

## پیش بینی تغییرات فصلی عامل های جوی در بوم نظام اقلیم- زراعی کرج با استفاده از مدل

### گردش عمومی GCM-HadCM3

بابک میرشکارنژاد<sup>۱\*</sup>، محمد نبی ایلکایی<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> - پژوهشگر مدل سازی گیاهان زراعی و تغییرات آب و هوایی، سازمان هواشناسی کشور

<sup>۲</sup> - دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

\*ایمیل نویسنده مسئول: bob\_mirshekar@yahoo.com

#### چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی تغییرات آتی خرد اقلیم منطقه کرج، داده های آب و هوایی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج در دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۵ به عنوان دوره پایه مورد استفاده قرار گرفت. داده های روزانه بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش با کمک مدل گردش عمومی GCM-HadCM3 تحت سناریو های انتشار توسط نرم افزار لارس شبیه سازی شدند. بیشترین افزایش میانگین دمای هوا به میزان ۲ درجه سلسیوس در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ برای سناریوهای A2 و A1B و بیشترین افزایش اختلاف بارش به میزان ۱۳ درصد در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ برای سناریو A1B تحت اثرات منفی تغییر اقلیم پیش بینی گردید. میانگین شاخص خشکی سالانه برای منطقه کرج در دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۵) به میزان ۰/۴۰ برآورد گردید. براساس نتایج رگرسیون خطی در یک دوره ۲۲ ساله، سرعت شاخص خشکی به میزان ۰/۰۰۲ و تغییرات شاخص خشکی سالانه بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ اندازه گیری شد. بنابراین با روند تغییر اقلیم از شرایط خشک و نیم خشک به شرایط خشک، اتخاذ تدابیر سازگاری نقش عمده ای در بهره وری اقتصادی از منابع آبی و پایداری بوم نظام اقلیم-زراعی منطقه کرج خواهد داشت.

#### کلمات کلیدی

"تدابیر سازگاری"، "تغییر اقلیم"، "سناریوهای انتشار"، "شاخص خشکی"، "لارس"

## Forecasting the seasonal variations of atmospheric factors in Karaj agroclimate ecosystem using GCM-HadCM3 model

Babak Mirshekarnezhad<sup>1\*</sup>, Mohammad Nabi Ilkaee<sup>2</sup>

\*1. PhD in agronomy, researcher on crop-weather modeling, Meteorological Organization of Iran

2. Assistant Professor, Department of Agronomy, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

Email Address : bob\_mirshekar@yahoo.com

#### Abstract

In order to investigate the future changes of Karaj microclimate, data collection of Karaj weather station from 1995 to 2015 were applied as baseline period. Daily climate data including minimum and maximum temperatures, precipitation and solar radiation by means of GCM-HadCM3 model under emission scenarios were simulated using LARS-WG software. The negative impacts of climate change induced temperatures increase up to 2°C for the period (2046-2065) under A2 and A1B scenarios and precipitations increase of approximately 13% for the period 2011-2030 under A1B scenario. The annual AI varied from 0.01 to 0.05 across the study area. The mean annual AI for the study area during the period 1995 to 2015 was measured at the rate of 0.40. Based on the linear regression, the aridity index of the given condition measured at the rate of 0.002. Thus, with the climate change trend from arid and semi-arid to arid condition in Karaj region, adaptation strategy is mandatory to improve the economical productivity of water resources to account for stability of Karaj agroclimate ecosystem.

#### Key words

"Adaptation strategies", "Climate change", "Emission scenarios", "Aridity index", "LARS-WG"

## ۱- مقدمه

اقلیم کره زمین مترصد تغییرات شگرفی است و این تغییرات در طول قرن بیست و یکم و پس از آن ادامه خواهد داشت. دماهای در حال صعود، الگوهای بارشی جدید، کمبود منابع آبی و دیگر تغییرات تنش زا جنبه های بسیاری از جامعه انسانی و عالم طبیعی را متأثر کرده است. امروزه با افزایش میانگین دمای جهانی و تغییرات شدید الگوهای اقلیمی مناطقی که مراحل آسیب پذیری را تحت تاثیر این عوامل طی می کنند در حال گسترش هستند. پیش بینی می شود مناطقی از زمین که در زمره نواحی تنش زای آبی قرار گیرند، متأثر از تداوم تغییر اقلیم تا سال ۲۰۵۰ به طور قابل ملاحظه ای افزایش یابند (باتز و همکاران، ۲۰۰۸). مطابق با گزارشات هیأت بین الدول تغییر اقلیم<sup>۲</sup> حتی اگر سطح کنونی انتشار گازهای گلخانه ای ثابت بماند، رویه افزایش گرمای جهانی و پیامدهای مخرب اثرات تغییر اقلیم به قوه خود باقی خواهد ماند (IPCC, 2007). در مطالعات تغییر اقلیم، پیش بینی اقلیم آتی توسط مدل های گردش عمومی جو و تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه ای انجام می شود. اما خروجی مدل های گردش عمومی جو که پارامترهای بزرگ مقیاس و در ابعاد چند ده هزار کیلومتر مربع اند، فاقد دقت مکانی و زمانی مناسب جهت استفاده در مطالعات منطقه ای می باشند (عباسی و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین از مدل های ریز مقیاس سازی جهت کاربردی کردن مطالعات تغییر اقلیم استفاده می گردد. روش های ریز مقیاس سازی به دو دسته آماری و دینامیکی تقسیم می شوند که روش های آماری دارای کاربرد و مقبولیت بیشتری می باشند (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹). در بین روش های آماری، در حال حاضر مدل های LARS-WG و SDSM از معتبرترین ابزارهای ریز مقیاس سازی به حساب می آیند. این مدل ها ابتدا مدت مراحل خشک و مرطوب را شبیه سازی می کنند که معروف ترین آن ها مدل LARS-WG است (بابائیان و همکاران، ۲۰۰۴). توسط مدل های گردش عمومی جو و جمع آوری داده های روزانه شبکه ای، می توان داده های روزانه دوره های آتی را نیز مدل سازی کرد. مدل LARS-WG یک ابزار ریز مقیاس کردن آماری است که جهت شبیه سازی حداقل و حداکثر دما (°C)، بارش (mm) و تشعشعات خورشیدی ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ) در یک مکان تحت شرایط آب و هوایی حال و اقلیم آینده به کار می رود. مدل LARS-WG برای طول سری های روزانه خشک و تر، بارش و تشعشعات خورشیدی روزانه از توزیع نیمه تجربی استفاده می کند و درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه نیز بر اساس سری های فوریه<sup>۳</sup> تخمین زده می شود (سمنو و بارو، ۲۰۰۲). نتایج مطالعات پیشین قابلیت بالای این مدل در شبیه سازی پارامترهای هواشناسی در دوره های آماری مختلف و توانایی آن برای ارزیابی تغییر

