم دیررس چندان مطلوب به نظر نمی‌رسد. آنچه که کاملاً بارز است افزایش چند برابری احتمال وقوع حداقل سه پدیده نامطلوب (E.V.3) در اکثر ایستگاه‌ها برای رقم دیررس نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه است (شکل 5). به طوری که برای ایستگاه گرگان در سناریو RCP8.5-D2 احتمال وقوع حداقل سه پدیده نامطلوب (E.V.3) به بیش از 25 برابر نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه خواهد رسید (شکل 5-d). در کل اگرچه شاخص‌های رشد و عملکردی محصول (E.F.R و Y_D) در بیشتر ایستگاه‌ها برای رقم دیررس در اکثر سناریوهای انتشار RCP نسبت

حساس‌نوی (گل‌دهی و رسیدن دانه) کمتر خواهد شد و بالعکس هرچه طول دوره رشد برای یک رقم بیشتر باشد احتمال اینکه مراحل حساس‌نوی در معرض دماهای بالاتر و تنش رطوبتی قرار گیرد بیشتر خواهد بود.

همانطور که مشاهده شد اگرچه فراوانی وقوع اکثر پدیده‌های نامطلوب نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد، اما نکته نگران‌کننده‌تر احتمال وقوع حداقل یکی (یا بیشتر) از 13 پدیده نامطلوب تعریف شده طی یک دوره رشد است. بررسی‌ها نشان داد احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب (از 13 پدیده تعریف شده در جدول 3) و همچنین احتمال وقوع حداقل سه پدیده نامطلوب (به جز RCP8.5-D2-La و RCP8.5-D1-La) طی دوره رشد در مقایسه با دوره پایه به طور متوسط برای کل منطقه و تمام سناریوها افزایش می‌یابد (جدول 6). احتمال وقوع حداقل یک، دو و سه پدیده نامطلوب برای رقم زودرس در دوره D_2 و سناریوی RCP8.5، بیشترین افزایش را نسبت به دوره پایه به ترتیب با مقدار 0/188، 0/277 و 0/171 است (جدول 6). در کل احتمال وقوع حداقل یک، دو و سه پدیده نامطلوب برای رقم دیررس نسبت به زودرس بسیار بیشتر است (جدول 6). به عنوان مثال احتمال وقوع حداقل سه پدیده نامطلوب (E.V.3) برای رقم زودرس در دوره D_1 و سناریوی RCP2.6، 0/143 می‌باشد در حالیکه این احتمال برای رقم دیررس تقریباً 5 برابر شده و به 0/71 می‌رسد (جدول 6). در کل می‌توان گفت احتمال وقوع حداقل یک، دو و سه پدیده نامطلوب اولاً برای دوره D_2 نسبت به دوره D_1 و ثانیاً برای رقم دیررس نسبت به زودرس بیشتر است. نتایج نشان داد احتمال وقوع حداقل یک، دو و سه پدیده نامطلوب طی دوره رشد برای رقم زودرس در دوره D_1 و سناریوی انتشار RCP8.5 در مقایسه با حالات دیگر کمتر است (جدول 6). می‌توان نتیجه گرفت که احتمال وقوع حداقل یک (یا بیشتر) پدیده نامطلوب طی دوره رشد برای هر رقم در آینده نسبت به دوره پایه برای همان رقم افزایش می‌یابد و هرچه طول دوره رشد یک رقم بیشتر باشد احتمال وقوع حداقل یک (یا بیشتر) پدیده نامطلوب نیز افزایش می‌یابد. حال می‌توان گفت اگرچه ممکن است شاخص‌های عملکردی محصول برای یک رقم مشخص نسبت به دوره پایه همان رقم بهبود یابد اما فراوانی پدیده‌های نامطلوب طی دوره رشد افزایش خواهد یافت و نگران‌کننده‌تر از این، وقوع همزمان حداقل دو پدیده نامطلوب است که عملکرد گندم را به شدت تحت تأثیر خواهد گذاشت.



