

بررسی توانمندی مدل اقلیمی PRECIS در شبیه‌سازی بارش‌های منطقه‌ای ایران

ایمان باباییان* - گروه پژوهشی تغییر اقلیم، پژوهشکده‌ی اقلیم شناسی، سازمان هواشناسی کشور
راهله مدیریان - گروه پژوهشی تغییر اقلیم، پژوهشکده‌ی اقلیم شناسی، سازمان هواشناسی کشور
مریم کریمیان - گروه پژوهشی تغییر اقلیم، پژوهشکده‌ی اقلیم شناسی، سازمان هواشناسی کشور
شراره ملبوسی - گروه پژوهشی تغییر اقلیم، پژوهشکده‌ی اقلیم شناسی، سازمان هواشناسی کشور

پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۸/۱۸ تأیید نهایی: ۱۳۹۰/۹/۶

چکیده

در این مقاله، برونداد مدل گردش عمومی جو HADAM3P با مدل منطقه‌ای PRECIS در دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۷۶ ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی شد و داده‌های بارش ایران در مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی در دو حالت با و بدون چرخه‌ی سولفور، مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهش حاضر، مدل PRECIS با تفکیک افقی ۴۴/۰ درجه‌ی جغرافیایی در شبکه‌هایی با ابعاد حدود ۲۵۰۰ کیلومترمربع اجرا شد و نتایج حاصل از اجرای مدل به دو روش ناحیه‌ای و ایستگاهی با داده‌های واقعی ایستگاه‌های هواشناسی مقایسه شدند، سپس میانگین‌های خطا و اریبی بارش ماهانه و انحراف معیار آن برای نواحی مختلف محاسبه شدند. میانگین خطای شبیه‌سازی حدود ۵/۳ درصد برآورد شد که بیشترین میانگین خطای شبیه‌سازی در نواحی بارشی فارسی، هرمزی، خوزی و خزری به ترتیب با ۲۴/۹، ۱۶/۹، ۱۲/۲ و ۱۰/۲- درصد و کمترین میانگین خطای شبیه‌سازی در نواحی بارشی کردی، آذری، میانه‌ی شمالی و خراسان شرقی با حدود یک درصد محاسبه شد. اریبی مثبت بارش در نواحی جنوبی کشور ممکن است ناشی از تزریق رطوبت از یاخته‌های بزرگ‌مقیاس مدل گردش عمومی به ساختار ریزمدل منطقه‌ای باشد. همچنین اریبی منفی بارش‌های خزری می‌تواند به دلیل ضعف مدل منطقه‌ای PRECIS در پارامترسازی بارش‌های همرفتی این منطقه باشد. علاوه‌برآن، بیشترین میانگین خطای شبیه‌سازی ماهانه در ماه‌های گرم سال دیده شد که در آنها وقوع یک بارش‌های ناگهانی همرفتی می‌تواند منجر به خطای کمابیش بزرگی شود. کمترین میانگین اریبی فصلی در بهار با ۱/۰ میلی‌متر و بیشترین آن در زمستان با ۲/۱۷- میلی‌متر رخ داده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل منطقه‌ای PRECIS توانمندی شبیه‌سازی بارش‌های کلی کشور را دارد؛ اما توانمندی آن در شبیه‌سازی بارش‌های ناحیه‌ای و همرفتی ضعیف است.

کلیدواژه‌ها: مدل PRECIS، ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی، بارش ایران، میانگین خطا.

مقدمه

گسترده‌ی عرض جغرافیایی، وجود دو رشته‌کوه زاگرس و البرز و همچنین کوهستان‌های واقع در شرق و جنوب کشور، دو منطقه‌ی کویری گسترده‌ی دشت کویر و کویر لوت، پهنه‌های آبی دریای مازندران، خلیج فارس و دریای عمان و سرانجام، سرزمین‌های پست ساحلی مجاور دریاها، از ویژگی‌های متنوع اقلیمی، توپوگرافی و پوشش سطحی گوناگون ایران است. علاوه بر آن، از دیدگاه اقلیم‌شناسی سینوپتیکی، الگوها و عناصر متفاوتی از جریان‌های بزرگ‌مقیاس جوّی، اقلیم ایران را کنترل می‌کنند که از آن میان می‌توان به پُرفشار جنب حاره‌ای، رودبادهای جنب حاره‌ای و جبهه‌ی قطبی، بادهای غربی، فرود بلند مدیترانه، سیکلون‌های مدیترانه و اقیانوس اطلس، فرابار سیبری، کم‌فشار حرارتی تابستانه و کم‌فشار خلیج فارس اشاره کرد (علیجانی، ۱۳۸۳، ۳۹-۲۶). وجود ویژگی‌های جغرافیایی و الگوی‌های سینوپتیکی گوناگون، چالشی اساسی در پیشروی پژوهشگران برای شبیه‌سازی اقلیم منطقه‌ای ایران به‌شمار می‌رود (مدیریان و دیگران، ۱۳۸۸، ۱۱۹-۱۰۷).

سلطان‌زاده و همکاران (۱۳۸۶) با هدف شناخت میزان تأثیرگذاری رشته‌کوه زاگرس بر عملکرد بارشی سامانه‌های جوّی ایران، به بررسی حساسیت مدل RegCM3 نسبت به توپوگرافی گفته‌شده در مقیاس منطقه‌ای و در بازه‌ی زمانی سه‌ماهه‌ی ژانویه‌ی سال ۱۹۹۹ تا مارس همان سال پرداختند. آنها دریافتند که با حذف رشته‌کوه‌های زاگرس، میزان بارش در مناطق مرکزی و شرقی ایران افزایش می‌یابد، ولی بارش در کلّ محدوده‌ی شبیه‌سازی کمابیش ثابت می‌ماند (سلطان‌زاده، ۱۳۸۶، ۵۰-۳۱).

باباییان و همکاران (۱۳۸۶) با اجرای مدل RegCM3 برای شبیه‌سازی بارش و دمای کشور در فصول زمستان دو سال خشک و پُربارش سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۷۹ دریافتند که در صورت لحاظ طرحواره گول برای شبیه‌سازی بارش‌های همرفتی مدل مذکور، میانگین بارش فصل زمستان کشور را با خطای تقریبی ۲۰ درصد شبیه‌سازی می‌کند (باباییان، ۱۳۸۶، ۷۲-۵۵).

اسلام^۱ و همکاران (۲۰۰۵ و ۲۰۰۶)، توانمندی مدل اقلیمی PRECIS را از راه مقایسه‌ی داده‌های دیدبانی ۲۶ ایستگاه هواشناسی کشور بنگلادش با خروجی این مدل در دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ بررسی کردند و دریافتند که به‌طور کلی این مدل، توانمندی شبیه‌سازی بارش و دمای این کشور را به‌ترتیب با دقت ۹۰ و ۹۶ درصد دارد (Islam, 2006).

تیان^۲ و همکاران (۲۰۰۶) ضمن بررسی روند تغییر اقلیم در دوره‌ی ۲۰۰۳-۱۹۶۱ با روش‌های آماری، تغییر اقلیم دوره‌ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ را با مدل اقلیمی PRECIS در دره‌ی جیان‌گای^۳ چین بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان می‌دهد که تواتر و شدت پدیده‌های حدّی اقلیمی مانند خشکسالی و سیل از سال ۱۹۹۰ تغییرات کاملاً مشهودی داشته‌اند (Tian, 2006).

