

اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم و تحلیل ریسک ناشی از آن (مطالعه موردی: منطقه روددشت اصفهان)

بهنام آبابایی^{1*}، تیمور سهرابی²، فرهاد میرزایی³، وحید رضوردی نژاد⁴ و بختیار کریمی⁵

تاریخ دریافت: 88/8/20 تاریخ پذیرش: 89/3/9

1- دانشجوی دکترا، آبیاری و زهکشی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

2 و 3- استاد و استادیار، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

4- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

5- دانشجوی دکترا، آبیاری و زهکشی، دانشگاه آزاد اسلامی، شاخه کرمانشاه

* مسئول مکاتبه: Email : b.ababaei@ut.ac.ir

چکیده

هرگونه تغییر در میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر زمین، باعث برهم خوردن تعادل بین اجزاء سیستم اقلیم کره زمین می‌گردد. اما اینکه در آینده چه مقدار از این گازها توسط جوامع بشری وارد اتمسفر زمین می‌شود، معین و قطعی نیست و تحت سناریوهای مختلفی ارائه شده است. در این مطالعه، سری زمانی روزانه پارامترهای اقلیمی منطقه روددشت اصفهان تحت سناریوهای تغییر اقلیم A2 (857 ppm غلظت CO₂) و افزایش دما 3/8 درجه) و B1 (538 ppm غلظت CO₂ و افزایش دما 2 درجه) با استفاده از نتایج مدل گردش عمومی (HADCM3 (GCM) و با بکارگیری مولد اقلیم LARS-WG برای دوره 2011 تا 2030 میلادی تولید گردید. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، میانگین بارش سالانه، مجموع بارش سالانه در طول دوره رشد گیاه و متوسط دمای روزانه تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم افزایش خواهند یافت. اثر تغییر اقلیم بر عملکرد محصول گندم فاریاب با استفاده از مدل SWAP مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل مقدار عملکرد نسبی و مطلق گندم تحت سناریوهای مختلف اقلیمی نشان داد که متوسط عملکرد نسبی محصول تحت دو سناریوی تغییر اقلیم A2 و B1 نسبت به سناریوی مبنا (1961-1990)، به ترتیب 1/49 و 2/1 درصد و متوسط عملکرد دانه گندم به ترتیب 4/19 و 17/9 درصد کاهش خواهند یافت. با تحلیل ریسک کاهش محصول نسبی و واقعی گندم مشخص شد که در سناریوهای تغییر اقلیم، به ویژه سناریوی B1، احتمال (ریسک) کاهش محصول نسبت به مقدار میانگین دوره مبنا افزایش می‌یابد. میزان ریسک حداقل 500 کیلوگرم در هکتار کاهش محصول گندم تحت سناریوهای مبنا، A2 و B1 نسبت به متوسط سناریوی مبنا به ترتیب در حدود 7، 15 و 55 درصد برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، گندم، SWAP, LARS-WG, HADCM3

Climate Change Impact on Wheat Yield and Analysis of the Related Risks: (Case Study: Esfahan Ruddasht Region)

B Ababaei^{1*}, T Sohrabi², F Mirzaei³, V Rezaverdinejad⁴ and B Karimi⁵

Received: 11 November 2009 Accepted: 30 May 2010

¹PhD Student, Irrig. and Drain., Islamic Azad Univ., Science and Research Unit, Tehran, Iran

^{2,3}Prof. and Assist. Prof., Dept. of Irrig. and Reclam., Univ. of Tehran, Iran

⁴Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Urmia, Iran

⁵PhD Student, Irrig and Drain., Islamic Azad Univ., Kermanshah Unit, Iran

*Corresponding author, Email: b.ababaei@ut.ac.ir

Abstract

Change in atmospheric greenhouse gases Leads to imbalance between different elements of the earth climate. However, the amount of the gases that will be disposed in to the atmosphere in the future by human activity is uncertain and may be presented under different scenarios. In this study, the daily time series of climatic parameters for Ruddasht region (located in Esfahan Province, Iran) under A2 (857 ppm CO₂, 308°C temperature rise) and B1 (538 ppm CO₂, 2°C temperature rise) climate change scenarios were generated for the period 2011-2030 using HADCM3 Global Circulation Model (GCM) and LARS-WG weather generator. The results showed that, in the region of study, the amount of mean total yearly precipitation, mean total effective precipitation and mean daily temperature would increase under climate change scenarios. The effects of climate change on irrigated wheat yield were analyzed using SWAP model. The analysis of relative and actual yield of wheat under different climatic scenarios showed that the mean relative yield under scenarios A2 and B1 would decrease by 1.49 and 2.1 percent and the mean actual yield would decrease by 4.19 and 17.9 percent, respectively. Analyzing related risks of yield decrease demonstrated that the risk of yield reduction would increase in climate change scenarios. The risk of 500 kg.ha⁻¹ wheat yield reduction in comparison with base scenario (BS) mean value were estimated 7, 15 and 55 percent for BS, A2 and B1 scenarios, respectively.

Key Words: Climate Change, Esfahan Ruddasht, HADCM3, LARS-WG, SWAP, Wheat.

مطالعات، نتایج حاصل از مدل‌های گردش عمومی (GCM) به همراه مدل‌های دینامیک شیب‌ساز رشد گندم مورد استفاده قرار گرفته‌اند (میرنز و همکاران 1996 و 1997، وولف و همکاران 1996، ریشتتر و سمونوف 2005). این تغییرات ممکن است تأثیر شدیدی بر میزان محصول، به ویژه در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند داشته باشد (سمونوف و پورتر 1994،

مقدمه

در حدود 21 درصد از غذای مردم دنیا به گندم وابسته است که تقریباً در 200 میلیون هکتار از اراضی کشاورزی کشت می‌شود. مطالعه در مورد اثرات احتمالی تغییرات اقلیمی بر محصول گندم بیش از یک دهه است که محققین از کشورهای مختلف دنیا را به خود مشغول کرده است. در تعداد زیادی از این

