

مقایسه روش‌های کوچک‌مقیاس کردن و مدل‌های AOGCM در بررسی تأثیر تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای

علیرضا مساح بوانی^{۱*}، سعید مرید^۲ و محسن محمدزاده^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه آمار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۱۰/۳، پذیرش نهایی: ۸۸/۱۲/۱۸)

چکیده

در تحقیقات تغییر اقلیم، استفاده از خروجی مدل‌های گوناگون AOGCM، روش‌های کوچک‌مقیاس کردن و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارند. در این مقاله سعی شده است تا چارچوبی برای بررسی وضعیت اقلیم منطقه‌ای تحت تأثیر روش‌های گوناگون کوچک‌مقیاس کردن و مدل‌های AOGCM عرضه شود. یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM (Atmosphere-Ocean General circulation Model)، کم بودن درجه تفکیک آنها (Resolution)، نسبت به منطقه مورد بررسی است که کوچک‌مقیاس کردن (Downscaling) آنها را با استفاده از روش‌های مناسب، ضروری می‌سازد. در این تحقیق عملکرد دو روش زمین‌آماری کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله (Inverse Distance Weighting, IDW) در کوچک‌مقیاس کردن متوسط ماهانه دما و بارندگی دوره پایه ۳۰ ساله (۱۹۷۱-۲۰۰۰) مدل AOGCM - عرضه شده در سومین گزارش IPCC- شامل: ECHAM4/ OPOYC3, GFDL R30, HadCM3, CSIRO MK2, CGCM2, CCSR/NIES- با تعداد سلول‌های محاسباتی گوناگون در اطراف موقعیت موردنظر که حوزه آبریز زاینده‌رود بوده است مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت روش IDW با ۸ سلول محاسباتی انتخاب شد. سپس بر این اساس، سناریوهای فصلی تغییر اقلیم دما و بارندگی در سه دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ میلادی از خروجی مدل‌های AOGCM فوق تحت سناریوهای موجود SRES (Special Report on Emission Scenario) برای منطقه مورد بررسی، کوچک‌مقیاس شدند. نتایج نشان می‌دهد که صرف استفاده از خروجی یک مدل AOGCM تحت یک سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای نمی‌تواند نتایجی منطقی برای برنامه‌ریزی‌های مربوط به کاهش اثرات مخرب پدیده تغییر اقلیم در پی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، AOGCM، کوچک‌مقیاس کردن، حوزه زاینده‌رود

Evaluating different AOGCMs and downscaling procedures in climate change local impact assessment studies

Massah Bavani, A. R.¹, Morid, S.² and Mohammadzadeh, M.³

¹Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of water resources, College of agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³Associate Professor, Department of Statistics, Faculty of Mathematical science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 23 Dec 2008, Accepted: 9 March 2010)

Abstract

Due to the growth of industries and factories, deforestation and other environmental degradation as well as greenhouse gases have been increasing greenhouse gases on the Earth's surface in recent decades. This increase disturbs the climate of the Earth and is

called climate change. An Increase in greenhouse gases in the future could exacerbate the climate change phenomenon and have several negative consequences on different systems, including water resources, agriculture, environment, health and industry. On the other hand to evaluate the destructive effects of climate change on different systems, it is necessary to initially study the area affected by climate change phenomena. Although the effect of climate change on different fields has been studied up to now, most of these studies only used a downscaling method on the AOGCM output model. In climate change studies, using different AOGCM models, downscaling methods and scenarios of greenhouse gas emissions affect the final results. This paper aims to present a framework to assess the effect of using different AOGCM models and downscaling methods on the regional climate. One of the major problems in using the output of AOGCMs (Atmosphere-Ocean General circulation Model), is their low degree of resolution compared to the study area so to make them appropriate for use, downscaling methods are required. In this study the performance of kriging and IDW (Inverse Distance Weighting,) in downscaling monthly average of temperature and rainfall of 7 model AOGCM - presented in the IPCC Third Report- including CCSR / NIES: CGCM2, CSIRO MK2, ECHAM4 / OPOYC3, GFDL R30, HadCM3, and NCAR DOE PCM were evaluated using several computational cells around the desired position of the river basin. This performance was evaluated by the coefficient of determination (R^2) and the Root Mean Square Error (RMSE) between observed and downscaled data. Finally, the IDW method with 8 computational cells was selected. Then accordingly, seasonal climate change scenarios of temperature and precipitation in the three periods 2039-2010, 2069-2040 and 2099-2070 from 7 AOGCM output models under the SRES (Special Report on Emission Scenario) were downscaled for the study area.

Based on the findings of this study the following conclusions are inferable. (1) Results of kriging and IDW with a different number of pixels around the original pixel did not show a significant difference. Therefore, because of its simplicity, the IDW method with 8 pixels was used to downscale the climate change scenarios of temperature and precipitation in future periods. (2) In all seasons and periods the average temperature of future increase was compared to the baseline period, so that in the period 2070 to 2099 the increase is more than the two other periods, while for rainfall, both reduction and increased amounts for future periods are predictable. According to the temperature results, in the 2070- 2099 period winter temperature would increase 2 to 7 ° C compared to baseline period in the study area, while for rainfall, this change is between -40 to +30 percent. On the other hand for the other seasons in the future period similar results were also derive. 3) The results indicate that the difference of climate change scenarios resulting from different AOGCM models under the same emission scenarios is more than the difference resulting from an AOGCM model under different emission. (4) Finally we can conclude that using data from only one AOGCM model and an emission scenario can force unrealistic results for related projects dealing with the destructive effects of climate change phenomena.