اقلیم در دهه ها آتی را مشخص کرد (بابائیان و نجفی نیک، ۲۰۰۶). مقایسه مدل های مختلف آب و هوایی نشان دادند که مدل LARS-WG در سطح اطمینان ۹۵ درصد داده های اندازه گیری شده را شبیه سازی کرد (ماوروماتیس و هانسن، ۲۰۰۱). تعدادی از پژوهشگران با بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه زاینده رود با استفاده از خروجی مدل HadCM3 تحت دو سناریوی اقلیمی A2 و B1 در دو دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ نشان دادند که در هر دو دوره میانگین سالانه بارش در این منطقه کاهش و میانگین سالانه دما افزایش پیدا می کند (مساح بوانی و مرید، ۲۰۰۶). محققان دیگر با ریز مقیاس نمایی تغییرات آب و هوایی توسط مدل LARS-WG5 تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 با استفاده از خروجی مدل HadCM3 افزایش دمای هوا به میزان ۲/۳ درجه سلسیوس و کاهش حجم بارش به میزان ۳ درصد را برای استان آذربایجان شرقی در طی سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۹۰ گزارش کردند (زرغامی و همکاران، ۲۰۱۱). در تحیق حاضر پارامترهای جوی منطقه کرج در دوره پایه ۲۰۱۵-۱۹۹۵ با استفاده از مولد داده پرداز LARS-WG برای دو دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ شبیه سازی شدند. نتایج حاصل از این شبیه سازی ها جهت پیش بینی های بلند مدت متغیرهای اقلیمی به کار می رود. بنابراین به منظور تعدیل اثرات منفی تغییرات اقلیم، لازم است اتخاذ تدابیر سازگاری به گونه ای مدیریت شوند که ضمن افزایش بهره وری اقتصادی از مصرف آب پایداری بوم نظام های طبیعی و کشاورزی را به همراه داشته باشند.

## ۲- روش انجام تحقیق

### • مراحل شبیه سازی اقلیم آتی با مولد داده پرداز LARS-WG

در این آزمایش کارایی مدل LARS-WG جهت تولید داده های روزانه بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش خورشیدی استخراج شده از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج واقع در عرض جغرافیایی ۳۵° ۴۶' شمالی، طول جغرافیایی ۵۶° ۵۰' شرقی و ارتفاع ۱۲۹۲/۹۰ متر از سطح دریا مورد آزمون قرار گرفتند (شکل - ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان البرز در نقشه ایران

1. Bates et al. (2008)

2. Intergovernmental Panel on Climate Change

3. Fourier

4. Semenov & Barrow (2002)

5. Mavromatis & Hansen (2001)

فرض صفر قبول می شود. به علاوه جهت اعتبارسنجی بیشتر داده های تولید شده مقدار p-value نیز محاسبه گردید. به نحوی که اگر مقدار  $p\text{-value} \geq \alpha_{0.05}$  اندازه گیری شود فرض صفر پذیرفته می شود که نتایج حاصل از دو آزمون بیانگر تفاوت معنی دار بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده است. در مقابل قبول فرض یک دلالت بر عدم وجود تفاوت معنی دار بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده می باشد. علاوه بر این داده های تولید شده با شاخص های آماری از قبیل ضریب کارایی ناش ساتکلیف<sup>۳</sup> با کمک رابطه (۱)، میانگین خطای مطلق<sup>۴</sup> با رابطه (۲) و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> با استفاده از رابطه (۳)، مورد ارزیابی قرار گرفتند.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{obs,i} - X_{model}|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (3)$$

که در آن  $X_{obs}$  مربوط به مقادیر اندازه گیری شده و  $X_{model}$  مربوط به مقادیر شبیه سازی شده در زمان  $t$  می باشند.

