

## The Effect of Climate Change on Main Areas of Rainfed Wheat Production in Iran

MOJTABA SHOKOUHI<sup>1</sup>, SEYED HOSSEIN SANA EI NEJAD<sup>2</sup>\*, MOHAMMAD BANNAYAN AVAL<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student of Agricultural Meteorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad Mashhad, Mashhad, Iran.

(Received: Oct. 20, 2018- Revised: Jan. 8, 2019- Accepted: Jan. 19, 2018)

### ABSTRACT

Climate change and global warming has increased climatic unfavorable events that could reduce crop yields and endanger food security. 13 agro-climatic indices which are based on the outputs of CMIP5 models and RCP emission scenarios, were used to investigate the effect of climate change on areas at risk of adverse events. Occurrence probability of heat stresses will be increased during the flowering and grain-filling for early and late cultivars at the end of the century so that these stresses will become the dominant adverse events in all areas. The occurrence probability of at least one adverse event is more than 20 and 90 percent for early and late cultivars, respectively in all areas for the baseline conditions, and this probability is expected to increase by more than 40 and 94 percent for early and late cultivars, respectively under future climate scenarios. Proportional to the reduction of water stress for different emission scenarios, the probability of simultaneous occurrence of heat and water stress at the flowering stage will decrease in future as compared to the baseline. In future, areas where are at risk of at least two adverse event occurrences will increase further, as compare to those where are at risk of at least one adverse event occurrence. Toward the end of the century, more areas will be at risk of at least one and two adverse event occurrences.

**Key words:** Agro-climatic indices, CMIP5 models, Emission scenarios RCP, Food security.

## اثر تغییر اقلیم بر مناطق عمده تولید گندم در ایران

مجتبی شکوهی<sup>۱</sup>، سید حسین ثنائی نژاد<sup>۲\*</sup>، محمد بنایان اول<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳. استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹)

### چکیده

تغییر اقلیم به همراه گرمایش جهانی منتج به افزایش وقوع پدیده‌های نامطلوب آب و هوایی شده که می‌تواند سبب کاهش عملکرد محصول شده و امنیت غذایی را به خطر اندازد. به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر خطرپذیری مناطق تولید عمده گندم در ایران از لحاظ قرارگیری در معرض خطر وقوع پدیده‌های نامطلوب، از ۱۳ شاخص اقلیمی-کشاورزی که بر مبنای خروجی مجموعه مدل‌های CMIP5 و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 است، استفاده شد. برای رقم زودرس و دیررس در پایان قرن، احتمال وقوع تنش‌های حرارتی در مرحله گل‌دهی و پرشدن دانه افزایش خواهد یافت، به گونه‌ای که این تنش‌ها به پدیده غالب در تمام مناطق تبدیل خواهند شد. در تمام مناطق و در دوره پایه، احتمال وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب برای رقم زودرس و دیررس به ترتیب بیش از ۲۰ و ۹۰ درصد انتظار می‌رود و این احتمال در آینده برای رقم زودرس و دیررس به ترتیب به بیش از ۴۰ و ۹۴ درصد افزایش می‌یابد. احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی در آینده نسبت به دوره پایه، متناسب با کاهش تنش رطوبتی برای سناریوهای مختلف کاهش می‌یابد. در آینده مناطقی که با خطر وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب مواجه هستند نسبت به مناطقی که با خطر وقوع حداقل یک پدیده مواجه هستند در کل افزایش بیشتری نسبت به دوره پایه خواهند داشت. با نزدیک شدن به پایان قرن، مناطق بیشتری در معرض خطر وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب قرار خواهند گرفت.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، سناریوهای RCP، شاخص‌های اقلیمی-کشاورزی، مدل‌های CMIP5.

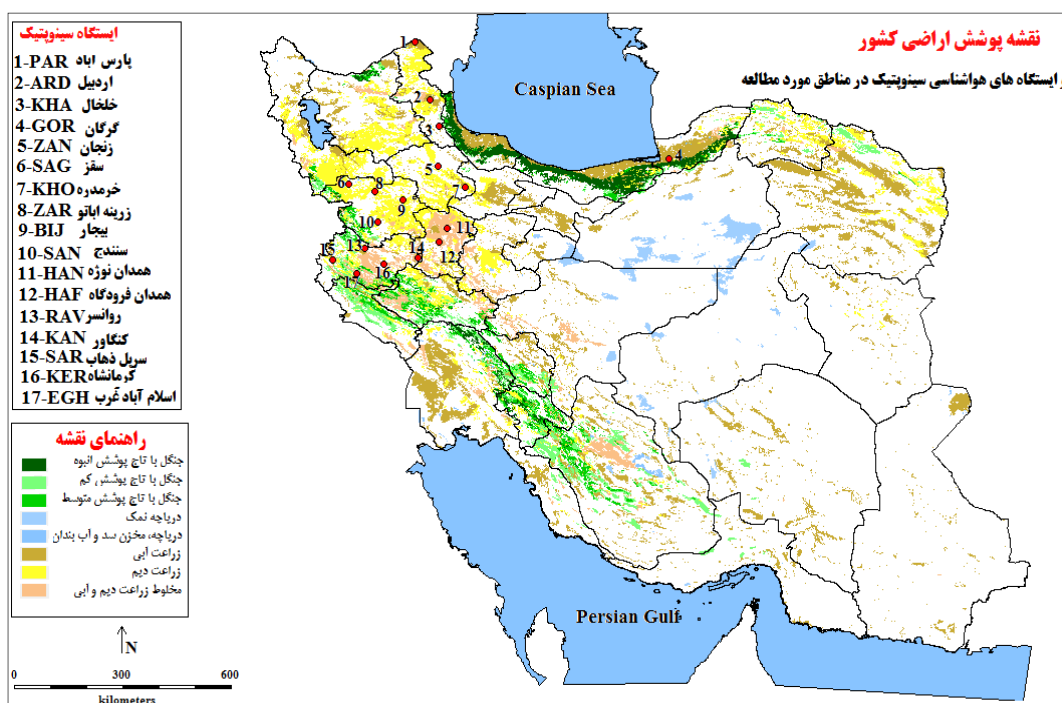
### مقدمه

برای سیاست‌گذاران 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 مدل‌های شبیه‌سازی زراعی یا از روش‌های آماری-تجربی استفاده می‌نمایند (Lobell and Asseng, 2017). اگر چه اکثر مدل‌های زراعی 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 and Shibusaki, 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 می‌شود (Hansen and Jones, 2000). از طرف دیگر تغییر اقلیم به همراه گرمایش جهانی منتج به افزایش رخدادهای وخیم

تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلفی از جامعه تاثیر می‌گذارد که از بین آنها اثر تغییر اقلیم بر امنیت آبی و تولید محصولات کشاورزی بسیار حائز اهمیت است (Wang et al., 2013). کمبود آب و مواد غذایی بزرگترین مشکل در سطح جهانی بوده که با شدت بیشتری مناطق خشک و نیمه خشک را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Misra, 2014). علاوه بر این‌ها افزایش جمعیت به بیش از ۹ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ از یک طرف و کاهش زمین‌های کشاورزی از طرف دیگر، تامین امنیت غذایی برای جمعیت آینده نزدیک را با چالش روبه‌رو ساخته است (Altinsoy et al., 2013). تغییر الگوهای توزیع دمایی و بارش، بر محیط تولید محصولات زراعی از جمله گندم اثرگذار خواهد بود. تا سال ۲۰۳۰ 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 ۲۰۵۰ به سه برابر افزایش خواهد یافت (Gourdji et al., 2013). بنابراین

2013). بنابراین در این مطالعه برای نشان دادن وقوع پدیده‌های نامطلوب موثر بر کاهش عملکرد محصول در مراحل مختلف رشد و نمو از ۱۳ شاخص اقلیمی-کشاورزی در مقیاس روزانه که بر مبنای خروجی مجموعه مدل‌های CMIP5<sup>۲</sup> (Taylor et al., 2012) و سناریوهای RCPs<sup>۳</sup> (Moss et al., 2010) هستند، استفاده شد تا تصویر نسبتاً جامعی از شرایط اقلیمی-کشاورزی فراهم آورد. در برخی مطالعات برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب طی دوره رشد گندم از شاخص-های اقلیمی-کشاورزی استفاده شده است (Trnka et al., 2015; Trnka et al., 2014).