Key words: Climate Change, Kriging, IDW, Downscaling, Zayandeh Rud basin

۱ مقدمه

زمین شده که از آن به تغییر اقلیم (Climate Change) یاد می‌شود (International panel for Climate change, 2007). افزایش گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی می‌تواند پدیده تغییر اقلیم را تشدید کند و تبعات

رشد صنایع و کارخانه‌ها از یک طرف و جنگل زدائی و تخریب محیط زیست از طرف دیگر طی دهه‌های اخیر باعث افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای در سطح کره زمین شده است. این افزایش باعث برهم خوردن اقلیم کره

جونز و پیچ، ۲۰۰۱). به منظور برطرف کردن نبود پیوستگی در تغییرات بین متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده در سایت‌های نزدیک به هم که در دو سلول متفاوت محاسباتی قرار می‌گیرند، از روش درون‌یابی سلول‌های مجاور منطقه مورد بررسی استفاده می‌شود (بارو و همکاران، ۱۹۹۶). مسئله مهم در این روش تعداد سلول‌های مورد نیاز در اطراف سلول اصلی برای محاسبات درون‌یابی است. در تحقیق وُن استورج و همکاران (۱۹۹۳)، روشن شد که برای محاسبات درون‌یابی، به اطلاعات حداقل ۴ سلول در اطراف سلول اصلی احتیاج است.

بررسی متغیرهای اقلیمی حاصل از مدل‌های AOGCM در سطوح منطقه‌ای نشان می‌دهد که این مدل‌ها به دلیل استفاده از روش‌های متفاوت در پارامتر کردن (Parameterization) فرایندهای کوچک‌مقیاس (بارندگی و مانند آن)، نتایج یکسانی را از شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی مشابه در منطقه مورد نظر به دست نمی‌دهند (جونز، ۲۰۰۱). لذا به منظور در نظر گرفتن تاثیر خروجی مدل‌های گوناگون AOGCM در تحقیقات تغییر اقلیم، لازم است تا از خروجی تعداد زیادتری از این مدل‌ها استفاده شود.

در این تحقیق، سعی شده است تا چارچوبی برای بررسی تاثیر پدیده تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی در مقیاس‌های منطقه‌ای با در نظر گرفتن روش‌های گوناگون کوچک‌مقیاس کردن و مدل‌های گوناگون AOGCM در دوره‌های آتی عرضه شود. در این خصوص، از حوزه آبریز زاینده‌رود اصفهان در حکم منطقه تحقیقاتی انتخاب شده است.

۲ مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه تحقیقاتی و منابع داده‌ها

حوضه زاینده‌رود اصفهان در مرکز ایران واقع شده است

منفی گوناگونی بر سامانه‌های گوناگون از جمله منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، بهداشت و صنعت و اقتصاد بر جای گذارد. از طرف دیگر به منظور بررسی آثار مخرب آن بر سامانه‌های گوناگون، لازم است تا در ابتدا وضعیت اقلیم منطقه مورد بررسی، تحت تاثیر پدیده تغییر اقلیم مورد تحقیق قرار گیرد.

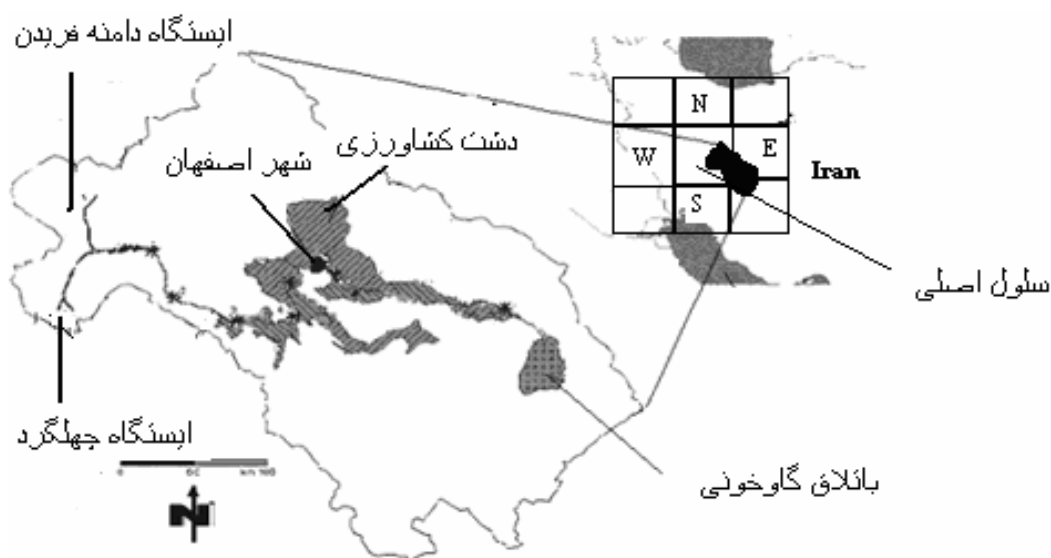
اگرچه تاکنون تحقیقات گوناگونی در زمینه ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم صورت پذیرفته، ولی در اکثر این تحقیقات، فقط تنها از یک روش کوچک‌مقیاس کردن (Downscaling) و یا خروجی یک مدل AOGCM استفاده شده است (ویلی و هریس، ۲۰۰۶؛ جونز، ۲۰۰۰). این در حالی است که نادیده گرفتن تاثیر روش‌های دیگر موجود در مراحل متفاوت ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم، باعث می‌شود تا از میزان قطعیت خروجی نهایی سامانه کاسته شود. لذا در این تحقیقات، لازم است تا تاثیر روش‌های گوناگون بر سامانه مورد تحقیق، بررسی شود.