### • انتخاب سناریوهای اقلیمی مدل گردش عمومی GCM-HadCM3

پس از ارزیابی کارایی مدل، با انتخاب سناریوهای A1B و B1 تحت مدل گردش عمومی GCM-HadCM3 داده های عوامل جوی برای دوره های زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تولید شدند. بر حسب تعریف سناریو A2 شامل شرایط بسیار ناهمگن محیطی، رشد بالای جمعیت، توسعه ناچیز اقتصادی و تغییرات کند تکنولوژیکی می باشد. بر اساس این سناریو غلظت CO2 حدود ۳۰ گیگاتن در سال افزایش یافته و دما بین ۲ تا ۵/۴ درجه سانتی گراد افزایش خواهد یافت (پورودهمه و همکاران، ۲۰۱۰). سناریو A1B نشان دهنده رشد سریع اقتصادی جهان بوده که حداکثر رشد جمعیت در اواسط قرن حاضر وجود داشته و تکنولوژی با کارایی بالا بر اساس تعادل انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. براساس این سناریو غلظت CO2 حدود ۱۵ گیگاتن در سال افزایش یافته و دما بین ۱/۷ تا ۴/۴ درجه سانتی گراد افزایش خواهد یافت (اولسن و همکاران، ۲۰۱۱). سناریو B1 هم شامل جهانی

جهت اجرای اولیه مدل بعد از اجرای بخش Site Analysis از منوی اصلی نرم افزار LARS-WG دو فایل به نام فایل شاخص (\*Wg) که شامل پارامتر های لازم برای شبیه سازی سری های زمانی آب و هوایی می باشد و فایل آمار (\*Sta) که مشتمل بر فراوانی فصلی توزیع سری های سرد و خشک و دوره های سرد و گرم است به طور خودکار توسط مدل ایجاد و در بخش دایرکتوری قرار می گیرند. در این تحقیق داده های روزانه مربوط به ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج واقع در عرض جغرافیایی ۳۵° ۴۶' شمالی، طول جغرافیایی ۵۰° ۵۶' شرقی و ارتفاع ۱۲۹۲/۹۰ متر از سطح دریا به عنوان فایل \*.St برای دوره پایه ۲۰۱۵-۱۳۹۵ و فایل \*.dat حاوی داده های هواشناسی از جمله سال، شماره روز ژولوسی<sup>۱</sup>، حداقل دما، حداکثر دما، بارش و ساعت آفتابی روزانه یا تابش به عنوان داده های ورودی به مدل معرفی شدند. با فعال کردن بخش QTest در منوی اصلی LARS-WG که شامل دو زیر بخش Test و Compare می باشد، صحت سنجی داده های واقعی و تولید شده با استفاده از تست کای اسکوایر<sup>۲</sup> انجام گرفت که خروجی آن ارزیابی داده های اندازه گیری شده و تولید شده بر اساس آزمون های آماری T و F بود. همچنین با کمک بخش QTest برای مدت ۵۰ سال داده پردازی خام انجام گرفت که پس از پروسه تجزیه آماری توسط نرم افزار، فایل های خروجی آن شامل طول دوره سری های خشک و تر، اطلاعات مربوط به توزیع احتمال، مقادیر میانگین و انحراف معیار متغیرهای بارندگی، ماکزیمم و مینیمم دما، تشعشعات آفتابی به صورت ماهانه و روزانه در فایلی با پسوند \*.tst استخراج و مورد بهره برداری قرار گرفتند. در نهایت با کمک بخش Generator از منوی اصلی نرم افزار پس از انتخاب سناریوهای تغییر اقلیم از زیر بخش مدل های GCMs بر اساس سری های زمانی پیش فرض، داده های شبیه سازی شده به تعداد سال های مورد آزمایش جهت بررسی تغییرات اقلیم آبی تولید شدند.

### • ارزیابی کارایی مدل LARS-WG با شاخص های آماری و آزمون t-test

به منظور توانایی مدل LARS-WG ابتدا داده های اندازه گیری شده و داده های شبیه سازی شده توسط آزمون T استیودنت مورد ارزیابی اولیه قرار گرفتند سپس نتایج آزمون با فرضیه های آماری تجزیه و تحلیل شدند. بر اساس تعریف، فرض صفر  $(H_0: \mu_1 = \mu_2)$  بیانگر تساوی داده های اندازه گیری شده و مقادیر شبیه سازی شده می باشد و فرض مخالف  $(H_1: \mu_1 \neq \mu_2)$  بیانگر عدم تساوی داده های اندازه گیری شده با مقادیر شبیه سازی شد می باشد. فرضیه های آزمایش با استفاده از آزمون دو طرفه با مقایسه t محاسبه شده و مقدار t بحرانی  $(t_{0.975, 10} = \pm t_{1-a/2, n-2})$  مورد ارزیابی نهایی قرار گرفتند. بر اساس این آزمون، اگر t محاسبه شده در محدوده قابل قبول قرار گیرد

3. Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient

4. Mean Absolute Error

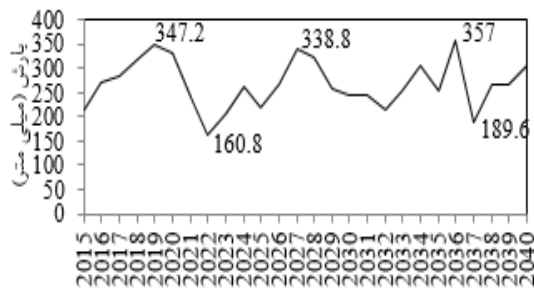
1. Root Mean Square Error

2. Olesen et al. (2011)

1. Julian day number

2. Chi-Square test

کشاورزی یک منطقه دارد. مطابق با داده های شبیه سازی شده بر اساس میانگین تغییرات درازمدت بارش منطقه در یک دوره ۲۵ ساله، نتایج نشان دهنده ثبت بالاترین مقادیر بارش به میزان (۳۴۷/۲، ۳۵۷) و ۳۳۸/۸ میلی متر به ترتیب برای سال های ۲۰۳۶، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۷ بود. در مقابل کمترین مقادیر بارش به میزان (۱۶۰/۸ و ۱۸۹/۶) میلی متر به ترتیب برای سال های ۲۰۲۲ و ۲۰۳۷ اندازه گیری شدند (شکل - ۲).