اقلیمی (مانند بارش سنگین، تنش‌های حرارتی) شده است (Rahmstorf and Coumou, 2011) که مدل‌های زراعی نمی‌توانند اثر چنین رویدادهایی را بر عملکرد نهایی محصول لحاظ کنند (Rotter et al., 2011). بنابراین گاهی اوقات بکارگیری شاخص‌های اقلیمی-کشاورزی<sup>۱</sup> برای ارائه یک تصویر جامع‌تر از تاثیر تغییر اقلیم بر شرایط اقلیمی-کشاورزی مفید واقع می‌شود (Alexandrov et al., 2008). اکثر مطالعات انجام شده تاکنون اثر رخدادهای وخیم آب و هوایی بر مناطق تولید و عملکرد محصول را به طور کامل و جامع طی دوره رشد در نظر نگرفته‌اند (Luo et al., 2018). به طوری که برخی از مطالعات تنها اثر یک پدیده نامطلوب بر عملکرد محصول را بررسی نموده‌اند (Gourdji et al., 2018).



شکل ۱- نمای کلی از موقعیت مکانی ایستگاه‌ها و نوع پوشش زراعی مناطق مورد مطالعه

در پی داشته باشد. بنابراین هدف این مطالعه ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب موثر بر کاهش عملکرد محصول در این مناطق است. علاوه بر این، اثر تغییر اقلیم بر تغییر خطرپذیری مناطق تولید عمده گندم دیم از لحاظ قرارگیری در معرض خطر وقوع پدیده‌های نامطلوب آب و هوایی از اهداف بعدی است. با کمی کردن خطر وقوع پدیده‌های نامطلوب در هر منطقه می‌توان سیاست‌های سازگاری مناسب‌تری (مثل توسعه رقم‌های جدید یا شیوه‌های مدیریت زراعی) برای هر منطقه اتخاذ کرد.

طبق آخرین آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی (Ahmadi et al., 2017)، مقدار تولید گندم آبی و دیم کشور به ترتیب تقریباً ۸/۸۴ و ۵/۷۵ میلیون تن می‌باشد که استان‌های اردبیل، کردستان، کرمانشاه، گلستان، همدان و زنجان به عنوان مناطق عمده تولید گندم دیم با تولید ۳/۱۸ میلیون تن، بیش از ۵۵ درصد از کل تولید گندم دیم کشور را به خود اختصاص داده‌اند (Ahmadi et al., 2017). لذا تغییر اقلیم می‌تواند بر تولید گندم دیم در این مناطق تاثیرگذار بوده و تبعات اجتماعی و اقتصادی

جدول ۱- مدل‌ها و گروه‌ها و اعضای هر گروه از مدل‌ها، که در این مطالعه بکار گرفته شده است.

نام مدل	مرکز مدل سازی	اندازه تفکیک	گروه‌ها و اعضای آنها
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques, France	۱/۴۰۶×۱/۴۰۱	hist. r[1-10]i1p1, RCP26 r1i1p1, RCP85 r[1,2,4,6,10]i1p1
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Queensland Climate Change Centre of Excellence Australia	۱/۸۷۵×۱/۸۶۵	r[1-10]i1p1
EC-EARTH	European Earth System Model, Netherlands/Ireland	۱/۱۲۵×۱/۱۲۱	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	Met Office Hadley Centre, UK	۱/۸۷۵×۱/۲۵	r[1-4]i1p1
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France	۲/۵×۱/۲۶۸	hist. r[1-3]i1p1, RCP26 and RCP85 r1i1p1
MIROC5	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	۱/۴۰۶×۱/۴۰۱	hist. r[1-5]i1p1, RCP26 and RCP85 r[1-3]i1p1
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	۱/۸۷۵×۱/۸۶۵	r[1-3]i1p1

### مواد و روش‌ها

تمرکز این مطالعه، بر روی استان‌های عمده تولید گندم در ایران (استان‌های کردستان، کرمانشاه، گلستان، زنجان، همدان و اردبیل) است که طبق آمار و اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی بیش از ۵۵ درصد تولید گندم در این مناطق است (شکل ۱). داده‌های روزانه دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش، برای ۱۷ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک طی دوره ۱۹۷۵-۲۰۰۵ (برای ایستگاه‌هایی که بعد از سال ۱۹۷۵ تاسیس شده‌اند از بدو تاسیس ایستگاه تا سال ۲۰۰۵) از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید (شکل ۱، دوایر شماره‌دار). یکی از مسائل حائز اهمیت در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم، انتخاب مدل‌های گردش عمومی GCM<sup>۱</sup> متناسب با منطقه هست (Shokouhi et al., 2018). بنابراین برای مناطق مورد مطالعه از خروجی (داده‌های روزانه

دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش) هفت مدل CMIP5 انتخابی (جدول ۱) تحت سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره‌های ۲۰۴۵-۲۰۶۵ (آینده نزدیک، D1) و ۲۰۸۰-۲۱۰۰ (آینده دور، D2) استفاده شد (Shokouhi et al., 2018). برای هر یک از گروه‌ها و اعضای آنها در هر مدل (جدول ۱) روش تصحیح خطای نگاشت هم فاصله تابع توزیع تجمعی (EDCDFm) 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 ۲۰۰۵ میلادی به عنوان دوره تاریخی (دوره پایه) و از اول ژانویه ۲۰۰۶ تا ۳۱ دسامبر ۲۱۰۰ میلادی برای سناریوهای آینده در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- پارامترهای مربوط به مراحل رشد و نمو ارقام مختلف گندم و روش استفاده شده جهت تعیین تاریخ وقوع مراحل رشد و نمو.

رقم محصول	از کاشت تا جوانه‌زنی	از جوانه زنی تا گل‌دهی	از گل‌دهی تا رسیدن
زودرس (Ea.)	$T_b = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{sum} = 125 \text{ } ^\circ\text{Cd}$	$T_{sum} = \sum(T_i - T_b)_+ \times \alpha$ $T_b = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , $T_{sum} = 380 \text{ } ^\circ\text{Cd}$	$T_{sum} = \sum(T_i - T_b)_+$ $T_b = 6 \text{ } ^\circ\text{C}$ , $T_{sum} = 280 \text{ } ^\circ\text{Cd}$
دیررس (La.)	$T_{sum} = \sum(T_i - T_b)_+$	$\alpha = \min\left[1, \frac{(t-6.5)_+}{12}\right]$ $T_b = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , $T_{sum} = 540 \text{ } ^\circ\text{Cd}$	$T_b = 6 \text{ } ^\circ\text{C}$ , $T_{sum} = 560 \text{ } ^\circ\text{Cd}$

$T_{sum}$ : 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  $\alpha$ : پاسخ فتوپریودیکی (پاسخ عامل طول روز) و  $\lambda$  طول روز حسب ساعت.

وقوع پدیده‌های نامطلوب با مراحل حساس رشد و نمو در دوره-های D1 و D2 با دوره پایه، دو رقم محصول، با طول دوره رشد کوتاه (زودرس Ea.) و طولانی مدت (دیررس La.) در نظر گرفته شد (جدول ۲). تاریخ وقوع مراحل رشد و نمو این ارقام با توجه به پارامترهای توصیه شده در هر مرحله توسط (Trnka et al.,

به منظور بررسی وقوع پدیده‌های نامطلوب آب و هوایی طی مراحل حساس رشد و نمو محصول، ۳۰۰ 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 داده آب و هوایی LARS-WG 5.5 تولید شد. به منظور بررسی و مقایسه اثرات همزمانی

خاک با استفاده از روش بیلان آب و خاک آلن و همکاران (Allen *et al.*, 1998)، از ترم‌های رواناب و نفوذ عمقی صرف نظر شد و خاکی با بافت متوسط (با خصوصیات  $\theta_{FC}$  برابر  $275 \text{ mm/m}$ ، رطوبت در نقطه پژمردگی ( $\theta_{WP}$ ) برابر  $100 \text{ mm/m}$  و حداکثر عمق ریشه  $1/3$  متر) برای تمام مناطق یکسان فرض شد (Allen *et al.*, 1998).