بهترین وسیله برای بررسی و تحقیق تاثیر گازه‌های گلخانه‌ای بر جو زمین در مقیاس منطقه‌ای، کاربرد مدل‌های AOGCM است (ویلی و هریس، ۲۰۰۶؛ میشل، ۲۰۰۳). یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM در ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم در سطوح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آنها، نسبت به منطقه مورد بررسی است. روش‌های گوناگونی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های AOGCM وجود دارد که به این روش‌ها کوچک‌مقیاس کردن گفته می‌شود (ویلی و همکاران، ۱۹۹۸). از بین این روش‌ها روش استفاده از اطلاعات سلول اصلی برای تجزیه و تحلیل‌های تغییر اقلیم مناسب‌تر است (مساح بوانی، ۱۳۸۵). در این روش متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده با AOGCM از اطلاعات مربوط به سلولی استخراج می‌شود که منطقه (ایستگاه) مورد بررسی در آن قرار می‌گیرد (ویلی و هریس، ۲۰۰۶؛

می‌کند، هستند (مساح یوانی، ۱۳۸۴ الف و ب) و از این رو اطلاعات آنها برای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های این دو ایستگاه برای سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۷۱ تهیه شد که این دوره به‌منزله دوره پایه این تحقیق انتخاب شد. همچنین، داده‌های تغییر اقلیم ۷ مدل AOGCM در دوره پایه و افق قرن بیست و یکم تحت سناریوهای موجود SRES (جدول ۱) تهیه شد.

(شکل ۱). بارندگی در حوضه از غرب با ۱۴۰۰ میلی‌متر تا شرق - باتلاق گاوخونی - تا کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در تغییر است. برای دمای حوضه الگویی شبیه به بارندگی قابل ملاحظه است. به طوری که میانگین دمای سالانه از ۶ درجه سلسیوس در غرب به ۱۵ درجه در محل باتلاق گاوخونی می‌رسد (مرید و همکاران، ۲۰۰۳).

داده‌های دمای ایستگاه دامنه فریدن و بارندگی ایستگاه چهل‌گرد (شکل ۱) معرف‌های خوبی از وضعیت اقلیمی بخشی از حوضه که بیشترین منابع آبی را تولید



شکل ۱. موقعیت حوضه زاینده‌رود اصفهان و پیکسل‌های یک مدل AOGCM.

جدول ۱. مدل‌های AOGCM به‌کارگرفته شده در این تحقیق.

نام مدل	اجراهای موجود از سناریوهای گازهای گلخانه‌ای SRES
CCSR / NIES	A1FI, A2, B1, B2
CGCM2	A2, B2
CSIRO MK2	A2, B1, B2
ECHAM4 / OPOYC3	A2, B2
GFDL R30	A2, B2
HadCM3	A2, B2
NCAR DOE PCM	A2, B2

۲-۲ کوچک‌مقیاس کردن
در این تحقیق از دو روش زمین‌آماري کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله (Inverse Distance Weighting method, IDW) با تعداد متفاوت از سلول‌های محاسباتی برای کوچک‌مقیاس کردن خروجی مدل‌های AOGCM مورد استفاده قرار می‌گیرد، که در زیر، شرح مربوط به هر کدام آورده می‌شود.

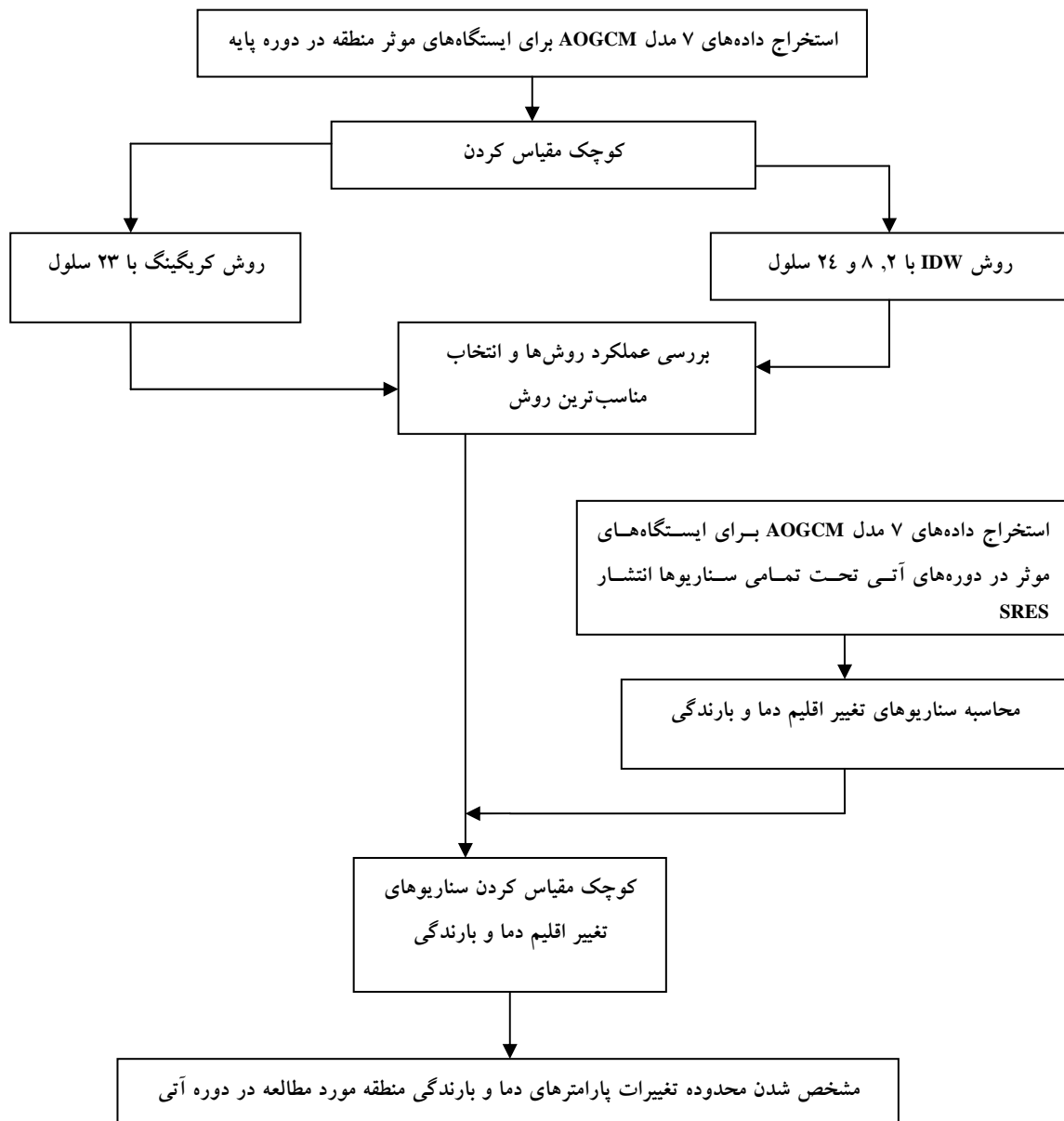
به‌منظور بررسی وضعیت آبی اقلیم یک منطقه تحت تاثیر افزایش گازهای گلخانه‌ای، لازم است مراحل زیر اجرا شود:

۱- بررسی روش‌های گوناگون کوچک‌مقیاس کردن و انتخاب روشی با بهترین عملکرد.

۲- تولید سناریوهای تغییر اقلیم منطقه مورد تحقیق.

شکل ۲، نمودار جریانی مراحل محاسباتی مربوط را

نشان می‌دهد.



شکل ۲. الگوریتم مراحل محاسباتی بررسی تاثیر پدیده تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای.

۲-۲-۲ روش کریجینگ (Kriging)

در این روش ابتدا می‌باید ساختار همبستگی مکانی بین نقاط موجود مشخص شود. این امر با استفاده از تغییرنگار (Variogram) صورت می‌گیرد. در واقع تغییرنگار کمیته است برداری که درجه همبستگی و غیرهمسان بودن تغییرات را نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر تغییرنگار نشان‌دهنده همبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده برحسب مربع تفاضل دو نقطه با توجه به جهت و فاصله بین آنها است. برای مثال اگر $Z(x)$ بیانگر یک متغیر مکانی در نقطه x باشد، برای محاسبه تغییرنگار از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

در این رابطه h فاصله بین دو متغیر مکانی در یک جهت خاص، n تعداد زوج مشاهدات مجزایی است که به فاصله h از یکدیگر قرار دارند و $2\gamma(h)$ تابع تغییرنگار است. برای ترسیم تغییرنگار، لازم است مقادیر $2\gamma(h)$ به ازای مقادیر گوناگون h در فضای داده‌ها محاسبه و در یک نمودار ترسیم شود. به نمودار به دست آمده تغییرنگار تجربی اطلاق می‌شود. مرحله بعدی برازش مدل‌های نظری تغییرنگار به مدل تجربی است. مدل‌های تغییرنگار گوناگونی عرضه شده است که از جمله می‌توان به مدل خطی، مدل نمایی، مدل لگاریتمی، مدل کروی و مدل گوسی اشاره کرد. شرح بیشتر این مدل‌ها در (کرسی، ۱۹۹۳) آمده است.

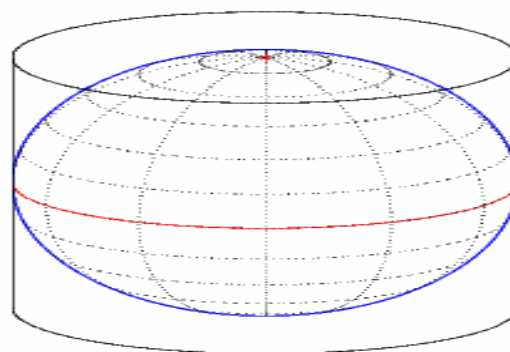
کریجینگ برآوردگری خطی نااریب (Unbias) با کمترین مقدار واریانس برآورد است که به هر یک از داده‌ها، وزن (λ_i) نسبت داده می‌شود، به گونه‌ای که ترکیب خطی آنها نااریب و دارای کمترین واریانس شود. رابطه کریجینگ به صورت زیر است:

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

۱-۲-۲ تبدیل سامانه تصویر نقشه (Map

Projection)

