

## ساختار هندسی جت آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین و پاسخ آن به گرمایش زمین در مدل‌های CMIP5

شاهین عالمزاده<sup>۱</sup>، فرهنگ احمدی گبری<sup>۲\*</sup>، علیرضا محب‌الحججه<sup>۳</sup>، و دانیال یازجی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۹)

### چکیده

در این پژوهش، چگونگی شبیه‌سازی جت جنب‌حاره‌ای آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین در مقایسه با داده‌های بازتحلیل و همچنین شبیه‌سازی پاسخ این جت به تغییر اقلیم در خروجی مدل‌های مرحله پنجم از «پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت شده» موسوم به CMIP5 ارزیابی و تحلیل می‌شود. داده‌های بازتحلیل مورد استفاده در این کار برای بررسی خطای مدل‌ها، ERA-Interim می‌باشد. این مطالعه بر مبنای شاخص‌های هندسی جت شامل عرض جغرافیایی یا به‌اختصار عرض جت، پهنا و تندی جت است، و منطقه جت به دو قطاع مجزای آسیا و آفریقا تقسیم می‌شود.

مهم‌ترین ویژگی‌های چرخه فصلی جت در دوره گذشته که در میانگین چند مدلی CMIP5 شبیه‌سازی می‌شود، عبارت از شیب تغییرات مثبت (منفی) از فصل سرد (گرم) به گرم (سرد) در شاخص عرض جت و برعکس این چرخه در دو شاخص تندی و پهنای جت برای هر دو قطاع است. بر اساس نتایج بررسی، عرض جت در همه فصل‌ها و تندی جت در همه فصل‌ها به‌جز بهار در قطاع آسیا بیشتر از آفریقا است. این ویژگی‌ها به‌خوبی با داده‌های بازتحلیل همخوانی دارد و برای بیشتر فصل‌ها و شاخص‌ها، میانگین چند مدلی خطا استوار نمی‌باشد. خطاهای استوار برای عرض جت در میانگین چند مدلی، به تابستان و زمستان قطاع آفریقا (به‌ترتیب  $-۱/۸۶$  و  $-۰/۹۰$  درجه)، برای پهنای جت به تابستان قطاع آسیا ( $۰/۹۱$  درجه) و برای تندی جت به زمستان و پاییز قطاع آفریقا (به‌ترتیب  $-۲/۹۲$  و  $۱/۸۲$ ) و تابستان آسیا ( $-۲/۹۹$  m/s) مربوط می‌شود.

پاسخ جت به گرمایش زمین، در همه شاخص‌ها و در بیشتر فصل‌های دو قطاع، در سناریوی RCP4.5 ضعیف‌تر از RCP8.5 است. در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 میانگین جهانی واداشت تابشی کل ناشی از گسیل انسانی گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰ (پایان قرن بیست‌ویکم) به‌ترتیب  $۴/۵$  و  $۸/۵$  W/m<sup>2</sup> فرض می‌شود. تغییرات برخی از شاخص‌ها در بعضی از فصل‌ها از دوره گذشته به آینده در میانگین همادی چند مدلی استوار است. تغییرات استوار مربوط به سناریوی RCP8.5 برای میانگین چند مدلی بدین‌صورت است که در فصل بهار، در هر دو قطاع آفریقا و آسیا، پهنای جت به‌ترتیب حدود  $۰/۵$  و  $۰/۲$  درجه و تندی جت در قطاع آسیا حدود  $۱/۱$  m/s افزایش می‌یابد. در تابستان، در قطاع آفریقا، تندی جت کاهش می‌یابد (حدود  $۰/۷$  m/s) ولی در قطاع آسیا، جت علاوه بر تقویت ( $۰/۴$  m/s)، حدود  $۰/۸$  درجه به سمت استوا جابه‌جا می‌شود. در فصل پاییز، در قطاع آفریقا، تندی جت کاهش ( $-۱/۳۹$  m/s) یافته و عرض جت حدود  $۰/۳$  درجه به سمت قطب جابه‌جا می‌شود. دیگر نکته قابل‌توجه آن است که برای فصل زمستان و هر دو قطاع، میانگین چند مدلی تغییر استواری را در هیچ‌یک از شاخص‌های جت، به‌جز افزایش جزئی و نسبتاً استوار در پهنا برای قطاع آفریقا (حدود  $۰/۲$  درجه) نشان نمی‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** جت آفریقا-آسیا، گرمایش زمین، مدل‌های CMIP5، خطای مدل‌ها، شاخص‌های هندسی، میانگین چند مدلی

## ۱ مقدمه

چگونگی پاسخ جریان جتی و مسیر توفان به افزایش گازهای گلخانه‌ای یکی از زمینه‌های مهم مورد بحث و مطالعه پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده است. مشاهدات (تامپسون و همکاران، ۲۰۰۰؛ تامپسون و سولومون، ۲۰۰۲) و شبیه‌سازی‌های عددی (شیندل و همکاران، ۱۹۹۹؛ فایف و همکاران، ۱۹۹۹؛ کوشنر و همکاران، ۲۰۰۱؛ کای و همکاران، ۲۰۰۳؛ شیندل و اشمیت، ۲۰۰۴؛ یین، ۲۰۰۵؛ آربلستر و مییل، ۲۰۰۶) نشان‌دهنده جابه‌جایی قطب‌سوی جت و مسیر توفان در پاسخ به واداشت‌های فعالیت بشری می‌باشند. همچنین، در نتایج شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی ارائه شده در گزارش چهارم از هیئت چند دولتی تغییر اقلیم (IPCC)، جابه‌جایی قطب‌سوی جت‌های عرض میانی در سناریوهای گرمایش زمین دیده می‌شود (میلر و همکاران، ۲۰۰۶؛ لو و همکاران، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸). پاسخ گردش‌های جوّی به گرمایش زمین در گزارش‌های IPCC بر مبنای شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی در «پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت شده» (CMIP) است. در مرحله‌های سوم (CMIP3) و پنجم (CMIP5) از این پروژه، سناریوهای متفاوتی از واداشت‌های فعالیت بشری و گسیل گازهای گلخانه‌ای تعریف شده است. در پژوهش‌های پیشین درباره پاسخ جت به گرمایش زمین بر اساس شبیه‌سازی مدل‌های CMIP، عمدتاً پاسخ گردش‌های جوّی واقع در عرض‌های میانی به صورت میانگین مداری و یا برای جت اطلس، جت آرام و جت نیمکره جنوبی مورد توجه قرار گرفته است (بارنز و پولوانی، ۲۰۱۳؛ گربر و سان، ۲۰۱۴). تا آنجا که ما اطلاع داریم، تا کنون مطالعه‌ای بر روی پاسخ جت جنب‌حاره‌ای آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین به گرمایش زمین بر مبنای شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی انجام نشده است. جت جنب‌حاره‌ای یکی از معیارهای تعریف مرز رژیم‌های حاره‌ای (کمربند حاره‌ای) زمین بوده که منطبق بر نوار

خشک جنب‌حاره‌ای است. جابه‌جایی قطب‌سوی جت جنب‌حاره‌ای ناشی از تغییر اقلیم، به معنای جابه‌جایی قطب‌سوی نوار خشک جنب‌حاره‌ای است که سبب نگرانی بسیار برای ساکنین مناطق نیمه‌خشک واقع در همسایگی قطب‌سوی نوار خشک جنب‌حاره‌ای می‌شود (سیدل و همکاران، ۲۰۰۸). ایران و خاورمیانه نیز از جمله ناحیه‌هایی هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک منطبق بر موقعیت جت جنب‌حاره‌ای آفریقا-آسیا قرار گرفته‌اند. بنابراین، هرگونه تغییر در ویژگی‌های این جت برای کشور ما بسیار حائز اهمیت است.

