

تأثیر تغییر اقلیم بر تولید سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در منطقه فریدون‌شهر اصفهان

I- رشد و نمو

ظهرا ب ادای^{1*} و محمود رضا تدین²

تاریخ دریافت: 1394/11/23

تاریخ پذیرش: 1395/04/27

ادای، ظ، و تدین، م. 1396. تأثیر تغییر اقلیم بر تولید سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در منطقه فریدون‌شهر اصفهان I- رشد و نمو. بوم‌شناسی کشاورزی، 9(4): 1117-1135.

چکیده

هدف از این مطالعه شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیکی، شاخص سطح برگ، عملکرد زیست‌توده و غده سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در شرایط تغییر اقلیم آینده منطقه فریدون‌شهر اصفهان بود. برای این منظور پیش‌بینی دو مدل گردش عمومی HadCM3 و IPCM4 تحت سه سناریوی A1B، B1 و A2 در سال‌های 2030، 2060 و 2090 به کار گرفته شد. برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی از مدل LARS-WG و برای شبیه‌سازی مراحل رشد سیب‌زمینی از مدل SUBSTOR-Potato و نرم‌افزار DSSAT استفاده گردید. نتایج ارزیابی مدل SUBSTOR-potato نشان داد مدل برآورد مناسبی ($RMSE \leq 10$) برای پیش‌بینی صفات عملکرد غده، حداکثر شاخص سطح برگ، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک گیاه سیب‌زمینی در شرایط آب و هوایی فریدون‌شهر دارا می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در تمام سناریوهای مورد بررسی، رشد و نمو سیب‌زمینی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم در آینده قرار خواهد گرفت و عملکرد آن نسبت به سال مبنا کاهش خواهد یافت. به طوری که بیشترین کاهش عملکرد غده در سناریوی A2 و در سال 2090 برای هر دو مدل گردش عمومی HadCM3 و IPCM4 شبیه‌سازی شد. میزان کاهش عملکرد غده در سناریوی B1 نسبت به دو سناریوی دیگر کمتر بود. گیاه سیب‌زمینی در سناریوی A2 در مقایسه با دو سناریوی دیگر از شاخص سطح برگ کمتری برخوردار بود. همچنین طول مرحله کاشت تا گلدهی و مدت زمان رسیدگی سیب‌زمینی در منطقه فریدون‌شهر در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به شرایط فعلی کاهش خواهد یافت که دلیل اصلی این کاهش، افزایش درجه حرارت (بسته به سناریوهای مختلف بین 1/1 تا 5/4 درجه سانتی-گراد) و در نتیجه افزایش سرعت رشد گیاه در شرایط تغییر اقلیم آینده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سناریوهای انتشار، شبیه‌سازی عملکرد، مدل LARS-WG، مراحل فنولوژیکی

مقدمه

تغییر اقلیم آینده با تأثیر بر خصوصیات فیزیولوژیکی و فنولوژیکی گیاهان، رشد و نمو گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و در نهایت مقدار عملکرد گیاهان را نسبت به شرایط کنونی تغییر خواهد داد. مرا و همکاران (Mera et al., 2006) تأیید کردند که در شرایط تغییر اقلیم در آینده، افزایش درجه حرارت بیشترین تأثیر را بر مرحله گلدهی گیاهان گذاشته و با کاهش درصد و دوره تلقیح گل، منجر به کاهش عملکرد گیاهان می‌شود. ایشان همچنین اشاره کردند که افزایش دو درجه دما باعث کاهش دوره گلدهی در گیاه ذرت (*Zea mays* L.) از 10 به 8 روز شده که تأثیر به‌سزایی در کاهش تشکیل تعداد دانه و

در سال‌های اخیر تغییرات قابل توجهی در دما و بارندگی در بعد جهانی و منطقه‌ای، از لحاظ مقدار و زمان وقوع به‌عنوان تغییر اقلیم اتفاق افتاده است که به‌تبع آن اثرات مختلفی بر نهاده‌ها و تولیدات کشاورزی گذاشته است (Wolf et al., 2010). افزایش دما در شرایط

1 و 2- به ترتیب استادیار، گروه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور و دانشیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(* - نویسنده مسئول: (Email: Z_adavi@pnu.ac.ir
DOI:10.22067/JAG.V9I4.53529

احتمالی اقلیمی در این مناطق اثرات قابل ملاحظه‌ای بر سیستم‌های تولید کشاورزی به همراه داشته باشد (Fischer et al., 1994). با این حال، علی‌رغم این‌که اغلب مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان در کشورهای در حال توسعه واقع شده‌اند، تحقیقات و پژوهش‌های علمی مربوط به اثرات تغییر اقلیم در این مناطق بسیار محدود می‌باشد.

سیب زمینی بعد از گندم (*Triticum aestivum* L.)، برنج (*Oryza sativa* L.) و ذرت، بیشترین سهم را در میزان تولید محصولات غذایی دارد و نقش مهمی در تغذیه و سبد غذایی جمعیت جهان دارد (Fabeiro et al., 2001) و در ایران بعد از گندم رتبه دوم را به خود اختصاص داده است (Sadr Gaen et al., 2011). متوسط سرانه سیب زمینی در ایران، بیش از 50 کیلوگرم در سال است و مصرف آن روز به روز در حال افزایش است و با توجه به روند افزایش جمعیت، نیاز به تولید بیشتر این محصول با در نظر گرفتن شرایط کشور اجتناب ناپذیر است (Afzali Nya, 2006). مجموع سطح زیر کشت سیب زمینی در سال زراعی 1392-1393 در استان اصفهان حدود 17600 هکتار گزارش شده است و تقریباً 440 هزار تن از تولید سیب زمینی کشور را شامل می‌شود (Adavi, 2014) و منطقه فریدون شهر با سطح زیر کشت بیش از 2000 هکتار و میانگین عملکرد غده 22 تن در هکتار، یکی از مهم‌ترین مناطق مستعد کشت سیب زمینی در کشور می‌باشد (Adavi, 2014). هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات رشد، فنولوژی و عملکرد غده سیب زمینی تحت تأثیر شرایط اقلیمی آینده برای منطقه فریدون شهر به‌عنوان قطب تولید سیب زمینی در استان اصفهان بود.

مواد و روش‌ها

مدل اقلیمی

برای بررسی شرایط اقلیمی آینده در منطقه فریدون شهر از پیش بینی دو مدل گردش عمومی $HadCM3^2$ (Mitchel et al., 1995) و $IPCM4^3$ (Stratonovitch & Semenov, 2010) بر اساس سه سناریوی SRES-A1B و SRES-B1، SRES-A2 (Olesen et al., 2011) در سه دوره زمانی 2015 میلادی تا 2045 میلادی (2030 میلادی)، 2046 میلادی تا 2075 میلادی (2060 میلادی) و 2076

عملکرد ذرت داشته است. در مطالعه هولدن و همکاران (Holden et al., 2003) نیز بر اساس پیش‌بینی مدل گردش عمومی $HadCM3$ و با فرض سناریوی تغییر اقلیم بر مبنای افزایش 1/6 درجه‌سانتی‌گراد اثر تغییرات اقلیمی بر عملکرد غده سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) برای دوره زمانی 2055 و 2075 شبیه‌سازی، کاهش عملکرد سیب‌زمینی تحت شرایط تغییر اقلیم آینده را گزارش نمودند.

با وجودی که در سال‌های اخیر، آزمایش‌های انجام شده در محیط‌های کنترل شده اطلاعات زیادی را در مورد تأثیر افزایش درجه حرارت و یا غلظت دی‌اکسیدکربن بر فرایندهای رشد و نمو گیاهان فراهم کرده است، ولی این نوع مطالعات بسیار پرهزینه بوده و اجرای آن‌ها به وجود ابزار دقیق وابسته است (Koocheki et al., 2002).

توسعه روش‌های مدل‌سازی جایگزینی مناسب و کم‌هزینه برای این نوع مطالعات است که در حال حاضر مورد توجه محققین قرار گرفته است. مدل‌های گردش عمومی¹ ابزاری مفید برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده بوده و داده‌های لازم برای اجرای مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو محصولات زراعی فراهم می‌سازند (Jones et al., 2003).

با این حال، استفاده از این مدل‌ها تنها راه‌حل موجود جهت مطالعه اثرات تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای و جهانی می‌باشد (Krishnan et al., 2007). رشد و نمو گیاهان زراعی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی می‌تواند به‌وسیله مدل‌هایی چون WOFOST، DSSAT، APSIM، SUCROS و غیره مورد ارزیابی قرار گیرد (Reidsma et al., 2010). در این مدل‌ها نه تنها از تعداد زیادی پارامتر (برای گیاه و خاک) و توابع شبیه‌سازی استفاده شده است، بلکه روابط و مکانیزم‌های پیچیده به کار برده شده در این مدل‌ها برای کمی‌سازی رشد و نمو، چگونگی تفسیر خروجی آن‌ها را در برخی از موارد با مشکل مواجه ساخته است (Goudriaan & Van Laar, 1994).

دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر در مورد پدیده تغییر اقلیم در ایران، مستلزم انجام مطالعات گسترده در مقیاس منطقه‌ای و پیش‌بینی واکنش سیستم‌های تولید کشاورزی هر منطقه به این تغییرات می‌باشد (Rahmani et al., 2016). اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که کشور ما نیز در گروه آن‌ها قرار دارد، به دلیل ساختار اکولوژیکی خاص خود، بیش از سایر اقلیم‌ها نسبت به تغییرات محیطی حساس بوده و آسیب‌پذیری بیشتری دارند. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که وقوع تغییرات

2- United Kingdom Met Office Hadley Center

3- Institute Pierre Simon Laplace

1- General circulation model

بر اساس ضرایب ژنتیکی¹ که به عنوان یکی از ورودی‌های مدل می‌باشد، تنظیم می‌شوند (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2010).