سال

شکل ۲- تغییرات بارندگی برای یک دوره ۲۵ ساله بر اساس داده های ایستگاه خودکار هواشناسی منطقه کرج

#### • نتایج اعتبار سنجی داده های تولید شده

بر اساس شاخص های آماری برآورد شده از مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده مدل طی دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۵ در منطقه کرج، نتایج حاکی از بالا بودن مقدار NSE و پایین بودن مقادیر مربوط به آماره های خطاسنجی MAE و RMSE برای داده های شبیه سازی شده بود. گرچه مدل متغیر بارش و تابش را با دقت پایین تری نسبت به متغیرهای دیگر شبیه سازی کرد با این حال  $t$  محاسبه شده برای اکثر متغیرهای جوی در محدوده  $-2.228 < t < +2.228$  ارزیابی و  $p\text{-values} > 0.05$  اندازه گیری شد که این نتایج حاکی از کارایی بالای مدل در شبیه سازی داده های هواشناسی منطقه کرج در دوره پایه ۲۰۱۵-۱۹۹۵ بود (جدول - ۲). در تطابق با این آزمایش، نتایج آزمایشات محققان دیگر نیز نشان داد که مدل LARS-WG از توانایی لازم برای پیش بینی پارامترهای آب و هوایی در شرایط تغییر اقلیم برخوردار بود (مرادی و همکاران، ۲۰۱۳).

جدول ۲- نتایج آماری مقادیر مشاهده شده در برابر مقادیر پیش بینی شده در دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۵

آماره ها	بارش (mm)	حداقل دما (°C)	حداکثر دما (°C)	تابش (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
MAE	۳/۷۷	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۱۰
NSE	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۶
RMSE	۴/۷۷	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۵۰
T-test	-۱/۵۵	۰/۳۸	۰/۴۹	-۱/۵۴
P value	۰/۰۷	۰/۳۸	۰/۳۱	۰/۰۸
Correlation	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸

همگرا بوده که بیشترین رشد جمعیت در اواسط قرن حاضر اتفاق افتاده و رشد سریع در بخش اقتصادی و تکنولوژیکی وجود دارد. بر اساس این سناریو غلظت CO<sub>2</sub> تغییر چندانی نداشته و دما بین ۱/۱ تا ۲/۹ درجه سانتی گراد افزایش خواهد یافت (واترغال و همکاران، ۲۰۰۹). به علاوه به منظور تعیین شاخص خشکی منطقه<sup>۳</sup>، تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) برای یک دوره ۲۱ ساله به روش لاری-جانسون و با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد (علیزاده، ۲۰۰۷).

$$PET = (0.004755D_m) + 24.4 \quad (۴)$$

که در آن D<sub>m</sub> مقدار درجه روز تجمعی دماهای ماکزیمم روزانه برای دوره مورد نظر می باشد. در این رابطه D<sub>m</sub> بر حسب درجه فارنهایت محاسبه می شود. در پایان PET برحسب سانتی متر به دست می آید. سپس شاخص خشکی (AI) به منظور تعیین نوع اقلیم منطقه کرج با استفاده از داده های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل برای دوره مورد نظر با استفاده از رابطه (۵) برآورد گردید (فائو، ۱۹۹۳).

$$AI = \frac{AR}{APET} \quad (۵)$$

که در آن AR مقدار میانگین بارش و APET تبخیر و تعرق پتانسیل سالیانه می باشد. طبقه بندی شاخص خشکی مناطق (AI) براساس درجه رطوبت و خشکی سطوح مختلف در جدول (۱) ارائه شده است.

#### ۱- شاخص خشکی (AI)

شاخص خشکی (AI)	طبقه بندی
AI ≤ 0.05	خیلی خشک
0.05 ≤ AI < 0.20	خشک
0.20 ≤ AI < 0.50	نیمه خشک
0.50 ≤ AI < 0.65	نیمه خشک تا نیمه مرطوب
0.65 ≤ AI < 0.80	نیمه مرطوب
0.80 ≤ AI < 1.5	مرطوب
1.5 ≤ AI	خیلی مرطوب

#### ۳- نتایج

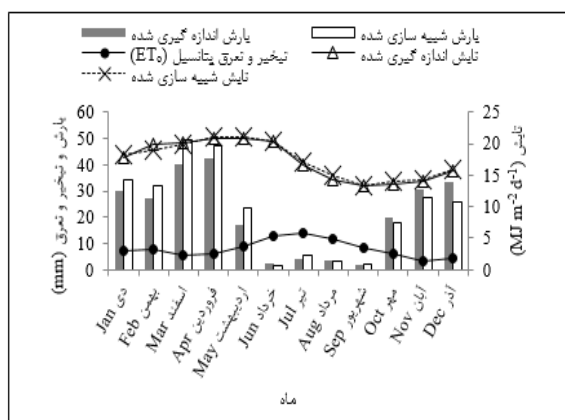
با تغییر روند افزایشی دمای سطحی، تغییرات الگوهای بارشی و تبخیر سطحی از خاک و پوشش گیاهی چرخه هیدرولوژی نیز تحت اثرات منفی این سناریوهای اقلیمی به شدت دست خوش تغییرات فزاینده ای شده است (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹). به عبارت دیگر تغییر الگوی بارش در ارتباط مستقیم با تغییرات دمایی با تأثیر بر میزان سرعت تبخیر سطحی نقش مؤثر در تعیین رژیم رطوبتی بوم نظام هیدرولوژی و

3. Wetterhall et al. (2009)

4. Aridity index

5. (FAO, 1993)