مقدار تولید و بهره‌وری می‌شود؛ اما این افزایش عمدتاً به دلیل تنش‌های رطوبتی خنثی می‌گردد. آبراه‌ها و سویچ (2006) اثر احتمالی تغییر اقلیم بر میزان عملکرد پتانسیل ذرت به همراه اثر تغییر دوهفته‌ای در زمان کاشت محصول را با استفاده از داده‌های هواشناسی مصنوعی تولید شده توسط مدل ClimGen (استاکل و همکاران 1998) و با بکارگیری مدل CropSyst (استاکل و همکاران 2003) مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که مقدار محصول بیشتر تابعی از تغییرات متوسط دما می‌باشد تا تغییر در مقادیر بارندگی. حسین و مُدسِر (2007) اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم را در مناطق کوهستانی سوات² و چیترال³ در کشور پاکستان مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با پیگیری روند تغییرات دما دریافتند که افزایش دما، باعث افزایش شاخص درجه-روز رشد (GDD) و کاهش طول فصل رشد (GSL) می‌شود. همچنین دریافتند که افزایش 1/5 و 3 درجه سانتیگرادی دما، باعث کاهش میزان محصول گندم به میزان 7 و 24 درصد در منطقه سوات و 14 تا 23 درصد در منطقه چیترال می‌گردد. همچنین اثر 5 تا 15 درصد افزایش مقدار بارندگی در طول دوره رشد بر عملکرد گندم را ناچیز ارزیابی کردند. ون ایترسام و همکاران (2003) اثر تغییر غلظت CO₂ اتمسفر، دما و بارندگی بر عملکرد گندم و مقادیر نفوذ عمقی را در منطقه‌ای از استرالیا بررسی کردند. از جمله نتایج این تحقیق آن بود که عملکرد گندم با افزایش هر 100 واحد (در حدود 28 درصد) بر غلظت CO₂ تا 700ppm، بطور خطی 10 تا 16 درصد افزایش پیدا می‌کند. فیلیپس و همکاران (1996) برای ذرت و سورگوم این مقادیر را بطور متوسط (به ترتیب) در حدود 5 و 9/3 درصد تعیین کرده‌اند. ریشتز و سمنوف (2005)، لوا و همکاران (2005) و کریشنان و همکاران (2007)

میرنر و همکاران (1997، پورتر و سمنوف 1999). از نظر تصمیمات مدیریتی در آینده، مهم است که مناطقی که نسبت به تغییرات اقلیمی آسیب پذیرتر هستند شناسایی شوند. ارقام گوناگون گندم واکنش متفاوتی نسبت به تغییرات پیرامونی دارند (فولکس و همکاران 2001) و انتخاب رقم مناسب می‌تواند در کاهش اثرات ناشی از تنش آبی مؤثر باشد. در این راستا و به منظور ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر عملکرد محصولات مختلف، مطالعات گوناگونی انجام پذیرفته است که در این بین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. ژانگ و نیرینگ (2005) با ترکیب مدل WEPP و مولد اقلیم¹ CLIGEN به بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی مقادیر فرسایش خاک، مقدار رواناب و عملکرد گندم زمستانه پرداختند. در این مطالعه، با استفاده از نتایج حاصل از مدل گردش عمومی HADCM3 تحت 3 سناریوی تغییر اقلیم A2a، B2a و GGa1 مقدار تغییر در مقادیر فرسایش، رواناب و عملکرد گندم زمستانه را تحت شرایط مدیریتی (به ویژه نحوه شخم زمین) برای دوره 2070-2099 شبیه سازی نموده و برای عملکرد گندم تحت سناریوی B2 حدود 5 درصد کاهش و تحت سناریوی GGa1 حدود 5 درصد افزایش را پیش‌بینی نمودند. آنها تغییر عملکرد گندم زمستانه را، معلول برهمکنش اثر منفی افزایش دما و اثر مثبت افزایش غلظت CO₂ دانستند. لوبل و همکاران (2006) اثر تغییر اقلیم در دوره 2050 را بر عملکرد گیاهان چند ساله از جمله انگور، بادام، پرتقال، گردو و آوکادو در کالیفرنیا آمریکا بررسی کرده و دریافتند که اثر منفی تغییر اقلیم بر عملکرد این محصولات، حتمی و کاهش محصول تا بیش از 40 درصد قابل پیش‌بینی می‌باشد. پیرسون و همکاران (2008) با استفاده از نتایج 5 مدل تغییر اقلیم، اثر آن را بر مقدار تولید و بهره‌وری در 101 منطقه از کانادا بررسی کردند. نتیجه این تحقیق نشان داد که تغییر اقلیم به احتمال فراوان باعث افزایش

² Swat³ Chitral¹ Weather generator

می‌باشد. موضوع دربرگیرنده خانواده سناریوهای A2، تقویت نیروهای جمعیتی منطقه‌ای با تأکید بر ارزش خانواده و رسوم خانوادگی، رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت سریع اقتصادی می‌باشد. وضعیت جمعیت در خانواده سناریوهای B1 مشابه سناریوی A1 می‌باشد. با این تفاوت که تأکید بیشتر در این سناریو بر استفاده از انرژی‌های پاک و حفظ محیط‌زیست و برقراری اقتصاد جهانی است. در خانواده سناریوهای B2، بر راه‌های منطقه‌ای برای تقویت مسائل اقتصادی-اجتماعی و محیط‌زیستی تأکید می‌گردد. این، یک دنیای ناهمگون با سرعت تغییرات تکنولوژی کمتر، اما با تنوع بیشتر است. اما تأکید قوی در این سناریو بر ابتکار عمل جامعه و نوآوری‌های آن برای یافتن راه‌های منطقه‌ای نسبت به راه‌های جهانی می‌باشد. براساس میزان تولید نیروی تابشی تا سال 2100، سناریوی AIFI بیشترین و سناریوی B1 کمترین نیرو را تولید کرده و سناریوی A2 در بین آنها قرار می‌گیرد (ناکیچنویچ و همکاران 2000).

اطمینان زیادی بر افزایش غلظت گازهای اتمسفر و بالتبع آن افزایش میانگین دمای سطحی اتمسفر کره زمین در دوره‌های آتی در بین دانشمندان وجود دارد. ولی چگونگی تغییرات متغیرهای اقلیمی در مقیاس‌های منطقه‌ای بطور صریح مشخص نمی‌باشد. بنابر این چون پیش‌بینی وضعیت اقلیم مشکل می‌باشد راه جایگزین، مشخص کردن وضعیت‌های ممکن آینده بوده که "سناریوی اقلیمی" نامیده می‌شود. باید توجه داشت که یک سناریوی اقلیمی، یک پیش‌بینی کننده آب و هوا نیست (بی‌نام 1999). در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی گردش عمومی اتمسفر-اقیانوس¹ (AOGCM) می‌باشند که بر پایه قوانین فیزیکی که بوسیله روابط ریاضی

نیز اثر تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات مختلف را در مناطق گوناگون مورد بررسی قرار داده‌اند.