1. Nazirul Islam

2. Hong Tian

3. Jianghuai

آلکامو و همکاران (۲۰۰۰) با به‌کارگیری سه سناریوی BAU^۱، TEC^۲ و VAL^۳ در مدل‌های اقلیمی و پیوند آن با مدل‌های هیدرولوژیکی نشان دادند که شرایط شکننده‌ی منابع آبی جهان، دست‌کم تا سال ۲۰۲۵ ادامه خواهد داشت و وسعت مناطق با تنش آبی حد از ۳۶/۴ به ۳۸/۶ میلیون کیلومتر مربع افزایش خواهد یافت که تنش آبی در جنوب و غرب آفریقا و جنوب آسیا حادث‌تر خواهد بود (Alcamo, 2000, 49).

نتایج پژوهش‌های ایم^۴ و همکاران (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) در شبیه‌سازی اقلیم دوره‌ی ۲۰۰۰-۱۹۷۱ کشور کره جنوبی با مدل منطقه‌ای RegCM3 نشان می‌دهد که مدل گفته‌شده توانایی شبیه‌سازی بارش فصل زمستان را با دقت بسیار خوبی داشته، اما توانایی آن در شبیه‌سازی بارش‌های سنگین بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در روز، نیازمند افزایش قدرت تفکیک افقی مدل از راه آشیانه‌سازی^۵ در داخل شبکه‌ی مادر^۶ است (Im, 2006, 187-200).

نتایج مطالعه‌ی کامگا و همکاران (۲۰۰۶) در شبیه‌سازی اقلیم دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ غرب آفریقا با استفاده از مدل منطقه‌ای PRECIS نشان می‌دهد که توانمندی این مدل در شبیه‌سازی دوره‌های فصلی و سالانه‌ی بارش و دما مناسب بوده ولی بارش‌های منطقه همگرایی حاره‌ای مرکز آفریقا را که معمولاً با بارش‌های سنگین همراه است، بیش از واقعیت برآورد می‌کند (Kamga, 2006, 28-37).

ین‌لانگ^۷ و همکاران (۲۰۰۶)، بارش و دمای دوره‌ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ کشور چین را با مدل PRECIS و دو سناریوی A2 و B2 شبیه‌سازی کردند. آنها در ابتدا خروجی مدل را برای دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ مورد ارزیابی قرار داده و سپس پس از تحلیل خطاهای مدل، تغییرات احتمالی در اقلیم آینده‌ی این کشور را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که بارش‌های سیل‌آسای تابستانه و خشکسالی‌های زمستانه در جنوب این کشور تشدید می‌شود (Yinlong, 2006, 50-53).

کومار^۸ و همکاران (۲۰۰۶) پس از صحت‌سنجی خروجی‌های مدل PRECIS در شبیه‌سازی اقلیم کشور هندوستان در دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۶۱، آن را برای دوره‌ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ اجرا کرده و تغییرات بارش و دمای این کشور را در دوره‌ی گفته‌شده بررسی کردند. در شبیه‌سازی اقلیم گذشته، مشخص شد که مدل بارش‌های مونسونی هند در کوه‌های گات^۹ غربی را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است؛ اما در برخی مناطق نیز اریب قابل توجهی دارد (Kumar, 2006, 334-345).

شبیه‌سازی‌های اقلیم و تغییر اقلیم بر روی کشورمان با هدف مطالعه‌ی واداشتها و رفتارهای منطقه‌ای، ارتقای پیش‌بینی‌های فصلی و ارزیابی تغییرات اقلیمی برای استفاده از نتایج آنها در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت، آمایش سرزمین و ارائه‌ی راهکار به مسئولان و برنامه‌ریزان کشور در اتخاذ روش‌های سازگاری و کاهش آثار تغییر اقلیم امری ضروری است. مدل‌های اقلیمی، قبل از استفاده بایستی واسنجی شده و توانمندی آنها در شبیه‌سازی اقلیم کشور مورد ارزیابی قرار

1. Business-As-Usual
2. Technology, Economics and Private Sector
3. Values and Lifestyles
4. Im Eun-Soon
5. Nesting
6. Mother domain
7. Yinlong
8. Kumar K. R.
9. Ghat

گیرد. در کشورمان بیشتر پژوهش‌های مرتبط با شبیه‌سازی‌های دینامیکی، محدود به مدل اقلیمی RegCM3^۱ است و کمتر به توانمندی مدل‌های اقلیمی دیگر از جمله PRECIS^۲ پرداخته شده است. در این مطالعه، توانمندی مدل اقلیمی PRECIS که هم‌اکنون در بیشتر کشورهای جهان به‌عنوان مرجع شبیه‌سازی تغییر اقلیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، تجزیه و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل اقلیمی مورد استفاده

در مطالعه‌ی پیش رو، از مدل منطقه‌ای اقلیمی PRECIS که ساختار دینامیکی آن مشابه مدل جوئی HadAM3P است، استفاده شده است. مدل مذکور، مؤلفه جوئی مدل گردش عمومی HadCM3 است (Gordon, 2000, 147-168). این مدل، دو قدرت تفکیک فضایی ۵۰ و ۲۵ کیلومتر، با ۹ لایه در جو (از سطح زمین تا ۳۰ کیلومتری در استراتوسفر) و چهار لایه در عمق خاک دارد. PRECIS از مختصه‌ی σ (نسبت فشار به فشار سطح زمین) استفاده کرده که در آن معادله‌های حرکت هوا، ترمودینامیک، تکانه و... در سیستم مختصات قطبی کروی حل می‌شوند. در این مدل برای تبدیل معادله‌های دیفرانسیلی به معادله‌های تفاضلی، از روش آراکوا^۳ در سطح افقی استفاده می‌شود (Arakawa, 1977, 173-265). برای پارامترسازی همرفت، از طرحواره نفوذ شار جرمی جورجی^۴ استفاده می‌شود که در آن همرفت قائم بر روی تکانه، گرما و رطوبت تأثیرگذار است (Gregory, 1990, 1483-1506). در طرحواره محاسباتی مدل، فرض می‌شود که بارش همرفتی بدون توجه به درصد ابرناکی، بر روی ۶۵٪ از مساحت شبکه‌ی مدل بیارد. مقدار آستانه‌ی آب ابر در بارش بر روی خشکی ۲ g/kg و روی دریا ۴ g/kg است. برای بارش‌های بزرگ‌مقیاس، رطوبت نسبی بحرانی برای شروع بارش در هر گام مکانی و زمانی محاسبه می‌شود و فرض می‌شود که شکل آب در داخل ابر در بالای صفر درجه‌ی سلسیوس مایع، زیر ۹- درجه سلسیوس جامد و در بین این دو درجه، تلفیقی از مایع و جامد باشد. مقادیر آستانه آب مایع ابر برای آغاز بارش ۰/۰۰۱ kg/kg بر روی خشکی و ۲×۱۰^{-۵} kg/kg بر روی دریا است. طرحواره تابش، میزان انرژی تابشی دریافتی، تشعشع طول موج‌های کوتاه (۶ باند) و بلند (۸ باند) ناشی از دمای محیط، ابر (آب مایع و جامد)، بخار آب و گازهای گلخانه‌ای همچون ازن، دی‌اکسید کربن، اکسید نیترو، متان و CFCها را محاسبه می‌کند. در لایه‌ی مرزی جو، از طرحواره اختلاط تالطمی مرتبه‌ی اول و برای اختلاط قائم از متغیرهای ترمودینامیکی و تکانه استفاده می‌شود. فرآیندهای سطح زمین نیز با استفاده از طرحواره کاکس^۵ شبیه‌سازی می‌شود (Cox, 1999, 183-203).