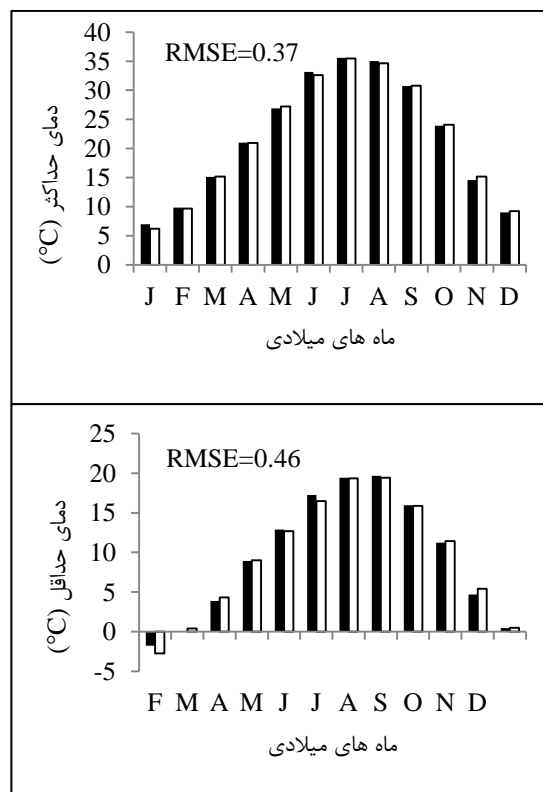
مطابق با شکل (۴) بالاترین مقادیر داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده بارش و تابش روزانه به همراه میزان کمتر تبخیر و تعرق سطحی در ماه های مارچ و آپریل اندازه گیری شدند. در عوض کمترین میزان بارش و تابش روزانه همراه با شدت بیشتر تبخیر و تعرق در ماه های خرداد، تیر، مرداد و شهریور ارزیابی گردید. با توجه به روند افزایشی دما و سرعت بالای تبخیر و تعرق منطقه کرج در تابستان و اثرات منفی آن بر پراکندگی غیریکنواخت بارندگی، مدیریت مؤثر منابع آبی حاصل از بارش های بهاری در شروع فصول رویش (فروردین و اردیبهشت) جهت استحصال اصولی از منابع آبی و پایداری بوم نظام اقلیم-زراعی منطقه حائز اهمیت می باشد. بر اساس گزارشات IPCC چرخه هیدرولوژی با روند افزایشی دمای سطحی، تغییرات الگوهای بارشی و سرعت تبخیر و تعرق دستخوش تغییرات عمده ای شده است (اینگول بلانکو، ۲۰۰۸).



شکل ۴- داده های بارش و تابش اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۵) مرتبط با تغییرات فصلی تبخیر و تعرق پتانسیل (ET<sub>o</sub>)

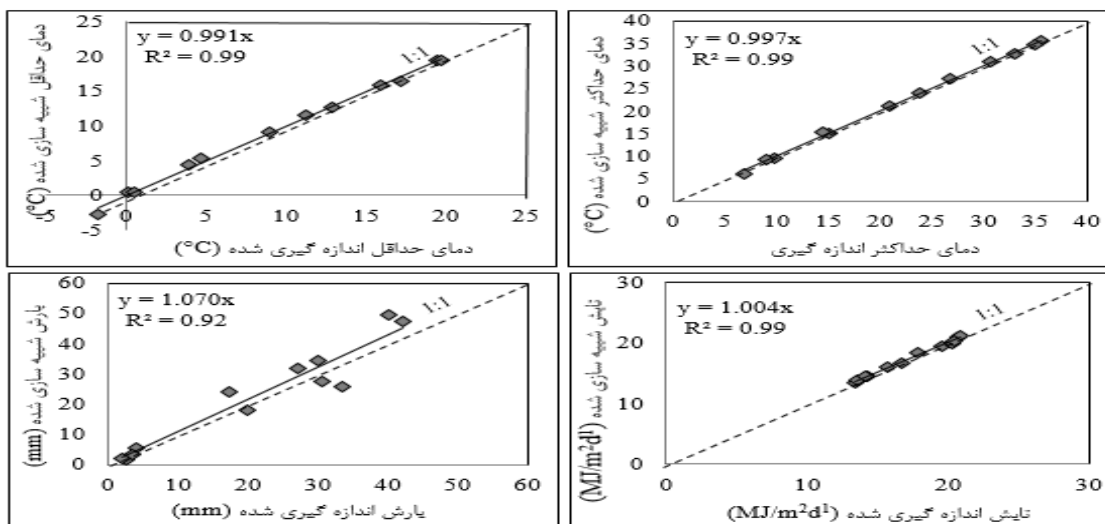
نمودارهای پراکنش مشاهده شده و شبیه سازی شده بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش در دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۵ نشان داد که همبستگی بالایی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده وجود داشت. با این توضیح که مقادیر دمای حداقل و حداکثر بیشترین همبستگی و مقادیر مربوط به بارش کمترین میزان همبستگی را دارا بودند (شکل-۵). این نتایج با مشاهدات دیگر محققان در پیش بینی بلند مدت پارامترهای هواشناسی مشابهت داشت (دوستی و همکاران، ۲۰۱۳).

• میانگین مشاهده شده و شبیه سازی شده متغیرهای جوی از میان عوامل تنش زای محیطی مهم از گازهای گلخانه ای و تنش خشکی، دما نقش عمده ای در تغییرات اقلیمی آینده دارد. از جمله این عوامل می توان به تأثیر دما در تغییرات و طول مدت شب و روز همچنین شدت و مدت آب و هوای سرد و گرم شکل گرفته در یک منطقه اشاره کرد. در واقع دمای محیط به طور فزاینده ای با تأثیر در فرایند های تغییرات فشاری بخار آب و هوا نقش عمده در تداوم هوای سرد و گرم منطقه داشته و از جمله تأثیر گذارترین عامل در ایجاد خرد کلیماها و ماکروکلیما ها به شمار می رود. نمودارهای مربوط به دمای حداقل و حداکثر نشان می دهد که اختلاف بین میانگین های دمای حداقل و حداکثر مشاهده شده و شبیه سازی شده بسیار جزئی بوده و در برخی از ماه ها هم برابر بود. به نحوی که میزان دمای حداکثر مشاهده شده فقط در ماه ژانویه کمی بیش از مقدار شبیه سازی و در ماه های دیگر برابر با مقدار شبیه سازی شده بود. میانگین دمای حداقل در ماه های ژانویه و ژوئن با اختلاف ناچیز بیشتر از مقدار شبیه سازی شده و در ماه های دیگر برابر با مقدار شبیه سازی شده برآورد گردید (شکل-۳).