به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر فراوانی وقوع پدیده‌های نامطلوب آب و هوایی طی دوره رشد محصول گندم پاییزه، از ۱۳ شاخص اقلیمی-کشاورزی استفاده شد تا مهمترین عوامل موثر بر کاهش شدید عملکرد محصول را در برگیرند (جدول ۳). این شاخص‌ها در ۴ گروه شاخص‌های تعیین‌کننده اثر دمای حداقل، دمای حداکثر، شرایط رطوبتی و شرایط نامطلوب در زمان کاشت و برداشت طبقه‌بندی شد (جدول ۳). چنانچه در یک دوره رشد، شرایط شاخص‌های تعریف شده در جدول ۳ رخ دهد، پدیده نامطلوب مربوطه در آن فصل رشد لحاظ می‌شود و در نهایت احتمال وقوع پدیده نامطلوب طی سال‌های مورد بررسی (از ۳۰۰ سال، ۵۰ سال اول را به علت ارزش‌دهی شرایط آغازین کنار گذاشته و ۲۵۰ سال بعدی به عنوان سری داده‌های روزانه مورد بررسی قرار گرفت) محاسبه شد. در ادامه احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب (از پدیده‌های تعریف شده در جدول ۳) طی دوره رشد محصول برای ۸ حالت مختلف (در دوره-های D1 و D2 برای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و ارقام زودرس Ea. و دیررس La.) محاسبه و برای هر رقم با دوره پایه مقایسه شد.

مرحله گل‌دهی یکی از حساس‌ترین مراحل به تنش رطوبتی و حرارتی بوده که به شدت عملکرد محصول را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Slafer and Rawson, 1994). البته جداسازی اثر همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در شرایط طبیعی مشکل است (Plaut *et al.*, 2004) اما به طور کلی می‌توان گفت اثر ترکیبی و همزمان تنش رطوبتی و حرارتی بسیار شدیدتر از اثرات تک تک آنها است (Baker, 1996). لذا اثر همزمانی وقوع پدیده‌های نامطلوبی مانند تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی، نسبت به اثر وقوع تنها یک پدیده، اثر شدیدتری بر کاهش عملکرد محصول می‌گذارند (Shokouhi and Sanaei nejad, 2014). از اینرو احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی (زمانیکه طی ۵ روز قبل از گل‌دهی تا ۵ روز بعد از آن، حداقل برای دو روز  $ET_{c-adj}/ET_c$  کمتر از  $0.15$  و دمای حداکثر بیش از  $31^\circ\text{C}$  باشد، این پدیده در نظر گرفته شد) در مناطق مورد مطالعه ارزیابی گردید.

(جدول ۲)، با استفاده از روش (Olesen *et al.*, 2012) (2014) تعیین شد (جدول ۲). برای هر ایستگاه در بازه زمانی ۳۱ شهریور الی ۲۰ آذر چنانچه اولین روز بعد از اینکه دمای متوسط، حداقل برای پنج روز متوالی کمتر از  $13^\circ\text{C}$  و رطوبت خاک بیش از یک سوم حداکثر ظرفیت زراعی خاک ( $\theta_{FC}$ ) باشد، به عنوان تاریخ مناسب کاشت در نظر گرفته شد و اگر این شرایط محقق نشد روز ۲۱ آذر به عنوان تاریخ مناسب کاشت در نظر گرفته شد. از آنجا که برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه ( $ET_o$ ) به روش پنمن-مونیت 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-نورژه روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده-۲۴ و برای مابقی ایستگاه‌ها روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده-۱ انتخاب شد (Valipour, 2014). تبخیر و تعرق روزانه محصول در شرایط استاندارد ( $ET_c$ ) با استفاده از روش آلن و همکاران محاسبه شد (Allen *et al.*, 1998). ضرایب گیاهی یگانه گندم (Kc) از  $0.73$  در مراحل اولیه رشد تا  $1/15$  در مرحله گل‌دهی و در نهایت تا  $0.25$  در زمان رسیدن لحاظ شد (Rahimi *et al.*, 2014). تبخیر و تعرق روزانه محصول در شرایط تنش رطوبتی ( $ET_{c-adj}$ ) و رطوبت خاک نیز با استفاده از روش بیلان آب و خاک آلن و همکاران برآورد شد (Allen *et al.*, 1998).

روزنه‌های سطح برگ در پاسخ به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تمایل به کاهش قطر خود دارند، این کاهش قطر به طور موثری تلفات آب از طریق تعرق را کاهش می‌دهد، بنابراین کارایی مصرف آب در گیاه بالا می‌رود (به طور مثال نسبت تعداد مولکول‌های دی‌اکسیدکربن تثبیت شده توسط گیاه به تعداد مولکول‌های آب از دست رفته از طریق تعرق بیشتر می‌شود) (Kruijt *et al.*, 2008). لذا انتظار می‌رود تبخیر و تعرق گیاه به علت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر برای دوره‌های آینده کاهش یابد، که این کاهش با یک ضریب تعدیل (فاکتور تصحیح)، در محاسبات تبخیر و تعرق اعمال می‌شود (Kruijt *et al.*, 2008). برآورد ضریب تعدیل (فاکتور تصحیح) به عوامل متعددی وابسته است. برای آگاهی از جزئیات بیشتر به (Kruijt *et al.*, 2008) مراجعه شود. لذا بر اساس نتایج مطالعات (Kruijt *et al.*, 2008)، این ضرایب تعدیلی برای سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره D1 به ترتیب  $0.94$  و  $0.97$  و در دوره D2 به ترتیب  $0.84$  و  $0.97$  تعیین گردید. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم و مقایسه بهتر و راحت‌تر بین ایستگاه‌ها در دوره پایه و آینده، در محاسبه رطوبت

جدول ۲-۱۳ شاخص اگرو-کلیمایی استفاده شده که نشان دهنده وقوع پدیده‌های نامطلوب هستند.