واسنجی² و اعتبارسنجی³ مدل رشد سیب زمینی

مدل SUBSTOR-Potato با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایشی دو ساله که در سال زراعی 1391-1392 و 1392-1393 در ناحیه فریدون شهر واقع در استان اصفهان به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شده بود، واسنجی و تعیین اعتبار شد. در این آزمایش فاکتور اصلی شامل تاریخ کاشت در سه سطح (15 اردیبهشت، آخرداد و 15 خرداد) در کرت‌های اصلی و فاکتور فرعی شامل ارقام سیب زمینی در سه سطح (آریندا، سانت و آگریا، که به ترتیب زودرس، میان‌رس و دیررس می‌باشند) در کرت‌های فرعی بودند. عملیات کاشت، داشت و برداشت در دو سال آزمایش به صورت مشابه انجام گرفت. برای واسنجی مدل از داده‌های سال اول و برای اعتبارسنجی مدل از داده‌های سال دوم آزمایش استفاده شد. برای اجرای آزمایش هر کرت آزمایش شامل شش خط کاشت، به طول پنج متر، فاصله بین ردیف‌ها 75 سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف 25 سانتی‌متر (تراکم بوته 5/33 در مترمربع) در نظر گرفته شد. برای کاشت ارقام سیب زمینی از غده‌های بذری کلاس E به قطر 35 تا 55 میلی‌متر استفاده شد. میزان کود مصرفی نیز بر اساس آنالیز خاک محل آزمایش و توصیه آزمایشگاه مقدار 350 کیلوگرم اوره در هکتار و 100 کیلوگرم سوپر فسفات تریپل به خاک اضافه گردید. نیمی از کود مصرفی در زمان کاشت و نیم دیگر در دوره گلدهی به خاک اضافه گردید. اولین آبیاری پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی هر هفت روز یک‌بار و به صورت بارانی صورت گرفت. برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ از دستگاه Leaf Area Meter مدل Licor استفاده شد. حجم آب مصرفی برای ارقام آریندا، سانت و آگریا با توجه به طول دوره رشد هر رقم زودرس، میان‌رس و دیررس به ترتیب حدود 12، 14 و 16 هزار مترمکعب در هکتار بود. در طول فصل رشد، وجین علف هرز در سه نوبت با دست انجام گرفت.

میلادی تا 2105 میلادی (2090 میلادی) استفاده شد. دوره مینا در این تحقیق از سال 1988 میلادی تا 2012 میلادی (سال 2012 میلادی) در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است در هر دوره زمانی، داده‌های اقلیمی یک سال نمونه که برای هر دوره در داخل پارانتز نشان داده شده است، استفاده گردید. همچنین برای تهیه پارامترهای اقلیمی به صورت روزانه از مدل LARS-WG استفاده شد. شبیه‌سازی شرایط اقلیمی و تعیین اعتبار و نتایج آن در مطالعه ادووی (Adavi, 2014) گزارش شده است.

مدل گیاهی مورد استفاده

به منظور شبیه‌سازی پارامترهای مختلف رشد و نمو سیب زمینی، از مدل SUBSTOR-Potato که یکی از 16 مدل تعبیه شده در نرم‌افزار DSSAT می‌باشد، استفاده گردید (Jones et al., 2003). مدل‌های موجود در DSSAT مدل‌های پیش‌بینی دینامیک هستند و بر اساس فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه طراحی شده‌اند. این مدل‌ها در محدوده‌ای از شرایط آب و هوایی، خاک، و شرایط مختلف مدیریتی قابل اجرا می‌باشند (Goudriaan & Van Laar, 1994). در این تحقیق از نسخه 4/5 نرم‌افزار DSSAT استفاده شده است. مدل SUBSTOR-Potato برای شبیه‌سازی اثر رقم، تراکم کاشت، آب و هوا، رطوبت خاک و نیتروژن بر رشد، نمو و عملکرد محصول در شرایط پتانسیل و محدودیت آب و عناصر غذایی طراحی شده است. این مدل یک مدل مکانیستیکی می‌باشد که بر اساس استانداردهای FORTRAN77 طراحی و به سهولت در هر کامپیوتری قابل اجرا است (Hodges & Ritchie, 1991). ورودی‌های این مدل شامل عملیات مدیریتی در مزرعه (اختلافات ارقام، نوع و خصوصیات خاک و اطلاعات آب و هوایی) پارامترهای مدیریتی (تاریخ کاشت، تراکم، عمق کاشت، فواصل بوته، رطوبت و حاصلخیزی خاک) و جزئیات برداشت می‌باشد. پارامترهای مورد نیاز برای رقم نیز شامل تعداد برگ، شاخه جانبی و مراحل فنولوژیکی می‌باشد.

پارامترهای تابش خورشیدی، حداقل و حداکثر دمای روزانه، سرعت باد و بارندگی روزانه برای شرایط اقلیمی و همچنین وزن مخصوص ظاهری خاک، درصد رس، شن و ماسه خاک، میزان عناصر خاک، ظرفیت مزرع‌های، نقطه پژمردگی و میزان رطوبت خاک برای داده‌های خاک مورد نیاز است. در این مدل ارقام مختلف سیب زمینی دارای واکنش‌های متفاوتی به تغییرات فاکتورهای محیطی هستند و

1- Genetic Coefficients
2- Calibration
3- Validation

TC نیاز به آزمایشات جداگانه و گسترده‌ای بود و داده‌های پیش فرض سایر ارقام نیز نتیجه مطلوبی نداشتند و خطای زیادی ایجاد می‌کرد، بنابراین برای محاسبه این دو ضریب از یک رقمی که ضرایب آن به- دست آمده و در نرم‌افزار وجود داشت استفاده گردید و ضرایب رقم مذکور با تغییرات جزئی مورد استفاده قرار گرفت. نظر به این‌که در بخش واسنجی مدل هدف تغییر ضرایب مدل و به حداقل رساندن خطای شبیه‌سازی می‌باشد، بنابراین تغییرات دو ضریب مذکور را تا جایی ادامه دادیم تا کمترین خطا بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای صفات مورد مطالعه به‌دست آید. ضرایب ژنتیکی مورد استفاده برای ارقام مختلف مورد استفاده در مدل در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- ضرایب ژنتیکی ارقام مختلف مورد استفاده سبب‌زمینی در مدل رشد سبب زمینی
Table 1- Genetic coefficients of used potato varieties in the potato growth model

ارقام Varieties	P ₂	TC	G ₂	G ₃
آگریا Agria	0.4	18	1550	20
سانته Santeh	0.4	19	1600	22
آریندا Arinda	0.3	20	1800	25

P₂, TC, G₂ و G₃ به ترتیب شروع غده‌دهی با فتوپریود (بدون واحد)، شروع غده‌دهی با دما (درجه سانتی‌گراد)، سرعت نمو سطح برگ (سانتی‌متر مربع بر متر مربع در روز) و سرعت رشد غده (گرم بر متر مربع در روز)

P₂, TC, G₂ and G₃: tuber initiation sensitivity to long photoperiods (no unit), critical temperature for tuber initiation (°C), leaf area expansion rate (cm².m⁻².d) and tuber growth rate (g.m⁻².d), respectively.

مربعات خطا، جذر میانگین مربعات انحراف‌ها، کارایی مدل، خط 1:1 و رگرسیون خطی برای مقایسه نتایج مدل با واقعیت استفاده شد، که از روابط زیر محاسبه شدند (Nash & Sutcliffe, 1970; Loague & Green):

$$\text{RMSE-N (\%)} = \frac{100}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (1) \text{ معادله}$$

$$\text{RMD} = \frac{100}{\bar{O}} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - O_i}{n} \quad (2) \text{ معادله}$$

$$\text{ME} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3) \text{ معادله}$$

P_i: مقادیر پیش‌بینی شده،

O_i: مقادیر اندازه‌گیری شده،

n: تعداد مشاهدات،

\bar{O} : میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده.