شکل ۳- داده های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده دماهای کمینه و بیشینه در دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۵). ستون مشکی مقادیر اندازه گیری شده و ستون بی رنگ مقادیر شبیه سازی شده می باشند.

سازگاری با تغییرات اقلیمی و مدیریت مؤثر منابع آبی مستلزم درک صحیحی از روابط پیچیده بین عوامل آب و هوایی و روند تغییر پذیری دوره ای و فصلی الگوهای رطوبتی و دمایی یک منطقه می باشد.



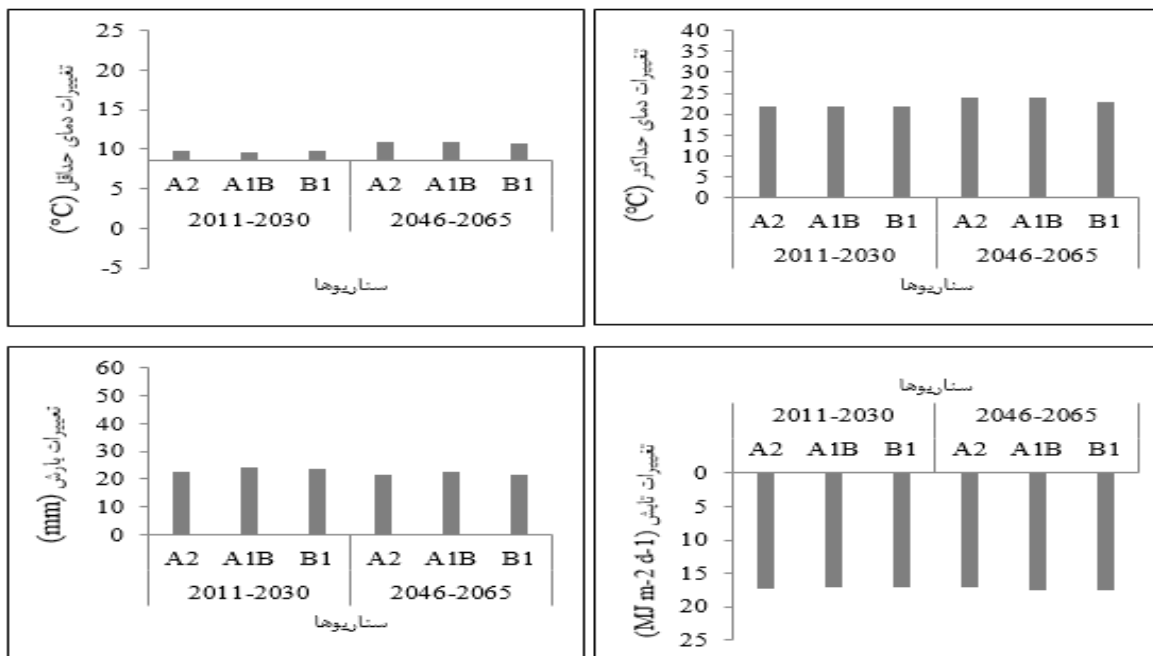
شکل ۵- رگرسیون خطی بین داده های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده متغیرهای دمای حداقل و حداکثر، بارش و تابش در دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۵

۲ درجه سلسیوس در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ تحت سناریوهای A1B و A2 کمترین تغییرات دمای حداقل به میزان ۰/۶ درجه سلسیوس در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریو A1B اتفاق افتاد. همچنین بیشترین تغییرات دمای حداکثر به میزان ۲ درجه سلسیوس در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ تحت سناریوهای A2 و A1B برآورد گردید. بررسی این سه سناریوی انتشار در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ برای متغیر حداکثر دما بیانگر عدم تفاوت آماری معنی دار بین سناریوهای مورد بررسی بود. نتایج حاصل از این آزمایش در تطابق با نتایج مطالعات پیشین بود (عباسی و همکاران، ۱۳۸۸) و (بابائیان و نجفی نیک، ۲۰۰۶).

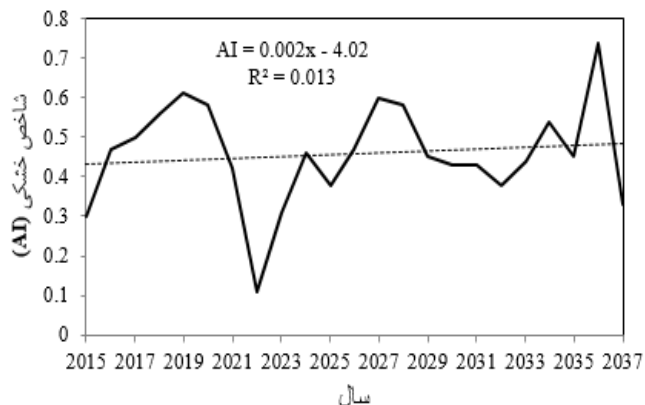
#### • تغییرات آتی عوامل آب و هوایی

پس از مراحل واسنجی و اطمینان از صحت و کارایی مدل در شبیه سازی پارامترهای هواشناسی بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش برای دوره پایه در منطقه کرج، با کمک مدل LARS-WG5 داده های روزانه پارامترهای مذکور تحت سه سناریوی منتخب A2، A1B و B1 از مدل GCM-HadCM3 برای دو سری زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ شبیه سازی شدند. نحوه تغییرات میانگین دمای حداقل و حداکثر هوا در دو دوره مورد بررسی برای سه سناریوهای مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است. از بین سه سناریو مورد بررسی مربوط به دمای حداقل، بیشترین تغییرات دمای حداقل به میزان