هدف از انجام این مطالعه، بررسی میزان اثرات تغییرات اقلیمی تحت 2 سناریوی تغییر اقلیم A2 و B1 (جدول 1) و با استفاده از نتایج مدل گردش عمومی HADCM3 بر عملکرد گندم در دوره 2011-2030 میلادی در منطقه رودش در حوضه زاینده‌رود می‌باشد.

مواد و روش‌ها

سناریوهای تغییر اقلیم و انتخاب مدل AOGCM

هرگونه تغییر در میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر زمین، باعث برهم خوردن تعادل بین اجزاء سیستم اقلیم کره زمین می‌گردد. اما اینکه در آینده چه مقدار از این گازها توسط جوامع بشری وارد اتمسفر زمین شده و به تبع آن چه وضعیتی برای سیستم اقلیم کره زمین رخ خواهد داد، معین و قطعی نیست و تحت سناریوهای مختلفی بررسی شده است. این سناریوها در دو بخش مجزای سناریوهای غیراقلیمی و سناریوهای اقلیمی قابل تفکیک هستند. یک سناریوی غیراقلیمی حاوی اطلاعاتی از وضعیت اقتصادی-اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین است. (سناریوهای انتشار). در این سناریوها مقادیر گازهای گلخانه‌ای با نرخی ثابت تا سال 2100 افزایش می‌یابد. هر کدام از این سناریوها مربوط به یکی از خانواده‌های A1، B1، A2 و B2 می‌باشند (جدول 1). در خانواده سناریوهای گروه A1، جهان با رشد سریع اقتصادی، افزایش رشد جمعیت که در اواسط قرن 21 به اوج خود خواهد رسید و از آن به بعد کاهش می‌یابد و معرفی تکنولوژی‌های جدید و کارا تر در نظر گرفته شده است. این خانواده، شامل 3 زیر شاخه تحت عنوان AIFI (تشدید استفاده از سوخت فسیلی)، AIB (استفاده از منابع فسیلی و غیر فسیلی بصورت متعادل) و AIT (استفاده از منابع انرژی غیر فسیلی)

¹ Atmospheric-ocean general circulation model

جدول 1- خلاصه ای از سناریوهای SRES در سال 2100 (نسبت به دوره مبنا، 1961-1990) (پاری و همکاران 2007a).

سناریوها					متغیرها
B2	B1	A2	A1	1990 (مبنا)	
10/4	7	15/1	7/1	5/252	جمعیت (بیلیون نفر)
615	538	857	569 - 976	354	غلظت CO ₂ (ppmv)
2/7	2	3/8	2/5 - 4/5	---	تغییر دمای میانگین کره زمین (°C)
36	31	42	37 - 49	---	افزایش جهانی سطح آب دریاها (cm)
235	328	243	525 - 550	21	تولید ناخالص جهانی (10 ¹² \$)

مدل SWAP

یکی از مدل‌های پیش‌بینی عملکرد محصول، مدل آگروهیدرولوژیک SWAP² (کروز و همکاران 2008) است. مدل SWAP یک مدل بسیار جامع برای انتقال آب، املاح و گرما در محیط اشباع و غیر اشباع بوده که شامل زیرمدل‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال املاح و حرارت در خاک، تبخیر از خاک و تعرق گیاه، مدیریت آبیاری، رشد و عملکرد محصول می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد محصول، تحقیقات زیادی با این مدل انجام شده و نتایج خوبی در مقایسه با نتایج مزرعه‌ای بدست آمده است (باستیانسن و همکاران 1996، دروگرز و همکاران 2000، وظیفه دوست و همکاران 2008).

مدل SWAP بطور مستقیم قادر به لحاظ کردن اثر غلظت CO₂ در اتمسفر بر روی رشد گیاه نیست. با توجه به نتایج مطالعه ون ایترسام و همکاران (2003) و فیلیپس و همکاران (1996) و با توجه به اینکه نرخ رشد غلظت CO₂ تحت سناریوهای A2 و B1 به ترتیب سالانه در حدود 0/81 و 0/31 درصد می‌باشد (به ترتیب 9/24 و 4/27 درصد افزایش غلظت CO₂ و 3/3 تا 5/3 و 1/5 تا 2/5 درصد افزایش عملکرد گندم تا سال 2020)، لذا در

ارائه می‌شوند استوار شده‌اند. در بین مدل‌های AOGCM، مدل HADCM3 در حوضه زاینده‌رود عملکرد بهتری داشته (مساح بوانی، 1385) و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

مولد اقلیم LARS-WG¹

برای تولید سناریوهای اقلیمی مختلف، از مدل LARS-WG (سمنوف و بارو 1997) استفاده شد. مدل LARS-WG یکی از دو مدلی است که در کنار مدل WGEN (ریچاردسون و رایت 1984) در مطالعات مختلف، بیش از سایر مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (ویلیبی و ویگی 2000) و نتایج آن، دارای همان دقت نتایج حاصل از مدل WGEN و سایر مولدهای اقلیم می‌باشد (ماوروماتیس و جونز 1998، سمنوف و همکاران 1998، ماوروماتیس و هسنن 2001). در ایران نیز توانایی این مدل در اقلیم‌های مختلف توسط آبابایی و همکاران (2010) مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای جزئیات بیشتر در مورد این مدل به راکسکو و همکاران (1991)، سمنوف و بروکز (1999) و سمنوف و استراتونویچ (2009) مراجعه شود.

² Soil, water, atmosphere and plant

¹ Long Ashton Research Station Weather Generator

شرایط مرطوب، کمتر از فصول دیگر است. هرچند نتایج مدل، در سطح 95 درصد اختلاف معنی‌داری با شرایط واقعی ندارد. این موضوع به دلیل وقوع بیشتر بارندگی ایستگاه در فصل زمستان و تفاوت مقادیر این بارندگی در طی سال‌های مختلف به دلیل وقوع دوره‌های ترسالی و خشکسالی متعدد در این منطقه می‌باشد.

نتایج آزمون‌های t و F برای ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد که در سطح 95 درصد، فرض صفر (برابری میانگین دو سری) در آزمون t در ماه‌های فوریه و سپتامبر و فرض صفر (برابری انحراف استاندارد دو سری) در آزمون F در ماه‌های ژوئن و سپتامبر رد می‌شود. بجز از ماه فوریه، هیچ یک از دو ماه جولای و سپتامبر منطبق با دوره رشد گیاه در منطقه مورد نظر نیستند. بعلاوه، مقدار متوسط بارش در ماه جولای و سپتامبر بطور متوسط کمتر از 2 و 0/03 میلیمتر بوده که توسط مدل به ترتیب در حدود 2/65 و 0/17 میلیمتر برآورد گردیده است. مشخصاً این مقادیر، تأثیر چشمگیری بر شرایط فیزیکی مسئله نخواهند داشت. نتایج آزمون مربع کای برای سری زمانی حداقل و حداکثر دمای روزانه و سری زمانی تابش خورشیدی روزانه هیچ اختلاف معنی‌داری بین سری واقعی و مصنوعی را نشان نداد.