هدف نویسندگان در پژوهش حاضر، بررسی و سعی در پاسخ به چهار پرسش مشخص درباره جت جنب‌حاره‌ای آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین است: (۱) مدل‌های اقلیمی CMIP5، ویژگی‌های هندسی جت آفریقا-آسیا را چگونه و با چه مقدار خطا شبیه‌سازی می‌کنند؟ (۲) خطای مدل‌ها در شبیه‌سازی این جت در فصل‌های مختلف و نیز در قطعات‌های مختلف محدودده آفریقا-آسیا چه تفاوت‌هایی دارد؟ (۳) پاسخ موقعیت مکانی، تندی و پهنای جت آفریقا-آسیا (در تراز زبرین وردسپهر) به تغییر اقلیم بر اساس سناریوهای گرمایش زمین در مدل‌های CMIP5 چگونه است؟ (۴) پاسخ جت آفریقا-آسیا به گرمایش زمین در فصل‌های مختلف و نیز قطعات‌های مختلف آفریقا-آسیا چه تفاوت‌ها یا شباهت‌هایی دارد؟

در بخش ۲، داده‌ها و روش تحقیق شرح داده خواهد شد. چگونگی شبیه‌سازی هندسه جت آفریقا-آسیا در مدل‌های CMIP5 و همچنین خطای مدل‌ها در بخش ۳ مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج مربوط به پاسخ جت به گرمایش زمین نیز در بخش ۴ ارائه می‌شود. در نهایت، بخش ۵ به خلاصه نتایج و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

## ۲ داده‌ها و روش تحقیق

در این پژوهش، داده‌های خروجی ۶۹ اجرای ۲۳ مدل GCM در مرحله پنجم از «پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت شده» موسوم به CMIP5 (تیلور و همکاران، ۲۰۱۲) مورد استفاده قرار گرفته است. فهرست اسامی این مدل‌ها در جدول ۱ آمده است. داده‌های به کار رفته در پژوهش حاضر شامل میانگین روزانه باد مداری در تراز ۲۵۰ hPa است. این داده‌ها سه سناریو به نام‌های سناریوی تاریخی (historical، دوره ۲۶ ساله ۱۹۸۰-۲۰۰۵)، RCP4.5 و RCP8.5 (دوره ۲۴ ساله ۲۰۰۹-۲۰۷۶) را در بر می‌گیرد. در سناریوی تاریخی، واداشت گازهای گلخانه‌ای مطابق مشاهدات گذشته در قرن بیستم است؛ ولی سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 متناظر با آینده‌ای هستند که میانگین جهانی واداشت تابشی کل ناشی از گسیل انسانی گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰ (پایان قرن بیست و یکم) به ترتیب به ۴/۵ و ۸/۵ وات بر متر مربع برسد. هدف این پژوهش بررسی پاسخ جت به افزایش گازهای گلخانه‌ای است و بدین منظور از بین سناریوهای RCP که برای کل قرن آینده، شیب افزایشی برای گسیل گازهای گلخانه‌ای در نظر می‌گیرند، RCP4.5 به عنوان خوش‌بینانه‌ترین و RCP8.5 به عنوان بدبینانه‌ترین شیب افزایشی (سناریو) انتخاب شده است. علت تعیین دوره‌های زمانی مذکور در این پژوهش آن است که وضع اقلیم ربع قرن آخر قرن بیستم با وضع اقلیم ربع قرن آخر قرن بیست و یکم مقایسه شود؛ زیرا در این حالت، فاصله زمانی حدود یک قرن بین دو دوره وجود دارد و تغییرات اقلیمی بهتر نمایان می‌شود. در پروژه CMIP5 در برخی از مدل‌ها، برای هر سناریو چند آزمایش همادی انجام شده است که در اینجا تنها یک عضو از مجموعه آزمایش‌های همادی برای هر یک از سناریوهای هر مدل استفاده شده است. همچنین، در مطالعه حاضر از داده‌های بازتحلیل ERA-Interim (دی و همکاران، ۲۰۱۱) در دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۵، برای مقایسه با

دوره تاریخی از مدل‌های CMIP5 و بررسی خطای مدل‌ها استفاده شده است. این داده‌ها، شامل میانگین روزانه باد مداری در تراز ۲۵۰ hPa است. تعریف تمام ویژگی‌های هندسی جت و روش محاسبات با استفاده از این داده‌ها مانند داده‌های CMIP5 است.

برای بررسی شبیه‌سازی جت آفریقا-آسیا و پاسخ آن به گرمایش زمین، ناحیه آفریقا-آسیا را به دو قطاع شمال آفریقا (۱۵ درجه غربی تا ۳۰ درجه شرقی و ۰-۵۰ درجه شمالی) و قطاع جنوب غرب آسیا (۳۰-۷۵ درجه شرقی و ۰-۶۰ درجه شمالی) تقسیم کرده (شکل ۱-الف) و ویژگی جت‌های هر قطاع را به طور جداگانه محاسبه می‌کنیم. از این پس، در این مقاله این دو قطاع را به ترتیب «آفریقا» و «آسیا» می‌نامیم. با توجه به اینکه در این بازه عرض جغرافیایی در بعضی از فصل‌ها ممکن است جت - قطبی نیز وجود داشته باشد، جداسازی بیشینه جت قطبی از جت جنب حاره در الگوریتم محاسبات در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، شبیه‌سازی جت و پاسخ آن به گرمایش زمین از دیدگاه هندسه جت بررسی می‌شود. برای این منظور، در تراز ۲۵۰ هکتو پاسکال و در هر یک از دو قطاع مذکور، سه شاخص هندسی شامل عرض جغرافیایی یا به اختصار عرض، تندی و پهنای جت را به صورت روزانه تعریف می‌کنیم. می‌دانیم که تراز بیشینه جت در وردسپهر زبرین از یک فصل به فصل دیگر و نیز از یک سناریو به سناریوی دیگر تغییر می‌کند و بنابراین برای دقت بیشتر بهتر است میانگین چند تراز مثلاً از ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتو پاسکال به منزله جت وردسپهر زبرین در نظر گرفته شود، اما در داده‌های CMIP5 از تراز ۵۰۰ تا تراز ۱۵۰ هکتو پاسکال تنها برای تراز ۲۵۰ هکتو پاسکال، داده موجود است و لذا درون‌یابی قائم می‌تواند خطای زیادی را ایجاد کند. بنابراین برای پرهیز از این خطا، در اینجا شاخص‌های جت وردسپهر زبرین بر اساس تراز ۲۵۰ هکتو پاسکال تقریب زده شده‌اند. برای تعیین شاخص‌ها، از

جدول ۱. فهرست مدل‌های CMIP5 ارزیابی شده در مطالعه حاضر. داده‌های باد مداری تراز ۲۵۰ هکتو پاسکال سناریوهای تاریخی (historical). RCP4.5 و RCP85 از این مدل‌ها به‌کار رفته است. بنابراین برای هر مدل، داده‌های خروجی ۳ اجرا استفاده شده که در مجموع برای ۲۳ مدل، ۶۹ اجرا می‌شود.