در روش‌های زمین‌آماري، فرض بر این است که داده‌ها دارای مختصات دو بُعدی در دستگاه مختصات دکارتی هستند. اگرچه کاربرد این روش‌ها برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در مناطق محدود جغرافیایی، خطای چندان زیادی ایجاد نمی‌کند، ولیکن در محدوده‌های وسیع جغرافیایی به دلیل یکسان نبودن مساحت تحت پوشش داده‌ها، نمی‌توان به طور مستقیم از روش‌های زمین‌آماري استفاده کرد. بنابر این به دلیل آنکه خروجی مدل‌های AOGCM همراه با مختصات مکانی روی کره زمین (طول و عرض جغرافیایی) داده می‌شود، لازم است تا قبل از هرگونه تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماري، این مختصات به سامانه تصویر هم‌مساحت تبدیل شود. در این تحقیق از روش مرسوم سامانه تصویر استوانه‌ای هم‌مساحت (Equal-Area Cylindrical projection) استفاده می‌شود. در این روش کره زمین در یک پوش استوانه‌ای بگونه‌ای قرار می‌گیرد که خط استوا با استوانه مماس و نقطه $(0,0)$ جغرافیایی بر مبدا مختصات دکارتی منطبق شود (شکل ۳). در این روش مساحت سلول‌های روی کره زمین بگونه‌ای وزن‌دهی می‌شوند تا در هنگام تصویرسازی در سامانه تصویر استوانه‌ای دارای مساحت‌های یکسان شوند (مساح‌بوانی، ۱۳۸۵).



شکل ۳. تصویرسازی کره زمین روی استوانه.

نمای وزن‌دهی ρ مشخص‌کننده نرخ کاهش وزن داده شده به نقاط، نسبت به افزایش فاصله آن‌ها از نقطه برآورد شده است. این مقدار معمولاً بین ۱ تا ۵ انتخاب می‌شود. بدیهی است هرچه مقدار ρ بیشتر انتخاب شود، میزان تأثیر نقاط دورتر بر مقدار برآورد شده نقطه مورد نظر کمتر خواهد بود. همچنین با توجه به رابطه ۴ مشخص می‌شود که اگر نقطه برآورد شده منطبق بر نقاط نمونه‌گیری شده باشد، در صورت نبود فاکتور s مخرج کسر صفر و یا نزدیک به صفر و مقدار کمیت در نقطه برآورد شده غیرواقعی خواهد شد. لذا انتخاب $s > 0$ باعث می‌شود تا این وضعیت تعدیل شود (کرسی، ۱۹۹۳).

۳-۲ ساخت سناریوهای تغییر اقلیم از مدل‌های AOGCM

به دلیل بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM و معرفی نشدن رخساره‌های موثر (اروگرافی) بر متغیرهای سطحی جو (دما و بارندگی) در این مدل‌ها، شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی (نوسانات روزانه یا ماهانه) این متغیرها همراه با خطا است، به گونه‌ای که مقایسه خروجی این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی، نشان از وجود تفاوت در نوسانات متغیر مورد بررسی دارد. از طرف دیگر مقایسه میانگین بلندمدت این متغیرها با داده‌های مشاهداتی، نشان از توانایی زیاد این مدل‌ها در شبیه‌سازی میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی دارد. لذا به منظور حذف اغتشاش‌های غیر معتبر درون‌مدلی این مدل‌ها (Noise) در محاسبات، معمولاً به جای استفاده مستقیم از داده‌های AOGCM در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌ای این داده‌ها استفاده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که بهترین طول دوره آماری برای محاسبه سیگنال‌های تغییر اقلیم ۳۰ سال است (آی پی سی سی تی جی سی آی، ۱۹۹۹).

با در دست داشتن شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره‌های گذشته از راه مدل‌های AOGCM، می‌توان با

در این رابطه Z^* مقدار محاسباتی متغیر مکانی، λ_i وزن آماری که به نمونه (x_i) نسبت داده می‌شود و $Z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی موردنظر در نقطه (x_i) است. ثابت می‌شود (کرسی، ۱۹۹۳) که به منظور ناریب بودن رابطه (۲) می‌باید مجموع وزن آماری نسبت داده شده به نمونه‌ها (λ_i) برابر یک باشد. از طرف دیگر رابطه واریانس برآورد به صورت زیر قابل استنتاج است:

$$\sigma_E^2 = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{oi} - \gamma_o - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \gamma_{oij} \quad (3)$$

که در آن، σ_E^2 واریانس برآورد، λ_i وزن داده‌ها، γ_o مقدار تغییرنگار به ازای $h=0$ مقدار تغییرنگار بین نقطه موردنظر و داده‌ها و γ_{oij} مقدار تغییرنگار بین نمونه‌ها است. حال برای اینکه واریانس برآورد حداقل شود، لازم است تا تابع σ_E^2 برحسب ضرایب کریجینگ (λ_i) حداقل شود که از روش ضریب لاگرانژ قابل حل است (کرسی، ۱۹۹۳).

۳-۲-۲ روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)

در روش IDW فرض بر این است که نقاط نزدیک به نقطه مورد درون‌یابی، نسبت به نقاط دورتر، تأثیر بیشتری بر مقدار کمیت مورد درون‌یابی دارند. در این روش، کمیت موردنظر براساس مقادیر این کمیت در دیگر نقاط محدوده، به صورت زیر برآورد (درون‌یابی) می‌شود:

$$Z^*(x_j) = \frac{\sum \frac{Z(x_i)}{(h_{ij} + s)^\rho}}{\sum \frac{1}{(h_{ij} + s)^\rho}} \quad (4)$$

که در آن، $Z^*(x_j)$ مقدار کمیت برآورد شده در نقطه j ، $Z(x_i)$ مقدار کمیت اندازه‌گیری شده در نقطه x_i ، h_{ij} فاصله بین نقطه $Z^*(x_j)$ و $Z(x_i)$ ، فاکتور همواری (Smoothing) و ρ نمای وزن‌دهی است.