تولید سری‌های زمانی مصنوعی

مقدار تغییرات متغیرهای اقلیمی تحت سناریوی انتشار A2 و B1 (مدل HADCM3) در جدول 2 نشان داده شده است. شاخص‌های بارندگی تحت سناریوهای مختلف در جدول 3 آورده شده است. به منظور بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر میزان عملکرد دانه گندم، سری زمانی بارندگی روزانه، حداکثر و حداقل دمای روزانه و مقدار تابش خورشیدی روزانه در یک بازه 500 ساله،

این مطالعه، در شبیه‌سازی اثر تغییرات کوتاه مدت اقلیمی (دوره 2030-2011) بر عملکرد گیاه، تغییر غلظت CO_2 اتمسفر در نظر گرفته نشده است.

منطقه مطالعاتی

این مطالعه، براساس اطلاعات گردآوری شده توسط وردی نژاد و همکاران (مکاتبه شخصی) در ایستگاه تحقیقات زهکشی و اصلاح اراضی رودشت صورت گرفته است. این ایستگاه، در 65 کیلومتری شرق اصفهان در طول جغرافیایی 52 درجه شرقی، عرض جغرافیایی 32/5 درجه شمالی و ارتفاع 1500 متر از سطح دریا واقع شده و از نظر اقلیمی، خشک با دامنه درجه حرارت از 30 درجه سانتیگراد در تابستان تا 3 درجه سانتیگراد در زمستان با متوسط بارش سالانه 120 میلیمتر می‌باشد. خاک‌های منطقه در سری زرنیدید با بافت لوم سیلتی رسی قرار دارند. محصولات اصلی منطقه شامل گندم، جو، چغندرقد، پنبه و صیفی‌جات است.

واسنجی و صحت سنجی مدل LARS-WG

مقادیر سری زمانی روزانه حداکثر و حداقل دما، ساعت تابش خورشیدی و بارندگی برای سال‌های 1987-2006 مربوط به ایستگاه هواشناسی کبوترباد (آبشار) برای این مطالعه استفاده شد. در مرحله واسنجی، سری‌های زمانی مصنوعی برای دوره 500 ساله توسط مدل تولید شد. به منظور ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی شرایط اقلیمی ایستگاه مورد نظر، سری‌های زمانی تولید شده توسط مدل با سری زمانی مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه توزیع طول دوره‌های خشک و مرطوب برای هر فصل، با استفاده از آزمون مربع کای انجام گرفت (به دلیل محدودیت فضا، جداول مربوطه ارائه نشده‌اند). آزمون مربع کای نشان داد که در فصل زمستان، توانایی مدل در شبیه‌سازی

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad [2]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{n}} \quad [3]$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [4]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad [5]$$

که O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} و \bar{P} متوسط و n تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشند. جدول 4 خلاصه نتایج نهایی واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAP را نشان می‌دهد.

برای دوره مینا (1961-1990) و دوره 2011-2030 (تغییرات اقلیمی کوتاه مدت معرف سال 2020) توسط LARS-WG تولید شدند. از میان این داده‌ها، برای هر یک از سه دوره، 100 سال بصورت تصادفی انتخاب شدند.

واسنجی مدل SWAP

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAP توسط وردی نژاد و همکاران (1389، مکاتبه شخصی) صورت گرفته است. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، حداکثر خطا (ME)، کارایی مدل‌سازی (EF) و ضریب باقیمانده (CRM) می‌باشند (همایی 2002، روابط 1 تا 5).

$$ME = \max(P_i - O_i)_{i=1}^n \quad [1]$$

جدول 2- تغییرات متوسط ماهانه پارامترهای اقلیمی برای دوره 2011-2030 نسبت به دوره مینا.

سناریو	ماه	بارندگی (تغییرات نسبی)		دما (تغییرات مطلق، °C)		تابش خورشیدی (تغییرات مطلق، °C)	
		B1	A2	B1	A2	B1	A2
1	1/08	0/98	2/34	0/81	0/94	0/98	0/98
2	1/20	1/08	1/78	2/44	0/94	0/93	0/93
3	0/86	0/98	0/82	2/55	1/00	0/93	0/93
4	1/01	1/20	0/34	1/84	1/03	1/00	1/00
5	0/90	1/12	0/69	0/94	1/04	1/01	1/01
6	1/05	1/19	0/92	0/72	1/01	0/98	0/98
7	0/91	0/76	1/32	1/97	1/04	1/06	1/06
8	0/75	0/83	1/50	1/48	1/06	1/03	1/03
9	0/90	0/70	2/18	2/30	1/06	1/09	1/09
10	0/90	0/98	1/29	1/19	1/11	1/11	1/11
11	0/98	0/98	0/70	1/75	1/00	0/96	0/96
12	0/98	0/92	0/71	1/26	0/97	0/97	0/97

جدول 3- شاخص های آماری بارندگی در سناریوهای اقلیمی مختلف.

شاخص	سناریو	میانگین (mm)	انحراف معیار (mm)	ضریب تغییرات	حداکثر (mm)	حداقل (mm)	صدک 10 ام (mm)	صدک 90 ام (mm)
مجموع بارش سالانه	BS	137/55	39/28	0/29	241/3	58/7	77/3	184/9
	A2	138/17	39/29	0/28	247/2	59/5	78/25	185/65
	B1	142/11	40/48	0/28	258/7	59/8	82/35	193/4
مجموع بارش سالانه در طول دوره رشد	BS	112/73	36/9	0/33	212/3	26/5	68/68	161/1
	A2	114/37	37/57	0/33	218/0	26/0	71/28	162/74
	B1	118/15	38/48	0/33	231/8	25/2	72/6	165/36

BS: سناریوی مبنا (سری زمانی روزانه متغیرهای هواشناسی، براساس میانگین‌های دوره 1961-1990، بدون در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی تولید شده‌اند)