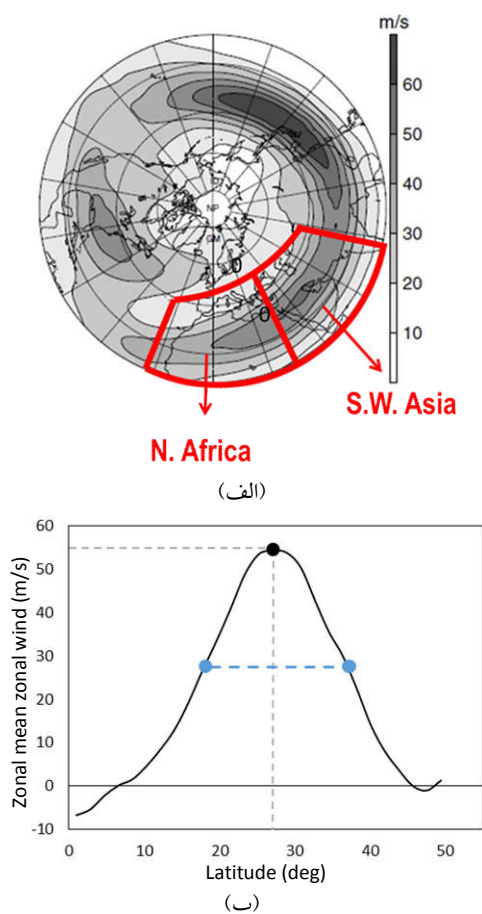
No.	Model	Expanded model name
1	ACCESS1.0	Australian Community Climate and Earth-System Simulator, version 1.0
2	ACCESS1.3	Australian Community Climate and Earth-System Simulator, version 1.3
3	BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, Climate System Model, version 1.1
4	BCC-CSM1.1(m)	Beijing Climate Center, Climate System Model, version 1.1, moderate resolution
5	CanESM2	Second Generation Canadian Earth System Model
6	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Climate Model
7	CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Climate Model with a resolved stratosphere
8	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques Coupled Global Climate Model, version 5
9	CSIRO-Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Mark 3.6.0
10	FGOALS-g2	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model gridpoint, version 1.0
11	GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model with Generalized Ocean Layer Dynamics (GOLD) component
12	GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model with Modular Ocean Model 4 (MOM4) component (ESM2M)
13	INMCM4	Institute of Numerical Mathematics Coupled Model, version 4.0
14	IPSL-CM5A-LR	L'Institut Pierre-Simon Laplace Coupled Model, version 5, coupled with NEMO, low resolution
15	IPSL-CM5A-MR	L'Institut Pierre-Simon Laplace Coupled Model, version 5, coupled with NEMO, mid resolution
16	IPSL-CM5B-LR	L'Institut Pierre-Simon Laplace Coupled Model, version 5, coupled with NEMO, low resolution
17	MIROC-ESM	Model for Interdisciplinary Research on Climate, Earth System Model
18	MIROC-ESM-CHEM	Model for Interdisciplinary Research on Climate, Earth System Model, Chemistry Coupled
19	MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate, version 5
20	MPI-ESM-LR	Max Planck Institute Earth System Model, low resolution
21	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute Earth System Model, medium resolution
22	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model, version 3
23	NorESM1-M	Norwegian Earth System Model, version 1 (intermediate resolution)

در شکل ۱-ب). برای به‌دست آوردن نقطه بیشینه و شاخص‌های مذکور، از روش برازش منحنی درجه دوم بر قله نیمرخ باد مداری و محاسبه مختصات بیشینه آن استفاده می‌کنیم. همچنین، نقاط تقاطع منحنی باد با خط نصف بیشینه باد ( $U/2$ )، به‌عنوان لبه‌های شمالی و جنوبی جت تعیین شده و فاصله بین این دو لبه، شاخص پهنای جت است که با  $W$  نشان داده می‌شود (خط‌چین آبی در شکل ۱-ب).

۳ شبیه‌سازی هندسه جت آفریقا-آسیا در مدل‌ها و خطای مدل‌ها در مقایسه با داده بازتحلیل پیش از بررسی چگونگی پاسخ جت آفریقا-آسیا به گرمایش زمین در شبیه‌سازی مدل‌های CMIP5، ابتدا باید به این پرسش مهم پاسخ دهیم که آیا خود جت و ویژگی‌های هندسی آن توسط مدل‌های GCM در این پروژه به‌خوبی شبیه‌سازی می‌شود؟ بنابراین در این بخش، شبیه‌سازی چرخه فصلی ویژگی‌های هندسی جت به

تعریف جت بر مبنای مدل برآمدگی (bump) (ویتمن و همکاران، ۲۰۰۵ و بارنز و پولوانی، ۲۰۱۳) استفاده شده است. بدین‌صورت که در هر روز، میانگین مداری باد مداری در هر قطاع برای تراز ۲۵۰ هکتو پاسکال را محاسبه کرده و توزیع آن نسبت به عرض جغرافیایی را به‌دست می‌آوریم (شکل ۱-ب). در این مدل، جت تنها بر اساس مؤلفه مداری باد تعریف می‌شود. شایان ذکر است که در بسیاری از مراجع همچون ویس (۲۰۰۶)، برای تعریف جت تنها از مؤلفه مداری باد استفاده می‌شود؛ زیرا مؤلفه نصف‌النهاری باد در مقایسه با مؤلفه مداری بسیار ناچیز است و در نتیجه تندی جت محاسبه‌شده بر مبنای مؤلفه مداری تفاوت بسیار اندکی با تندی حاصل از هر دو مؤلفه دارد. بنا بر تعریف شاخص‌های هندسی توسط بارنز و پولوانی (۲۰۱۳)، بیشینه نیمرخ، شاخصی است از تندی جت که آن را با  $U$  نشان می‌دهیم و عرض جغرافیایی بیشینه نیمرخ، شاخصی است از عرض جغرافیایی جت که با  $L$  نشان داده می‌شود (دایره مشکی

جت در محدوده مرز دو قطاع دارای خمیدگی زیاد است. در واقع، با اینکه روند افزایشی و کاهش‌ی تغییرات فصلی در قطاع آسیا مانند قطاع آفریقا است، ولی شیب این تغییرات از بهار به تابستان و نیز از پاییز به زمستان در قطاع آسیا بیشتر از آفریقا می‌باشد. علت این تفاوت بین عرض جغرافیایی جت در دو قطاع آن است که در فصل تابستان،



شکل ۱. (الف) نمایش موقعیت جغرافیایی جت آفریقا-آسیا و قطاع‌های شمال آفریقا (N. Africa) و جنوب غرب آسیا (S.W. Asia) که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. مناطق هاشور زده و پریندها نشان‌دهنده تندی باد مداری (برحسب m/s) در تراز ۲۰۰ هکتو پاسکال برای زمستان نیمکره شمالی و در دوره ERA15 بوده که برگرفته از کوچ و همکاران (۲۰۰۶) است. (ب) طرح‌واره‌ای از تعیین هندسه جت. منحنی، معرف نیمرخ میانگین مداری باد مداری تراز ۲۵۰ hPa در یک روز و در یک قطاع، و دایره مشکی بیشینه نیمرخ است که مختصات آن نشان‌دهنده شاخص‌های عرض (L) و تندی (U) جت می‌باشد. خط‌چین آبی، پهنای جت (W) در نصف بیشینه نیمرخ را مشخص می‌کند.