شاخص RMSE-N (%) میانگین فاصله مقادیر پیش‌بینی شده از

مقادیر واقعی را به صورت درصد نشان داده، در صورتی که RMD

به منظور واسنجی مدل ضرایب ژنتیکی G₂ و G₃ که به ترتیب سرعت نمو سطح برگ (سانتی‌متر مربع بر متر مربع در روز) و سرعت رشد غده (گرم بر متر مربع در روز) می‌باشند، با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای سال اول آزمایش محاسبه و اصلاح شدند. سایر ضرایب ژنتیکی ارقام سبب زمینی که شامل P₂ و TC به ترتیب شروع غده-دهی با فتوپریود (بدون واحد)، شروع غده‌دهی با دما (درجه سانتی-گراد) بودند، با تغییر مقادیر این ضرایب به صورتی که صفات مورد اندازه‌گیری عملکرد دانه، بیشترین مقدار شاخص سطح برگ، کاشت تا گلدهی (روز) و کاشت تا رسیدگی (روز) با مقادیر شبیه‌سازی شده این صفات توسط مدل کمترین اختلاف را داشته باشند، برآورد گردید. به-عبارت دیگر، با توجه به این‌که برای به‌دست آوردن دو ضریب P₂ و

تعیین اعتبار مدل گیاهی

در مدل‌های شبیه‌سازی فرآیندهای رشد، در گیاهان زراعی مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی)، مرحله مهمی قبل از به‌کارگیری مدل در انجام مطالعات شبیه‌سازی است (Hoogenboom & Jones, 2010). در اکثر تحقیقات از روش‌ها و شاخص‌های گوناگونی برای واسنجی و تعیین اعتبار مدل‌ها استفاده شده است که می‌توان به جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده¹ (RMSE-N)، جذر میانگین مربعات انحراف‌ها² (RMSD)، رگرسیون خطی و ضریب تبیین (R²)، کارایی مدل³ (ME)، خط 1:1 و غیره اشاره کرد. در این تحقیق از جذر میانگین

1- Root mean squared error

2- Root mean squared deviation

3- Model efficiency

نشان داد که میزان عملکرد غده، حداکثر شاخص سطح برگ، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی به ترتیب با اختلاف $\pm 3/53$ ، $\pm 4/99$ و $\pm 3/87$ درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط مدل، شبیه‌سازی شد (جدول 2). نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل SUBSTOR-potato صفت روز تا برداشت را با دقت بیشتری و عملکرد غده را با دقت کمتری نسبت به سایر صفات شبیه‌سازی نموده است، با این وجود، مقادیر شاخص RMSE نرمال شده برای تمام صفات کمتر از 10 درصد محاسبه شد که بیانگر دقت و اطمینان مدل در شبیه‌سازی رشد و نمو گیاه سیب زمینی است (جدول 2). با توجه به مقادیر پایین ME و RMD می‌توان بیان کرد که مدل تمام صفات مورد مطالعه را با دقت بالایی شبیه‌سازی نموده است. (جدول 2). با توجه به شاخص ME می‌توان به کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی صفت روز تا رسیدگی در مقایسه با سایر صفات اشاره نمود. در مطالعه یوری (Yauri, 1997) و استاستنا و همکاران (Stastna et al., 2010) نیز به کارایی بالای مدل SUBSTOR-potato را در شبیه‌سازی رشد سیب زمینی به ترتیب برای شرایط آب و هوایی کشور پرو و چک اسلواکی بیان داشتند.

میزان انحراف سیستماتیک مدل را نشان می‌دهد (Brisson et al., 2002). ME کارایی مدل را در رابطه با میانگین مشاهدات بیان می‌کند (Bannayan & Hoogenboom, 2008). مقدار مطلوب برای شاخص ME برابر یک می‌باشد و مقادیر منفی نشان‌دهنده انحراف زیاد در نتایج پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر مشاهده شده را نشان می‌دهد. هرچه مقادیر RMSE-N (%) و RMD به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل می‌باشد. رگرسیون خطی نیز میزان همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده را نشان داده و بیانگر دقت مدل است.

نتایج و بحث

تعیین اعتبار مدل SUBSTOR-potato

نتایج ارزیابی مدل SUBSTOR-potato براساس شاخص‌های آماری نشان داد که این مدل برآورد مناسبی برای پیش‌بینی صفات عملکرد غده، حداکثر شاخص سطح برگ، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی گیاه سیب زمینی در شرایط آب و هوایی فریدون شهر دارد (جدول 2). مقادیر محاسبه شده بر اساس شاخص RMSE-N (%)

جدول 2- تعیین اعتبار مدل در شبیه‌سازی صفات مورد بررسی در سبب زمینی بر اساس شاخص‌های آماری RMSE-N، ME و RMD
Table 2- Validation of the model for simulation of the studied traits in potato based on statistical indexes as RMSE-N, ME and RMD

صفات Traits	مقادیر اندازه‌گیری شده Measured	مقادیر شبیه‌سازی شده Simulated	RMSE-N (%)	ME	RMD
عملکرد غده (تن در هکتار) Tuber yield (t.ha ⁻¹)	31.55	32.07	4.99	0.828	0.514
حداکثر شاخص سطح برگ (مترمربع) Max LAI (m ²)	4.56	4.69	3.53	0.447	2.653
روز تا گلدهی (روز) Days to anthesis (day)	58.44	57.89	3.87	0.875	0.00
روز تا رسیدگی (روز) Days to maturity (day)	120.22	121.04	2.24	0.958	0.092

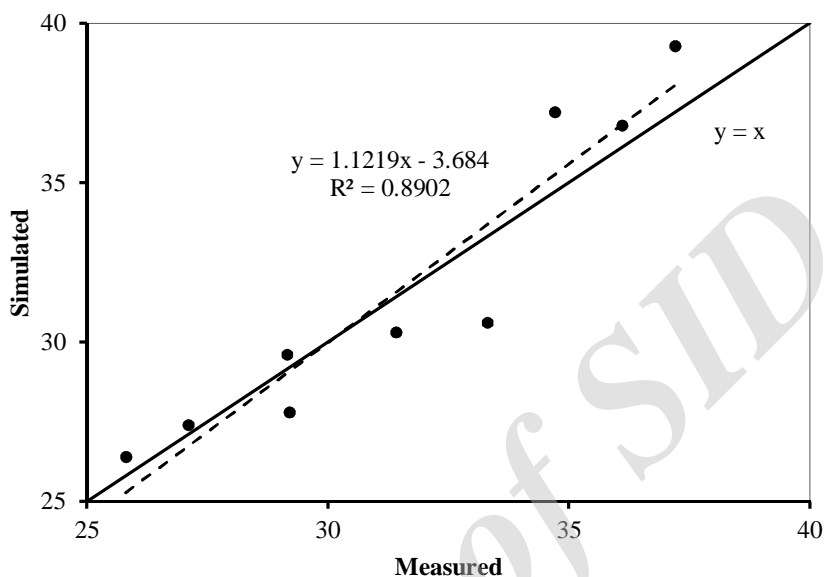
مدل مقدار این صفت را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برای آن شبیه‌سازی می‌نماید¹ (شکل 2). بنابراین مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ از مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر خواهد بود با توجه به ضریب تبیین بالا در تمام صفات مورد ارزیابی ($R^2 \geq 0/85$)، می‌توان

مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده صفات براساس خط 1:1 نیز نشان داد که مدل حداکثر شاخص سطح برگ را بیشتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی نموده، به طوری که تمام نقاط مربوط به حداکثر شاخص سطح برگ در بالای خط 1:1 قرار گرفتند، به عبارتی قرار گرفتن نقاط در بالای خط 1:1 بیانگر این موضوع می‌باشد که

1- Overestimate

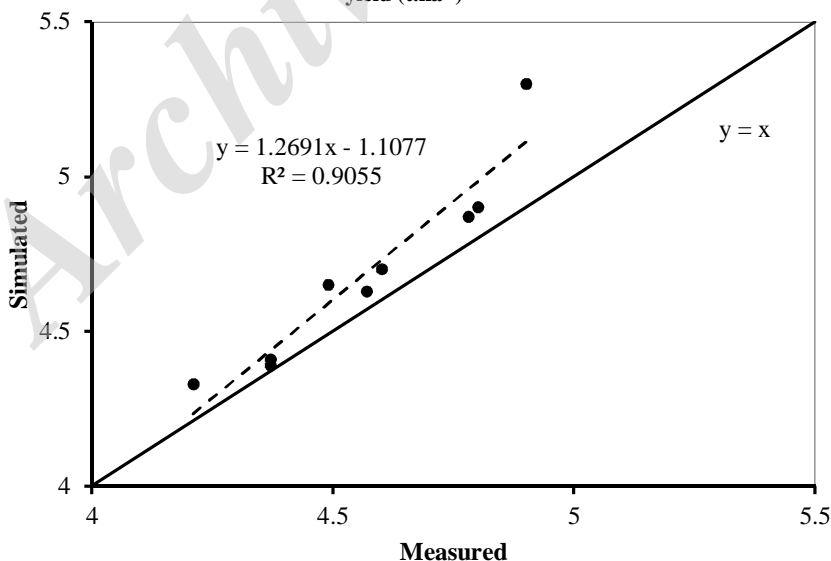
برداشت با ضریب تبیین 0/96 و کمترین همبستگی مربوط به صفت روز تا گلدهی با ضریب تبیین 0/88 بود (شکل 1 تا 4).