شبیه‌سازی تولید محصول

تحلیل قرار گرفتند. در مرحله بعد، توزیع‌های مختلف احتمالاتی بر سری عملکرد نسبی (مقدار عملکرد واقعی به عملکرد پتانسیل) و سری عملکرد واقعی محصول (کیلوگرم در هکتار) برای تمامی سناریوها برآزش داده شدند. در این بین، توزیع نرمال دارای عملکرد بهتری بوده و برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. جدول 5 خلاصه‌ای از نتایج مدل تحت سه سناریوی اقلیمی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شکل‌های 1 تا 4 توزیع‌های احتمالاتی مرتبط با مقدار نسبی عملکرد دانه را نشان می‌دهند. با مراجعه به شکل 1 مشخص می‌شود که شکل توزیع در سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به توزیع دوره مبنا به سمت چپ منتقل شده است. شکل 2، توزیع احتمال تجمعی عملکرد نسبی برای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل، در اکثر نقاط، توزیع B1 در سمت چپ توزیع A2 قرار داشته و هر دو توزیع در تمام نقاط در سمت چپ توزیع دوره مبنا قرار گرفته‌اند. این مسئله نشان از آن دارد که احتمال دستیابی به مقادیر بالاتر عملکرد نسبی در سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به سناریوی مبنا کمتر است. همچنین مقدار عملکرد واقعی و پتانسیل در هر دو سناریوی تغییر اقلیم کمتر از سناریوی مبنا و در سناریوی B1 کمتر از سناریوی A2 می‌باشد.

داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل SWAP، شامل اطلاعات روزانه دمای ماکزیمم و مینیمم، میزان تشعشع و بارندگی هستند که برای هر سه دوره توسط مدل LARS-WG شبیه‌سازی شدند. از آنجایی‌که معادله فائو-پنمن-مانتیث برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل به متغیرهای اقلیمی بیشتری نیاز دارد و به منظور اجتناب از نیاز به تعیین مقادیر این متغیرها (مثل سرعت باد) براساس سناریوهای تغییر اقلیم، مقادیر روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از رابطه 6 (هارگریوز و سامانی 1982) محاسبه و پس از واسنجی با روش فائو-پنمن-مانتیث (در مقیاس روزانه و براساس توصیه آلن و همکاران 1998) در اختیار مدل قرار گرفت.

در این رابطه، R_a مقدار تابش فرا زمینی است و واحد آن، متناسب با واحد ET_o انتخاب می‌شود (mm یا $MJ.day^{-1}.m^{-2}$). واسنجی با استفاده از یک رابطه خطی (آلن و همکاران 1998) به شکل زیر انجام پذیرفت:

$$ET_o = a + b ET_o\text{-Hargreaves} \quad [7]$$

که ET_o مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل مورد نیاز از رابطه فائو پنمن-مانتیث (دوره 1987-2006) می‌باشد. این سری‌های زمانی مصنوعی به عنوان مقادیر روزانه پارامترهای اقلیمی به مدل SWAP وارد و نتایج مورد

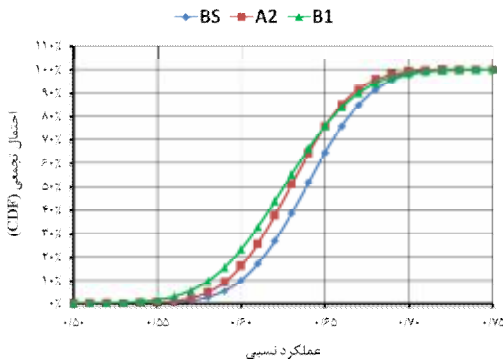
جدول 4- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAP.

پارامترهای گیاهی (بهینه شده)	مقدار	پارامترهای خاک* (بهینه شده)	مقدار	پارامترهای خاک (اندازه گیری شده)	مقدار
مجموع دما از جوانه زنی تا گلدهی (°C)	1217	λ لایه 1	-0/891	α لایه 1	0/0213
مجموع دما از گلدهی تا رسیدن (°C)	695	λ لایه 2	-1/819	α لایه 2	0/0321
حداکثر افزایش نسبی سطح برگ ($m^2m^{-2}d^{-1}$)	0/36	λ لایه 3	5-3/35	α لایه 3	0/0311
سطح برگ ویژه ($ha\ kg^{-1}$)	0/0017	λ لایه 4	-6/167	α لایه 4	0/0301
راندمان مصرف نور ($kg\ ha^{-1}hr^{-1}/(Jm^{-2}S^{-1})$)	0/46	θ_{res} لایه 1	0/1	n لایه 1	1/30
حداکثر نرخ جذب CO_2 ($kg\ ha^{-1}hr^{-1}$)	0/45	θ_{res} لایه 2	0/1	n لایه 2	1/16
کارایی تبدیل CO_2 جذب شده به بیومس برگ	0/72	θ_{res} لایه 3	0/1	n لایه 3	1/11
کارایی تبدیل CO_2 جذب شده به بیومس دانه	0/69	θ_{res} لایه 4	0/1	n لایه 4	1/05
کارایی تبدیل CO_2 جذب شده به بیومس ریشه	0/71	---	---	---	---
کارایی تبدیل CO_2 جذب شده به بیومس ساقه	0/68	---	---	---	---
ارزیابی عملکرد مدل در برآورد عملکرد	R^2	ME	EF	RMSE	
محصول گندم در تمامی تیمارها در مرحله اعتبارسنجی	0/903	1/27	0/85	18/22	2. $cm.day^{-1}$

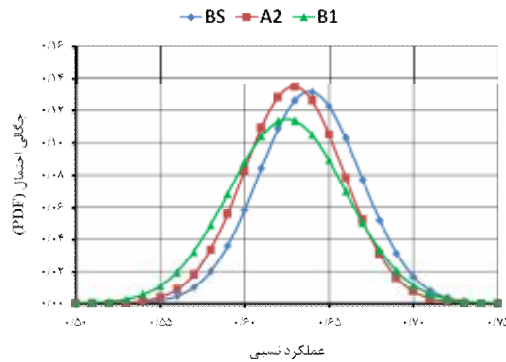
* $\lambda, \alpha, n, \theta_{res}$ و پارامترهای مدل معلم-ونگونختن (1980) هستند. (1 cm^{-1} (2 $cm\ day^{-1}$)

جدول 5- خلاصه نتایج مدل SWAP برای سناریوی مینا و دو سناریوی تغییر اقلیم.