بارندگی ماهانه در دوره پایه براساس اطلاعات مدل‌ها محاسبه شد. پس از آن با استفاده از روش Equal-Area Cylindrical projection مختصات جغرافیایی سلول‌های محاسباتی همه ۷ مدل AOGCM به مختصات دکارتی تبدیل شد.

در روش کربجینگ در ابتدا با در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به میانگین دما و بارندگی پیکسل اصلی و ۲۴ پیکسل در اطراف آن در دوره پایه، نیم‌تغییرنامه‌های (Semivariograms) گوناگونی شامل لگاریتمی، کروی، نمایی، خطی و گوسی مورد آزمون قرار گرفت (انتخاب ۲۴ پیکسل بدین دلیل است که این کمترین اطلاعات لازم برای آزمون نیم‌تغییرنا بود). سپس مقادیر میانگین دما و بارندگی ماهانه به ترتیب برای موقعیت ایستگاه‌های دامنه‌فریدن و چهل‌گرد کوچک مقیاس شد.

در روش IDW استفاده از تعداد کمتر از ۲۴ پیکسل نیز مقدور بود و بدین ترتیب، ترکیب ۱ پیکسل در شمال و ۱ پیکسل در جنوب ((IDW(NS))، یک پیکسل در شرق و یک پیکسل در غرب ((IDW(EW))، ۸ پیکسل در اطراف ((IDW(8))، و ۲۴ پیکسل در اطراف ((IDW(24)) برای درون‌یابی میانگین‌های دما و بارندگی استفاده شد.

عملکرد هر کدام از روش‌ها به وسیله ضریب تعیین (R2) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های کوچک مقیاس شده و مشاهده شده در دو ایستگاه، مورد مقایسه قرار گرفت (جدول‌های ۲ و ۳). همچنین در این جدول‌ها مقایسه بین خروجی مدل‌های AOGCM بدون کوچک مقیاس کردن (Main Box) و داده‌های مشاهده‌ای نیز آورده شده است.

جداول ۲ و ۳ رفتار روش‌های گوناگون کوچک مقیاس کردن را نشان می‌دهد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های AOGCM عملکرد بهتری در شبیه‌سازی دما نسبت به بارندگی دارند؛ ضمن اینکه نتایج آنها هم تفاوت محسوسی ندارد. ولی در بارندگی

محاسبه تغییرات متغیر اقلیمی مورد نظر در دوره‌های آتی نسبت به دوره گذشته، سناریوی تغییر اقلیم آن متغیر را به دست آورد. در این حالت دما از تفاوت بین دو متغیر و برای بارندگی از نسبت بین آنها استفاده می‌شود (روابط ۵ و ۶).

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base, i}) \quad (5)$$

$$\Delta P_i = \left(\frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۵) $\bar{T}_{GCM, fut}$ میانگین ۳۰ ساله دما، شبیه‌سازی شده با AOGCM در دوره‌های آتی (مانند ۲۰۱۰-۲۰۳۹)، $\bar{T}_{GCM, base}$ میانگین ۳۰ ساله دما، شبیه‌سازی شده با AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) و زیرنویس (i) مربوط به ماه‌های سال است. رابطه ۶ مربوط به بارندگی (P) است و در آن همه زیرنویس‌ها شبیه به رابطه ۱ معرفی می‌شود.

برای این تحقیق، این مقادیر برای سه افق زمانی ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ و به صورت فصلی برآورد شد.

۳ نتایج

به منظور کوچک مقیاس کردن خروجی مدل‌های AOGCM برای حوضه زاینده‌رود، در ابتدا سری زمانی ماهانه داده‌های دما و بارندگی مربوط به پیکسلی که موقعیت مکانی ایستگاه‌های دامنه فریدن و چهل‌گرد در آن قرار می‌گیرند (پیکسل اصلی) از داده‌های ۷ مدل AOGCM (جدول ۱) در دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ استخراج شد. سپس به منظور درون‌یابی، اطلاعات مربوط به تعداد ۲، ۸ و ۲۴ پیکسل در اطراف پیکسل اصلی نیز از این مدل‌ها استخراج شد (موقعیت ۸ پیکسل در اطراف پیکسل اصلی به طور طرحوار در شکل ۱ نشان داده شده است). سپس برای هر سلول، میانگین درازمدت ۳۰ ساله دما و

تفاوت‌ها آشکارتر می‌شود و HadCM3 بهترین عملکرد از خروجی یک مدل AOGCM مد نظر باشد، در شبیه‌سازی بارندگی را دارد. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که تنها استفاده از خروجی یک مدل AOGCM مد نظر باشد، مدل HadCM3 برای این منطقه تحقیقاتی، قابل پیشنهاد خواهد داشت.

جدول ۲. عملکرد روش‌های گوناگون کوچک‌مقیاس کردن داده‌های دما.

روش کوچک‌مقیاس کردن مدل	KRIG(24)		IDW(24)		IDW(8)	
	R ² (%)	RMSE (°c)	R ² (%)	RMSE (°c)	R ² (%)	RMSE (°c)
CCSR/NIES	97.89	11.09	97.82	11.49	97.73	11.67
CGCM2	99.63	2.13	99.58	2.57	99.54	2.69
CSIRO MK2	97.99	4.11	98.04	3.01	98.03	2.98
ECHAM4	99.20	4.73	99.18	5.70	99.17	5.66
GFDL R3	98.78	6.97	98.86	6.91	98.85	6.92
HADCM3	99.02	2.17	99.08	3.88	99.01	3.59
NCAR	99.18	1.77	99.23	1.31	99.22	1.32
روش کوچک‌مقیاس کردن مدل	IDW(EW)		IDW(NS)		Main grid box	
	R ² (%)	RMSE (°c)	R ² (%)	RMSE (°c)	R ² (%)	RMSE (°c)
CCSR/NIES	97.14	12.79	97.70	11.72	97.12	12.82
CGCM2	99.07	3.18	99.14	3.41	98.76	4.20
CSIRO MK2	98.01	2.85	98.02	2.97	98.01	2.85
ECHAM4	99.17	5.65	99.17	5.62	99.17	5.63
GFDL R3	98.81	7.04	98.90	7.43	98.86	7.59
HADCM3	98.87	3.65	99.09	4.81	98.93	5.39
NCAR	99.23	1.32	99.22	1.34	99.23	1.33

جدول ۳. عملکرد روش‌های گوناگون کوچک‌مقیاس کردن داده‌های بارندگی.