در مدل PRECIS معادله‌های حرکت هوا، ترمودینامیک، تکانه و... به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - (f + \xi) \cdot V + \eta \frac{\partial U}{\partial \eta} + \frac{R_d T_v}{a} \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln p + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\phi + E) = P_U + K_U \quad (1)$$

1. Regional Climate Model version 3
2. Providing Regional Climates for Impacts Studies
3. Arakawa
4. Gregory
5. Cox

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (f + \xi) \cdot U + \dot{\eta} \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{R_d T_v}{a} (1 - \mu^2) \frac{\partial}{\partial \mu} \ln p + \frac{(1 - \mu^2)}{a} \frac{\partial}{\partial \mu} (\phi + E) = P_v + K_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{U}{a(1 - \mu^2)} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial T}{\partial \mu} + \dot{\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} - \frac{\kappa T_v \omega}{(1 + (\delta - 1)q_v)p} = P_T + K_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + \frac{U}{a(1 - \mu^2)} \frac{\partial q_v}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial q_v}{\partial \mu} + \dot{\eta} \frac{\partial q_v}{\partial \eta} = P_{q_v} + K_{q_v} \quad (4)$$

$$\frac{\partial q_w}{\partial t} + \frac{U}{a(1 - \mu^2)} \frac{\partial q_w}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial q_w}{\partial \mu} + \dot{\eta} \frac{\partial q_w}{\partial \eta} = P_{q_w} + K_{q_w} \quad (5)$$

در این معادله‌ها q_v نسبت اختلاط بخار آب و $q_w = q_l + q_i$ و q_i شامل q_l (محتوی مایع) و q_i (بخش جامد) است. توصیف علائم دیگر به کاررفته در معادله‌ها به شرح زیر است:

U : سرعت مداری	f : پارامتر کوریولیس	η : مختصه‌ی قائم که تابعی از فشار است
ξ : تاوایی نسبی	V : سرعت نصف‌النهاری	R_d : ثابت گازها برای هوای خشک
T_v : دمای مجازی	a : شعاع زمین	λ : طول جغرافیایی
p : فشار	ϕ : ژئوپتانسیل	E : انرژی جنبشی بر واحد جرم
T : دما	$\dot{\eta}$: سرعت قائم	

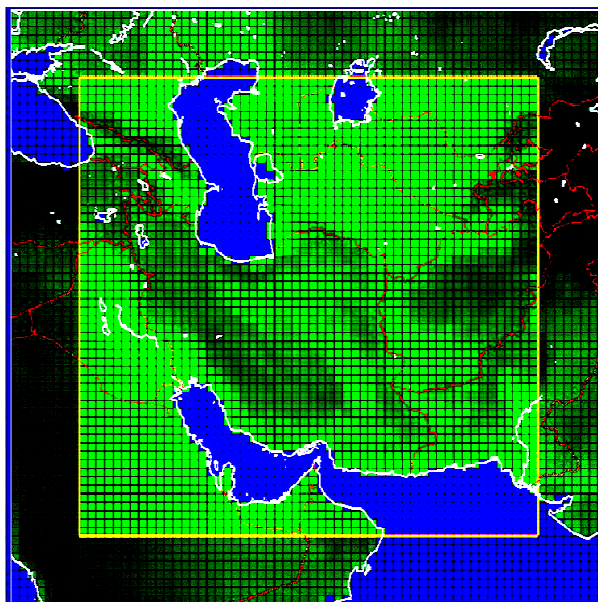
P_{q_w} و P_{q_v} : شار قائم اندازه حرکت، محتوی رطوبتی و آب ابر.

برای اجرای مدل PRECIS، ابتدا ناحیه‌ی مورد نظر و قدرت تفکیک مکانی اجرای مدل، انتخاب شده و پس از آن به ترتیب نوع سناریو، زمان آغاز اجرا و پایان آن و متغیرهای پیش‌بینی به مدل معرفی می‌شوند. تغییر ناهمواری، نوع پوشش سطح زمین و شکل داده‌های خروجی را می‌توان در طول اجرای مدل تعریف کرد. مدل PRECIS، ارتفاع دریاچه‌های محصور در خشکی را به صورت پیش‌فرض صفر (معادل سطح آزاد اقیانوس‌ها) در نظر می‌گیرد که باید توسط کاربر برای دریاچه‌های محصور در خشکی اصلاح شود. مدل PRECIS بر روی سیستم عامل لینوکس اجرا می‌شود (Wilson, 2005, 136).

داده‌ها، ناحیه و دوره‌ی مورد مطالعه

در این مطالعه، بارش‌های ماهانه دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۷۶ ایران با مدل اقلیمی PRECIS شبیه‌سازی شده است. از آنجا که اقلیم یک ناحیه با فرآیندهای داخل و خارج از آن منطقه کنترل می‌شود؛ بنابراین، مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای نیازمند یکسری داده‌های شرایط مرزی (نشان‌دهنده‌ی فرایندهای اقلیمی تأثیرگذار خارج از ناحیه‌ی مورد مطالعه) هستند. در این مطالعه، از داده‌های شرایط مرزی مدل گردش عمومی HadAM3P (۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰) استفاده شده است. ناحیه‌ی اجرای مدل ۴۳ تا ۶۸ درجه‌ی شرقی و ۲۳ تا ۴۵ درجه‌ی شمالی است که شامل شبکه‌ای به ابعاد ۷۰×۷۰ نقطه با قدرت تفکیک ۵۰ کیلومتر می‌شود. ناهمواری‌های مدل، دقت ۱۰ دقیقه‌ی جغرافیایی دارد. در شکل شماره ۱، محدوده‌ی اجرای مدل

نشان داده شده است. ناحیه‌ی تیره‌رنگ در حاشیه‌ی این شکل، مناطقی را نشان می‌دهد که در آنها خطای شبیه‌سازی زیاد بوده و نمی‌توانند در ارزیابی‌ها مورد استفاده قرار گیرند.



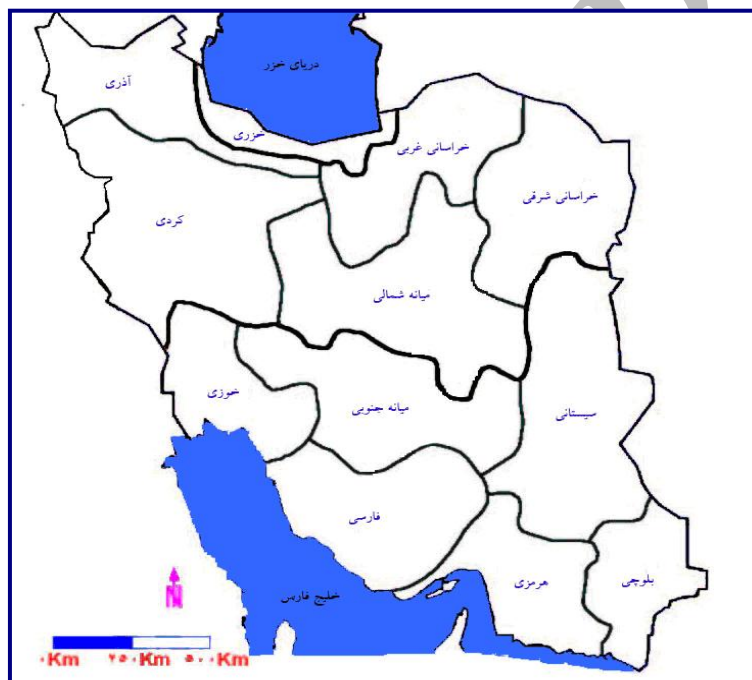
شکل ۱. ناحیه‌ی مورد مطالعه برای بررسی توانمندی مدل PRECIS بر روی ایران