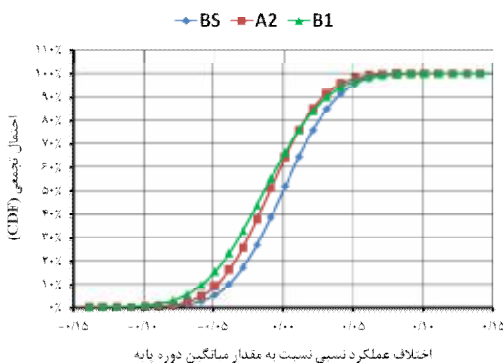
عملکرد نسبی دانه (بدون بعد)			عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)			سناریو
B1	A2	BS	B1	A2	BS	
0/6254	0/6292	0/6387	2504	2923	3051	متوسط
2/10%	1/49%	---	17/9%	4/19%	---	کاهش متوسط نسبت به مینا
0/0348	0/0295	0/0303	339/5	353	342/6	انحراف معیار
0/526	0/55	0/568	1694	1987	2238	حداقل
0/697	0/698	0/696	3408	3875	3908	حداکثر
0/584	0/591	0/592	2092	2452	2609	10
0/602	0/61	0/619	2296	2714	2859	25
0/628	0/631	0/638	2468	2904	2996	50 صدک ها
0/646	0/65	0/662	2710	3138	3299	75
0/673	0/666	0/68	2928	3366	3467	90



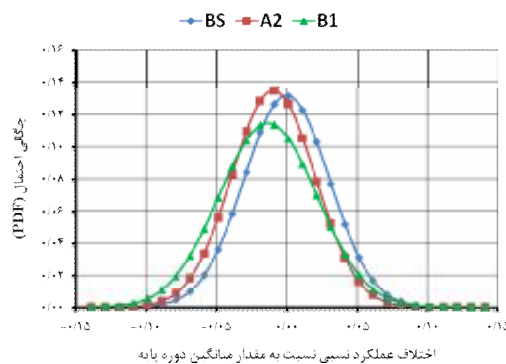
شکل 2- توزیع احتمال تجمعی عملکرد نسبی دانه.



شکل 1- توزیع چگالی احتمال عملکرد نسبی دانه.



شکل 4- توزیع احتمال تجمعی اختلاف عملکرد نسبی دانه در مقایسه با مقدار میانگین عملکرد نسبی دانه در دوره مینا.



شکل 3- توزیع چگالی احتمال اختلاف عملکرد نسبی دانه در مقایسه با مقدار میانگین عملکرد نسبی دانه در دوره مینا

در شکل 5 نیز مشاهده می‌شود که نشان از کاهش مقدار عملکرد دانه در سناریوهای تغییر اقلیم به ویژه سناریوی B1 دارد. شکل 8، مقدار احتمال (ریسک) کاهش یا افزایش عملکرد در مقایسه با میانگین عملکرد دانه در دوره مینا را نمایش می‌دهد. بعنوان نمونه، ریسک کاهش 500 کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه در مقایسه با میانگین دوره مینا، تحت سناریوی مینا، سناریوی A2 و سناریوی B1 به ترتیب در حدود 7، 15 و 55 درصد می‌باشد که نشان از افزایش ریسک کاهش محصول تحت سناریوهای تغییر اقلیم دارد.

شکل‌های 3 و 4 به ترتیب توزیع چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی مربوط به اختلاف (افزایش یا کاهش) عملکرد نسبی در مقایسه با میانگین عملکرد نسبی دوره مینا را نشان می‌دهند. این دو شکل نشان می‌دهند که ریسک کاهش عملکرد نسبی (کاهش نسبت به میانگین دوره مینا) در این دو سناریو بیشتر از سناریوی مینا می‌باشد. در مقابل، احتمال حصول مقادیر عملکرد نسبی بالاتر از مقدار متوسط در این دو سناریو، کاهش می‌یابد. شکل‌های 5 تا 8، مقایسه مشابهی را بر روی مقادیر عملکرد واقعی دانه نشان می‌دهند. مشابه شکل 1، انتقال نمودار توزیع به سمت چپ

خرداد)، مدت زیادی از رسیدن گیاه به حداکثر رشد گذشته است. بنابراین، از تحلیل نتایج مربوط به این دوره زمانی خودداری گردید.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر تغییرات اقلیمی تحت دو سناریوی A2 و B1 با استفاده از نتایج مدل گردش عمومی اتمسفر-اقیانوس HADCM3 مورد تحلیل قرار گرفته و با نتایج حاصل از سناریوی مبنا مقایسه شد. نتایج این مطالعه به صورت خلاصه به این شرح می‌باشند:

- بررسی آماری نشان داد که اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر میزان عملکرد دانه گندم کاملاً معنی‌دار است. تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم، مقادیر مطلق و نسبی عملکرد دانه گندم کاهش یافت (به ترتیب 4/19% و 17/9% برای عملکرد مطلق و 1/49% و 2/1% برای عملکرد نسبی).

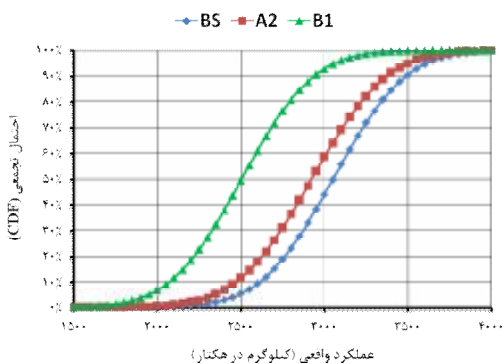
- تحلیل ریسک کاهش محصول نشان داد که این ریسک در سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به سناریوی مبنا بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. - بین عملکرد دانه گندم و مجموع متوسط دمای روزانه در سناریوی مبنا، همبستگی معنی‌داری وجود ندارد. اما در سناریوهای تغییر اقلیم، همبستگی منفی معنی‌داری برقرار است. این همبستگی در مورد مجموع بارش در طول دوره رشد در سناریوی مبنا و سناریوی تغییر اقلیم A2، تا حدودی افزایشی و در سناریوی تغییر اقلیم B1 تا حدودی کاهش یافته، اما در هیچ یک از سناریو ها، معنی‌دار نمی‌باشد. از آنجایی که انتظار می‌رفت افزایش مقدار بارش در طول دوره رشد، اثر مثبتی در مقدار عملکرد گندم داشته باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر منفی افزایش دما بیش از تأثیر مثبت شاخص بارش بوده است.