شکل ۶- تغییرات ماهانه دمای حداقل و حداکثر، بارش و تابش شبیه سازی شده در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶



منطقه با شیب ملایم از شرایط نیمه خشک به خشک ارزیابی شد (شکل-۷). بنابراین با ادامه روند بی ثبات تغییرات عوامل اقلیمی همچون دما، پراکنش غیر یکنواخت بارندگی و سرعت تبخیر و تعرق وقوع تغییر اقلیم از شرایط نیم خشک به شرایط خشک در بوم نظام اقلیم - زراعی کرج دور از ذهن نخواهد بود. نتایج این آزمایش با نتایج تحقیقات پیشین تأیید می گردد (ساوا و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۷- تغییرات زمانی شاخص خشکی در یک دوره ۲۳ ساله بر اساس داده های شبیه سازی شده بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) در منطقه کرج

#### ۴- نتیجه گیری

مقایسه میانگین های ماهانه مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده متغیرهای اقلیمی بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش با استفاده از شاخص های آماری MAE، RMSE و NSE نشان داد که مدل HadCM3 کارایی لازم را جهت تولید داده های روزانه متغیرهای ذکر شده در منطقه کرج را دارا بوده و می توان با اعمال مدیریت های مختلف بر اساس سناریوهای اقلیمی اقدام به پیش بینی داده های آب و هوایی و تعیین الگوی کشت در منطقه نمود. به طور کلی با افزایش میانگین های دمای هوا و تغییرات الگوهای بارشی، ناپایداری عوامل اقلیمی بیشتر می شود. پیامدهای حاصل از تغییر اقلیم و اثرات فاجعه آمیز آن بر محیط زیست، بخش اقتصادی و امنیت غذایی به طور قابل ملاحظه ای در بسیاری از کشورهای در حال توسعه رو به گسترش هستند. با این حال ابعاد وقوع این فاجعه به لحاظ پیچیدگی فرایند اثرگذاری فیدبک ها در اکوسیستم و بخش اقتصادی مشخص نیست. همچنین برآورد دقیق شاخص خشکی و تعیین اقلیم منطقه در محدوده خشک طبق رده بندی فائو، لزوم اتخاذ به موقع تدابیر سازگاری جهت تعدیل اثرات منفی تغییر اقلیم نقش عمده ای در بهره وری اقتصادی از منابع آبی و پایداری بوم نظام اقلیم-زراعی منطقه کرج خواهد داشت.

در بین سناریوهای انتشار، دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ از تغییرات بارش بیشتری برخوردار بود. به نحوی که بیشترین اختلاف بارش به میزان ۱۳ درصد برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت سناریو AIB و کمترین اختلاف بارش به میزان ۲ درصد برای دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تحت سناریو B1 نسبت به دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۵) پیش بینی گردید (شکل ۱۲). محققان دیگر با ریز مقیاس کردن متغیرهای اقلیمی ۳۷ ایستگاه هواشناسی ایران در دوره های ۲۰۴۰-۲۰۱۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ تحت مدل CGCM 3.1 نشان دادند که نواحی مرطوب ایران در آینده مقدار بارش بیشتر و نواحی خشک مقدار بارش کمتری را دریافت خواهند کرد (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹). در حالی که آزمایشات دیگر کاهش ۹ درصدی بارش در ایران و افزایش میانگین سالانه دما در حدود ۰/۵ درجه سانتی گراد را نشان دادند (عباسی و همکاران، ۱۳۸۸). تغییرات تابش بر اساس پیش بینی های مدل LARS-WG5 در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ برای سناریوهای AB1 و B1 و در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ برای سناریو A2 به میزان ناچیزی کاهش نشان داد (شکل-۱۳). تغییرات این عامل جوی برای دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تحت سناریو های A1B و B1 به میزان ۰/۵ و برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت سناریو A2 به میزان ۰/۴ مگاژول بر متر مربع در روز پیش بینی گردید.

#### • تغییرات بعد زمانی شاخص خشکی در منطقه کرج

تبخیر و تعرق مرکب از دو فرایند جداگانه است که از جمله عوامل اصلی تأثیرگذار در چرخه هیدرولوژی محسوب می شوند. نقل و انتقال آب از طریق این دو فرایند از سطح خاک به شکل تبخیر و از سطح گیاه به شکل تعرق صورت می گیرد. نقش این عوامل در کنترل و انتقال رطوبت به جو زمین با تأثیر بر مؤلفه های اصلی اکوسیستم خاکی همچون سیلاب، رطوبت خاک و رشد گیاهان از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد (فیشر و همکاران، ۲۰۱۱<sup>۱</sup>). بر این اساس و با توجه به اثر متقابل بارندگی و تبخیر و تعرق و تأثیر آن بر کم آبی، شاخص خشکی (AI) و متعاقباً نوع اقلیم منطقه اندازه گیری و مشخص می شود. در حالتی که AI بیشتر از حد نرمال برای یک منطقه اندازه گیری شود، نوع اقلیم منطقه در زمره مناطق مرطوب طبقه بندی می شود (لی و همکاران، ۲۰۱۷<sup>۲</sup>). شاخص AI علاوه بر تعیین الگوهای رطوبتی به منظور پهنه بندی بوم زیست های طبیعی و کشاورزی یک منطقه نیز مورد استفاده قرار می گیرد (پاپاریسوز و همکاران، ۲۰۱۶). با احتساب میانگین بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، میانگین شاخص خشکی سالانه برای منطقه کرج در دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۵) به میزان ۰/۴۰ برآورد گردید. بنابراین با توجه به رده بندی فائو، منطقه کرج در ردیف اقلیم خشک و نیمه خشک طبقه بندی می شود. براساس نتایج رگرسیون خطی در یک دوره ۲۲ ساله (۲۰۲۶-۲۰۱۵)، شدت خشکی به میزان ۰/۰۰۲ و تغییرات شاخص خشکی سالانه به میزان ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ در این آزمایش اندازه گیری شد که در نتیجه بر اساس طبقه بندی فائو اقلیم