تفکیک قطاع در مدل‌ها و مقایسه آن با چرخه فصلی هندسه جت در داده‌های بازتحلیل ERA-Interim مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، میانگین زمانی بلندمدت (۱۹۸۰-۲۰۰۵) هر یک از سه شاخص هندسی جت به تفکیک فصل، در هر قطاع و برای سناریوی تاریخی مربوط به هر یک از ۲۳ مدل و همچنین در دوره مشابه از داده‌های بازتحلیل محاسبه می‌شود. در جدول ۲، حاصل این محاسبات برای شاخص عرض جغرافیایی جت برای نمونه و ارجاع ارائه شده است. نتایج شاخص عرض جغرافیایی جت، در شکل‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود. در شکل ۲، چرخه فصلی شبیه‌سازی شده هر یک از ۲۳ مدل با خطوط خاکستری و میانگین چند مدلی با خط مشکی نشان داده شده است. در هر دو قطاع، عرض جت در میانگین چند مدلی و نیز در هر مدل، در فصل زمستان کمینه و در تابستان بیشینه است. روند تغییر عرض جت در میانگین چند مدلی از زمستان به بهار و از بهار به تابستان افزایشی و از تابستان به پاییز و زمستان کاهش‌ی است. روند تغییرات فصلی تک‌مدلی نیز در همه مدل‌ها مشابه میانگین چند مدلی است، فقط چند مدل در قطاع آسیا و یک مدل در قطاع آفریقا، روند تغییرات زمستان به بهار را برخلاف میانگین چند مدلی، کاهش‌ی نشان می‌دهند.

از نتایج کلیدی دیگر که از مقایسه عرض جت در هر فصل و بین دو قطاع به دست می‌آید، آن است که در همه فصل‌ها، عرض جت قطاع آسیا در میانگین چند مدلی و توزیع مدل‌ها بیشتر از عرض جت آفریقا است. این تفاوت در فصل‌های زمستان و بهار کم (حدود ۳ الی ۴ درجه)، ولی در فصل‌های تابستان و پاییز قابل توجه (حدود ۶ الی ۷ درجه) است. این امر بدین معنی است که در فصل‌های زمستان و بهار، بیشینه‌های جت در دو قطاع تقریباً هم‌عرض بوده و جت در محدوده مرز دو قطاع به صورت تقریباً مستقیم‌الخط است؛ اما در فصل‌های تابستان و پاییز

جدول ۲. چرخه فصلی میانگین عرض جغرافیایی جت در دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) در قطعات آسیا (اعداد سمت راست) و آفریقا (اعداد سمت چپ) برای هر یک از ۲۳ مدل، میانگین چندمدلی و داده بازتحلیل ERA-Interim

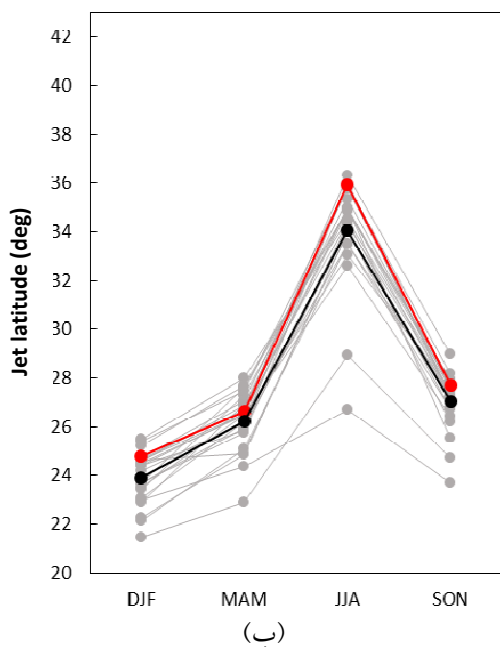
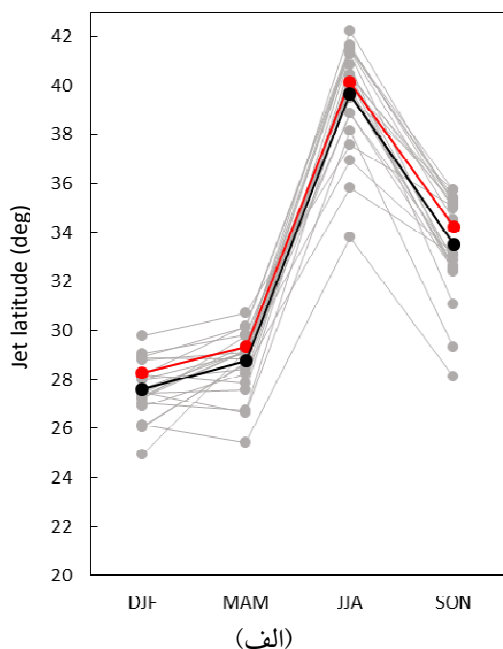
Model	DJF		MAM	JJA			SON	
1	23.71	27.43	25.92	27.56	34.05	40.84	26.22	31.07
2	24.41	28.22	25.84	27.85	34.33	41.27	27.47	32.51
3	22.11	26.05	25.07	28.72	33.51	38.85	27.25	32.44
4	22.25	26.89	24.88	28.26	34.00	40.37	27.11	32.85
5	24.67	28.92	26.68	30.14	36.33	41.48	28.98	35.73
6	23.70	29.06	27.61	29.81	34.89	39.50	27.69	35.73
7	24.43	28.78	26.52	29.10	34.99	40.02	27.19	35.25
8	22.91	27.24	26.94	29.77	34.41	39.90	26.75	32.54
9	25.42	28.88	27.45	28.85	35.93	40.32	28.17	35.38
10	23.44	24.95	27.30	29.17	34.97	36.95	25.52	33.12
11	23.06	27.28	26.20	29.17	33.50	39.71	26.74	32.62
12	23.53	27.34	26.47	29.17	33.07	38.85	27.56	33.03
13	24.63	28.27	26.54	29.31	34.84	42.22	27.96	35.19
14	24.50	27.99	26.50	28.42	32.63	35.84	26.41	33.07
15	25.48	29.77	28.00	30.73	34.49	37.59	27.61	35.08
16	22.98	26.15	24.36	25.43	26.71	33.79	23.72	28.14
17	23.70	27.44	25.76	29.36	36.00	41.55	27.19	35.29
18	24.21	27.63	26.16	29.13	36.01	41.45	27.30	35.43
19	25.23	26.09	27.69	28.64	34.92	40.45	27.89	35.12
20	24.75	28.21	27.06	30.17	35.78	41.65	27.67	34.98
21	24.60	28.01	26.89	29.08	35.36	41.40	27.63	34.51
22	21.45	27.49	22.90	26.64	28.94	38.13	24.72	29.33
23	24.66	27.04	24.90	26.72	34.01	40.14	27.26	32.42
mean	23.90	27.62	26.25	28.75	34.07	39.66	27.04	33.51
ERA-Interim	24.80	28.28	26.62	29.34	35.93	40.16	27.71	34.24

مقایسه بین دو قطاع، در فصل پاییز پراکندگی مدل‌ها در آسیا بیشتر از آفریقا است (به ترتیب ۸ و ۵ درجه)؛ اما در سایر فصول، پراکندگی مدل‌ها در دو قطاع تقریباً برابر است.