- در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در صورت ثابت ماندن روش‌های مدیریتی، به ویژه تعیین زمان کاشت و برداشت و مدیریت آبیاری، به احتمال

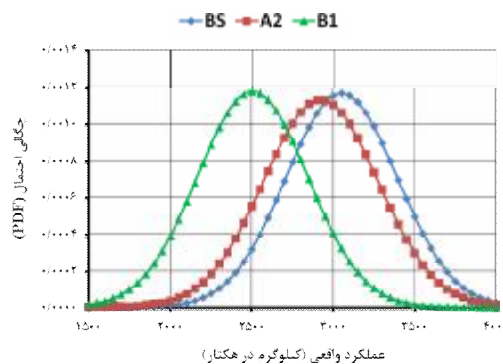
عملکرد دانه گندم نسبت به مجموع متوسط دمای روزانه در طول دوره رشد گیاه در هر سه سناریوی BS، A2 و B1 دارای روند کاهشی می‌باشد که با افزایش دما (تغییر سناریوی اقلیمی) مقدار شیب منفی‌تر و مقدار ضریب تبیین (R^2) افزایش پیدا می‌کند. روند کاهشی در سناریوی مبنا معنی‌دار نبوده، اما در سناریوهای A2 و B1 معنی‌دار است ($p < 0/05$). مطالعات دیگر از جمله مطالعه حسین و مدسر (2007) و لوبل و همکاران (2006) این روند کاهشی را تأیید می‌کنند.

روند تغییرات عملکرد دانه گندم در مقابل مجموع بارش در طول دوره رشد گیاه (شکل‌ها ارائه نشده اند) در سناریوی مبنا و سناریوی A2 افزایشی و در سناریوی B1 کاهش یافته، اما این روندها در سطح 95 یا 99 درصد معنی‌دار نمی‌باشند ($p > 0/01$). شکل‌های 9 و 10 به ترتیب میزان عملکرد دانه گندم در برابر مجموع متوسط دمای روزانه و مجموع بارش در دوره رشد برای هر سه سناریوی اقلیمی را نشان می‌دهند. تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد که روند کاهشی کاملاً معنی‌داری ($p < 0/01$) بین مجموع متوسط دمای روزانه با عملکرد گندم وجود دارد. ولی این روند در مورد اثر مجموع بارش در طول دوره رشد، معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین، تأثیر منفی افزایش دما بیش از تأثیر مثبت شاخص مجموع بارش در طول دوره رشد بوده و نتایج مطالعه حسین و مدسر (2007) و آبراه و سَویج (2006) نیز این مسئله را تأیید می‌کنند.

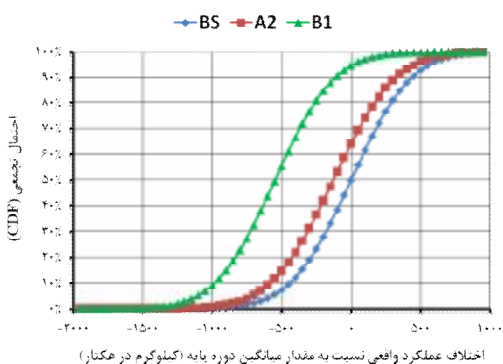
سناریوهای تغییر اقلیم، علاوه بر کاهش میزان متوسط عملکرد دانه، زمان رسیدن گیاه به حداکثر رشد را نیز کاهش می‌دهند. این مسئله در دوره 2055 شدت بیشتری دارد. به نحوی که فرض ثابت ماندن زمان کاشت و برداشت محصول برای این دوره، بی‌معنی می‌باشد. در این دوره، تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم، در زمان فعلی برداشت محصول (10 ژوئن یا 20



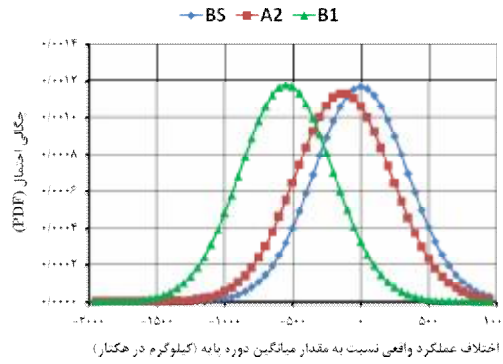
شکل 6- توزیع احتمال تجمعی عملکرد واقعی دانه.



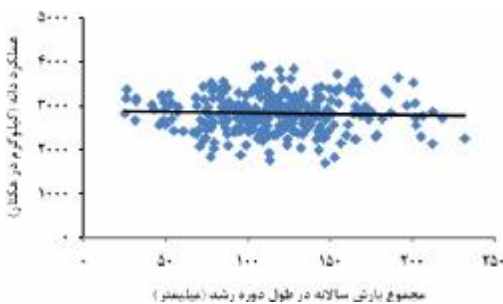
شکل 5- توزیع چگالی احتمال عملکرد واقعی دانه.



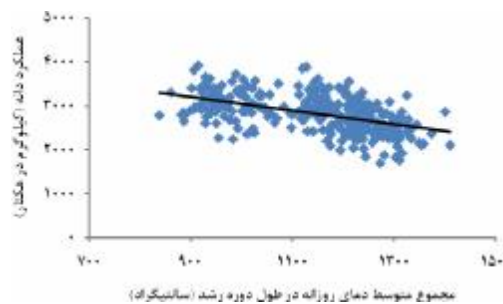
شکل 8- توزیع احتمال تجمعی اختلاف عملکرد واقعی دانه در مقایسه با مقدار میانگین عملکرد دانه در دوره مینا.



شکل 7- توزیع چگالی احتمال اختلاف عملکرد واقعی دانه در مقایسه با مقدار میانگین عملکرد دانه در دوره مینا.



شکل 10- روند تغییر عملکرد دانه گندم در برابر مجموع بارش در طول دوره رشد تمامی سناریوها
($R^2 = 0/002$, $p = 0/444$)



شکل 9- روند تغییر عملکرد دانه گندم در برابر مجموع متوسط دمای روزانه در طول دوره رشد (سانتیگراد)
($R^2 = 0/252$, $p = 0/000$)

تر و استفاده از ارقام با عملکرد بالاتر می‌توانند جزو راهکارهای مقابله با اثرات تغییر اقلیم مدنظر قرار گیرند.

سیاسگزاری

در پایان، از مسئولین ایستگاه تحقیقات زهکشی و اصلاح اراضی روددشت که در گردآوری اطلاعات مورد نیاز این مطالعه نهایت همکاری را داشتند صمیمانه سپاسگزاریم.