نتیجه گرفت که رابطه قابل قبول و معنی داری بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد. بیشترین همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مربوط به صفت روز تا



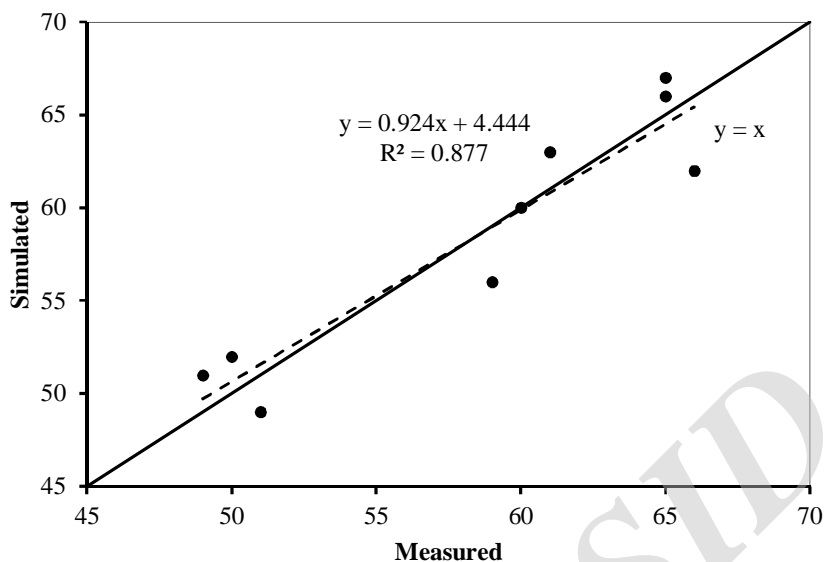
شکل 1- مقایسه خط 1:1 و خط رگرسیون برازش داده شده بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای عملکرد غده سیب زمینی (تن در هکتار)

Fig. 1- Comparison of the 1:1 line and the fitted regression line between the measured and predicted values for potato tuber yield ($t \cdot ha^{-1}$)

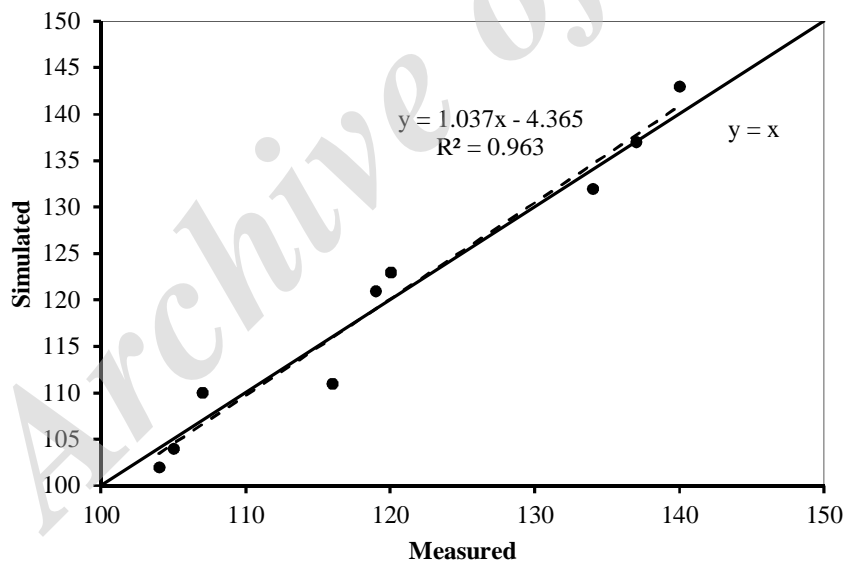


شکل 2- مقایسه خط 1:1 و خط رگرسیون برازش داده شده بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای حداکثر شاخص سطح برگ

Fig. 2- Comparison of the 1:1 line and the fitted regression line between the measured and predicted values for maximum leaf area index



شکل 3- مقایسه خط 1:1 و خط رگرسیون برازش داده شده بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده برای روز تا گلدهی
 Fig. 3- Comparison of the 1:1 line and the fitted regression line between the measured and predicted values for days to anthesis (DTA)



شکل 4- مقایسه خط 1:1 و خط رگرسیون برازش داده شده بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده برای روز تا رسیدگی
 Fig. 4- Comparison of the 1:1 line and the fitted regression line between the measured and predicted values for days to maturity (DTM)

مورد بررسی شاخص سطح برگ نسبت به سال مینا کاهش خواهد یافت (جدول 3). به دلیل افزایش درجه حرارت گیاهان به منظور کاهش تعرق سطح برگ خود را کاهش خواهند داد و همچنین در ماههای بالاتر از دمای اپتیمم، تنفس گیاه افزایش یافته و در نتیجه

اثر تغییر اقلیم بر رشد و نمو سیب زمینی

شاخص سطح برگ سیب زمینی

نتایج شبیه سازی نشان داد که شاخص سطح برگ در گیاه سیب زمینی تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار خواهد گرفت و در تمام سناریوهای

دوره پایه برابر با 10/09 درصد و در مدل گردش عمومی IPC_{M4} معادل 11/34 درصد برآورد گردید (شکل 5 و 6). در بین سناریوهای مختلف، در مدل گردش عمومی $HadCM_3$ ، سناریوی A_2 در مقایسه با سناریوهای A_1B و B_1 از حداکثر شاخص سطح برگ کمتری برخوردار خواهد بود (جدول 3)، بنابراین درصد کاهش حداکثر شاخص سطح برگ نسبت به دوره پایه (1988-2012) در این سناریو و در تمام سال‌ها بیشتر از دو سناریوی دیگر می‌باشد (شکل 5). در مدل گردش عمومی IPC_{M4} نیز نتایج شبیه‌سازی، مشابه نتایج برآورد شده در مدل گردش عمومی $HadCM_3$ می‌باشد، به طوری که، در این مدل گردش عمومی نیز بیشترین درصد کاهش نسبت به دوره پایه در سناریوی A_2 شبیه‌سازی شد (شکل 6). به طوری که، با توجه به یافته‌های به دست آمده در این مطالعه، می‌توان بیان داشت که در مدل گردش عمومی IPC_{M4} ، تأثیر منفی تغییر اقلیم آینده بر رشد و نمو سیب‌زمینی بیشتر از مدل گردش عمومی $HadCM_3$ خواهد بود (جدول 3).

تولید و اختصاص مواد فتوسنتزی به برگ‌ها نیز کاهش می‌یابد (Reddy & Hodges, 2000). در سال‌های آینده در تمام سناریوها و در هر دو مدل گردش عمومی، صفت حداکثر شاخص سطح برگ در گیاه سیب‌زمینی کاهش خواهد یافت که این کاهش در سناریوی B_1 به دلیل پیش بینی کمتر افزایش درجه حرارت (Adavi, 2014)، نسبت به دو سناریوی دیگر در هر دو مدل گردش عمومی $HadCM_3$ و IPC_{M4} کمتر خواهد بود (جدول 3) و این موضوع علت کاهش کمتر شاخص سطح برگ در این سناریو می‌باشد. در شرایط تغییر اقلیم آینده بیشترین کاهش در میزان حداکثر شاخص سطح برگ در هر دو مدل گردش عمومی، تحت سناریوی A_2 در سال 2090 اتفاق خواهد افتاد که میزان این کاهش، نسبت به دوره پایه (1988-2012) در مدل گردش عمومی $HadCM_3$ و IPC_{M4} به ترتیب برابر با 24/78 و 27/52 درصد خواهد بود (شکل 5 و 6). کمترین کاهش شاخص سطح برگ نیز مربوط به سناریوی B_1 در سال 2030 می‌باشد. به طوری که در مدل گردش عمومی $HadCM_3$ درصد کاهش نسبت به

جدول 3- شبیه‌سازی میزان عملکرد غده، حداکثر شاخص سطح برگ، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی سیب زمینی رقم آگریا بر اساس پیش

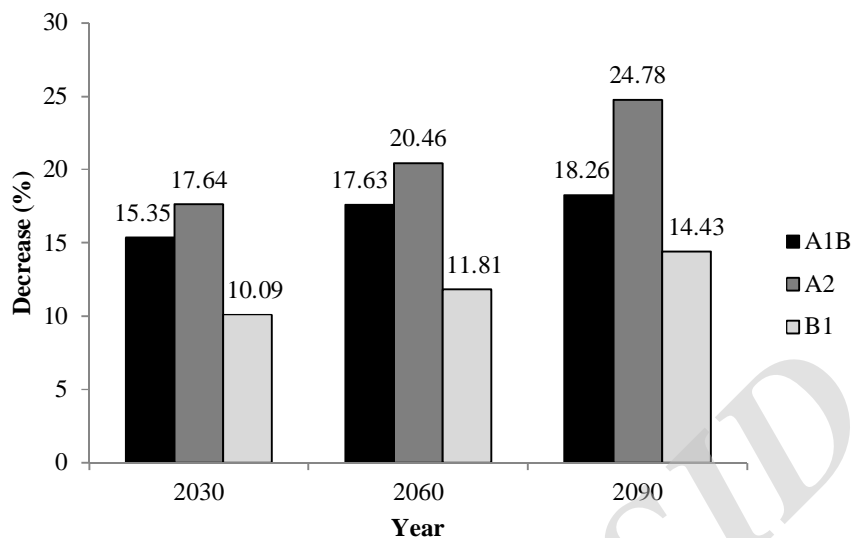
بینی دو مدل گردش عمومی IPC_{M4} و $HadCM_3$ تحت سناریوهای A_1B ، B_1 و A_2 در منطقه فریدون شهر اصفهان

Table 3- Simulation of tuber yield, maximum leaf area index, days to anthesis (DTA) and days to maturity (DTM) of Agriya variety based on the prediction of two general circulation model (GCM) $HadCM_3$ and IPC_{M4} under A_1B , B_1 and A_2 scenarios in Feridonshahr region of Isfahan

مدل گردش عمومی GCM	سناریو Scenario	سال هدف Target yield دوره پایه Base period	حداکثر شاخص سطح برگ Max LAI	روز تا گلدهی DTA	روز تا رسیدگی DTM	عملکرد غده (تن در هکتار) Tuber yield (t.ha ⁻¹)
$HadCM_3$	A_1B	2030	4.57	65	137	29.15
		2060	3.87	62	133	24.18
		2090	3.76	60	129	23.44
	A_2	2030	3.74	59	127	23.23
		2060	3.76	60	129	23.44
		2090	3.64	60	129	22.52
	B_1	2030	3.44	58	125	21.13
		2060	4.11	60	129	25.88
		2090	4.03	61	131	25.32
IPC_{M4}	A_1B	2030	3.91	61	131	24.48
		2060	3.79	62	133	23.61
		2090	3.75	59	127	23.34
	A_2	2030	3.71	59	127	23.06
		2060	3.73	60	129	23.19
		2090	3.57	58	125	22.09
	B_1	2030	3.31	57	123	20.24
		2060	4.05	63	135	25.48
		2090	3.95	62	133	24.77
		2090	3.83	61	131	23.93