نام شاخص <sup>۱</sup>	توضیحات
یخ زدگی (F.R)	زمانی که دمای حداقل طی دوره رشد، برای حداقل یک روز، کمتر/ مساوی با ۲۰ °C باشد، این پدیده لحاظ می شود بعد از یک دوره حداقل ۵ روزه متوالی با دمای متوسط بیشتر/مساوی با ۱۰ °C، دمای حداقل کمتر مساوی ۲ °C - شود، این پدیده لحاظ می شود.
آخرین یخبندان (L.F.R)	زمانی که دمای حداقل بعد از گل‌دهی تا رسیدن دانه، برای حداقل نه روز، بیشتر/ مساوی با ۲۰ °C باشد، این پدیده لحاظ می شود.
افزایش شدید دمای شبانه در زمان پر شدن دانه (G.F.N.H)	زمانی که دمای حداکثر، طی ۵ روز قبل از گل‌دهی تا ۵ روز بعد از آن، حداقل برای دو روز بیش از ۳۱ °C باشد، این پدیده لحاظ می شود.
تنش حرارتی در زمان گل دهی (A.H.S)	زمانی که دمای حداکثر، طی ۵ روز بعد از گل‌دهی تا رسیدن دانه، حداقل برای سه روز بیش از ۳۵ °C باشد این پدیده لحاظ می شود.
تنش حرارتی شدید در زمان پر شدن دانه (G.F.H)	چنانچه پیش از یک دوره حداقل شش روزه متوالی با دمای متوسط کمتر از ۳ °C، دمای حداکثر، حداقل برای ۹ روز بیش از ۱۸ °C باشد، این پدیده لحاظ می شود.
شروع زمستان‌گذری گیاه (B.H.H)	چنانچه طی دوره کاشت تا گل‌دهی، برای روزهای با دمای متوسط بیش از ۳ °C، رطوبت خاک برای حداقل ۶۰ روز برابر یا بیشتر از ظرفیت زراعی باشد، این پدیده لحاظ می شود.
رطوبت بیش از حد (E.X.W)	چنانچه طی مرحله گل‌دهی تا ۵ روز قبل از مرحله رسیدن، حداقل برای دو روز بارندگی بیش از ۴۰ میلی‌متر رخ دهد، یا اگر در روزی بارندگی بیش از ۲۰ میلی‌متر رخ دهد و در روز قبل از آن رطوبت خاک برابر یا بیشتر از ظرفیت زراعی باشد، این پدیده لحاظ می شود.
شاخص ورس (L.O.G)	چنانچه از زمان کاشت تا مرحله گل‌دهی، برای روزهای با حداقل دمای متوسط ۳ °C، $ET_{c-adj} / ET_c$ ، حداقل برای ۱۰ روز متوالی کمتر از ۰/۱۵ باشد، این پدیده لحاظ می شود.
خشکی شدید طی دوره کاشت تا گل دهی (D.S.A)	چنانچه از زمان گل‌دهی تا رسیدن، $ET_{c-adj} / ET_c$ ، حداقل برای ۱۰ روز متوالی کمتر از ۰/۱۵ باشد، این پدیده لحاظ می شود.
خشکی شدید طی دوره گل دهی تا رسیدن (D.A.M)	چنانچه از زمان کاشت تا مرحله رسیدن، برای روزهای با دمای متوسط حداقل ۳ °C، $ET_{c-adj} / ET_c$ ، حداقل برای ۲۱ روز کمتر از ۰/۱۵ باشد، این پدیده لحاظ می شود.
خشکی شدید طی دوره کاشت تا رسیدن (D.S.M)	چنانچه در دوره مناسب کاشت (پنجره زمانی $\pm 15$ روز از تاریخ مناسب کاشت)، حداقل سه روز با شرایط ۱- رطوبت خاک بین ۹۰٪ - ۵٪، ۲- بارندگی کمتر از ۵ میلی‌متر و ۳- در روز قبل از یک روز مناسب کاشت بارندگی کمتر از ۱۰ میلی‌متر موجود نباشد، این پدیده لحاظ می شود.
شرایط نامطلوب در زمان کاشت (A.C.S)	چنانچه در دوره مناسب برداشت (۵ تا ۲۵ روز بعد از تاریخ رسیدن)، حداقل سه روز با شرایط ۱- رطوبت خاک کمتر از ۸۵٪، ۲- بارندگی کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و ۳- در روز قبل از یک روز مناسب برداشت بارندگی کمتر از ۵ میلی‌متر موجود نباشد، این پدیده لحاظ می شود.
شرایط نامطلوب در زمان برداشت (A.C.H)	

۱- تعیین کننده اثر دمای حداقل

۲- تعیین کننده اثر دمای حداکثر

۳- تعیین کننده اثر رطوبتی

۴- شرایط نامطلوب در زمان کاشت

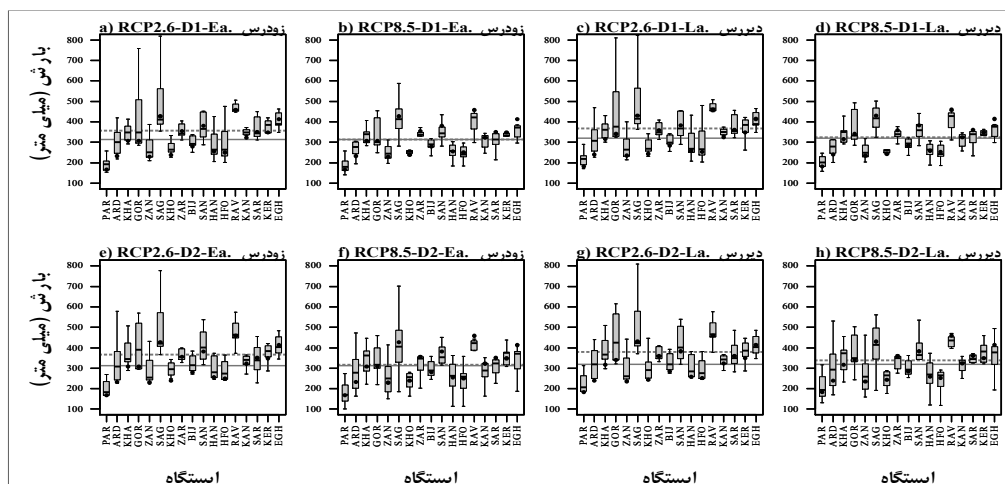
\* شاخص‌ها بر اساس مطالعات (Shokouhi and Sanaei nejad, 2014; Trnka et al., 2014) تعریف شده است.

## نتایج و بحث

نتایج نشان داد به علت مناسب نبودن شرایط کاشت (به علت

کمتر بودن شرایط رطوبتی خاک)، تاریخ مناسب کاشت در آینده نسبت به دوره پایه با تاخیر مواجه خواهد شد و به اواخر فصل پاییز موکول می‌شود. نتایج محققان دیگر نیز نشان داد که در مناطقی که شرایط بارشی (رطوبتی) مناسب نباشد تاریخ کاشت دیرتر و به اواخر پاییز موکول می‌شود (Delavar et al., 2017). 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 متوسط طول دوره رشد برای تمام سناریوها در مقایسه با دوره پایه کوتاه‌تر می‌شود. متوسط کوتاه‌ترین طول دوره رشد برای کل منطقه در بین سناریوها مربوط به RCP8.5-D2-Ea با ۱۶۷ روز و طولانی‌ترین آن مربوط به RCP2.6-D2-La با ۲۲۰ روز است. تحقیقات متعدد در نقاط مختلف کشور نیز حاکی از کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد در شرایط اقلیمی آینده است (Saadati et al., 2016).

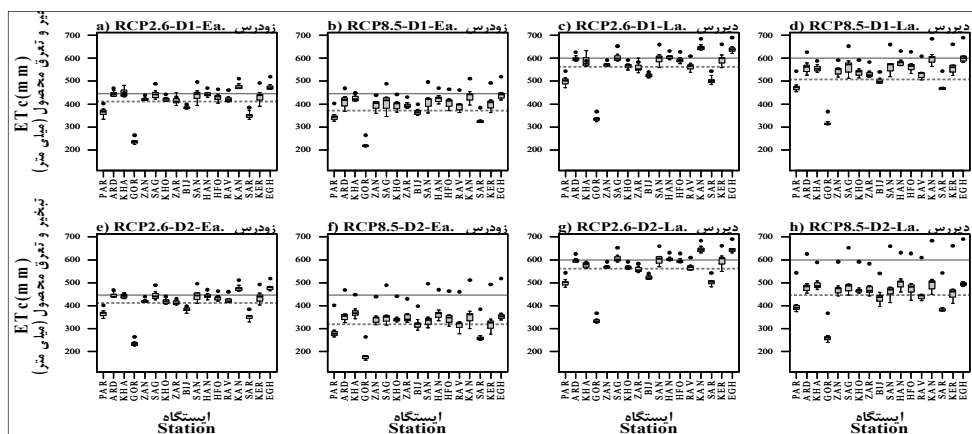
پیش‌نگری هفت مدل GCM نشان داد به طور کلی دمای متوسط طی دوره رشد برای تمام سناریوها و دوره‌ها و ارقام، نسبت به دوره پایه افزایش یافته به طوری که بیشترین و کمترین مقدار افزایش دمای متوسط طی دوره رشد مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره D2 و رقم دیررس (La.) به مقدار ۳/۱ درجه‌سانتی‌گراد و کمترین مقدار به سناریوی RCP2.6 در دوره D1 و رقم زودرس (Ea.) به مقدار ۰/۹ درجه‌سانتی‌گراد است. 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 برای تمام سناریوها و دوره‌ها و ارقام کم و بیش افزایش خواهد یافت (شکل ۲) و این افزایش برای مناطق شمالی‌تر (ایستگاه‌های پارس‌آباد مغان، اردبیل، خلخال، گرگان و زنجان) مشهودتر است. این در حالی است که مناطق جنوبی‌تر کم و بیش بدون تغییر یا با کاهش بارش مواجه خواهند بود (شکل ۲).