زیاد در آینده نزدیک، عملکرد گندم در حوضه زاینده‌رود کاهش چشمگیری خواهد یافت. بنابراین، تحلیل چگونگی واکنش گندم (و سایر محصولات کشاورزی) در برابر تغییرات اقلیمی ضروری به نظر می‌رسد. در این بین، بهینه‌سازی روش‌های مدیریتی، انتخاب زمان کاشت و برداشت بهینه، مطالعه و امکان‌سنجی استفاده از محصولاتی با طول دوره رشد کوتاه-

منابع مورد استفاده

مساح بوانی ع، 1385. ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تاثیر آن بر منابع آب: مطالعه موردی حوضه زاینده رود اصفهان. پایان نامه دکترای مدیریت منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

Ababaei B, Sohrabi TM, Mirzaei F and Karimi B, 2010. Evaluation of a stochastic weather generator in different climates. *Computer and Information Science* 3(3): 217-229.

Abraha MG and Savage MJ, 2006. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 115: 150-160.

Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *Irr and Drain Paper* 56. UN-FAO, Rome, Italy.

Anonymous, 1999. Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment In: Carter TR, Hulme M and Lal M, (eds.), Version 1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment (IPCC-TGCIAC).

Bastiaansen WGM, Huygen J, Schakel JK and Van Den Broek BJ, 1996. Modeling the soil-water-crop-atmosphere system to improve agricultural water management in arid zone (SWATRE), In BJ Van Den Broek (ed.), Pp. 13-27. Dutch experiments in irrigation water management modeling, Report 123, Winand Starig Center, Wageningen.

Droogers P, Akbari M, Torabi M and Pazira E, 2000. Exploring field scale salinity using simulation modeling, Example for Rudasht area, Esfahan Province, Iran, IAEIR-IWMI Research Report 2.

Foulkes MJ, Scott RK, Sylvester-Bradley R, 2001. The ability of wheat cultivars to withstand drought in UK conditions: resource capture. *Journal of Agricultural Science*. 137: 1-16.

Hargreaves GH and Samani ZA, 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 108 (3): 223-230.

- Homaee M, Dirksen C, and Feddes RA, 2002. Simulation of root water uptake, I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction function, *Agricultural Water Manag* 57: 89-109.
- Hussain SS and Mudasser M, 2007. Prospects for wheat production under changing climate in mountain areas of Pakistan – An econometric analysis. *Agricultural Systems* 94: 494–501.
- IPCC 2007a. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC.* Parry M, Canziani O, Palutikof J, van der Linden P, and Hanson C, Cambridge University Press, Cambridge.
- Krishnan P, Swain DK, Chandra Bhaskar B, Nayak SK and Dash RN, 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.
- Kroes JG, Van Dam JC, Groenendijk P, Hendriks RFA and Jacobs CMJ, 2008. Reference Manual SWAP version 3.2, Alterra Green World Research, Wageningen, Report 1649.
- Lobell DB, Field CB, Cahill KN and Bonfils C, 2006. Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology* 141: 208–218.
- Luo Q, Bellotti W, Williams M and Bryan B, 2005. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 273–285.
- Mavromatis T and Hansen JW, 2001. Interannual variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators. *Agricultural and Forest Meteorology* 109: 283–296.
- Mavromatis T and Jones PD, 1998. Comparison of climate scenario construction methodologies for impact assessment studies. *Agricultural and Forest Meteorology* 91: 51–67.
- Mearns LO, Rosenzweig C and Goldberg R, 1996. The effect of changes in daily and interannual climatic variability on cereals-wheat: a sensitivity study. *Climate Change* 32: 257–292.
- Mearns LO, Rosenzweig C, Goldberg R, 1997. Mean and variance change in climate scenarios: Methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. *Climate Change* 35: 367–396.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries B, Fenham J, Gaffin S, Gregory K, Grübler A, Jung TY, Kram T, La Rovere EL, Michaelis L, Mori S, Morita T, Pepper Pitcher WH, Price L, Raihi K, Roehrl A, Rogner H, Sankovski A, Schlesinger M, Shukla P, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N. and Dadi Z, 2000. *Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Pearson CJ, Bucknell D and Laughlin CP, 2008. Modelling crop productivity and variability for policy and impacts of climate change in eastern Canada. *Environmental Modelling and Software* 23: 1345–1355.

- Philips DL, Lee JJ and Dodson RF, 1996. Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO₂: I. Corn and Soybean yields. *Agricultural Systems* 52: 481-502.
- Porter JR and Semenov MA, 1999. Climatic variability and modelling of crop yield in Europe. *Nature* 400: 724.
- Racsko P, Szeidl L and Semenov MA, 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57: 27-41.
- Richardsdon CW and Wright DA, 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. U.S. Dep. of Agric, Agricultural Research Service ARS-8.
- Richter GM and Semenov MA, 2005. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales - assessing drought risks. *Agricultural Systems* 84: 77-97.
- Semenov MA and Barrow EM, 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change* 35: 397-414.
- Semenov MA and Brooks RJ, 1999. Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research* 11: 137-148.
- Semenov MA and Porter JR, 1994. The implications and importance of non-linear responses in modelling of growth and development of wheat. In: Grasman, J, van Straten, G. (Eds.), *Predictability and Nonlinear Modelling in Natural Sciences and Economics*. Wageningen.
- Semenov MA, Brooks RJ, Barrow EM and Richardson CW, 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* 10: 95-107.
- Semenov MA. and Stratonovitch P. 2009. The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change. *Climate Research* 41: 1-14.
- Stockle CO, Steduto P and Allen RG, 1998. Estimating daily and daytime mean VPD from daily maximum VPD. 5th Congress of the European Society of Agronomy, Nitra, the Slovak Republic.
- Stockle CO, Donatelli M, Nelson R, 2003. CropSyst: a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18(3-4): 289-307.
- Van Genuchten MTh, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
- Van Ittersum MK, Howden SM and Asseng S, 2003. Sensitivity of productivity and deep drainage of wheat cropping systems in a Mediterranean environment to changes in CO₂, temperature and precipitation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 97: 255-273.
- Vazifedoust M, Van Dam JC, Feddes RA and Feizi M, 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management* 95: 89-102.
- Wilby RL and Wigley TML, 2000. Down-scaling general circulation issues in climate prediction. In: Sivakumar, M.V.K. (Ed.), Pp.39-68, *Climate Prediction and Agriculture*, Proceedings of the

START/WMO International Workshop, Geneva, Switzerland, September 27–29, 1999. International START Secretariat, Washington, DC, USA.

Wolf J, Evans LG, Semenov, MA, Eckersten H and Iglesias A, 1996. Comparison of wheat simulation models under climate change. 1. Model calibration and sensitivity analyses. *Climate Research* 7: 253–270.

Zhang XC and Nearing MA, 2005. Impact of climate change on soil erosion, runoff, and wheat productivity in central Oklahoma. *Catena* 61: 185–195.