روش کوچک‌مقیاس کردن مدل	KRIG(24)		IDW(24)		IDW(8)	
	R ² (%)	RMSE (°c)	R ² (%)	RMSE (°c)	R ² (%)	RMSE (°c)
CCSR/NIES	76.60	49.16	81.27	48.45	78.82	49.14
CGCM2	71.94	30.88	66.77	34.15	70.90	33.37
CSIRO MK2	82.09	34.10	78.30	33.50	78.14	33.46
ECHAM4	89.53	42.03	87.35	45.46	87.25	45.50
GFDL R3	72.54	40.37	73.89	40.62	72.96	40.74
HADCM3	92.26	28.37	92.19	31.96	92.26	30.92
NCAR	92.41	52.85	93.06	53.74	93.28	53.84
روش کوچک‌مقیاس کردن مدل	IDW(EW)		IDW(NS)		Main grid box	
	R ² (%)	RMSE (°c)	R ² (%)	RMSE (°c)	R ² (%)	RMSE (°c)
CCSR/NIES	69.20	51.10	78.38	49.17	69.30	51.03
CGCM2	78.95	32.77	85.65	31.22	90.68	32.62
CSIRO MK2	77.43	33.38	78.07	33.40	77.41	33.35
ECHAM4	86.93	45.82	87.11	45.49	86.86	45.78
GFDL R3	71.72	40.82	72.50	42.06	72.30	42.07
HADCM3	91.60	29.85	90.08	28.71	88.93	29.06
NCAR	92.83	54.04	93.21	53.86	92.84	54.03

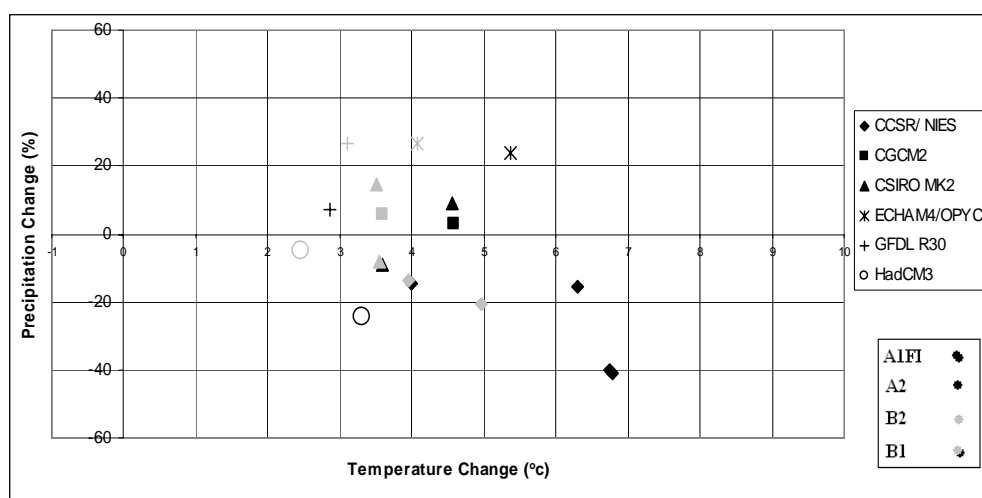
۲ تا ۷ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه در منطقه مورد تحقیق افزایش خواهد یافت. این در حالی است که تغییرات بارندگی بین ۴۰- تا ۳۰+ درصد در نوسان است. از طرف دیگر برای فصول دیگر در دوره‌های مورد بررسی نیز نتایج مشابهی استنتاج شد (نشان داده نشده است).

۴ بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله عرضه روشی برای کوچک‌مقیاس کردن خروجی مدل‌های AOGCM و بررسی تأثیر تفاوت خروجی این مدل‌ها بر رواناب حوضه است. بدین منظور، در ابتدا میانگین ماهانه دما و بارندگی حاصل از مدل‌های AOGCM در دوره پایه با استفاده از روش‌های درون‌یابی کریجینگ و IDW برای موقعیت مکانی دو ایستگاه دامنه فریدن و چهل‌گرد کوچک‌مقیاس شد، سپس با داده‌های مشاهداتی این دو ایستگاه مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت به منظور بررسی تفاوت مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی‌های متغیرهای اقلیمی، سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی حاصل از همه این مدل‌ها تحت همه سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای SRES موجود، با استفاده از بهترین روش کوچک‌مقیاس کردن تولید شد.

با توجه به نتایج حاصل، گرچه روش کریجینگ با به‌کاربردن اطلاعات ۲۴ پیکسل در اطراف پیکسل اصلی، نتایج منطقی‌تری را به همراه دارد، ولی برای اعمال این روش، نیاز به صرف وقت زیاد و محاسبات فراوانی است. از طرف دیگر به دلیل آنکه نتایج روش (8) IDW نزدیک به روش کریجینگ است و نسبت به دور روش (NS) IDW و (EW) IDW از اطلاعات بیشتری در اطراف پیکسل اصلی استفاده می‌کند، این روش برای کوچک‌مقیاس کردن سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی در دوره‌های آتی قابل توصیه است.