شکل ۲- متوسط مجموع بارش طی دوره رشد برای دوره پایه (دایره‌های توپر) ۲۰۰۵-۱۹۷۵ و پیش‌نگری‌های اقلیمی هفت مدل GCM (نمودار جعبه‌ای) برای هر ایستگاه. a, b, c و d مربوط به دوره D1 (۲۰۴۵-۲۰۶۵) و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و ارقام زودرس (Ea.) و دیررس (La.). به همین ترتیب برای e, f, g و h اما برای دوره D2 (۲۰۸۰-۲۱۰۰). متوسط مجموع بارش طی دوره رشد برای تمام ایستگاه‌ها در دوره پایه و آینده به ترتیب با خطوط ممتد و منقطع در هر نمودار نشان داده شده است. ایستگاه‌ها بر روی محور افقی از شمال به جنوب مرتب شده است.

غلظت دی‌اکسیدکربن مقاومت روزه‌های گیاه افزایش یافته (هدایت روزه‌های کاهش) و به دنبال آن تعرق گیاه کاهش می‌یابد (Saadati et al., 2016). نتایج محققان در دیگر نقاط ایران نیز موید این نکته است که مجموع تبخیر و تعرق محصول طی دهه-های آتی کاهش خواهد یافت (Rahmani et al., 2016; Saadati et al., 2018; Yarmohammadi et al., 2018). به طور کلی می‌توان گفت برای 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.

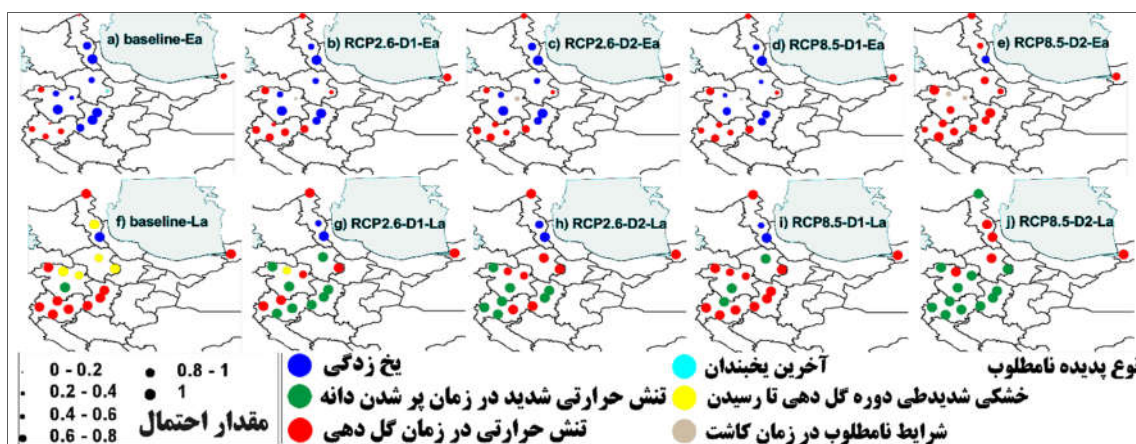
متوسط مجموع تبخیر و تعرق محصول ( $E_{Tc}$ ) کل منطقه طی دوره رشد برای رقم زودرس و دیررس در دوره D1 و D2 و برای سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در مقایسه با دوره پایه کم‌تر خواهد شد (شکل ۳). علیرغم افزایش دما طی دوره رشد نسبت به دوره پایه در تمام سناریوها، اما مجموع تبخیر و تعرق محصول طی دوره رشد در دهه‌های کاهش می‌یابد. این کاهش مجموع تبخیر و تعرق محصول  $E_{Tc}$  طی دوره رشد می‌تواند به دو دلیل باشد، اول، طول دوره رشد کاهش یافته و در نتیجه مقدار جمعی تبخیر و تعرق طی دوره رشد محصول کاهش می‌یابد، و دوم، اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر کاهش مقدار تبخیر و تعرق محصول. در آزمایشی نشان داده شد بر اثر دو برابر شدن



شکل ۳- متوسط مجموع تبخیر و تعرق محصول ( $E_{Tc}$ ) طی دوره رشد برای دوره پایه (دایره‌های توپر) ۲۰۰۵-۱۹۷۵ و پیش‌نگری‌های اقلیمی هفت مدل GCM (نمودار جعبه‌ای) برای هر ایستگاه. a, b, c و d مربوط به دوره D1 (۲۰۴۵-۲۰۶۵) و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و ارقام زودرس (Ea.) و دیررس (La.). به همین ترتیب برای e, f, g و h اما برای دوره D2 (۲۰۸۰-۲۱۰۰). متوسط مجموع تبخیر و تعرق محصول ( $E_{Tc}$ ) طی دوره رشد برای تمام ایستگاه‌ها در دوره پایه و آینده به ترتیب با خطوط ممتد و منقطع در هر نمودار نشان داده شده است. ایستگاه‌ها بر روی محور افقی از شمال به جنوب مرتب شده است.

(F.R) به طور متوسط برای کل منطقه و تمام سناریوها نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت (شکل ۴). به غیر از پدیده‌های نامطلوب ذکر شده، احتمال وقوع سایر پدیده‌های نامطلوب ذکر شده در جدول ۳ کم و بیش افزایش می‌یابد. در بین پدیده‌های نامطلوب، بیشترین خطری که کل منطقه را تهدید می‌کند وقوع تنش‌های حرارتی به ویژه در مرحله گل‌دهی و پرشدن دانه است (شکل ۴).

افزایش کم و بیش بارش در اکثر نقاط از یک طرف و کاهش مجموع تبخیر و تعرق محصول طی دوره رشد از طرف دیگر، سبب می‌شود در کل شرایط تنش رطوبتی در دهه‌های آتی کاهش یابد. نتایج نیز نشان داد احتمال وقوع پدیده‌های نامطلوب خشکی شدید طی دوره گل‌دهی تا رسیدن (D.A.M) و کاشت تا رسیدن (D.S.M) اتفاق می‌یابد (شکل ۴). همچنین با افزایش دمای متوسط و دمای حداقل احتمال وقوع پدیده نامطلوب یخ‌زدگی



شکل ۴- نوع پدیده غالب (دایره‌های رنگی) و مقدار احتمال وقوع آنها (متناسب با اندازه دایره‌ها) در هر منطقه، (a) تا (e) برای رقم زودرس (Ea) و (f) تا (j) برای رقم دیررس (La). برای دوره پایه (baseline) و متوسط پیش‌نگری‌های هفت مدل انتخابی GCM تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره D1 (-۲۰۴۵ تا ۲۰۶۵) و دوره D2 (۲۰۸۰-۲۱۰۰).

افزایش خواهد یافت (شکل ۵-f تا j). بنابراین می‌توان گفت مناطق عمده تولید گندم در ایران بالقوه دارای خطر بالای از وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب هستند و این خطر انتظار می‌رود در آینده بیشتر هم شود (شکل ۵). به طوری که برای رقم دیررس می‌توان گفت تحت سناریوی RCP8.5 در پایان قرن حاضر احتمال وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب طی دوره رشد در تمام مناطق نزدیک به ۱۰۰ درصد خواهد بود (شکل ۵-j). برای رقم زودرس در دوره پایه، احتمال وقوع حداقل یک دو پدیده نامطلوب در ۵۰٪ مناطق کشت گندم دیم به ترتیب کمتر از ۷۳ و ۲۲ درصد است (شکل ۶-a و b باکس خاکستری baseline-Ea). اما این احتمال برای رقم زودرس در آینده در مقایسه با دوره پایه بیشتر خواهد شد (شکل ۶-a و b باکس‌های سبز رنگ). به طوری که احتمال وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب در ۵۰٪ مناطق برای سناریوی RCP2.6 در دوره D1 و D2 به ترتیب به ۸۵ و ۸۶ درصد و برای RCP8.5 در دوره D1 و D2 به ترتیب به ۷۹ و ۸۸ درصد خواهد رسید (شکل ۶-a باکس‌های سبز رنگ). احتمال وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب در ۵۰٪ مناطق برای سناریوی RCP2.6 در دوره D1 و D2 به ترتیب به