1. Fisher et al. (2011)

2. Li et al. (2017)

منابع

- بابائیان، ا.، نجفی نیک، زهرا. (۱۳۸۵). معرفی و ارزیابی مدل LARS-WG برای مدل سازی پارامترهای هواشناسی استان خراسان دوره آماری ۲۰۰۳-۱۹۶۱، فصلنامه نیوار، ۶۲ و ۶۳، ۴۹-۶۵.
- دوستی، م.، حبیب نژاد روشن، م.، شاهدهی، کاکا، میر یعقوب زاده، م. ح. (۱۳۹۲). بررسی شاخص های اقلیمی حوضه آبخیز تهر استان گلستان در شرایط تغییر اقلیم با کاربرد مدل LARS-WG، مجله فیزیک زمین و هوا، ۳۹ (۴)، ۱۷۷-۱۸۹.
- عباسی، ف.، ملیوسی، ش.، بابائیان، ا.، اثمیری، م.، برهانی، ر. (۱۳۸۸). پیش بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ با استفاده از ریز مقیاس نمایی آمار خروجی مدل ECHO-G، نشریه آب و خاک، ۲۴، ۲۳۳-۲۱۸.
- علیزاده، امین. (۱۳۸۶). اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ بیست و دوم، انتشارات دانشگاه امام رضا.
- علیزاده، ا.، سیاری، ن.، حسامی کرمانی، م. ر.، بنایان اول، م. فریدحسینی، ع. (۱۳۸۹). بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیمی بر منابع و مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کشف رود)، آب و خاک، ۲۴ (۴).
- مساح بوانی، ع. ر.، مرید، س. (۱۳۸۴). اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده رود اصفهان، نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۹ (۴)، ۱۷ تا ۲۷.
- مرادی، ر.، کوچکی، ع.، نصیری محلاتی، م. (۱۳۹۲). تاثیر تغییر اقلیم بر تولید ذرت و ارزیابی تغییر کاشت بعنوان راهکار سازگاری در شرایط آب و هوایی مشهد، مقاله پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۳ (۴)، ۱۳۰-۱۱۱.
- Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S. and Yang, H. 2009, Assessing the impact of climate change on water resources in Iran, *Water Resources Research*, 45: 10-34.
- Babaeian, I., Kwon, WT. and Im, ES. 2004, Application of weather generator technique for Climate change assessment over Korea, Korea Meteorological Research Institute, climate research lab, pp. 98.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. and Palutikof, J.P (Eds.). 2008, *Climate Change and Water*, Technical Paper, International Panel on Climate Change (IPCC) Secretariat, Geneva.
- FAO. 1993, *Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries*, Forestry Paper 112, Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fisher, J.B., Whittaker, R.J. and Malhi, Y. 2011, ET come home: Potential evapotranspiration in Geographical Ecology, *Global Ecological Biogeography*, 20: 1-18.
- Ingol-Blanco, E. 2008, *Climate Impacts on the Water Resources, An overview of Global Impacts and Technique to Assess at Local Scale*, University of Texas at Austin.
- IPCC. 2007, *Synthesis report*, In: Metz, ORD; Bosch, PR.; Dave, R. and Meyer, LA. (Eds.), *Climate Change. Fourth Assessment Report*, Cambridge University Press, Cambridge. UK.
- Li, Y., Feng, A., Liu, W., Ma, X. and Dong, G. 2017, Variation of Aridity Index and the Role of Climate Variables in the Southwest China, *Water* 2017, 9 (10): 743.
- Mavromatis, T.h. and Hansen, J.W. 2001, Inter annual variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators, *Agricultural and forest meteorology*, 109: 283-296.
- Olesen, J.E, Trnka, M, Kersebaum, K.C. and et al. 2011, Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change, *Eur J Agron*, 34: 96-112.
- Paparrisoz, S., Maris, F. and Matzarakis, A. 2016, Integrated analysis and mapping of aridity over Greek areas with different climate conditions, *Global Nest Journal*, 18(1): 131-145.
- Prudhomme, C., Wilby, R.L., Crooks, S. and et al. 2010, Scenario-neutral approach to climate change impact studies, application to flood risk. *J. Hydrol*, 390: 198-209.
- Sawa, B.A., Ati, O.F., Jayeoba, I.A. and Oladipo, E.O. 2015, Trends in aridity of the arid and semi-arid regions of northern Nigeria, *Journal of Environment and Earth Science*, 5 (10): 61-68.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M. 2002, *LARS-WG a stochastic weather generator for use in climate impact studies, User's manual*, 3: 27.
- Wetterhall, F., Bardossy, A., Chen, D., Halldin, S. and Ch, XU. 2009, Statistical downscaling of daily precipitation over Sweden using GCM output, *Theor. Appl. Climatol*, 96: 95-103.
- Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hasanzadeh, Y. and Kanani, R. 2011, Impacts of climate change on runoffs in east Azerbaijan, Iran, *Global and Planetary Change*. In Press, Corrected Proof, Available online 30 June 2011.