مرحله بعدی محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی فصلی منطقه از مدل‌های AOGCM تحت سناریوهای موجود SRES (جدول ۱) برای سه دوره آتی (روابط ۵ و ۶) و کوچک‌مقیاس کردن آنها برای ایستگاه‌های منطقه (چهل‌گرد و دامنه‌فریدن) با روش (8) IDW است. به‌طور کلی با در نظر داشتن ۱۷ سناریو از مدل‌های AOGCM، ۴ فصل، ۳ دوره و ۲ متغیر، در مجموع ۴۰۸ سناریوی تغییر اقلیم تولید شد. شکل ۴ (برای مثال) نتایج مربوط به سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی را در فصل زمستان در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نشان می‌دهد. طبق این شکل دما در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ در فصل زمستان



شکل ۴. سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی در فصل زمستان در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱).

مساح بوانی، ع. ر. و مرید، س.، ۱۳۸۴ الف. تاثیر تغییرات اقلیم بر روی منابع آب و محصولات کشاورزی. تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۱: ۴۰-۴۷.

مساح بوانی، ع. ر. و مرید، س.، ۱۳۸۴ ب. اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال نهم، شماره چهارم.

Barrow, E., Hulme, M. and Semenov, M., 1996, Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: examples from Europe. *Climate Research*, 7, 195-211.

Cressie, N. A., 1993, *Statistics for spatial data*. John Wiley.

IPCC., 2007, *Climate change 2001, The science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. eds. Houghton, J.T., Filho, L.G.M., Callander, B.A., Harris, N., Attenberg, A. and Maskell K., 572 pp. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC-TG CIA, 1999, *Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*. eds. Carter, T.R., Hulme, M. and Lal, M., Version 1, 69pp. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.

Jones, R. N., 2000, "Managing uncertainty in climate change projections – issues for impact assessment". *J. Climatic Change*, 45, 403-419.

Jones, R. N., 2001, An environmental risk assessment/management framework for climate change impact assessments. *Natural Hazards*, 23, 197-230.

Jones, R. N. and Page, C. M., 2001, Assessing the risk of climate change on the water resources of the Macquarie River Catchment, In: *Integrating Models for Natural Resources Management across Disciplines, issues and scales (Part 2)*. eds. Ghassemi, F., Whetton, P., Little, R. and Littleboy, M., pp. 673-678. Modsim 2001 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra.

Mitchell, J. F. B. Johns, T. C., Eagles, M., Ingram, W. J. and Davis, R. A., 1999, *Towards the Construction of Climate Change*

براساس یافته‌های این تحقیق، نتایج زیر قابل استنتاج است. (۱) نتایج روش کریجینگ و IDW با تعداد گوناگون پیکسل‌ها در اطراف پیکسل اصلی تفاوت معنی‌داری نشان نداد. لذا به دلیل سادگی، از روش IDW با تعداد ۸ پیکسل برای کوچک‌مقیاس کردن سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی در دوره‌های آتی استفاده شد. (۲) در همه فصل‌ها و دوره‌ها، میانگین دما نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد، به طوری که در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰ مقدار افزایش نسبت به دو دوره دیگر بیشتر است. این در حالی است که برای بارندگی هر دو مقادیر کاهش و افزایش برای دوره‌های آتی قابل پیش‌بینی است. (۳) نتایج روشن می‌سازد که تفاوت سناریوهای تغییر اقلیم ناشی از مدل‌های AOGCM گوناگون با سناریوهای انتشار یکسان بیش از تفاوت ناشی از سناریوهای ناشی از یک مدل AOGCM با سناریوهای انتشار متفاوت است. (۴) در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از داده‌های حاصل از صرفاً یک مدل AOGCM و یک سناریوی انتشار می‌تواند نتایجی غیرواقعی را در برنامه‌ریزی‌های مربوط به طرح‌های مقابله با اثرات مخرب پدیده تغییر اقلیم به دنبال داشته باشد.

تشکر و قدردانی

لازم به ذکر است که این طرح تحقیقاتی با حمایت مالی معاونت فنی و پژوهشی شرکت سهامی مدیریت منابع آب (دفتر امور پژوهشی و پشتیبانی علمی) با کد WRE1-83072 به انجام رسیده است.

منابع

مساح بوانی، ع. ر.، ۱۳۸۵، ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تاثیر آن بر منابع آب مطالعه موردی حوضه زاینده رود اصفهان. رساله دکتری، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس.

- Scenarios. *Climatic Change*, **41**, 547–581.
- Morid, S., Massah, A. R., Aghaalikhani, M. and Mohammadi, K., 2003, “Water, Climate, Food and environment in the Zayandeh Rud Basin”. Available online at http://www.geo.vu.nl/users/ivmadapt/downloads/zayandehRud_FinalReport.pdf
- Von Storch, H., Zorita, E. and Cubasch, U., 1993, Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in intertime. *Journal of Climate*, **6**, 1161-1171.
- Wilby, R. L. and Harris, I., 2006, A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*.
- Wilby, R. L., Wigley, T. M. L., Conway, D., Jones, P. D., Hewitson, B. C., Main, J. and Wilks, D. S., 1998, “Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods”. *J. Water Resources Research*, **34**, 2995-3008.