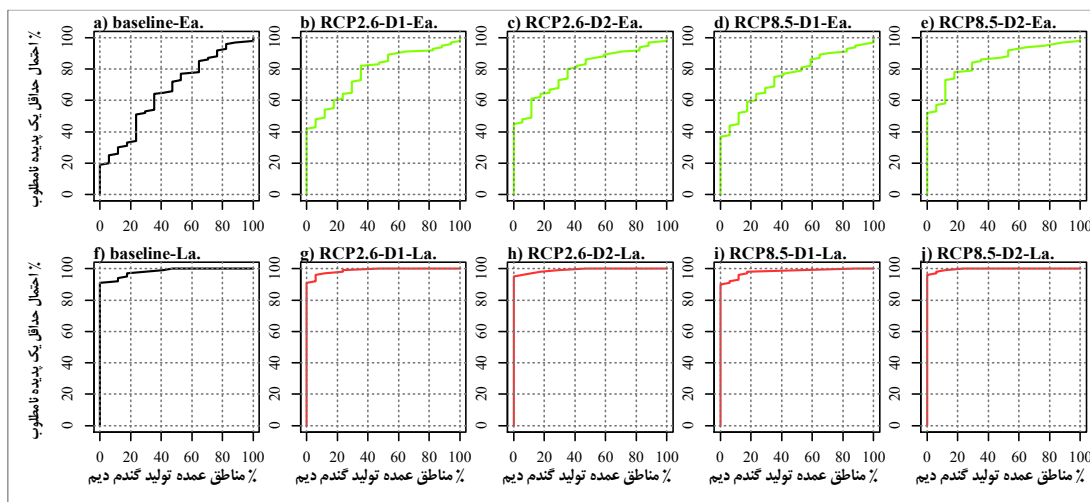
از آنجا که برای رقم دیررس طول دوره رشد بلندتر بوده و مراحل حساس رشد و نمو به ماه‌های گرم پایانی بهار و اوایل تابستان منتقل می‌شود احتمال وقوع این تنش‌ها برای رقم دیررس نسبت به رقم زودرس بسیار بیشتر است (شکل ۴). با نزدیک‌تر شدن به پایان قرن حاضر برای رقم زودرس و دیررس احتمال وقوع تنش‌های حرارتی در مرحله گل‌دهی و پرشدن دانه افزایش یافته، و این افزایش برای سناریوی RCP8.5 بسیار بیشتر خواهد بود. به طوری که در پایان قرن تنش‌های حرارتی در مرحله گل‌دهی و پرشدن دانه به عنوان پدیده نامطلوب غالب در تمام مناطق با احتمال بالایی رخ خواهند داد (شکل ۴-j).

احتمال وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب (از پدیده‌های تعریف شده در جدول ۳) برای رقم زودرس در دوره پایه در تمام مناطق بیش از ۲۰٪ است. در دهه‌های آتی این احتمال برای تمامی سناریوها به بیش از ۴۰٪ در تمام مناطق خواهد رسید (شکل ۵-a تا e). اما این احتمال برای رقم دیررس بیشتر هم خواهد شد. به طوری که احتمال وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب برای رقم دیررس در دوره پایه در تمام مناطق بیش از ۹۰٪ است و در دهه‌های آتی این احتمال برای تمامی سناریوها اندکی



۸۶ و ۹۸ درصد خواهد رسید. (شکل ۶- b باکس‌های قرمز رنگ). بنابراین می‌توان گفت که احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب طی دوره رشد برای رقم دیررس نسبت به زودرس هم در دوره پایه و هم آینده چندین برابر بیشتر است. همچنین در کل می‌توان گفت احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب طی دوره رشد برای تمام ارقام و سناریوها و در تمام دوره‌ها نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همانطور که مشاهده شد هرچه به پایان قرن حاضر نزدیک می‌شویم احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب برای تمام ارقام و سناریوها افزایش بیشتری خواهد یافت. همچنین می‌توان دید که در بین سناریوهای مختلف، کمترین احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب مربوط به RCP8.5 در میانه‌های قرن حاضر ( دوره D1) است و در نقطه مقابل بیشترین احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب مربوط به همین سناریو اما در اواخر قرن حاضر ( دوره D2) است.

۴۳ و ۴۸ درصد و برای RCP8.5 در دوره D1 و D2 به ترتیب به ۳۶ و ۵۴ درصد خواهد رسید (شکل ۶- b باکس‌های سبز رنگ). برای رقم دیررس در دوره پایه احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب در ۷۵٪ مناطق کشت گندم به ترتیب بیشتر از ۹۶ و ۸۲ درصد است (شکل ۶- a و b باکس خاکستری baseline-La). اما این احتمال در اکثر سناریوها برای رقم دیررس در آینده در مقایسه با دوره پایه کم و بیش اندکی افزایش خواهد یافت (شکل ۶- a و b باکس‌های قرمز رنگ). به طوری که احتمال وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب در ۷۵٪ مناطق برای سناریوی RCP2.6 در دوره D1 و D2 به ترتیب به بیش از ۹۸ و ۹۹ درصد و برای RCP8.5 در دوره D1 و D2 به ترتیب به بیش از ۹۶ و ۱۰۰ درصد (شکل ۶- a باکس‌های قرمز رنگ) خواهد رسید. احتمال وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب در ۷۵٪ مناطق برای سناریوی RCP2.6 در دوره D1 و D2 به ترتیب بیشتر از ۸۸ و ۸۹ درصد و برای RCP8.5 در دوره D1 و D2 به ترتیب بیشتر از



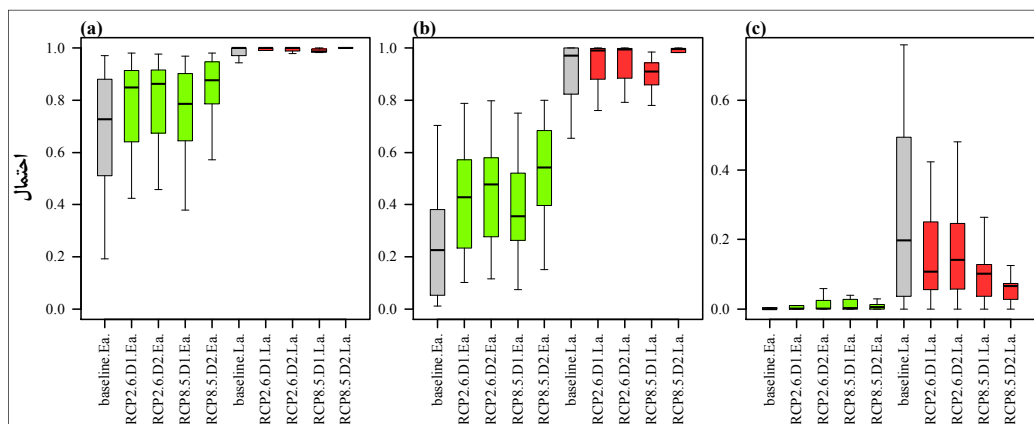
شکل ۵- احتمال تجمعی وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب طی دوره رشد در برابر مناطق عمده تولید گندم دیم، (a) تا (e) برای رقم زودرس و (f) تا (j) برای رقم دیررس. برای دوره پایه (baseline) و متوسط پیش‌نگری‌های هفت مدل انتخابی GCM تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره D1 (۲۰۴۵-۲۰۶۵) و دوره D2 (۲۰۸۰-۲۱۰۰).