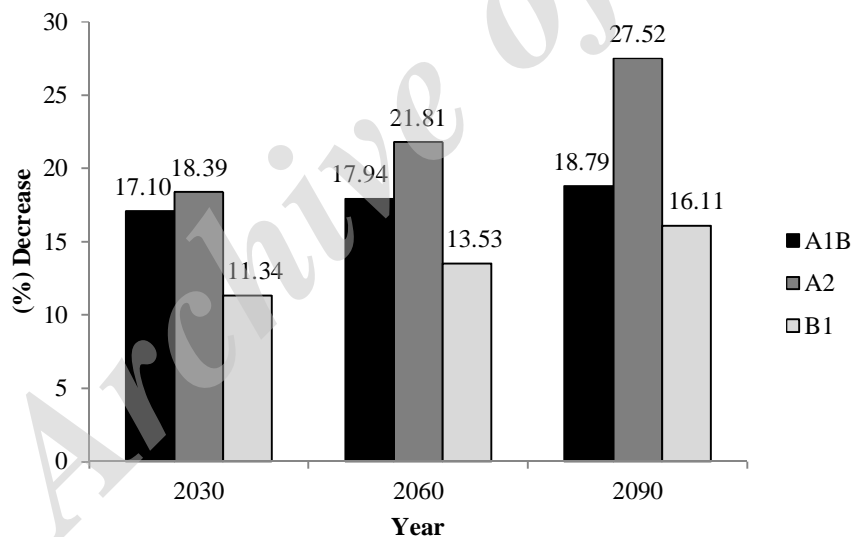
* A_2 : تأکید بر هویت منطقه ای و حفظ آن‌ها، B_1 : تأکید در استفاده از انرژی‌های پاک محیط زیست و اقتصاد در سطح جهانی، A_1B : تأکید بر استفاده متعادل از انواع منابع انرژی.

* A_2 : Demonstrating and preserving regional identity, B_2 : Emphasis on the use of clean environments and economies globally, A_1B : Emphasizing the balanced use of a variety of energy sources.



شکل 5- درصد کاهش حداکثر شاخص سطح برگ در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه (1988-2012) تحت سناریوهای مختلف در مدل گردش عمومی HadCM₃

Fig. 5- Decrease percentage of maximum leaf area index in the future climate change conditions compared to the base period (1988-2012) under different scenarios in general circulation model HadCM₃



شکل 6- درصد کاهش حداکثر شاخص سطح برگ در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه (1988-2012) تحت سناریوهای مختلف در مدل گردش عمومی IPCM₄

Fig. 6- Decrease percentage of maximum leaf area index in the future climate change conditions compared to the base period (1988-2012) under different scenarios in general circulation model IPCM₄

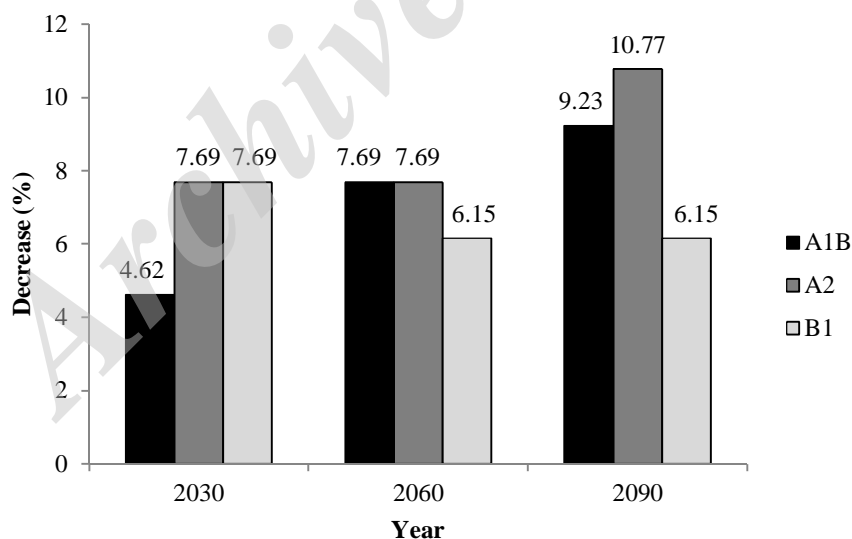
اقلیم نسبت به شرایط کنونی منطقه فریدون شهر کاهش خواهد یافت (جدول 3). کمترین تعداد روز از زمان کاشت تا رسیدن به مرحله گلدهی در گیاه سیب زمینی در دو سناریوی A₂ و A₁B در سال

تعداد روز از کاشت تا گلدهی

تعداد روز از کاشت تا گلدهی سیب زمینی در هر دو مدل گردش عمومی و سال‌های پیش‌بینی شده تحت سناریوهای مختلف تغییر

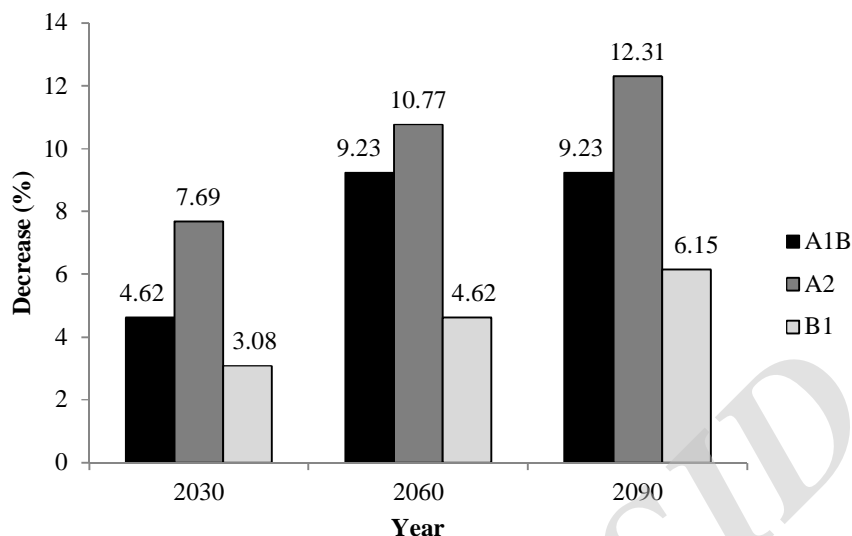
مشاهده پیش بینی تعداد روز تا گلدهی سیب زمینی در تمامی سناریوها (به جز سناریوی B₁ در مدل گردش عمومی HadCM₃) و هر دو مدل گردش عمومی نشان داد که در کلیه سناریوها، با افزایش زمان، تعداد روز تا گلدهی در گیاه سیب زمینی کاهش خواهد یافت، به طوری که در سال 2090 میلادی تعداد روز تا گلدهی نسبت به سال های 2030 و 2060 بیشترین کاهش را خواهد داشت (جدول 3). در هر دو مدل گردش عمومی، سناریوی A₂ و B₁ به ترتیب بیشترین و کمترین کاهش طول دوره رویشی را نشان دادند که با توجه به این که کاهش طول دوره رشد به دلیل کاهش مدت زمان استفاده از منابع احتمالاً منجر به کاهش عملکرد غده در گیاه سیب زمینی خواهد شد، بنابراین به نظر می رسد که به ترتیب کمترین و بیشترین عملکرد غده در سناریوهای مذکور مشاهده شود. در مطالعه مزا و همکاران (Meza et al., 2008) تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد و مراحل فنولوژیکی ذرت گزارش کردند که افزایش درجه حرارت باعث تسریع در مراحل فنولوژیکی و افزایش سرعت نمو ذرت شده است. همچنین بیان داشتند که در شرایط شبیه سازی شده تغییر اقلیم مقدار درجه روز-رشد (GDD) مورد نیاز برای تکمیل رشد گیاه در زمان کوتاه تری دریافت خواهد شد

2090 در مدل گردش عمومی HadCM₃ (به ترتیب با 58 و 59 روز) مشاهده شد (جدول 3). بر اساس این دو سناریو در مدل گردش عمومی HadCM₃، تعداد روز تا گلدهی سیب زمینی به ترتیب حدود 10/77 و 9/23 درصد نسبت به دوره پایه (1988-2012) در سال 2090 کاهش خواهد یافت (شکل 7). در مدل گردش عمومی IPCM₄، کمترین تعداد روز تا گلدهی در سناریوی A₂ و در سال های 2090 و 2060 به ترتیب با 57 و 58 روز شبیه سازی گردید (جدول 3)، که به ترتیب کاهش 12/31 و 10/77 درصدی در تعداد روز تا گلدهی در مقایسه با شرایط کنونی را نشان می دهد (شکل 8). به طور کلی، نتایج شبیه سازی نشان داد که تعداد روز از کاشت تا گلدهی در منطقه فریدون شهر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی پیش رو نسبت به وضعیت کنونی کاهش خواهد یافت (جدول 3). به نظر می رسد دلیل اصلی این اتفاق، افزایش دمای هوا بین 1 تا 5 درجه سانتی گراد (، 2007، IPCC)، بر اساس سناریوهای مذکور باشد. افزایش دما منجر به تسریع در رشد گیاه شده و در نتیجه دوره گلدهی و رسیدگی در گیاهان کوتاه تر می شود، بنابراین کاهش طول فصل رشد و عملکرد گیاهان در اثر تغییر اقلیم جهانی و گرمایش زمین در آینده مورد انتظار است (Nassiri Mahallati et al., 2003).