شکل 5- تغییرات نسبی تابش خورشیدی مؤثر (E.F.R)، احتمال وقوع حداقل سه (E.V.3)، دو (E.V.2) و یک (E.V.1) پدیده نامطلوب و YD، برای ارقام زودرس Ea. و دیررس La. در مقایسه با رقم میان‌رس Me. در دوره پایه (1975-2005) برای هر ایستگاه. a) سناریوی RCP2.6 در دوره (2045-2065)، b) سناریوی RCP8.5 در دوره (2045-2065)، c) سناریوی RCP2.6 در دوره (2080-2100) و d) سناریوی RCP8.5 در دوره (2080-2100). رنگ خاکستری و سیاه میله‌ها به ترتیب حاکی از مطلوب‌تر شدن و نامطلوب‌تر شدن شرایط در آینده دارد

Fig. 5- Relative changes in effective solar radiation (E.F.R), the probability of the occurrence of at least three (E.V.3), two (E.V.2) and one adverse events (E.V.1) and YD for early (Ea.), late (La.) cultivars compared with baseline (1975-2005) and medium (Me.) cultivar at each station. a) RCP2.6 in D1 (2045-2065), b) RCP8.5 in D1 (2045-2065), c) RCP2.6 in D2 (2080-2100), d) RCP8.5 in D2 (2080-2100). Green and red color bars stand for favorable and unfavorable changes, respectively

می‌شود (شکل 5-d).

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب اقلیمی طی دوره رشد محصول گندم دیدیم که اثرات قابل توجهی بر کاهش عملکرد محصول دارند و معمولاً به خوبی در مدل‌های گیاهی-زراعی لحاظ نمی‌شوند، مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این تمرکز بر روی تنها یک پدیده نامطلوب می‌تواند منجر به ارزیابی ناقصی از اثرات تغییر اقلیم شود. لذا در این مطالعه 13 شاخص که نشان دهنده پدیده‌های نامطلوب هستند مورد ارزیابی قرار گرفت تا تصویر جامع‌تری از شرایط اقلیمی آینده ترسیم کنند. نتایج این مطالعه نشان داد علیرغم عدم قطعیت در پیش‌نگری اقلیمی مدل‌های CMIP5، احتمال وقوع حداقل یک (یا بیشتر) پدیده نامطلوب طی دوره رشد برای هر رقم محصول در آینده نسبت به دوره پایه برای همان رقم افزایش می‌یابد و هرچه طول دوره رشد یک رقم بیشتر باشد احتمال وقوع حداقل یک (یا بیشتر) پدیده نامطلوب نیز افزایش می‌یابد. با بهبود کاهش نسبی عملکرد ناشی از تنش رطوبتی (YD) و تابش خورشیدی مؤثر به عنوان شاخصی از عملکرد محصول برای اکثر ایستگاه‌ها در آینده نمی‌توان بیان نمود عملکرد محصول بهبود می‌یابد زیرا احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب طی دوره رشد افزایش یافته و به ویژه همزمانی وقوع آنها می‌تواند به شدت تأثیر منفی بر عملکرد محصول بگذارد. در مواجهه با سه‌راهی انتخاب ارقام زودرس، میان‌رس و دیررس در آینده نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه، می‌توان گفت رقم زودرس هم از لحاظ شاخص‌های رشد و عملکردی محصول و هم از لحاظ احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب در طی دوره رشد، نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه در شرایط مطلوب‌تری قرار خواهد گرفت.