تا اینجا، شبیه‌سازی چرخه فصلی عرض جت در مدل‌ها شامل مقایسه نتایج مدل‌ها با یکدیگر و نیز با میانگین چند مدلی شرح داده شد. در ادامه به مقایسه نتایج مدل‌ها و میانگین چند مدلی با نتایج حاصل از داده‌های بازتحلیل برای ارزیابی «خطای» مدل‌ها در شبیه‌سازی عرض جت به تفکیک فصل و قطاع می‌پردازیم. در شکل ۲، چرخه فصلی شاخص عرض جت با استفاده از داده بازتحلیل با خط قرمز نشان داده شده است. با بررسی فاصله (انحراف) بین نتایج میانگین چند مدلی و نیز هر یک از مدل‌ها از نتایج داده بازتحلیل (فاصله نمودار مشکی و هر یک از نمودارهای خاکستری از نمودار قرمز)، می‌توان

به دلیل گرمایش قابل توجه جنوب قاره آسیا و فلات تبت و همچنین گردش‌های موسمی (مانسون) تابستانه در جنوب آسیا، عرض جت جنب‌حاره‌ای در جنوب غرب آسیا بسیار قطب‌سوتر از جت جنب‌حاره‌ای در سایر مناطق نیمکره شمالی قرار می‌گیرد. همچنین در سایر فصل‌ها و در قطاع آفریقا، مسیر توفان مدیترانه و برهم‌کنش پیچک‌های گذرنده از مدیترانه با شارش میانگین می‌تواند سبب آن شود که موقعیت جت جنب‌حاره‌ای در این قطاع، استواسوتر از قطاع آسیا باشد. از دیگر نکات مهم، مقایسه میزان پراکندگی توزیع مدل‌ها در هر یک از فصل‌ها و قطاع‌های مختلف است. بر اساس نتایج، در هر دو قطاع، کمترین پراکندگی (بازه کمینه تا بیشینه) مربوط به فصل‌های زمستان و بهار بوده که بازه بین کمینه تا بیشینه مدل‌ها حدود ۵ درجه است. بیشترین پراکندگی مدل‌ها در هر دو قطاع در فصل تابستان (حدود ۱۰ درجه) است. در

مدلی خطا برای عرض جت تقریباً منفی یک درجه بوده و خطای بیشتر مدل‌ها مقادیر منفی را نشان می‌دهند که حاکی از استواری خطا در میانگین چند مدلی است.

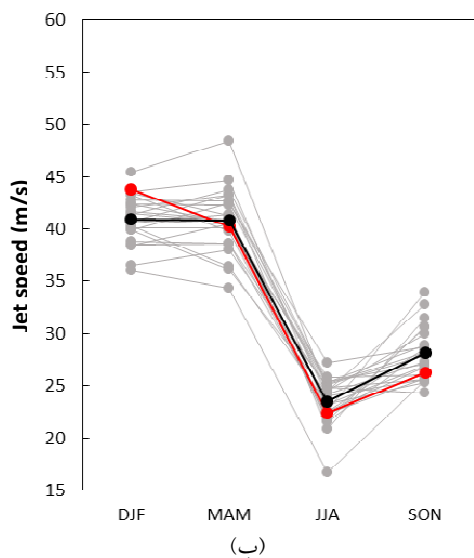
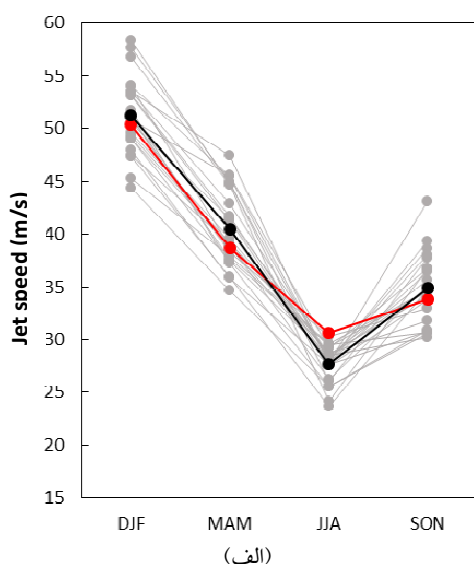


شکل ۲. چرخه فصلی میانگین عرض جت جغرافیایی جت در دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) در قطعات آسیا (الف) و آفریقا (ب) برای هر یک از ۲۳ مدل (خطوط خاکستری)، میانگین چندمدلی (خط مشکی) و داده بازتحلیل (خط قرمز).

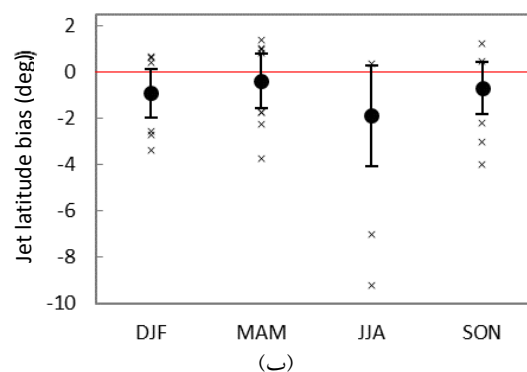
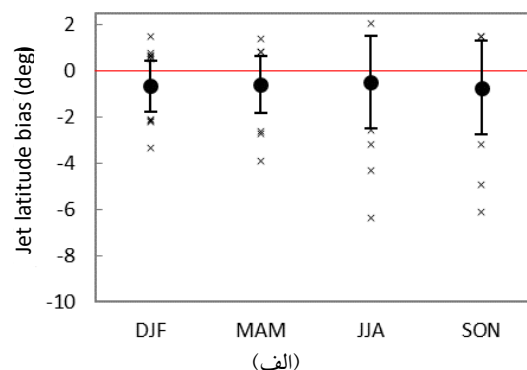
خطای مدل‌ها را به صورت توصیفی تحلیل کرد. برای ارزیابی کمی خطای مدل‌ها در شبیه‌سازی عرض جت، «خطای» هر مدل برابر است با تفاضل نتایج هریک از مدل‌ها (دایره‌های خاکستری در شکل ۲) از نتایج داده بازتحلیل (دایره‌های قرمز در شکل ۲) که در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳، میانگین چند مدلی خطا برای عرض جت با دایره مشکی، بازه یک انحراف معیار از توزیع خطای مدل‌ها با علامت بار و خطای مدل‌های خارج از این بازه با علامت ضربدر مشخص شده‌اند. در واقع، خط قرمز معرف خطای صفر بوده و میزان انحراف توزیع نتایج مدل‌ها از این خط نشان‌دهنده مقدار خطا است. مقادیر منفی و مثبت به ترتیب به معنای خطای استواسو و قطب‌سوی عرض جت در نتایج مدل‌ها نسبت به نتایج داده بازتحلیل می‌باشد.