شکل 7- درصد کاهش تعداد روز از کاشت تا زمان گلدهی سیب زمینی در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه (1988-2012) تحت سناریوهای مختلف در مدل گردش عمومی HadCM₃

Fig. 7- Decrease percentage of days to anthesis in the future climate change conditions compared to the base period (1988-2012) under different scenarios in general circulation model HadCM₃



شکل 8- درصد کاهش تعداد روز از کاشت تا زمان گلدهی سیب زمینی در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه (1988-2012) تحت سناریوهای مختلف در مدل گردش عمومی $IPCM_4$

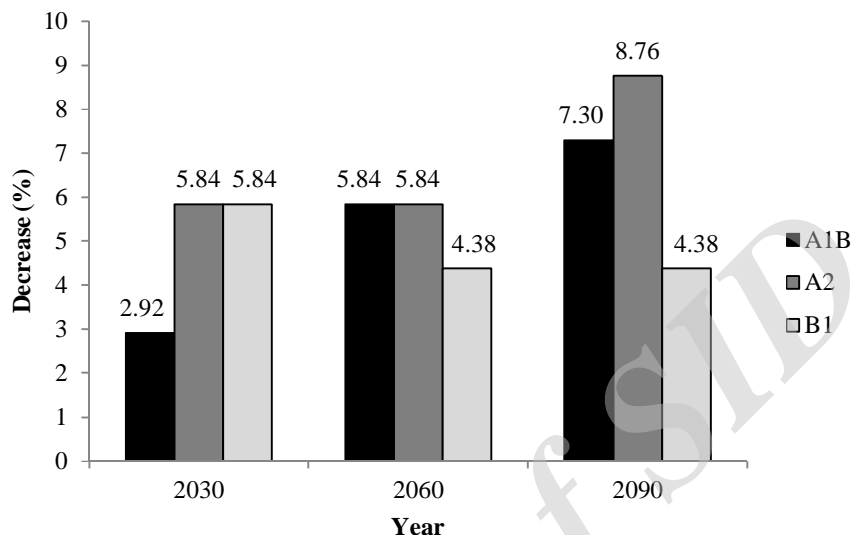
Fig. 8- Decrease percentage of days to anthesis in the future climate change conditions compared to the base period (1988-2012) under different scenarios in general circulation model $IPCM_4$

شیب کند افزایش درجه حرارت در سناریوی B_1 در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دو سناریوی دیگر نسبت داد (IPCC, 2007) که داده-های اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG در منطقه فریدون شهر نیز موید این مطلب می‌باشد (Adavi, 2014). همان‌طور که اشاره شد، افزایش دما در شرایط تغییر اقلیم آینده منجر به تسریع مراحل نمو و در نتیجه موجب کاهش طول زمان رسیدگی در گیاهان می‌گردد (Koocheki & Nassiri Mahallati, 2009). افزایش درجه حرارت سرعت رشد و نمو محصولات زراعی را افزایش خواهد داد، با این حال نتایج برخی آزمایش‌ها نشان داده است که تحت این شرایط، طول دوره رسیدگی در گیاهان کوتاه‌تر خواهد شد که با نتایج شبیه‌سازی شده در این مطالعه مطابقت دارد (Parry et al., 2004). کوچکی و نصیری محلاتی در مطالعه‌ای ابراز داشتند که افزایش درجه حرارت در شرایط اقلیمی آینده، باعث کاهش قابل توجه طول دوره رسیدگی در گیاه گندم می‌شود (Koocheki & Nassiri Mahallati, 2009). کاهش طول دوره رشد ذرت (Kiniry, 2003) و سویا (Jones & Aggarwal, 2004)، گندم (Lawlor & Van Oijen & Ewert, 2006; Prasad et al., 2006; Mitchell, 2000) و برنج (Prasad et al., 2006) نیز در مطالعات تغییر اقلیم گزارش شده است. مقایسه بین دو مدل گردش عمومی نیز نشان داد

تعداد روز از کاشت تا رسیدگی

تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیکی نیز براساس پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی و تحت سناریوهای مورد مطالعه نسبت به شرایط کنونی کاهش یافت که دامنه این کاهش از $2/92$ تا $8/76$ درصد برای مدل $HadCM_3$ و بین $1/46$ تا $10/22$ درصد برای مدل $IPCM_4$ متغیر بود (جدول 3). بیشترین میزان کاهش مرحله رسیدگی نسبت به شرایط کنونی در هر دو مدل گردش عمومی $HadCM_3$ و $IPCM_4$ تحت سناریوی A_2 در سال 2090 (به ترتیب با 125 و 123 روز) مشاهده شد که درصد این کاهش به ترتیب $8/76$ و $10/22$ درصد محاسبه شد (شکل 9 و 10). نتایج نشان داد که با گذشت زمان در آینده، دوره رشد سیب زمینی تقریباً در کلیه سناریوها و هر دو مدل کاهش خواهد یافت، به طوری که سال 2090 نسبت به سال‌های 2030 و 2060 کمترین طول دوره رشد را خواهد داشت (جدول 3). در بین سناریوهای مورد بررسی نیز، سیب زمینی در سناریوی B_1 در مقایسه با سایر سناریوها از طول دوره رشد بیشتری برخوردار خواهد بود، با این وجود در این سناریو نیز طول دوره رشد سیب زمینی در مقایسه با دوره پایه (1988-2012) کاهش خواهد یافت (جدول 3). بیشتر بودن تعداد روز از کاشت تا زمان رسیدگی فیزیولوژیکی در سناریوی B_1 در مقایسه با A_1B و A_2 را می‌توان به

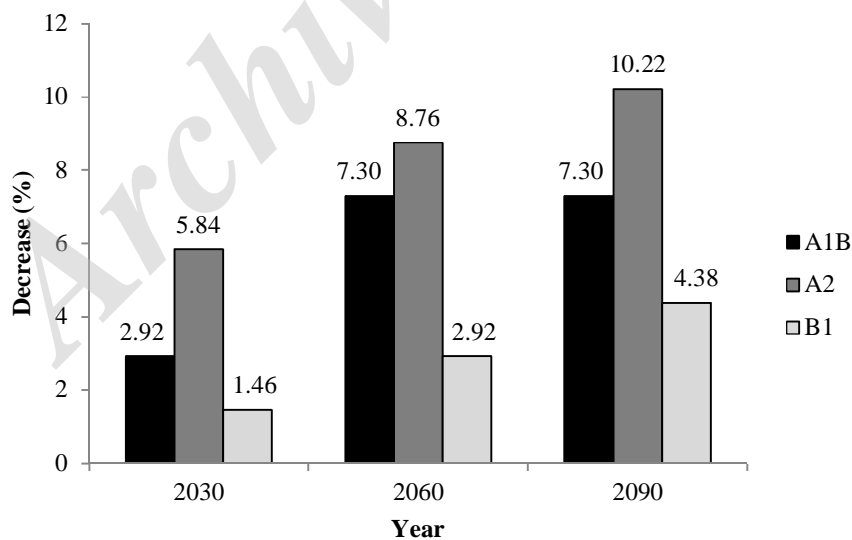
سناریوها و زمان‌ها کوتاه‌تر خواهد بود (جدول 3).
 که در مدل گردش عمومی $IPCM_4$ طول فصل رسیدگی در گیاه
 سیب زمینی نسبت به مدل گردش عمومی $HadCM_3$ در اکثر



شکل 9- درصد کاهش تعداد روز از کاشت تا رسیدگی سیب زمینی در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه (1988-2012) تحت

سناریوهای مختلف در مدل گردش عمومی $HadCM_3$

Fig. 9- Decrease percentage of days to maturity in the future climate change conditions compared to the base period (1988-2012) under different scenarios in general circulation model $HadCM_3$



شکل 10- درصد کاهش تعداد روز از کاشت تا رسیدگی سیب زمینی در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه (1988-2012) تحت

سناریوهای مختلف در مدل گردش عمومی $IPCM_4$

Fig. 10- Decrease percentage of days to maturity in the future climate change conditions compared to the base period (1988-2012) under different scenarios in general circulation model $IPCM_4$

عملکرد غده

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که عملکرد غده سیب زمینی در شرایط تغییر اقلیم در منطقه فریدون شهر کاهش خواهد یافت. به طوری که این صفت تحت تاثیر سناریوهای مورد بررسی (A_1B ، A_2 و B_1) برای هر دو مدل گردش عمومی و در تمامی سال های مورد ارزیابی در این آزمایش، نسبت به شرایط کنونی کاهش نشان داد. میزان کاهش عملکرد غده در شرایط اقلیمی آینده نسبت به دوره پایه (1988-2012 میلادی) بین 11/21 تا 27/53 درصد برای مدل گردش عمومی $HadCM_3$ و از 12/60 تا 30/58 درصد برای مدل گردش عمومی $IPCM_4$ متغیر بود (شکل های 11 و 12). در مدل گردش عمومی $HadCM_3$ و $IPCM_4$ سناریوی B_1 در سال 2030 میلادی به ترتیب با 25/88 و 25/48 تن غده در هکتار، کمترین اختلاف را با شرایط کنونی (1988-2012) (29/15 تن غده در هکتار) داشت (جدول 3). میزان کاهش عملکرد در این سناریو، نسبت به شرایط کنونی (1988-2012) حدود 11/21 درصد خواهد بود (شکل 11). در مدل گردش عمومی $IPCM_4$ نیز بیشترین عملکرد غده با عملکردی معادل 25/48 تن در هکتار تحت سناریوی B_1 در سال 2030 شبیه سازی شد (جدول 3) که درصد کاهش عملکرد غده آن در مقایسه با دوره پایه (1988-2012) برابر 12/60 درصد خواهد بود (شکل 12). هولدن و همکاران (Holden et al., 2003) نیز اثر تغییرات اقلیمی را بر عملکرد غده سیب زمینی برای دوره زمانی 2055 و 2075 شبیه سازی کرده‌اند و کاهش عملکرد سیب زمینی تحت شرایط تغییر اقلیم آینده را گزارش نموده‌اند. این پژوهشگران برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر میزان عملکرد سیب زمینی از مدل گردش عمومی $HadCM_3$ استفاده کردند و سناریوی تغییر اقلیم در مطالعه خود را بر مبنای افزایش 1/6 درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی نمودند.