به رقم میان‌رس در دوره پایه شرایط مطلوب‌تری خواهند داشت اما احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب به ویژه افزایش چشمگیر احتمال وقوع حداقل سه پدیده نامطلوب (E.V.3) (شکل 5) سبب افزایش ریسک استفاده از رقم دیررس در آینده خواهد شد. بنابراین در مجموع می‌توان گفت در اکثر ایستگاه‌ها رقم زودرس هم از لحاظ شاخص‌های رشد و عملکردی محصول (E.F.R و YD) و هم از لحاظ احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب در طی دوره رشد نسبت به رقم میان‌رس در دوره پایه در شرایط مطلوب‌تری قرار خواهد گرفت. اگرچه استفاده از رقم زودرس در ایستگاه‌های گرگان، پارس‌آباد و سرپل‌ذهاب (ایستگاه‌های با آب و هوای گرم) نسبت به دوره پایه همچنان با ریسک همراه است اما در مقایسه با رقم دیررس بسیار مطلوب‌تر است (شکل 5). بنابراین می‌توان گفت در کل انتخاب رقم زودرس در مقایسه با سایر رقم‌ها، رقم مناسب‌تری خواهد بود و می‌تواند شرایط اقلیمی آینده را به نفع تولید گندم در اکثر مناطق به ویژه مناطق سردسیر تغییر دهد. با بررسی شکل 5 برای رقم زودرس می‌توان دید که کمترین تعداد میله سیاه رنگ (که حاکی از شرایط نامطلوب است) در نمودارها مربوط به سناریوی انتشار RCP8.5 در دوره D₁ (شکل 5-b) است. از طرفی پیش‌تر نیز بیان شد که احتمال وقوع حداقل یک، دو و سه پدیده نامطلوب طی دوره رشد برای رقم زودرس در دوره D₁ و سناریوی انتشار RCP8.5 در مقایسه با حالات دیگر کمتر است (جدول 6). بنابراین می‌توان گفت برای رقم زودرس، سناریوی انتشار RCP8.5 در دوره D₁ مطلوب‌ترین حالت است (شکل 5-b) و بهترین شرایط آب و هوایی را دارا خواهد بود. این در حالی است که از سناریوی انتشار RCP8.5 به دلیل پیش‌نگری در افزایش دمای بیشتر نسبت به سایر سناریوهای انتشار به عنوان سناریوی بدبینانه نام برده می‌شود. اما نکته جالب توجه این است که با بررسی شکل 5 مشخص می‌شود هرچه به پایان قرن نزدیک می‌شویم سناریوی انتشار RCP8.5 به نامطلوب‌ترین حالت ممکن برای رقم زودرس تبدیل

منابع

- Ahmadi, K., Gholizadeh, H., Abedzadeh, H.R., Hossein Pour, R., Abdshah, H., Kazimian, A., and Maryam, R. 2017. Agricultural statistics of 2015-2016, volume i. ed. Ministry of Agriculture, Department of Planning and Economic Center for Information and Communication Technology. (In Persian)
- Alexandrov, V., Mateescu, E., Mestre, A., Kepinska-Kasprzak, M., Stefano, V.D., and Dalezios, N. 2008. Summarizing a questionnaire on trends of agroclimatic indices and simulation model outputs in Europe, in: Cost Action. Pp: 115–161.

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. FAO irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 56: e156.
- Amirnejad, H., and Asadpour kordi, M. 2017. Effects of climate change on wheat production in Iran. *Journal of Agricultural Economics Research* 9: 163–182. (In Persian with English Summary)
- Angulo, C., Rötter, R., Lock, R., Enders, A., Fronzek, S., and Ewert, F. 2013. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 32–46.
- Lobell, D.B., and Asseng, S. 2017. Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models. *Environmental Research Letters* 12: 15001.
- Dashti, G., Bagheri, P., Pishbahar, E., and Majnooni, A. 2018. The calculation of yield risk caused by climate change for rainfed wheat in Ahar county: weather value at risk approach application. *Journal of Economics and Agricultural Development* 32:139–153. (In Persian with English Summary)
- Delavar, N., Akhavan, S., and Mehnatkesh, A. 2017. Climate change impact on some factors affecting rainfed wheat growth (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Journal of Water and Soil Science* 21: 131–149. (In Persian with English Summary)
- Delghandi, M., Broomandnasab, S., Andarzian, B. and Massah-Bovani, A. 2016. Adaptation strategies of wheat to climate change (case study: Ahvaz Region). *Journal of Water and Soil* 30, 300–311. (In Persian with English Summary)
- Farshadi, S., Deihimfard, R., Noori, O., and Kambouzia, J. 2017. Impacts of increasing CO_2 and temperature due to climate change on wheat yield in Khuzestan province: A simulation study. *Iranian Journal of Field Crop Science* 48: 749–761. (In Persian with English Summary)
- Fernández-Long, M.E., Müller, G.V., Beltrán-Przekurat, A., and Scarpati, O.E. 2013. Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology* 33: 1673–1686.
- Gourdji, S.M., Sibley, A.M., and Lobell, D.B. 2013. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. *Environmental Research Letters* 8: 24041.
- Hansen, J.W., and Jones, J.W. 2000. Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agricultural Systems* 65, 43–72.
- IPCC. 2014. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Koocheki, A., and Kamali, G. 2010. Climate change and rainfed wheat production in Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research* 8: 508–520.
- Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2016. Climate change effects on agricultural production of Iran: ii. predicting productivity of field crops and adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research* 14: 1–20. (In Persian with English Summary)
- Kruijt, B., Witte, J.P.M., Jacobs, C.M.J., and Kroon, T. 2008. Effects of rising atmospheric CO_2 on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology* 349: 257–267.
- McMaster, G., and Wilhelm, W. 2003. Phenological responses of wheat and barley to water and temperature: improving simulation models. *The Journal of Agricultural Science* 141: 129–147.
- Mohammadi, E., Yazdanpna, H., and Mohammadi, F. 2014. Event of climate change, its impact on durum wheat planting and during the growing season case study: station of Sararood, Kermansha. *Physical Geography Research Quarterly* 26: 231–246. (In Persian with English Summary)
- Moss, R.H., Edmonds, J.A, Hibbard, K. a, Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A, Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., and Wilbanks, T.J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747–56.

- Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Elsgaard, L., Palosuo, T., Rötter, R.P., Skjelvåg, a O., Peltonen-Sainio, P., Börjesson, T., Trnka, M., Ewert, F., Siebert, S., Brisson, N., Eitzinger, J., Van Asselt, E.D., Oberforster, M., and Van Der Fels-Klerx, H.J. 2012. Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. *Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment* 29: 1527–42.
- Priya, S., and Shibasaki, R. 2001. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modelling* 136: 113–129.
- Rahimi, J., Khalili, A., and Bazrafshan, J. 2014. Estimation of effective precipitation for winter wheat in different regions of Iran using an Extended Soil-Water Balance Model. *Desert* 19: 91–98.
- Rahmani, M., Jami Al-Ahmadi, M., Shahidi, A., and Hadizadeh Azghandi, M. 2016. Effects of climate change on length of growth stages and water requirement of wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) (Case study: Birjand plain). *Journal of Agroecology* 7: 443–460. (In Persian with English Summary)
- Reyer, C.P.O., Leuzinger, S., Rammig, A., Wolf, A., Bartholomeus, R.P., Bonfante, A., De Lorenzi, F., Dury, M., Gloning, P., and Jaoudé, R.A. 2013. A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Global Change Biology* 19: 75–89.
- Rotter, R.P., Carter, T.R., Olesen, J.E., and Porter, J.R. 2011. Crop-climate models need an overhaul. *Nature Clim. Change* 1: 175–177.
- Saadati, Z., Delbari, M., Panahi, M., Amiri, E., Rahimian, M., and Ghodsi, M. 2016. Evaluation of the effects of climate change on wheat growing period and evapotranspiration using the ceres-wheat model (Case study: Mashhad). *Water and Soil Science* 26: 67–79. (In Persian with English Summary)
- Shokouhi, M., and Sanaei nejad, S.N. 2014. Determination of weather conditions associated with the production of rainfed barley crop (Case study: East Azerbaijan). *Journal of Agroecology* 6: 634–644. (In Persian with English Summary)
- Shokouhi, M., Sanaei Nejad, S.N., and Bannayan Aval, M. 2018. Evaluation of simulations of precipitation and temperature from cmip5 climate models in regional climate change studies (case study: major rainfed wheat-production areas in Iran). *Journal of Water and Soil* 32: In Press. (In Persian with English Summary)
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zhang, X., Zwiers, F.W., and Bronaugh, D. 2013. Climate extremes indices in the cmip5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118: 1716–1733.
- Soleymani Nanadegani, M., Parsinejad, M., Araghinejad, S., and Massah Bavani, A. 2011. Study on climate change effect on net irrigation requirement and yield for rainfed wheat (case study: Behshahr). *Journal of Water and Soil* 25: 389–397. (In Persian with English Summary)
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., and Meehl, G.A. 2012. An overview of cmip5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93: 485–498.
- Trnka, M., Rötter, R.P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., Žalud, Z. and Semenov, M.A. 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change* 4: 637–643.
- Valipour, M. 2014. Use of average data of 181 synoptic stations for estimation of reference crop evapotranspiration by temperature-based methods. *Water Resources Management* 28: 4237–4255.
- Yarmohammadi, S., Zakerinia, M., Ghorbani, K., and Soltani, A. 2018. Investigation of the effect of climate change on evapotranspiration and wheat water requirement in Bojnord region. *Water Engineering* 10: 97–110. (In Persian with English Summary)
- Yazdanshenas, L., Moghadasi, R., and Yazdani, S. 2011. A model for the wheat market in Iran. *International Journal of Agricultural Science and Research* 2: 49–55.