متفاوت خواهد بود و احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی نسبت به رقم زودرس به چندین برابر افزایش خواهد یافت (شکل ۶- c). از آنجا که تاریخ وقوع مرحله گل‌دهی در رقم دیررس نسبت به رقم زودرس به ماه‌های گرم و کم‌بارش در پایانی بهار منتقل شده در نتیجه گیاه در معرض دماهای بالاتر و ماه‌های خشک‌تر قرار می‌گیرد و در پی آن احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی افزایش می‌یابد. اما آنچه که قابل توجه است کاهش خطر احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی برای رقم

یکی از شرایط نامطلوب که می‌تواند اثرات جبران ناپذیری بر محصول گذاشته و سبب کاهش عملکرد محصول شود، وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی است (Shokouhi and Sanaei nejad, 2014). نتایج نشان داد احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی در دوره پایه برای رقم زودرس در تمام مناطق ناچیز و تقریباً نزدیک به صفر است اما این احتمال در آینده اندکی افزایش خواهد داشت به طوری که در ۹۰٪ مناطق به کمتر از ۰/۰۲ خواهد رسید (شکل ۶- c باکس‌های سبزرنگ). اما این وضعیت برای رقم دیررس بسیار

باکس‌های قرمز رنگ). این کاهش متناسب با کاهش تنش رطوبتی برای سناریوهای مختلف است که پیش‌تر نیز بیان شد و در اینجا نیز کاملاً مشهود است (شکل ۶- c باکس‌های قرمز رنگ). به طوری که کمترین احتمال وقوع همزمانی تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی مربوط به RCP8.5-D2-La است (شکل ۶- c باکس‌های قرمز رنگ).

دیررس در دهه‌های آتی نسبت به دوره پایه است (شکل ۶- c باکس‌های قرمز رنگ). همانطور که پیش‌تر نیز بیان شد به دلیل کمتر شدن تنش رطوبتی و کاهش طول دوره رشد (اتمام دوره رشد در ماه‌های خنک‌تر و پر بارش‌تر اولیه بهار) در تمام سناریوها، احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی در دهه‌های آتی نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد (شکل ۶- c).



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای احتمال وقوع، (a) حداقل یک پدیده نامطلوب و (b) حداقل دو پدیده نامطلوب طی دوره رشد و (c) احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی. برای مناطق مورد مطالعه در دوره پایه (baseline) و متوسط پیش‌نگری‌های هفت مدل انتخابی GCM تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP2.6 در دوره D1 (۲۰۴۵-۲۰۶۵) و دوره D2 (۲۱۰۰-۲۰۸۰) برای ارقام زودرس (Ea.) و دیررس (La.).

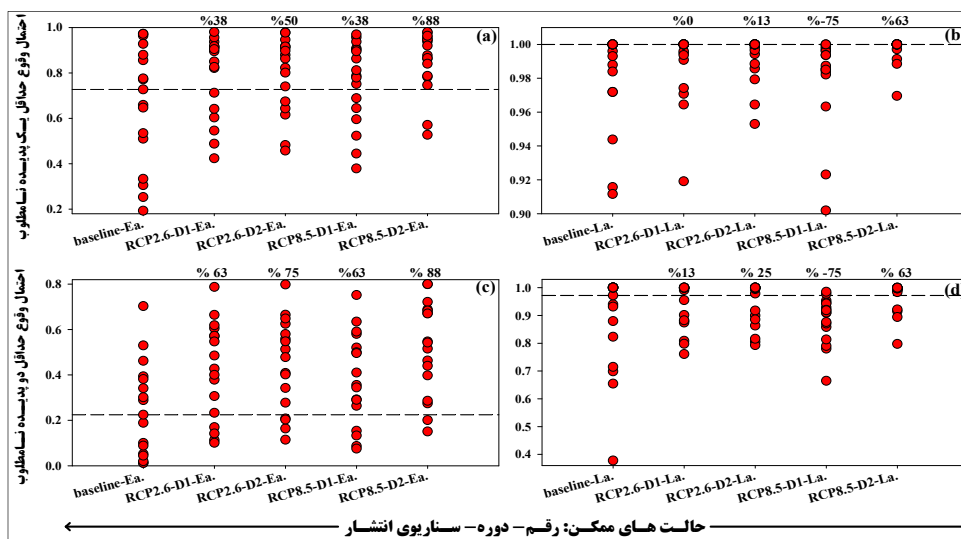
میانه‌ی احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب برای کل منطقه (برای کل ایستگاه‌ها) در دوره پایه به عنوان یک معیار کلی برای سنجش این احتمال‌ها در کل منطقه انتخاب شد (شکل ۷ خطوط منقطع در هر نمودار). حال چنانچه برای هر ایستگاه (شکل ۷ دایره‌ها) مقدار احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب در دهه‌های آتی از مقدار معیار تعریف شده (خطوط منقطع در هر نمودار شکل ۷) بیشتر (کمتر) شود به معنای افزایش (کاهش) مناطق در معرض خطر خواهد بود. این تغییرات (افزایش یا کاهش) مناطق در معرض خطر نسبت به دوره پایه با

اعدادی حسب درصد بالای هر نمودار و برای هر حالت (رقم-دوره زمانی-سناریو) مشخص شده است (شکل ۷). می‌توان گفت مناطقی که با خطر وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب طی دوره رشد تهدید می‌شوند، برای رقم زودرس از ۳۸٪ برای حالت RCP2.6-D1.Ea تا ۸۸٪ برای حالت RCP8.5-D2-Ea نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد (شکل ۷- a). در مقابل برای رقم دیررس در دهه‌های آتی مناطقی که با خطر وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب طی دوره رشد تهدید می‌شوند تنها برای حالت RCP2.6-D2-La و RCP8.5-D2-La به ترتیب ۶۳ و ۱۳ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد (شکل ۷- b). مناطقی که با خطر وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب طی دوره رشد مواجه خواهند بود، در تمام حالات و حداکثر تا ۸۸٪ برای حالت RCP8.5-

D2-Ea نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد (شکل ۷- c). همچنین برای رقم دیررس به جز حالت RCP8.5-D1-La مناطقی که با خطر وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب طی دوره رشد مواجه خواهند بود، نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد (شکل ۷- d). از مقایسه نظیر به نظیر هر حالت (رقم-دوره زمانی-سناریو) در نمودار شکل (۷- a) با نمودار شکل (۷- c) برای رقم زودرس مشخص است که در دهه‌های آتی مناطقی که با خطر وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب مواجه خواهند بود نسبت به مناطقی که با خطر وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب مواجه هستند در کل افزایش بیشتری نسبت به دوره پایه خواهند داشت. این به معنی بیشتر بودن احتمال وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب نسبت به احتمال وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب در دهه‌های آتی نیست بلکه به این مفهوم است که در مقایسه با دوره پایه میزان افزایش مناطقی که با خطر وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب مواجه خواهند بود نسبت به مناطقی که با خطر وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب مواجه هستند، رشد بیشتری خواهند داشت (شکل ۷- a و c). همین الگو برای مقایسه نمودار شکل (۷- b) با نمودار شکل (۷- d) برای رقم دیررس نیز تکرار می‌شود. در هر نمودار شکل (۷) مشخص است که تغییرات نسبی مناطق در معرض خطر برای هر سناریوی RCP در دوره D2 نسبت به D1 افزایش می‌یابد. به طور مثال در نمودار شکل (۷- a) برای سناریوی RCP8.5 در دوره

معرض خطر را خواهد داشت. می‌توان نتیجه گرفت افزایش اندکی غلظت دی‌اکسیدکربن و دمای هوا (تحت سناریوی RCP8.5 در میانه‌های قرن) در مناطق مورد مطالعه که اکثراً سردسیر هستند می‌تواند مفید واقع گردند و خطر وقوع برخی پدیده‌های نامطلوب را برای رقم دیررس کاهش دهند. اما روند این افزایش تحت سناریوی RCP8.5 در پایان قرن می‌تواند به ضرر گیاه بوده و مناطق بیشتری را در معرض خطر وقوع پدیده‌های نامطلوب قرار دهد.