نکته مهمی که در مطالعات تغییر اقلیم و تأثیر آن بر میزان عملکرد گیاهان زراعی بایستی مد نظر داشت توجه به تأثیر افزایش دی‌اکسید کربن می‌باشد، به طوری که در مطالعاتی که میزان افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در شبیه‌سازی تغییرات اقلیم در آینده مدنظر قرار گرفته، نتایج متفاوتی گزارش شده است. فابرو و همکاران (Fabeiro et al., 2001) با بررسی تغییرات اقلیمی تا سال 2050 بر عملکرد سیب زمینی در انگلستان گزارش کردند که عملکرد غده در مناطق مختلف انگلستان از 2/9 تا 6/2 درصد نسبت به دوره پایه افزایش

خواهد یافت. این محققان در مطالعه خود میزان افزایش غلظت دی‌اکسید کربن را تحت دو سناریوی A_1F و B_1 به ترتیب 593 و 489 میلی‌گرم بر کیلوگرم در مدل گردش عمومی $HadCM_3$ در نظر گرفتند، در صورتی که غلظت دی‌اکسید کربن در سال مینا را حدود 330 مدنظر قرار دادند.

سناریوی A_2 در هر دو مدل گردش عمومی برای سال 2090 نیز کمترین عملکرد غده (21/13 تن در هکتار برای مدل گردش عمومی $HadCM_3$ و 20/24 تن در هکتار برای مدل گردش عمومی $IPCM_4$) را بر اساس پیش‌بینی‌ها برای شرایط اقلیمی آینده در منطقه فریدون شهر نشان داد که به ترتیب کاهش 27/53 و 30/58 درصدی عملکرد غده سیب زمینی را در مقایسه با دوره پایه (1988-2012) در پی خواهد داشت (شکل های 11 و 12). به طور کلی، نتایج نشان داد که سناریوی B_1 در مدل گردش عمومی $HadCM_3$ و $IPCM_4$ نسبت به دیگر سناریوها دارای کمترین کاهش عملکرد در مقایسه با شرایط کنونی (1988-2012) خواهد بود و بیشترین کاهش عملکرد نیز در سناریوی A_2 پیش‌بینی شد (جدول 3). نتایج شبیه‌سازی همچنین حاکی از آن است که در طی زمان های آینده میزان کاهش عملکرد غده سیب زمینی افزایش می‌یابد، به نحوی که در تمام سناریو-های مورد مطالعه، سال 2090 از کمترین عملکرد غده برخوردار خواهد بود، به طوری که در سناریوهای A_1B ، A_2 و B_1 به ترتیب کاهش 20/29، 27/53 و 16/04 درصدی عملکرد غده را نسبت به دوره پایه (1988-2012) برای مدل گردش عمومی $HadCM_3$ (شکل 11) و کاهش 20/88، 30/58 و 17/90 درصدی برای مدل گردش عمومی $IPCM_4$ پیش‌بینی شده است (شکل 12).

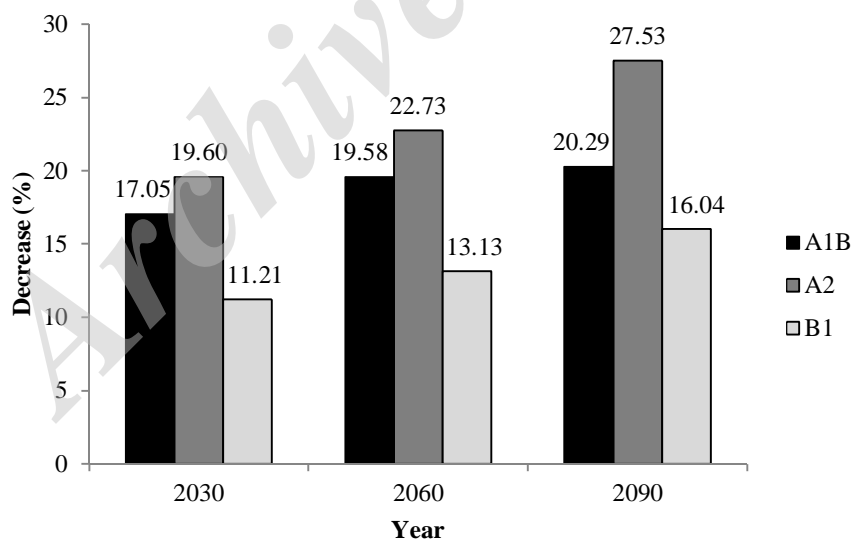
کاهش عملکرد سیب زمینی در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در منطقه فریدون شهر را می‌توان به افزایش درجه حرارت در این منطقه نسبت داد، به طوری که شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی در این منطقه نشان داد که در سناریوهای مختلف در هر دو مدل گردش عمومی، با گذشت زمان، دمای منطقه افزایش می‌یابد (Adavi, 2014). این موضوع به نوبه خود با تأثیر بر مراحل نمو و فتوسنتز گیاه بر میزان عملکرد غده سیب زمینی اثر منفی می‌گذارد. افزایش دما علاوه بر کاهش طول دوره رشد، منجر به افزایش تنفس در گیاهان خواهد شد و در نتیجه کاهش تولید مواد فتوسنتزی و کاهش عملکرد گیاهان را به دنبال خواهد داشت (Kafi et al., 2009). نتایج شبیه‌سازی داده-

الکساندرو و هوگنبوم (Alexandrov & Hoogenboom, 2000) کاهش طول دوره رشد در گیاهان را به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد گیاهان در شرایط تغییر اقلیم آینده بیان کردند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در این تحقیق نیز به نظر می‌رسد افزایش دما تحت سناریوهای مورد بررسی بر طول فصل رشد و مرحله گلدهی سیب‌زمینی تأثیر منفی گذاشته و از این طریق منجر به کاهش 11/21 تا 30/58 درصدی عملکرد سیب‌زمینی (شکل‌های 11 و 12) تحت تأثیر سناریوها و مدل‌های گردش عمومی مختلف شده است.

نتیجه‌گیری

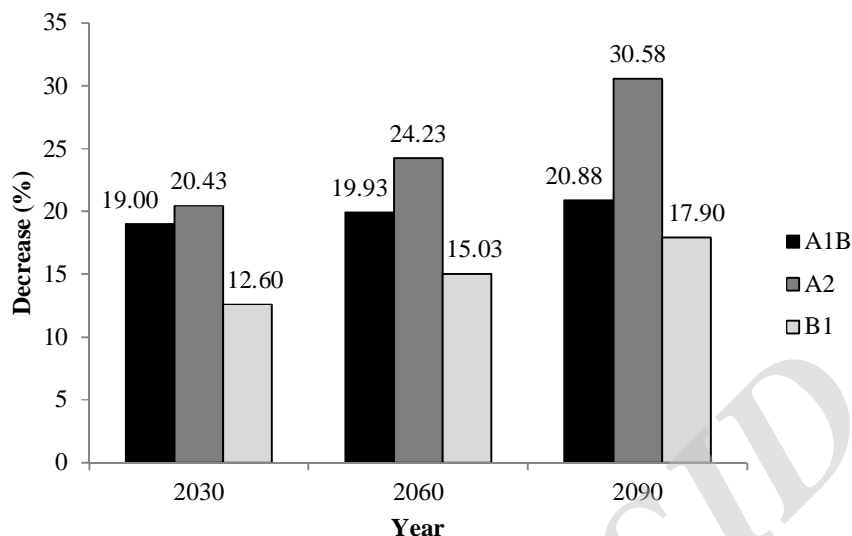
نتایج ارزیابی مدل SUBSTOR-potato نشان داد که مدل برآورد قابل قبولی ($RMSE \leq 10$) برای پیش‌بینی عملکرد غده، حداکثر شاخص سطح برگ، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه سیب‌زمینی در شرایط آب و هوایی فریدون شهر دارا می‌باشد.