برای تنظیم مدل و ایجاد سازگاری بین فرآیندهای جوّی و عمق زمین، لازم است دوره‌ی اجرای مدل، چند ماه قبل از دوره‌ی مورد مطالعه باشد تا تعادلی بین رفتار اتمسفر و خشکی به‌وجود آمده و خطای ناشی از ناسازگاری به پایین‌ترین حدّ ممکن کاهش یابد؛ بنابراین برای پرهیز از ایجاد و رشد خطا، توصیه می‌شود اجرای مدل، یک سال قبل از دوره‌ی مورد مطالعه شروع شده، ولی داده‌های سال مذکور در ارزیابی‌ها مورد استفاده قرار نگیرند. در این مطالعه، مدل برای شانزده سال (۱۹۷۵-۱۹۹۰) اجرا شده است، اما، تنها داده‌های پانزده‌ساله‌ی دوره‌ی ۱۹۷۶-۱۹۹۰ مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل PRECIS یک سال، از دوازده ماه سی‌روزه تشکیل شده است. قدرت تفکیک مکانی مدل 50×50 کیلومتر لحاظ شده است؛ اما، امکان اجرای مدل با قدرت 25×25 کیلومتر نیز وجود دارد. داده‌های خروجی مدل را به سه صورت GRIB و Net CDF، PP و می‌توان ذخیره کرد.

روش محاسبه‌ی میانگین خطا و اریبی

از آنجاکه برونداد مدل‌های اقلیمی به‌صورت شبکه‌ای و در طول و عرض‌های منظم است، پس در بیشتر موارد، در تلاقی‌های هر یک از شبکه‌های مدل اقلیمی، ایستگاه هواشناسی معادل آن در سطح زمین وجود نداشته و بنابراین، امکان مقایسه داده‌های شبکه‌ای با مقادیر دیدبانی وجود ندارد. در این پژوهش، از دو روش برای برآورد خطا استفاده شده است: روش ایستگاه‌به‌ایستگاه (ایستگاهی) و روش ناحیه‌به‌ناحیه (ناحیه‌ای). در روش ایستگاهی برای هر داده دیدبانی یک نقطه معادل از داده‌های مدل استخراج شده و پس از مقایسه، میانگین خطای شبیه‌سازی محاسبه می‌شود؛ اما در روش

ناحیه‌ای، ایران به چند ناحیه‌ی بارشی تقسیم‌شده و میانگین بارش ایستگاه‌های هواشناسی در شبکه‌ی مورد ارزیابی با داده‌های مدل در همان شبکه مقایسه می‌شوند. در این پژوهش، مبنای ارزیابی و سنجش توانمندی مدل، ناحیه‌بندی رژیم بارشی ایران، ارائه‌شده از سوی مسعودیان (۱۳۸۲) در نظر گرفته شده است. او با استفاده از داده‌های بارش تمامی ایستگاه‌های هواشناسی کشور در دوره‌ی زمانی ۱۹۹۹-۱۹۵۱ و به‌کارگیری تحلیل خوشه‌ای، دوازده رژیم بارشی شامل میانه‌ی جنوبی، فارسی، کردی، سیستانی، خراسان غربی، خراسان شرقی، میانه‌ی شمالی، خوزی، هرمزی، آذری، بلوچی و خزری را برای ایران مشخص کرد (شکل شماره ۲) (مسعودیان، ۱۳۸۴، ۵۹-۴۷).



شکل ۲. مرزهای ناحیه‌بندی رژیم‌های بارشی دوازده‌گانه ایران

(۱) میانه‌ی جنوبی؛ (۲) فارسی؛ (۳) کردی؛ (۴) سیستانی؛ (۵) خراسان غربی؛ (۶) خراسان شرقی؛
(۷) میانه‌ی شمالی؛ (۸) خوزی؛ (۹) هرمزی؛ (۱۰) آذری؛ (۱۱) بلوچی و (۱۲) خزری (مسعودیان، ۱۳۸۲)

برای ارزیابی توانمندی شبیه‌سازی از شاخص‌های آماری میانگین اریبی، انحراف معیار و میانگین خطا استفاده شدند

که فرمول‌های آنها به صورت زیر است:

- میانگین اریبی^۱

$$Bias = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - Q_i}{n} \quad (1)$$

- انحراف معیار

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum n_i (P_i - \bar{P})^2}{n}} \quad (۲)$$

- میانگین خطا

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - Q_i|}{n} \quad (۳)$$

که در آنها P_i مقادیر مدل شده، Q_i مقادیر واقعی، n تعداد نواحی و \bar{P} مقدار متوسط مقادیر مدل شده است. میانگین اریبی، نشان‌دهنده‌ی میزان تطابق داده‌های مدل شده با مقادیر مشاهداتی است.

یافته‌های تحقیق

با استفاده از داده‌های شرایط مرزی مدل گردش عمومی جو HadAM3P، بارش و سایر متغیرهای هواشناسی ایران در دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۷۶ با مدل اقلیم منطقه‌ای PRECIS و در دو حالت با چرخه‌ی سولفور و بدون چرخه‌ی سولفور ریزمقیاس‌نمایی و برونداد ماهانه‌ی بارش با داده‌های دیدبانی شده به دو روش ایستگاهی و ناحیه‌ای مقایسه شدند. برای تحلیل خطای شبیه‌سازی، نخست سهم (وزن) هر یک از نواحی بارشی دوازده‌گانه، در مجموع بارش کل کشور محاسبه و میزان تأثیرگذاری خطای شبیه‌سازی هر ناحیه بر روی بارش کل کشور، بر اساس وزن ناحیه‌ی مورد بررسی محاسبه شد. سهم (وزن) ناحیه‌ای بارش که نسبت میانگین بارش ایستگاه‌های هر ناحیه به بارش کل کشور است، عددی کوچکتر از یک است. در جدول شماره ۱، سهم نسبی بارش‌های ناحیه‌ای از مجموع بارش فصلی و سالانه‌ی کشور آورده شده است. بر اساس این جدول ملاحظه می‌شود که ناحیه‌ی خزری بیشترین سهم بارش کشور را طی فصول مختلف دوره‌ی مورد مطالعه (۱۹۹۰-۱۹۷۶) دارد.

جدول ۱. سهم (وزن) نسبی نواحی بارشی دوازده‌گانه کشور از مجموع بارش فصول مختلف (دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۷۶)

فصل	میان‌ه‌ی جنوبی	فارسی	کردی	سیستانی	خراسان غربی	خراسان شرقی	میان‌ه‌ی شمالی	خوزی	هرمزی	آذری	بلوچی	خزری
بهار	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۱۸
تابستان	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰	۰/۲۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۵۶
پاییز	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۵۲
زمستان	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲۲
سال	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۳۷

در جدول شماره ۲، میانگین خطای هر کدام از روش‌های مقایسه‌ای در دو حالت با چرخه‌ی سولفور و بدون چرخه‌ی سولفور در شبیه‌سازی بارش آورده شده است. ملاحظه می‌شود که میزان تأثیرگذاری روش محاسبات خطا در توانمندی مدل بیشتر از لحاظ شدن یا لحاظ نشدن چرخه‌ی سولفور است. در روش ایستگاهی، میانگین خطا حدود ۳/۸ درصد از روش ناحیه‌ای کمتر است. همان‌گونه که در جدول شماره ۲ آمده است، میانگین کلی خطای شبیه‌سازی حدود ۵/۳ درصد است که در این میان، بیشترین میانگین خطای شبیه‌سازی در نواحی بارشی فارسی، هرمزی، خوزی و خزری به ترتیب با ۲۴/۹، ۱۶/۹، ۱۲/۲ و ۱۰/۲- درصد رخ داده است. در سه ناحیه‌ی فارسی، هرمزی و خوزی مدل اریبی تر و در ناحیه‌ی خزری اریبی خشک دارد. کمترین میانگین خطای شبیه‌سازی در نواحی بارشی کردی، آذری، میانه‌ی شمالی و خراسان شرقی به ترتیب با ۰/۹-، ۰/۹-، ۱- و ۱/۹- درصد رخ داده است. در یک تحلیل کلی می‌توان گفت، توانمندی مدل در شبیه‌سازی بارش‌های ناحیه‌ای، به‌ویژه در مناطقی با بارش‌های سنگین محلی، از نواحی دیگر ضعیف‌تر است.