D1، مقدار افزایش مناطق در معرض خطر نسبت به دوره پایه ۳۸٪ است این در حالی است که در دوره D2 به ۸۸٪ خواهد رسید. این نشان می‌دهد هر چه به پایان قرن حاضر نزدیک شویم مناطق بیشتری در معرض خطر وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب قرار خواهند گرفت. در شکل (b و d) مشخص است که برای رقم دیررس تحت سناریوی RCP8.5 در دوره D1، مناطق در معرض خطر نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد اما تحت همین سناریو در دوره D2 بیشترین درصد افزایش مناطق در



شکل ۷- احتمال وقوع حداقل یک (a) رقم زودرس (Ea)، (b) رقم دیررس (La) و احتمال وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب طی دوره رشد (c) رقم زودرس (Ea) و (d) رقم دیررس (La)، برای هر ایستگاه (دایره‌های قرمز رنگ). در دوره پایه (baseline) و برای متوسط پیش‌نگری‌های هفت مدل انتخابی GCM تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره D1 و دوره D2، خط منقطع در هر نمودار نشان دهنده میانه وقوع احتمال در دوره پایه برای کل ایستگاه‌ها است. اعداد مشخص شده در بالای هر نمودار نشان دهنده تغییرات نسبی تعداد ایستگاه‌هایی است که در آینده احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب در آنها نسبت به مقدار میانه در دوره پایه افزایش می‌یابد.

پدیده‌های نامطلوب طی دوره رشد استفاده شد تا اثر این پدیده‌های نامطلوب بر کاهش عملکرد لحاظ شود. سعی شد تا شاخص‌های اقلیمی-کشاورزی تعریف شده در ۴ دسته (تعیین کننده اثر دمای حداقل، دمای حداکثر، شرایط رطوبتی و شرایط نامطلوب در زمان کاشت و برداشت) تا جای ممکن مهمترین عوامل موثر بر عملکرد محصول را در بر گیرند. در حالی که در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصول با استفاده از مدل‌های زراعی و روش‌های آماری اثر مخرب چنین پدیده‌های نامطلوبی کمتر لحاظ می‌شود. همچنین در این مطالعه یکی از مهمترین عوامل موثر در کاهش عملکرد محصول یعنی همزمانی وقوع تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله گل‌دهی نیز ارزیابی شد که اکثراً در مطالعات دیگر تنها اثر تنش حرارتی یا رطوبتی به صورت مجزا در نظر گرفته شده و احتمال وقوع همزمان تنش حرارتی و رطوبتی در مرحله

## نتیجه‌گیری

پیش‌نگری مدل‌های GCM نشان داد دمای متوسط دوره رشد در پایان قرن حاضر تا  $3/1^{\circ}\text{C}$  تحت سناریوی RCP8.5 افزایش می‌یابد در حالی که با وجود عدم قطعیت قابل توجه در پیش‌نگری بارش، می‌توان گفت مناطق شمالی‌تر شاهد افزایش و مناطق جنوبی‌تر کم و بیش بدون تغییر یا با کاهش مجموع بارش طی دوره رشد روبه‌رو خواهند بود. نتایج نشان داد برای 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. در این مطالعه اثر تغییر اقلیم بر خطرپذیری مناطق تولید عمده گندم دیم از لحاظ قرارگیری در معرض خطر وقوع پدیده‌های نامطلوب بررسی شد. از رهیافت شاخص‌های اقلیمی-کشاورزی روزانه برای تعریف

تولید گندم دیم در ایران بالقوه دارای خطر بالای از وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب هستند و این خطر انتظار می‌رود در آینده بیشتر هم شود. با توجه به افزایش مناطق در معرض خطر وقوع پدیده‌های نامطلوب در دهه‌های آتی انتظار می‌رود با شناخت نوع پدیده‌های نامطلوب و برآورد خطر وقوع آنها در هر منطقه راه کارهای سازگاری با تغییر اقلیم مثل توسعه رقم‌های مناسب با هر منطقه اتخاذ شود تا همزمانی وقوع پدیده‌های نامطلوب با مراحل حساس رشد و نموی محصول تا حد ممکن کاهش یابد.

گل‌دهی در آنها ارزیابی نشده است. نتایج نشان داد میزان افزایش مناطقی که با خطر وقوع حداقل دو پدیده نامطلوب مواجه خواهند بود نسبت به مناطقی که با خطر وقوع حداقل یک پدیده نامطلوب مواجه هستند، رشد بیشتری خواهند داشت و علاوه بر این احتمال وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب برای تمام سناریوها نیز افزایش می‌یابد. میزان افزایش مناطق در معرض خطر نسبت به دوره پایه بسته به نوع سناریوی RCP، دوره و رقم مورد بررسی از ۰ تا ۸۸ درصد تغییر می‌کند. هر چه به پایان قرن حاضر نزدیک شویم مناطق بیشتری در معرض خطر وقوع حداقل یک و دو پدیده نامطلوب قرار خواهند گرفت. می‌توان گفت مناطق عمده

## REFERENCES

- Ahmadi, K., Gholizadeh, H., Abedzadeh, H. R., Hossein Pour, R., Abdshah, H., Kazimian, A., and Maryam, R. (2017). *Agricultural Statistics of 1394-95* (Volume I). Ministry of Agriculture, Department of Planning and Economic Center for Information and Communication Technology. (In Farsi).
- 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* (Vol. 734, 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(97), e156.
- Altinsoy, H., Kurt, C., and Kurnaz, M. L. (2013). Analysis of the Effect of Climate Change on the Yield of Crops in Turkey Using a Statistical Approach. In C. G. Helmis and P. T. Nastos (Eds.), *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics SE - 53* (pp. 379–384). Springer Berlin Heidelberg.
- 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(0), 32–46.
- Baker, R.J. (1996). Oslo and Biggar spring wheats respond differently to controlled temperature and moisture stress. *Canadian journal of plant science* 76(3), 413–416.
- 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(2), 131–149. (In Farsi).
- 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(2), 24041.
- Hansen, J. W., and Jones, J. W. (2000). Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agricultural Systems*, 65(1), 43–72.
- Kruijt, B., Witte, J.-P. M., Jacobs, C. M. J., and Kroon, T. (2008). Effects of rising atmospheric CO<sub>2</sub> on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 257–267.
- Lobell, D. B., and Asseng, S. (2017). Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models. *Environmental Research Letters*, 12(1), 15001.
- Luo, Q., Trethowan, R., Tan, D.K.Y. (2018). Managing the risk of extreme climate events in Australian major wheat production systems. *International journal of biometeorology*, 62(9), 1685–1694.
- Misra, A. K. (2014). Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 153–165.
- Moss, R. H., Edmonds, J. a, Hibbard, K. a, Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., ... Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756.
- Olesen, J. E., Børgesen, C. D., Elsgaard, L., Palosuo, T., Rötter, R. P., Skjelvåg, a O., ... van der Fels-Klerx, H. J. (2012). Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. *Food Additives and Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 29(10), 1527–1542.
- Plaut, Z., Butow, B.J., Blumenthal, C.S., Wrigley, C.W. (2004). Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature. *Field Crops Research*, 86(2), 185–198.
- Priya, S., and Shibasaki, R. (2001). National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modelling*, 136(2–3), 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(2), 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(4), 443–460. (In Farsi).
- Rahmstorf, S., and Coumou, D. (2011). Increase of extreme events in a warming world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(44), 17905–17909.
- Rotter, R. P., Carter, T. R., Olesen, J. E., and Porter, J. R. (2011). Crop-climate models need an overhaul. *Nature Clim. Change*, 1(4), 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(3), 67–79. (In Farsi).
- Shokouhi, M., and Sanaei nejad, S. (2014). Determination of Weather Conditions Associated With the Production of Rainfed Barley Crop (Case Study: East Azerbaijan). *Journal of Agroecology*, 6(3), 634–644. (In Farsi).
- Shokouhi, M., Sanaei Nejad, S., 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(5), 1013-1027. (In Farsi).
- Slafer, G.A., Rawson, H.M. (1994). Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Functional Plant Biology*, 21(4), 393–426.
- 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(4), 485–498.
- Trnka, M., Hlavinka, P., and Semenov, M. A. (2015). Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(112), 20150721.
- 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(7), 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(12), 4237–4255.
- Wang, J., Huang, J., and Yan, T. (2013). Impacts of Climate Change on Water and Agricultural Production in Ten Large River Basins in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(7), 1267–1278
- 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(35), 97–110. (In Farsi).