های اقلیمی منطقه نشان داد که سناریوی B₁ در هر دو مدل گردش عمومی از افزایش دمای کمتری نسبت به دو سناریوی دیگر برخوردار خواهد بود (Adavi, 2014) که این موضوع کاهش کمتر عملکرد غده سیب زمینی در این سناریو را منجر خواهد شد. در چنین شرایط علاوه بر طول فصل رشد بیشتر که منجر به استفاده و بهره‌برداری بیشتر از منابع تولید می‌شود، میزان افزایش تنفس گیاه نیز به دلیل درجه حرارت کمتر در این سناریو نسبت به سناریوهای دیگر کمتر خواهد بود. کرنل-بوجولو و همکاران (Carbonell-Bojollo et al., 2001) تأیید کردند که افزایش درجه حرارت بیشترین تأثیر را بر مرحله گلدهی گیاهان داشته و با کاهش درصد و دوره تلقیح گل، منجر به کاهش عملکرد گیاهان می‌شود. ایشان همچنین اشاره کردند که افزایش دو درجه سانتی‌گراد دما باعث کاهش دوره گلدهی در گیاه ذرت از 10 به 8 روز شده که تأثیر به‌سزایی در کاهش تعداد دانه تشکیل شده و عملکرد ذرت داشته است. شواهد موجود نشان دهنده این است که کاهش طول دوره پر شدن دانه ناشی از افزایش درجه حرارت مهمترین عامل کاهش عملکرد گیاهان زراعی در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد (Challinor et al., 2007; Asseng et al., 2009).



شکل 11- درصد کاهش عملکرد غده سیب زمینی در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه (1988-2012) تحت سناریوهای مختلف در مدل گردش عمومی HadCM₃

Fig. 11- Decrease percentage of potato tuber yield in the future climate change conditions compared to the base period (1988-2012) under different scenarios in general circulation model HadCM₃



شکل 12- درصد کاهش عملکرد غده سیب زمینی نسبت به دوره پایه (1988-2012) در شرایط تغییر اقلیم آینده تحت سناریوهای مختلف در مدل گردش عمومی $IPCM_4$

Fig. 12- Decrease percentage of potato tuber yield in the future climate change conditions compared to the base period (1988-2012) under different scenarios in general circulation model $IPCM_4$

به طور کلی، نتایج نشان داد که تعداد روز مورد نیاز از کاشت تا گلدهی و همچنین زمان رسیدگی سیب زمینی در منطقه فریدون شهر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی آینده نسبت به وضعیت کنونی کاهش خواهد یافت که دلیل اصلی این کاهش، افزایش درجه حرارت (براساس سناریوهای مختلف بین 1/1 تا 5/4 درجه سانتی-گراد) و در نتیجه افزایش سرعت رشد گیاه در شرایط تغییر اقلیمی آینده می باشد.

نتایج شبیه سازی نشان داد که در تمام سناریوهای مورد بررسی، عملکرد سیب زمینی تحت تأثیر تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره مینا کاهش خواهد یافت، به طوری که بیشترین کاهش عملکرد غده در سناریوی A_2 و در سال 2090 برای هر دو مدل گردش عمومی $IPCM_4$ و $HadCM_3$ میزان کاهش عملکرد غده در سناریوی B_1 نسبت به دو سناریوی دیگر کمتر بود و سناریوی A_2 نیز بیشترین کاهش عملکرد را در تغییر اقلیم آینده نشان داد.

منابع

- Afzali Nya, B. 2006. Agronomy Potato. Publications of Agriculture Organization, Jiroft, Iran. (In Persian)
- Alexandrov, V.A., and Hoogenboom, G. 2000. The impact of climate variability and change crop yield in Bulgaria. *Agricultural Forest Meteorology* 104: 315-327.
- Asseng, S., Jamieson, P.D., Kimball, B., Pinter, P., Sayre, K., Bowden, J.W., and Howden, S.M. 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO_2 . *Field Crops Research* 85: 85-102.
- Bannayan, M., and Hoogenboom, G. 2008. Weather analogue: A tool for real-time prediction of daily weather data realizations based on a modified k-Nearest neighbor approach. *Environment Model Software* 3: 703-713.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., and Sinoquet, H. 2002. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18: 309-332.
- Carbonell-Bojollo, R., González-Sánchez, E.J., Veróz-González, O., and Ordóñez-Fernández, R. 2011. Soil management systems and short term CO_2 emissions in a clayey soil in southern Spain. *Science of the Total Environment* 409: 2929-2935.

- Challinor, A.J., and Wheeler, T.R. 2008. Crop yield reduction in the tropics under climate change: Processes and uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 343-356.
- Daccache, A., Weatherhead, E.K., Stalham, M.A., and Knox, J.W. 2011. Impacts of climate change on irrigated potato production in a humid climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1641-1653.
- Fabeiro, C., Olalla, F., and de Juan, J.A. 2001. Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agriculture Water Management* 48: 255-266.
- Fischer, G., Frohberg, K., Parry, M.L., and Rosenzweig, C. 1994. Climate change and world food supply, demand and trade: who benefits, who loses? *Global Environmental Change* 4(1): 7-23.
- Goudriaan, J., and Van Laar, H.H. 1994. Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- Hodges, T., and Ritchie, J.T. 1991. The CERES-Wheat Phenology Model. p. 133-141. In T. Hoodges (Ed.) *Predicting Crop Phenology*. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Holden, N.M., Brereton, A.J., Fealy, R., and Sweeney, J. 2003. Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields. *Agricultural and Forest Meteorology* 116: 181-196.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh, U., Lizaso, J.L., White, J.W., Uryasev, O., Royce, F.S., Ogoshi, R., Gijsman, A.J., and Tsuji, G.Y. 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.
- IPCC. 2007. Summary for Policy Makers. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones, C.A., and Kiniry, J.R. 2003. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development Texas A&M University Press, College Station, TX, USA.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., and Ritchie, J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18: 235-265.
- Kafi, M., Zand, A., Kamkar, B., Mahdavi Damghani, A.M., Abbasi, F., and Sharifi, H. 2009. *Plant Physiology*. University of Mashhad Publication, Mashhad, Iran. (In Persian)
- Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2009. Impact of climate change with increasing CO₂ concentration on wheat yield in Iran and evaluation of adaptation strategies. *Iranian Journal of Agricultural Research* 6: 139-153. (In Persian with English Summary)
- Koocheki, A., Soltani, A., Sharifi, H., and Kamali, G.A. 2002. The effects of climate change on growth, development and yield of sunflower and pea Tabriz irrigated and rainfed conditions. *Agricultural Science and Technology* 15(1): 155-164. (In Persian with English Summary)
- Krishnan, P., Swain, D.K., Chandra Bhaskar, B., Nayak, S.K., and Dash, R.N. 2007. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122: 233-242.
- Lawlor, D.W., and Mitchell, R.A.C. 2000. Crop Ecosystem Responses to Climatic Change: Wheat. *Climate Change and Global Crop Productivity* (Eds Reddy, K.R. & Hodges, H.F.), 57-80. CAB International, Cambridge.
- Loague, K., and Green, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contam Hydrology* 7: 51-73.
- Mall, R.K., and Aggarwal, P.K. 2002. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. I. Evaluation of impact assessment models. *Climate Change* 52: 315-330.
- Mera, R.J., Niyogi, D., Buol, G.S., Wilkerson, G.G., and Semazzi, F.H.M. 2006. Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C₃) and maize (C₄) crops: An agrotechnology model based study. *Global and Planetary Change* 54: 163-182.
- Meza, F.J., Silva, D., and Vigil, H. 2008. Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems* 98: 21-30.
- Moradi, R., Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2014. Adaptation of maize to climate change impacts in Iran. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 19: 1223-1238.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
- Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., and Rezvani Moghaddam, P. 2003. The Effect of Global Climate Change on

Agricultural Production. University of Mashhad Publication, Mashhad, Iran. (In Persian)

Parry, M., Rosenzweig, C., Inglesias, A., Livermore, M., and Gischer, G. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* 14: 53-67.

Prasad, P.V.V., Boote, K.J., Allen, L.H., Sheehy, J.E., and Thomas, J.M.G. 2006. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crops Research* 95: 398-411.

Rahmani, M., Jami Alahmadi, M., Shahidi, A., and Hadizadeh Azghandi, N. 2015. Effect of climate change on the growth stages of the growth and water requirements of wheat and barley (Case Study: Birjand Plain). *Journal of Agroecology* 7(4): 443-460. (In Persian with English Summary)

Reddy, K.R., and Hodges, H.F. 2000. *Climate Change and Global Crop Productivity*. CABI International, Cambridge.

Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., and Leemans, R. 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. *European Journal of Agronomy* 32: 91-102

Sadr Gaen, S.H., Nakhjavani Moghaddam, H., and Baghani, J. 2011. Effect of spacing and different levels of water on potato yield in drip irrigation method (type) in Firouzkouh. *Journal of Irrigation and Drainage* 1: 99-108. (In Persian with English Summary)

Salinger, M.J. 2005. Climate variability and change: past, present and future- an overview. *Climate Change* 70: 9-29.

Stastna, M., Toman, F., and Dufkova, J. 2010. Usage of SUBSTOR model in potato yield prediction. *Agricultural Water Management* 2: 286-290.

Van Oijen, M., and Ewert, F. 1999. The effects of climatic variation in Europe on the yield response of spring wheat cv. Minaret to elevated CO₂ and O₃: an analysis of open-top chamber experiments by means of two crop growth simulation models. *European Journal of Agronomy* 10: 249-264.

Wolf, J., Adger, W., Lorenzoni, I., Abrahamson, V., and Raine, R. 2010. Social capital, individual responses to heat waves and climate change adaptation: An empirical study of two UK cities. *Global Environmental Change* 20: 44-52.

Yauri, H. 1997. Validation de un modelo para simular el crecimiento del cultivo de papa. PhD disertation, Universidad Nacional Agraria. La Molina. Peru.