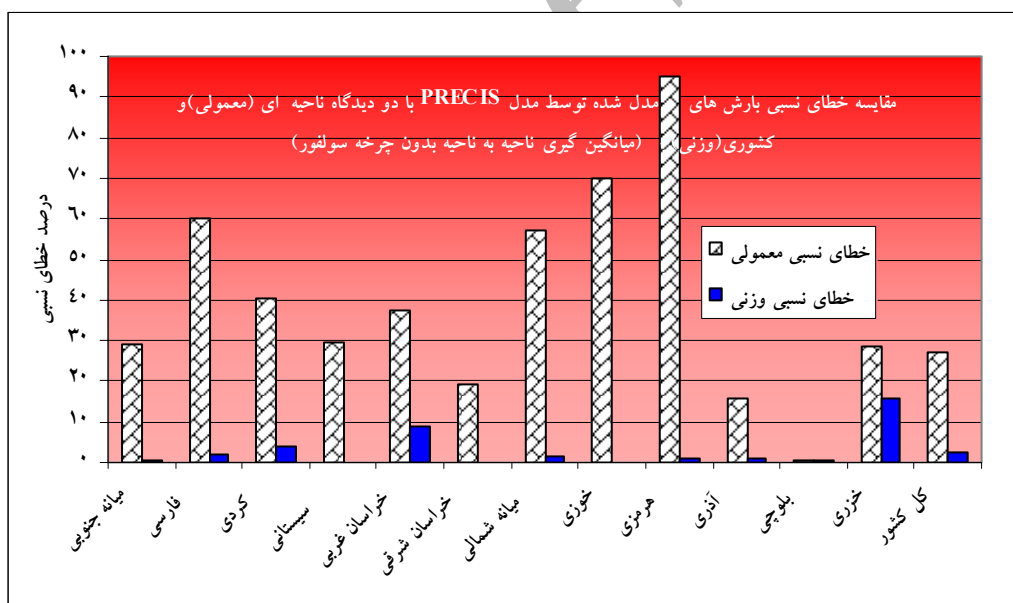
جدول ۲. میانگین خطا ناحیه‌ای و ایستگاهی در دو حالت لحاظ کردن چرخه‌ی سولفور و بدون لحاظ کردن چرخه‌ی سولفور با مدل PRECIS (دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۷۶)

میانگین	روش ایستگاهی		روش ناحیه‌ای		ناحیه	ردیف
	بدون چرخه‌ی سولفور	با چرخه‌ی سولفور	بدون چرخه‌ی سولفور	با چرخه‌ی سولفور		
۹/۹	۶/۳	۷/۱	۱۳/۱	۱۳/۱	میانه‌ی جنوبی	۱
۲۴/۹	۱۵	۱۵	۳۵	۳۴/۷	فارسی	۲
-۰/۹	-۱/۶	-۲	۰/۳	-۰/۲	کردی	۳
۳/۱	۲/۸	۲/۷	۳/۵	۳/۵	سیستانی	۴
-۳/۹	-۳/۲	۳/۱	-۴/۶	-۴/۵	خراسان غربی	۵
-۱/۹	-۲	-۲	-۱/۸	-۱/۸	خراسان شرقی	۶
-۱	-۰/۸	-۰/۸	-۱/۲	-۱/۲	میانه‌ی شمالی	۷
۱۲/۲	۴	۳/۷	۲۰/۷	۲۰/۴	خوزی	۸
۱۶/۹	۱۸/۷	۱۸/۸	۱۵/۳	۱۴/۸	هرمزی	۹
۰/۹	۰/۶	۰/۷	۱/۳	۱	آذری	۱۰
۵/۶	۵/۹	۵/۸	۵/۴	۵/۳	بلوچی	۱۱
-۱۰/۲	-۸/۳	-۸/۳	-۱۲/۲	۱۲/۱	خزری	۱۲
۵/۳	۳/۱	۳/۷	۶/۲	۸/۱	کل کشور	

ضعیف‌ترین شبیه‌سازی ناحیه‌ای در ماه سپتامبر و در رژیم بارشی فارسی رخ داده است، جایی که میانگین بارش ناحیه‌ای ماه گفته‌شده در دوره‌ی ۱۹۷۶-۱۹۹۰ حدود ۰/۰۵ میلی‌متر ثبت شده است، در حالیکه بارش مدل ۲/۹۸ میلی‌متر است. هرچند در ماه سپتامبر خطای نسبی ناحیه‌ای مدل حدود ۶۰ درصد است، اما با لحاظ کردن سهم بارش ماه سپتامبر این ناحیه در کل کشور (کمتر از ۲ درصد)، خطای واقعی شبیه‌سازی (در مقایسه با بارش کل کشور) حدود ۸ درصد

خواهد شد. در واقع، خطای مذکور در ماه سپتامبر، موجب ۸ درصد خطای شبیه‌سازی در بارش میانگین کشور می‌شود. به‌طور کلی، درصد خطای نسبی مدل نسبت به میانگین بارش ناحیه (۳۴/۸ درصد) بسیار بزرگتر از درصد خطای نسبی مدل با لحاظ سهم بارش ناحیه از بارش کل کشور (۲/۶ درصد) است. به‌گفته‌ای دیگر، مدل PRECIS توانمندی شبیه‌سازی میانگین بارش کل کشور را به‌خوبی دارد، اما توانمندی آن در شبیه‌سازی بارش‌ها در مقیاس ناحیه‌ای به نسبت ضعیف است.

مقایسه‌ی خطای واقعی مدل (با لحاظ کردن سهم بارش هر ناحیه در بارش کل کشور) نشان می‌دهد که بدترین پاسخ شبیه‌سازی در ناحیه‌ی خزری با ۱۹/۵ درصد خطا بوده و کمترین خطای میانگین مدل در نواحی بارشی میانه‌ی جنوبی، خراسان شرقی (شامل استان خراسان رضوی و شرق استان‌های یزد، سمنان و اصفهان)، سیستان (شامل خراسان جنوبی، شمال سیستان و بلوچستان و شرق استان کرمان)، خوزی (شامل خوزستان و ایلام) و هرمزی به میزان کمتر از یک درصد است (نمونه‌ی بدون چرخه‌ی سولفور در شکل شماره ۳ آورده شده است).



شکل ۳. مقایسه‌ی میانگین خطای نسبی بارش‌های مدل شده با PRECIS از دو دیدگاه ناحیه‌ای و کشوری. در این شکل، نتایج روش میانگین‌گیری ناحیه‌ای - بدون لحاظ چرخه‌ی سولفور آورده شده است.