در قطاع آفریقا و در فصل تابستان تقریباً همه مدل‌ها عرض جت را در استواسوی جت حاصل از داده بازتحلیل نشان می‌دهند و جت میانگین چند مدلی نیز با فاصله حدود ۲ درجه در استواسوی جت حاصل از داده بازتحلیل قرار دارد (شکل ۲-ب). بنابراین همان‌طور که در شکل ۳-ب مشخص است، بیشترین خطای مدل‌ها در شبیه‌سازی عرض جت، مربوط به تابستان قطاع آفریقا است. توزیع خطای مدل‌ها همگی در پایین خط صفر (مقادیر منفی) بوده که مؤید استواری (robustness) و سامانندی (systematicness) خطای مجموعه مدل‌ها می‌باشد و خطای میانگین چند مدلی عرض جت، تقریباً منفی ۲ درجه است. پس از آن، زمستان قطاع آفریقا بیشترین خطا را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲-ب، در این فصل عرض جت مربوط به میانگین چند مدلی با فاصله حدود یک درجه در استواسوی عرض جت حاصل از داده بازتحلیل قرار گرفته و بخش عمده توزیع مدل‌ها نیز در استواسوی این جت واقع هستند. با توجه به شکل ۳-ب نیز مشاهده می‌شود که در این فصل و در این قطاع، میانگین چند

چند مدلی عرض جت ناچیز و نزدیک به صفر است (شکل ۳). نکته جالب آن است که در هر دو قطاع و در همه فصل‌ها، چه مواردی که خطای مجموعه مدل‌ها استوار است و چه مواردی که ناستوار و ناچیز است، خطای عرض جت منفی (استواسو) می‌باشد. در مطالعات پیشین نیز خطای استواسو در جت اقیانوس اطلس و جت نیمکره جنوبی در مدل‌های CMIP5 مشاهده شده است (بارنز و پولوانی، ۲۰۱۳).



شکل ۴. مشابه شکل ۲ ولی برای تندی جت.



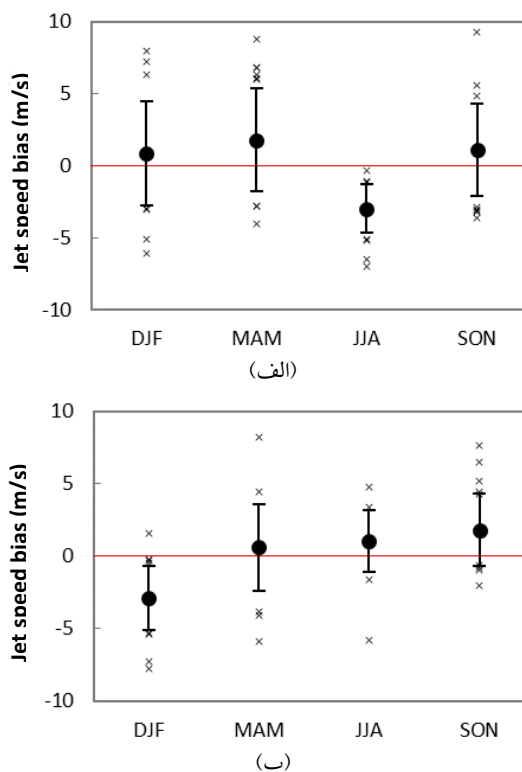
شکل ۳. خطای مدل‌ها (تفاضل مدل و داده بازتحلیل) در شبیه‌سازی میانگین فصلی شاخص عرض جت در دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) برای قطاع‌های آسیا (الف) و آفریقا (ب). دایره‌ها معرف میانگین چند مدلی (۲۳ مدل)، علامت‌های بار معرف بازه یک انحراف معیار از توزیع ۲۳ مدل و علامت‌های ضربدر نشان‌دهنده مدل‌های خارج از این بازه هستند. خط قرمز مربوط به مقدار صفر است.

اما در فصل‌های بهار و پاییز قطاع آفریقا و نیز در همه فصل‌های قطاع آسیا، توزیع عرض جت مربوط به مدل‌ها به‌طور تقریباً متقارن در دو طرف عرض جت حاصل از داده بازتحلیل تقسیم شده و به عبارتی مرکز توزیع چند مدلی عرض جت تقریباً منطبق بر عرض جت داده بازتحلیل است (شکل ۲). بر این اساس، در شکل ۳ بخش عمده توزیع خطای عرض جت مدل‌ها در دو طرف محور صفر قرار گرفته و مرکز توزیع در نزدیکی صفر می‌باشد. این امر بدین معنی است که مجموعه مدل‌ها، خطای استوار و سامانمندی را نشان نمی‌دهند. همچنین، عرض جت مربوط به میانگین چند مدلی در نزدیکی عرض جت داده بازتحلیل بوده (شکل ۲) و بنابراین خطای میانگین



میانگین چند مدلی و هم در توزیع مدل‌ها بزرگ‌تر از قطاع آفریقا است (به ترتیب حدود ۱۰، ۷ و ۴ متر بر ثانیه)، ولی در فصل بهار تندی جت هر دو قطاع تقریباً برابر است (شکل ۴). در مورد پراکندگی توزیع مدل‌ها، در فصل تابستان هر دو قطاع، کمترین پراکندگی مشاهده می‌شود و پراکندگی در سایر فصول تقریباً مشابه است.

در مقایسه با نتایج داده بازتحلیل، بیشترین انحراف تندی جت در توزیع مدل‌ها و میانگین چند مدلی از تندی جت داده بازتحلیل (شکل ۴) و در نتیجه بیشترین خطای تندی جت در توزیع مدل‌ها و میانگین چند مدلی (شکل ۵)، در فصل‌های زمستان و پاییز قطاع آفریقا و تابستان قطاع آسیا مشاهده می‌شود. در زمستان قطاع آفریقا، بخش عمده توزیع تندی جت مدل‌ها و نیز میانگین چند مدلی تندی کمتر از تندی جت داده بازتحلیل است (شکل ۴-ب). بنابراین توزیع خطای تندی مدل‌ها (شکل ۵-ب) نیز مقادیر منفی داشته که مؤید استواری خطای مجموعه مدل‌ها و میانگین چند مدلی است. خطای تندی جت میانگین چند مدلی تقریباً منفی  $2/9 \text{ m/s}$  است. برعکس، در فصل پاییز قطاع آفریقا، بخش عمده توزیع تندی جت مدل‌ها و میانگین چند مدلی تندی جت بیشتر از تندی جت داده بازتحلیل بوده (شکل ۴-ب) و مطابق آن توزیع خطای تندی جت مدل‌ها (شکل ۵-ب) نیز دارای مقادیر مثبت است که نشان‌دهنده استواری خطای مجموعه مدل‌ها می‌باشد و میانگین چند مدلی خطای تندی در حدود مثبت  $1/8 \text{ m/s}$  است. در تابستان قطاع آسیا، توزیع تندی جت تمامی مدل‌ها مقادیری کمتر از تندی جت داده بازتحلیل نشان می‌دهد (شکل ۴-الف). در نتیجه خطای تندی جت همه مدل‌ها منفی است و میانگین چند مدلی خطای تندی جت که حدود منفی  $2/9 \text{ m/s}$  می‌باشد استوار است (شکل ۵-الف). در سایر فصول دو قطاع، توزیع تندی جت مدل‌ها در دو طرف تندی جت داده بازتحلیل قرار داشته و مرکز توزیع تندی مدل‌ها و همچنین میانگین چند مدلی