Effects of Climate Change on Frequency of Adverse Weather Events during Wheat-Growing Season (Case Study: Main Areas of Rainfed Wheat Production in Iran)

M. Shokouhi¹, S.H. Sanaei-Nejad^{2*} and M. Bannayan Aval³

Submitted: 04-10-2018

Accepted: 25-12-2018

Shokouhi, M., Sanaei-Nejad, S.H., and Bannayan Aval. 2019. Effects of climate change on frequency of adverse weather events during wheat-growing season (Case Study: Main Areas of Rainfed Wheat Production in Iran). Journal of Agroecology. 11 (2):601-618.

Introduction

Adverse and extreme agro climatic events will disrupt food production and these changes are expected to increase in the world. The wheat is Iran's dominant diet, especially in the form of bread. It is important as a food product that has an impact on food security. Climate change can affect wheat production in major areas of rainfed wheat production in Iran, with social and economic consequences. Therefore, it is important for policy makers and scientists to evaluate the effects of climate change on the agricultural sector and food security. Crop models cannot take into account the effects of severe weather events (such as heavy rainfall, heat stresses) on the final yield of the crop. It could be useful to utilize agro climatic indices to provide more comprehensive projections of the impact of climate change on agro climatic conditions. The purpose of this study was evaluating the probability of occurrence of adverse and extreme agro climatic events at different stages of wheat development using agro climatic indices.

Materials and Methods

The focus of this study is on main areas of rainfed wheat production in Iran (Kurdistan, Kermanshah, Golestan, Zanjan, Hamedan, and Ardebil provinces). According to the latest statistics and information from the Ministry of Agricultural Jihad, more than 55% of wheat production achieve in these areas. The evaluations are based on the outputs of seven CMIP5 models and RCP8.5 and RCO2.6 emission scenarios for the period 2045-2065 and 2080-2100. The equidistant quintile-based mapping method (EDCDF) was applied to bias correct the outputs of CMIP5 models. The proposed method of Allen et al. (1998) was utilized to estimate daily crop evapotranspiration, soil moisture and relative reduction in crop yield under soil water shortage to describe the major adverse conditions for wheat production; the set of 13 indicators was used to cover the major causes of low yields of winter wheat.

Result and discussion

The average temperature during the growing season will be increased by 3.1 °C for the late cultivar and RCP8.5 scenario during the period 2080-2100 compared to the baseline. The appropriate sowing dates will occur later for all scenarios relative to the baseline and shift to late autumn. Due to the increased average temperature during the growth period, anthesis and maturity dates will occur earlier relative to the baseline and subsequently the average growth period for all scenarios is shorter than the baseline. Average total crop evapotranspiration (ETc) during the growing season will be reduced in most stations. The average relative reduction in crop yield (YD) and the average total effective solar radiation will be more favorable than the baseline. Thus, it can be said that these crop yield indicators are better than the baseline. However, increasing frequency of adverse events will

1,2 and 3- Ph.D student in Agricultural Meteorology, Associate Professor of Water Engineering Department and Professor of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.

(*- Corresponding Author: Mojtashokohi@gmail.com)

Doi:10.22067/jag.v11i2.75744

be undesirable and the most unsettling possibility is the increase in the likelihood of occurrence of at least one, two and three adverse events during the growing season that can be extremely unfavorable climatic conditions for the production of wheat. The close connection between the likelihood of adverse events and the duration of growth period (such as moisture and heat stresses) is obvious so that the longer growth period, is more likely to be exposed to high temperatures and moisture stresses. An early cultivar will be a more suitable cultivar for sowing compare to late and medium-ripening cultivar which can change future climate conditions in favor of rainfed wheat production in most areas, especially cold regions.

Conclusion

In this study, the probability of occurrence of adverse and extreme agro climatic events during the growing season of wheat was determined, which is usually not well considered in crop models. However, it is well known that the impacts of such extreme events can be substantial. The results of this study showed that, despite high uncertainty in the climate projections within CMIP5 models, the probability of occurrence of at least one (or more) adverse event during the growth period for each cultivar will increase compared to the baseline for the same cultivar. So that, the longer growth period, the greater likelihood of occurrence of at least one (or more) adverse event.

Key words: Agro-climatic indices, CMIP5 models, EDCDF biases correction, Emission scenarios RCP.