ارزیابی فصلی شبیه‌سازی

برای بررسی توانمندی مدل در شبیه‌سازی بارش‌های ماهانه، نسبت میانگین بارش‌های ماهانه‌ی مدل به مشاهداتی محاسبه شد (شکل شماره ۴). در این شکل، مقادیر واقع بر روی خط افقی توپُر نشان‌دهنده‌ی این است که مقدار بارش مدل شده با بارش واقعی برابر است (۱ = نسبت بارش مدل به مشاهداتی). همان‌گونه که دیده می‌شود، بیشترین خطای میانگین ماهانه مربوط به سپتامبر (۱۳/۵۲ = بارش واقعی / بارش مدل) - ماه گذر از رژیم بارشی تابستانه به پاییزه - است؛ پس از آن، به‌ترتیب بیشترین خطاهای میانگین در ماه‌های اوت و جولای رخ داده است. کمترین خطای میانگین

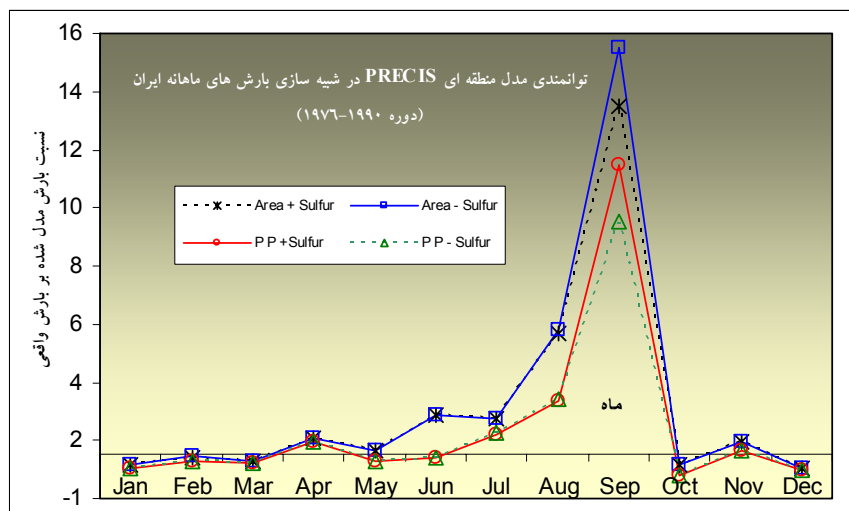
مدل، در ماه دسامبر با نسبت ۰/۵۴ (با خطای ۶ درصد) در حالت بدون لحاظ چرخه‌ی سولفور و با استفاده از روش ناحیه‌ای به‌دست آمده است.

هرچند بیشترین خطای میانگین شبیه‌سازی در ماه سپتامبر رخ داده است، اما محاسبه‌ی اریبی داده‌های مدل نسبت به دیدبانی نشان می‌دهد که بیشترین اریبی داده‌ها در فصل زمستان با ۱۷/۲- میلی‌متر رخ داده است. کمترین اریبی داده‌های مدل در فصل تابستان با ۰/۱ میلی‌متر مدل شده است. معنادار بودن تفاوت بین میانگین و واریانس دو جامعه‌ی آماری داده‌های واقعی و مدل شده با استفاده از آزمون‌های F و t مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در سطح معناداری ۵ درصد تفاوت معناداری میان میانگین‌ها و واریانس‌های دو سری داده‌ها وجود ندارد. در جدول شماره ۳ بارش‌های واقعی، مدل شده و اریبی آن در فصول مختلف برای حالت بدون سولفور و روش نقطه‌به‌نقطه (ایستگاهی) آورده شده است.

جدول ۳. مقایسه‌ی مقادیر بارش واقعی مدل شده با PRECIS و میزان اریبی منطقه‌ای بارش با استفاده از روش نقطه‌ای و بدون لحاظ کردن چرخه‌ی سولفور (دوره‌ی مورد مطالعه ۲۰۰۰-۱۹۷۶)

ناحیه‌ی بارشی		بهار			تابستان			پاییز			زمستان		
ردیف	نام	واقعی	مدل	اریبی	واقعی	مدل	اریبی	واقعی	مدل	اریبی	واقعی	مدل	اریبی
۱	میانه‌ی جنوبی	۲۰/۶۵	۱۶/۴	-۴/۲	۰/۶۲	۰/۷	-۰/۱	۶/۶۷	۵/۵	-۱/۳	۲۸/۴۹	۱۳/۵	-۱۵
۲	فارسی	۲۱/۸۲	۱۹/۹	-۲/۳	-۰/۴۹	۲/۱	۱/۶	۹/۵۷	۱۱/۵	۲	۶۳/۶۹	۱۸/۴	-۴۵/۳
۳	کردی	۴۷/۴۹	۳۰/۹	-۱۶/۶	۱/۶۱	۰/۹	-۰/۸	۲۳/۶۲	۱۰/۵	-۱۳/۱	۵۴/۹۸	۲۹/۲	-۲۵/۸
۴	سیستانی	۱۲/۴۲	۱۱/۵	-۰/۹	-۰/۳۴	۰/۵	۰/۲	۲/۴	۴/۶	۲/۲	۱۵/۳۲	۱۳/۹	-۱/۴
۵	خراسان غربی	۳۱/۵۹	۵۸/۳	۲۶/۷	۱۸/۴۸	۱/۲	-۱۷/۳	۶۹/۱۴	۱۰/۲	-۵۸/۹	۴۵/۹۲	۳۵/۶	-۱۰/۳
۶	خراسان شرقی	۲۸/۷۰	۳۳/۹	۵/۲	۱/۰۳	۰/۱	-۰/۹	۶/۱۱	۴/۶	-۱/۶	۳۶/۲۶	۱۷/۱	-۱۹/۲
۷	میانه‌ی شمالی	۱۴/۶۵	۹/۹	-۴/۷	-۰/۷۷	۰/۴	-۰/۴	۵/۴۳	۳/۳	-۲/۱	۱۸/۴۷	۶/۱	-۱۲/۳
۸	خوزی	۱۹/۹۴	۱۰/۳	-۹/۷	۰/۲	۰/۳	-۰/۱	۱۲/۹۹	۵/۴	-۷/۵	۵۳/۸۳	۱۰/۹	-۴۳
۹	هرمزی	۱۸/۵۹	۷/۴	-۱۱/۲	۰/۹	۷/۵	۶/۶	۲/۹۳	۱۸/۳	۱۵/۳	۳۷/۴۴	۱۳/۸	-۲۳/۷
۱۰	آذری	۴۳/۲۷	۵۰/۸	۷/۵	۷/۹۸	۲/۳	-۵/۶	۲۳/۱۷	۲۵/۶	۲/۵	۲۹/۲۵	۴۹/۸	۲۰/۵
۱۱	بلوچی	۱۱/۴۴	۵/۴	-۶/۱	۵/۵۲	۱۱/۱	۵/۶	۲/۰۱	۹/۴	۷/۴	۲۴/۶۷	۷/۴	-۱۷/۳
۱۲	خزری	۵۷/۴۷	۷۴/۸	۱۷/۴	۴۷/۷۷	۱۳/۵	-۳۴/۳	۱۸۱/۳۲	۲۷/۸	۱۰۸/۵	۱۱۵/۲۶	۱۰۲	-۱۳/۳
میانگین کشور		۲۷/۳	۲۷/۴	۰/۱	۷/۱	۳/۴	-۳/۸	۲۸/۸	۱۵/۱	-۱۳/۶	۴۳/۶	۲۶/۵	-۱۷/۲
مقدار F		۲/۳۶			۰/۱۱			۰/۱۴			۰/۹۹		
مقدار t		۰/۰۱			-۰/۴۴			-۰/۸۶			-۱/۵۵		

مقادیر همبستگی در سطح یک درصد معنادار هستند.