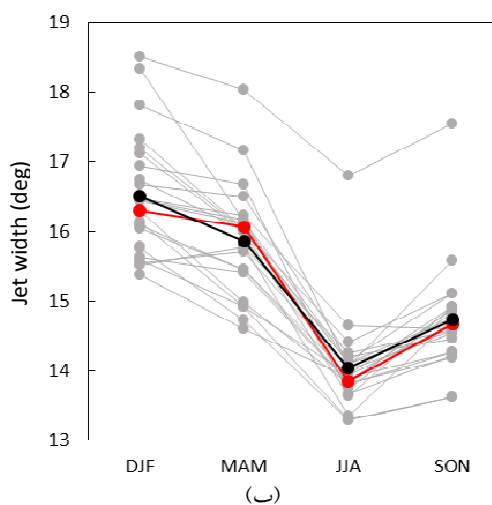
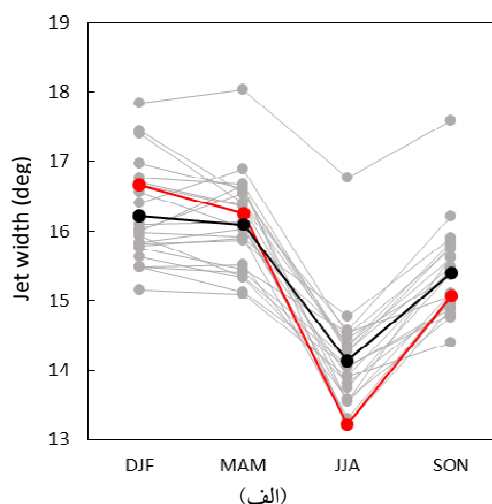


شکل ۵. مشابه شکل ۳ ولی برای تندی جت.

در شکل‌های ۴ و ۵، نتایج مربوط به شاخص تندی جت نشان داده شده است و علائم و رنگ‌ها به ترتیب مانند شکل‌های ۲ و ۳ می‌باشد. چرخه فصلی تندی جت، برعکس عرض جت است. در هر دو قطاع، در میانگین چند مدلی و نیز هر یک از مدل‌ها، بیشینه تندی در فصل زمستان و کمینه آن در فصل تابستان است (شکل ۴). شیب تغییرات فصلی برای میانگین چند مدلی، از زمستان به بهار و از بهار به تابستان منفی و از تابستان به پاییز و پاییز به زمستان مثبت است. شیب تغییرات تک مدلی نیز مانند میانگین چند مدلی است. تنها در روند تغییرات از زمستان به بهار قطاع آفریقا، شیب تغییرات میانگین چند مدلی ناچیز بوده و برخی از مدل‌ها شیب مثبت و برخی دیگر شیب منفی نشان می‌دهند. در مقایسه بین دو قطاع، نتیجه کلیدی آن است که در فصل‌های زمستان و پاییز و با شدت کمتر در فصل تابستان، تندی جت قطاع آسیا هم در

زمستان به بهار و از بهار به تابستان کاهش می‌یابد و از تابستان به زمستان به پاییز و از پاییز به زمستان افزایش می‌یابد. شیب تغییرات تک‌مدلی نیز مشابه میانگین چند مدلی است؛ با این تفاوت که از زمستان به بهار آسیا، برخی از مدل‌ها شیب منفی و برخی دیگر شیب مثبت نشان می‌دهند. نکته قابل ذکر آنکه در چند مدل، شیب تغییرات پهنای جت از زمستان به بهار در قطاع آفریقا، برخلاف اکثر مدل‌ها و میانگین چند مدلی، مثبت است. همچنین، در یک مدل شیب تغییرات از تابستان به پاییز در قطاع آفریقا، برخلاف دیگر مدل‌ها، منفی است. در مقایسه نتایج دو قطاع تفاوت چندانی وجود ندارد و تنها در پاییز، توزیع مدل‌ها و میانگین چند مدلی، جت آسیا را کمی پهن‌تر از جت آفریقا و در زمستان، جت آفریقا را کمی پهن‌تر از آسیا نشان می‌دهند. در مورد پراکندگی نتایج مدل‌ها، نکته حائز اهمیت وجود یک مدل است (مدل ۵) که دارای انحراف قابل توجه نسبت به توزیع پهنای جت دیگر مدل‌ها می‌باشد و در همه فصول و در دو قطاع، جت را پهن‌تر از نتایج بقیه مدل‌ها نشان می‌دهد (بالاترین نمودار خاکستری در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب). در مقایسه با نتایج داده بازتحلیل، تنها در تابستان قطاع آسیا، بیشترین انحراف پهنای جت مدل‌ها از پهنای جت بازتحلیل (شکل ۶-الف) و در نتیجه بیشترین خطای مدل‌ها و میانگین چند مدلی (شکل ۷-الف) دیده می‌شود. در واقع، تمامی مدل‌ها جت را پهن‌تر از جت مربوط به داده بازتحلیل نشان می‌دهند و خطای میانگین چند مدلی پهنای جت که تقریباً مثبت ۱ درجه است، استوار می‌باشد. در فصل‌های زمستان و پاییز قطاع آسیا، اگرچه میانگین چند مدلی پهنای جت دارای انحراف حدود نیم درجه نسبت به پهنای جت داده بازتحلیل است (شکل‌های ۶-الف و ۷-الف)، ولی توزیع نتایج مدل‌ها در دو طرف پهنای جت داده بازتحلیل قرار دارد که بیانگر استوار نبودن خطای میانگین چند مدلی است. در سایر موارد، شامل فصل بهار آسیا و همه فصل‌های قطاع آفریقا، انحراف

تندی تقریباً منطبق بر تندی جت داده بازتحلیل است (شکل ۴). به عبارتی دیگر، مرکز توزیع خطای تندی مدل‌ها و میانگین چند مدلی خطای تندی در این موارد نزدیک به صفر بوده (شکل ۵) و مجموعه مدل‌ها خطای استوار و محکمی را نشان نمی‌دهند.



شکل ۶. مشابه شکل ۲ ولی برای پهنای جت.

نتایج مربوط به پهنای جت در شکل‌های ۶ و ۷ آمده است و علائم و رنگ‌ها مانند شکل‌های پیشین برای دو شاخص دیگر است. چرخه فصلی پهنای جت (شکل ۶) تقریباً مشابه تندی جت است؛ بدین ترتیب که در هر دو قطاع، در میانگین چند مدلی شیب تغییرات پهنای جت از

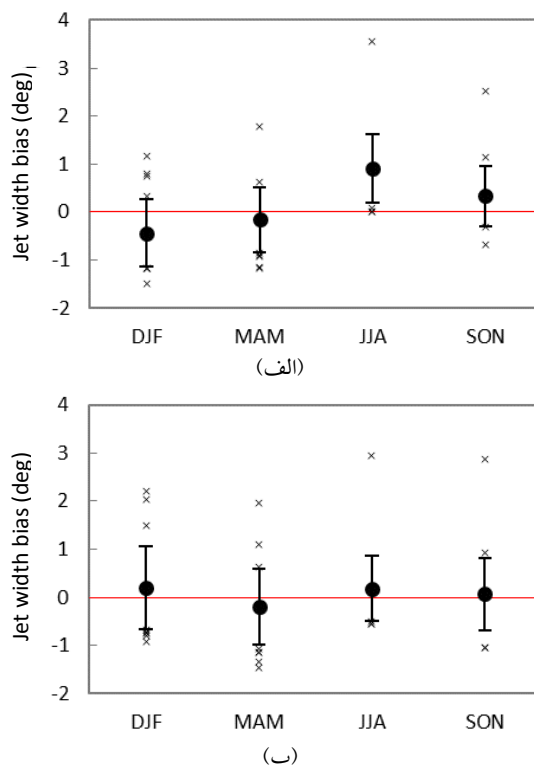
مدلی تندی جت تقریباً ۲ الی ۳ متر بر ثانیه است (شکل ۵). بنابراین در پاسخ به پرسشی که در ابتدای این بخش ذکر شد می‌توان گفت که مجموعه مدل‌های CMIP5 ویژگی‌های جت آفریقا-آسیا را در بیشتر فصل‌های هر دو قطاع به خوبی و با خطای کمی شبیه‌سازی می‌کنند و در نتیجه منطقی است که پاسخ جت مورد نظر به گرمایش زمین را در این مدل‌ها مورد بررسی قرار دهیم که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود. پس در بخش ۴ باید این نکته را در نظر داشته باشیم که برای هر شاخص، در فصل‌ها و قطاع‌هایی که بر اساس نتایج بخش حاضر، خطای مجموعه مدل‌ها استوار و محکم است، پاسخ شبیه‌سازی شده جت به گرمایش زمین کمتر قابل اعتماد خواهد بود.