شکل ۴. توانمندی مدل منطقه‌ای PRECIS در شبیه‌سازی بارش‌های ماهانه‌ی دوره‌ی آماری ۱۹۷۶ - ۱۹۹۰ ایران با به‌کارگیری دو سناریوی با چرخه‌ی سولفور و بدون چرخه‌ی سولفور و دو روش میانگین‌گیری نقطه‌ای و ناحیه‌ای. خط افقی توپُر خط یک‌به‌یک را نشان می‌دهد.

ارزیابی انحراف معیار بارش

یکی از مهم‌ترین معایب مدل‌های دینامیکی و آماری، ضعف آنها در شبیه‌سازی انحراف معیار متغیرهای هواشناسی است که معمولاً مدل‌ها، انحراف معیار را کمتر از واقعیت برآورد می‌کنند؛ بنابراین، توانمندی یک مدل اقلیمی در شبیه‌سازی انحراف معیار، یکی از عوامل برتری مدل‌ها و یا سناریوهای اقلیمی نسبت به یکدیگر است. به همین دلیل، انحراف معیار داده‌های مدل با دو حالت با چرخه‌ی سولفور و بدون چرخه‌ی سولفور و دیدبانی در دو مقیاس ماهانه و فصلی محاسبه و با هم مقایسه شدند (جدول شماره ۴).

همان‌گونه که در جدول شماره ۴ ملاحظه می‌شود، انحراف معیار فصلی مدل با دو دیدگاه ایستگاهی و ناحیه‌ای و در دو حالت با چرخه‌ی سولفور و بدون سولفور محاسبه شد. به‌طورکلی، شبیه‌سازی انحراف معیار بدون لحاظ چرخه‌ی سولفور با روش ناحیه‌ای کمترین میانگین خطای شبیه‌سازی فصلی را دارد.

جدول ۴. مقایسه‌ی انحراف معیار داده‌های دیدبانی با داده‌های مدل با دو روش ناحیه‌ای (Reg) و ایستگاهی (Sta)، در دو حالت با چرخه‌ی سولفور و بدون چرخه‌ی سولفور

انحراف معیار مدل (-S) (میلی‌متر)		انحراف معیار مدل (+S) (میلی‌متر)		انحراف معیار دیدبانی	بارش مدل (-S)		بارش مدل (+S)		
Reg	Sta	Reg	Sta		Reg	Sta	Reg	Sta	
۱۸/۴	۲۱/۸	۱۸/۴	۲۲/۸	۱۴/۹	۲۸/۳	۲۷/۴	۲۸/۲	۲۷/۵	بهار
۴/۵	۴/۵	۴/۶	۴/۶	۱۳/۹	۳/۹	۳/۴	۳/۹	۳/۴	تابستان
۱۶/۵	۱۹/۳	۱۶/۴	۱۹/۳	۵۱/۵	۱۵/۱	۱۵/۱	۱۵	۱۵/۲	پاییز
۲۳/۶	۲۶/۷	۲۳/۵	۲۷	۲۷/۱	۲۸/۸	۲۶/۵	۲۸/۷	۲۶/۵	زمستان
۱۵/۶	۱۸/۱	۱۵/۷	۱۸/۴	۱۷/۵	۱۹	۱۸/۱	۱۸/۹	۱۸/۲	سالانه

برخی از منابع و علل بروز خطا در شبیه‌سازی‌های اقلیمی، ساختار فیزیکی داخلی و طرحواره‌های محاسباتی مورد استفاده در مدل‌های گردش عمومی و منطقه‌ای و سناریوهای انتشار مورد استفاده هستند. هر یک از مدل‌های گردش عمومی و منطقه‌ای، ساختار فیزیکی و محاسباتی خاص خود را دارند. از آنجاکه در ریزمقیاس‌نمایی‌های دینامیکی داده‌های ورودی مدل‌های منطقه‌ای در قالب داده‌های شرایط مرزی از مدل‌های جهانی گرفته می‌شوند، پس هرگونه خطا در شبیه‌سازی‌های بزرگ‌مقیاس جوئی با مقیاس کمتری به ابعاد منطقه‌ای منتقل می‌شود که برای برطرف کردن این خطا بایستی ساختار فیزیکی و محاسباتی مدل‌ها اصلاح شوند. با توجه به ابعاد یاخته‌های مدل‌های گردش عمومی، برخی رفتارهای بزرگ‌مقیاس در فرآیند ریزمقیاس‌نمایی به ساختار ریزمنطقه‌ای نیز گسترش می‌یابند. برای نمونه، ممکن است به دلیل ابعاد بزرگ یاخته‌ها در شبکه‌ی محاسباتی مدل گردش عمومی، رطوبت آنها به یاخته‌های ریزتر مدل منطقه‌ای که گاهی در مجاورت منابع رطوبتی هم قرار نمی‌گیرند، منتقل شود؛ بنابراین یکی از دلایل احتمالی اریبی مثبت بارش در مناطق جنوبی کشور، به‌ویژه نواحی خوزی، هرمزی و فارسی می‌تواند ناشی از این موضوع باشد. بارش‌های شبیه‌سازی شده در مناطق خزری نیز اریبی منفی دارد که ممکن است ناشی از ضعف مدل اقلیمی مورد استفاده در پارامترسازی بارش‌های همرفتی باشد. علاوه بر آن، نتایج نشان می‌دهند که عمده‌خطای ماهانه در ماه‌های گرم سال رخ داده است که بیشترین مقدار آن مربوط به ماه‌های سپتامبر و آگوست است. به‌استثنای نواحی ساحلی شمال کشور، میانگین بارش ماه‌های گرم سال در بیشتر ایستگاه‌های کشور بسیار کم است، بنابراین، با توجه به ماهیت بارش‌های همرفتی در ماه‌های مذکور، وجود یک ناپایداری محلی می‌تواند موجب خطای زیادی در شبیه‌سازی‌های بارش شود. نتایج پژوهش جاری با یافته‌های کامکا و همکاران (۲۰۰۶) و کومار و همکاران (۲۰۰۶) مبنی بر ضعف شبیه‌سازی بارش‌های منطقه‌ی همگرایی حاره‌ای آفریقا و مونسونی هندوستان که از نوع بارش‌های همرفتی هستند، مطابقت دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

با هدف صحت‌سنجی و بررسی توانمندی مدل اقلیمی PRECIS در شبیه‌سازی بارش ایران، این مدل با قدرت تفکیک افقی ۰/۴۴ درجه‌ی جغرافیایی برای دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۷۶ در دو حالت با چرخه‌ی سولفور و بدون چرخه‌ی سولفور اجرا شد. با توجه به توزیع نامناسب مکانی ایستگاه‌های هواشناسی و اینکه برای بسیاری از خروجی‌های شبکه‌ای مدل، داده‌های معادل آن در سطح زمین وجود ندارد، بنابراین با دو دیدگاه ایستگاهی (نقطه‌به‌نقطه) و ناحیه‌ای، توانمندی مدل مورد بررسی قرار گرفت و میانگین خطا و اریبی مدل محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهند که میانگین کلی خطای شبیه‌سازی حدود ۵/۳ درصد است که بیشترین آن در نواحی بارشی فارسی، هرمزی، خوزی و خزری به‌ترتیب با ۲۴/۹، ۱۶/۹، ۱۲/۲ و ۱۰/۲- درصد رخ داده است. به‌طور کلی شبیه‌سازی‌های بارش در نواحی جنوبی کشور اریبی مثبت دارد که ممکن است ناشی از همجواری آنها با منابع رطوبتی پهنه‌های آبی جنوب کشورمان در یاخته‌های بزرگ‌مقیاس مدل‌های گردش عمومی است. رطوبت یاخته‌های بزرگ‌مقیاس در حین ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی به ابعاد منطقه‌ای انتقال می‌یابد. در همین ارتباط، اریبی منفی بارش‌های خزری می‌تواند ناشی از به‌کارگیری طرحواره بارش همرفتی نامناسب در مدل

منطقه‌ای باشد. کمترین میانگین خطای شبیه‌سازی متعلق به نواحی بارشی کردی، آذری، میانه‌ی شمالی و خراسان شرقی با میانگین حدود یک درصد است. بیشترین خطای شبیه‌سازی بارش‌های ماهانه مربوط به ماه‌های گرم سال است که همراه با بارش‌های همرفتی هستند. در بین ماه‌های سال، کمترین میانگین خطای شبیه‌سازی ماهانه مربوط به فوریه است. فصل بهار با $0/1-$ میلی‌متر و زمستان با $17/2-$ میلی‌متر به ترتیب کمترین و بیشترین اریبی‌های فصلی را دارند. همچنین بدترین شبیه‌سازی فصلی انحراف معیار به میزان $72/5$ میلی‌متر، در فصل زمستان با روش تحلیل ایستگاهی و بدون لحاظ چرخه‌ی سولفور و بهترین شبیه‌سازی انحراف معیار به میزان $13/9$ میلی‌متر در فصل تابستان با روش تحلیل ناحیه‌ای با لحاظ چرخه‌ی سولفور محاسبه شده است. بنابراین استفاده نکردن از چرخه‌ی سولفور منجر به بروز خطای کمتری در شبیه‌سازی انحراف معیار فصلی خواهد شد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شبیه‌سازی بارش‌ها با مدل PRECIS در مقیاس ناحیه‌ای ضعیف بوده، اما توانمندی خوبی را در شبیه‌سازی بارش در مقیاس کل کشور دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند در واسنجی مدل PRECIS و تحلیل خطا و انحراف معیار داده‌های آن در شبیه‌سازی اقلیم دهه‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

از سازمان هواشناسی کشور برای حمایت مالی از پروژه و تجهیز آزمایشگاه شبیه‌سازی اقلیمی پژوهشکده اقلیم‌شناسی و از مرکز هادلی انگلیس برای در اختیار گذاردن مدل PRECIS و داده‌های شرایط مرزی مورد نیاز، قدردانی می‌شود.

منابع

- Khan, A. M., Shrestha, M. L., 2005, **Enhancement of National Capacities in the Application of Simulation Models for the Assessment of Climate Change and its Impacts on Water Resources**, Food and Agricultural Production, Final Report for APN CAPaBLE, Project, PP. 96.
- Alcamo, J., Henrichs, T., Rosch, T., 2000, **World Water 2025: Global Modeling and Scenario Analysis for the World Commission on Water for 21st Century**, Kassel University Press, World Water Series, Technical Report, center of Environmental Systems Research University of Kassel, Germany.
- Alijani, B., 2003, **Weather and Climate of Iran**, 6th Edition, Payame Noor University Press, Tehran, Iran.
- Babaeian, I., Karimian, M., Modirian, R., Habibi, M. N., 2007, **Simulation of 1376 and 1379 Winter Precipitations Using RegCM3 Regional Climate Model**, Geography and Development Iranian Journal, No.10, PP. 55-72.
- Cox, P. M., Betts, R. A., Bunton, C. B., Essery, R. L. H., Rowntree, P. R. and Smith, J., 1999, **The Impact of New Land Surface Physics on the GCM Simulation of Climate and Climate Sensitivity**, Climate Dynamic Journal, No. 15, PP. 183-203.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B. & Wood, R. A., 2000, **the Simulation of SST, Sea Ice Extents and Ocean Heat**

- Transports in a Version of the Hadley Centre Coupled Model without Flux Adjustments**, *Climate Dynamic Journal*, No. 16, PP. 147-168.
- Gregory, D. & Rowntree, P. R., 1990, **A Mass-flux Convection Scheme with Representation of Cloud Ensemble Characteristics and Stability Dependent Closure**, *Monthly Weather Review*, 118, PP. 1483-1506.
- Im, E. S., Kwon, W. T., Ahn, J. B., Giorgi, F., 2007, **Multi-decadel Scenario Simulation over Korea Using a One-way Double-nested Regional Climate Model System**, Part 1, Recent Climate Simulation (1971-2000), *Journal of Climate Dynamics*, Vol. 28, PP. 759-780.
- Im, E. S., Park, E. H., Kwon, W. T., Giorgi, F., 2006, **Present Climate Simulation over Korea with a Regional Climate Model Using a One-way Double-nested System**, *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 86, PP. 187-200.
- Islam, M. N., Mannan, A. M., Devkota, L. P., Nessa, M., 2005, **Validation of PRECIS Regional Climate Model in Bangladesh**, Technical Report, Bangladesh University of Engineering and Technology.
- Islam, S., Rehman, N., 2006, **Future Change in the Frequency of Warm and Cold Spells Duration over Pakistan Simulated by the PRECIS Regional Climate Model**, Presented to Young Scientist Conference, 5-12 Nov., Beijing, China.
- Jones, R.G., Noguer, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S. S., Jenkins, G.J., and Mitchell, J. F. B., 2004, **Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS**, Met Office Hadley Center, Exter, Uk.
- Kamga, A., Buscarlet, E., 2006, **Simulation of the 1961-1990 Climate of Western Africa Using a Regional Climate Model and Validation**, *Journal of La Meteorology*, in French, No. 52, PP. 28-37.
- Kumar, K. R., Sahai, A. K., Kumar, K. K., Patwardhan, S. K., Mishra, P. K., Revadekar, J. V., Kamala, K., Pant, G. B., 2006, **High-resolution Climate Change Scenarios for India for the 21st Century**, *Journal of Current Science*, Vol. 90, No. 3, PP. 334-345.
- Lobell, D. B., Field, C. B., Cahill, K. N., Bonfils, C., 2006, **Impacts of Future Climate Change on California Crop Yields: Model Projections with Climate and Crop Uncertainties**, *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, No. 141, PP. 208-218.
- Masoudian, S. A., 2005, **Detection of Precipitation Regimes of Iran Using Cluster Analysis**, *Geographical Research*, No. 52, PP. 47-59.
- Modirian, R., Babaeian, I., Karimian, M., 2010, **The Optimum Configuration of RegCM3 Model for Simulation Precipitation and Temperature at Autumn Seasons over Khorasan Region in 1991-2000**, *Physical Geography Research Quarterly*, No. 70, PP. 107-119.
- Soltanzadeh, I., Ahmadi-givi, F. and Irannejad, P., 2007, **A Three-month Study of the Effects of Zagros Mountain Range on Musicale Currents in East of Zagros Using RegCM3 Regional Model**, *Journal of the Earth and Space Physics*, Vol. 33, No. 1, PP. 31-50.
- Tian, H., Wu, B., Xu, Y., Jiang, S., Wang, X., 2006, **Detection and Projection of Climate Change in Jianguhai Valley in China**, *Proceeding of SPIE*, Vol. 6298, SPIE Press, Beijing.

Wilson, S., Hassell, D., Hein, D., Jones, R., Taylor, R., 2005, **Installing and Using the Hadley, Center Regional Climate Modeling System, Precise Version 1.4**, Met Office Hadley Center, Exeter, UK.

Yinlong, X., Xiaoying, H., Yong, Z., Wantao, L., Erda, L., 2006, **Statistical Analysis of the Climate Change Scenarios over China in the 21st Century**, Advances in Climate Change Research, No. 2, PP. 50-53.

Archive of SID