#### ۴ پاسخ جت آفریقا-آسیا به گرمایش زمین در مدل‌ها

در این بخش، به بررسی و تحلیل چگونگی پاسخ جت آفریقا-آسیا به گرمایش زمین از دیدگاه هندسه جت، در شبیه‌سازی مدل‌های CMIP5 می‌پردازیم. هدف از این کار، ارزیابی و مقایسه چگونگی پاسخ جت به گرمایش زمین در فصل‌ها و قطاع‌های مختلف و سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه است. برای این منظور، میانگین زمانی بلندمدت هر یک از سه شاخص هندسی جت، به تفکیک فصل و قطاع، برای هر یک از سه سناریوی تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۷۶-۲۰۹۹) و در هر یک از ۲۳ مدل محاسبه شده است. تفاضل میانگین فصلی بلندمدت هر شاخص در دوره تاریخی از میانگین فصلی بلندمدت آن در هر یک از دوره‌های RCP4.5 و RCP8.5، پاسخ جت به گرمایش زمین بر اساس هر یک از دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه را تعیین می‌کند.

در شکل‌های ۸ و ۹، نتایج برای شاخص عرض جت به ترتیب برای دو قطاع آسیا و آفریقا، به تفکیک فصل و

پهنای جت میانگین چند مدلی و هر یک از مدل‌ها از پهنای جت داده بازتحلیل نزدیک به صفر و بی‌معنی است (شکل‌های ۶ و ۷).



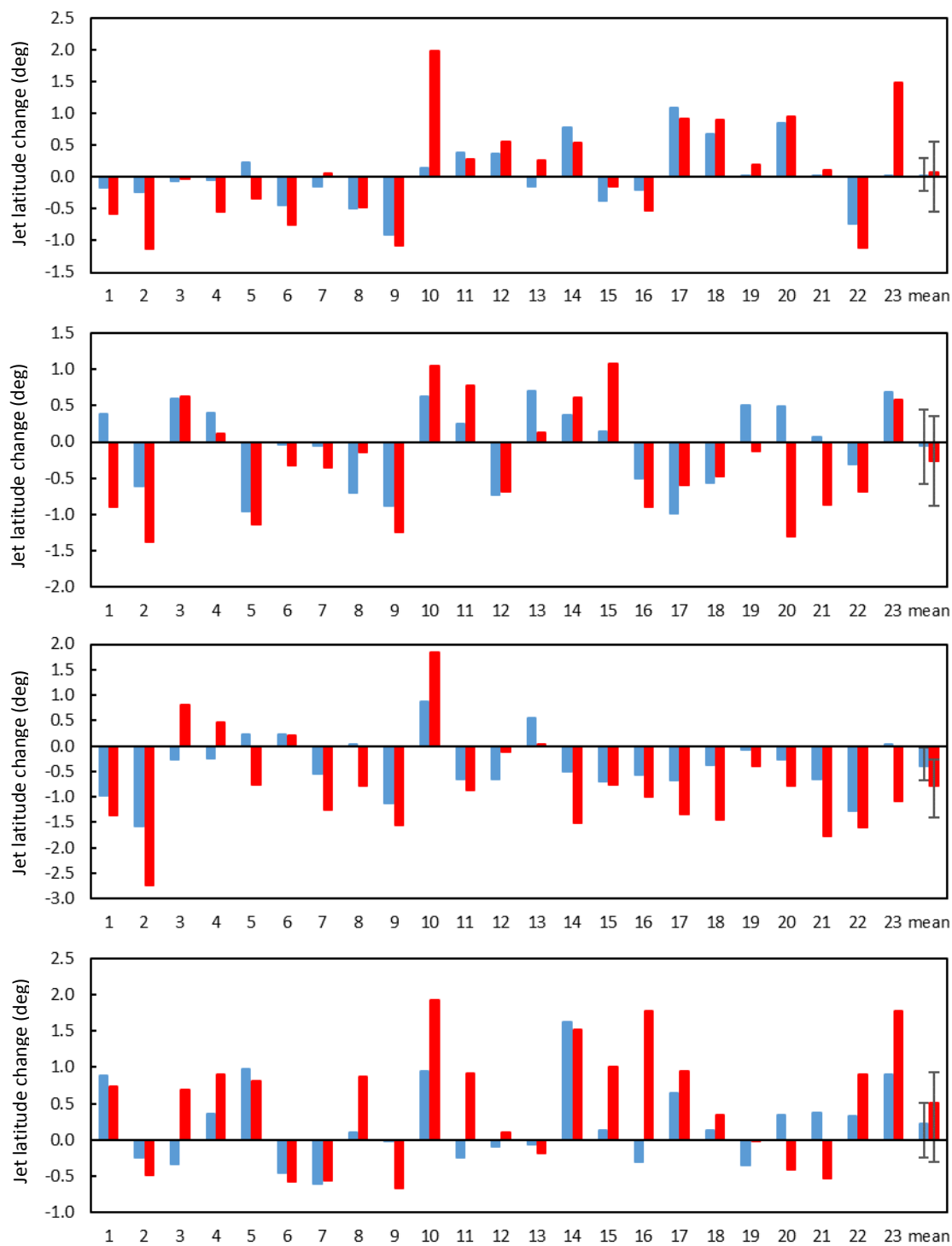
شکل ۷. مشابه شکل ۳ ولی برای پهنای جت.

در جمع‌بندی خطای مدل‌ها و انحراف آنها از نتایج داده بازتحلیل در شبیه‌سازی چرخه فصلی هندسه جت آفریقا-آسیا می‌توان گفت که در مورد شاخص‌های عرض (شکل ۳) و پهنای جت (شکل ۷)، در دو قطاع و در همه فصل‌ها، به جز شاخص عرض در تابستان قطاع آفریقا (شکل ۳-ب) و شاخص پهنای در تابستان قطاع آسیا (شکل ۷-ب)، توزیع نتایج مدل‌ها انحراف استوار و قوی را از نتایج داده بازتحلیل نشان نمی‌دهند و خطای میانگین چند مدلی نزدیک به صفر است. در مورد شاخص تندی جت، در تابستان قطاع آسیا و همچنین زمستان و پاییز قطاع آفریقا، نتایج مدل‌ها دارای انحراف استوار و قابل توجه از نتایج داده بازتحلیل بوده و بزرگی خطای میانگین چند

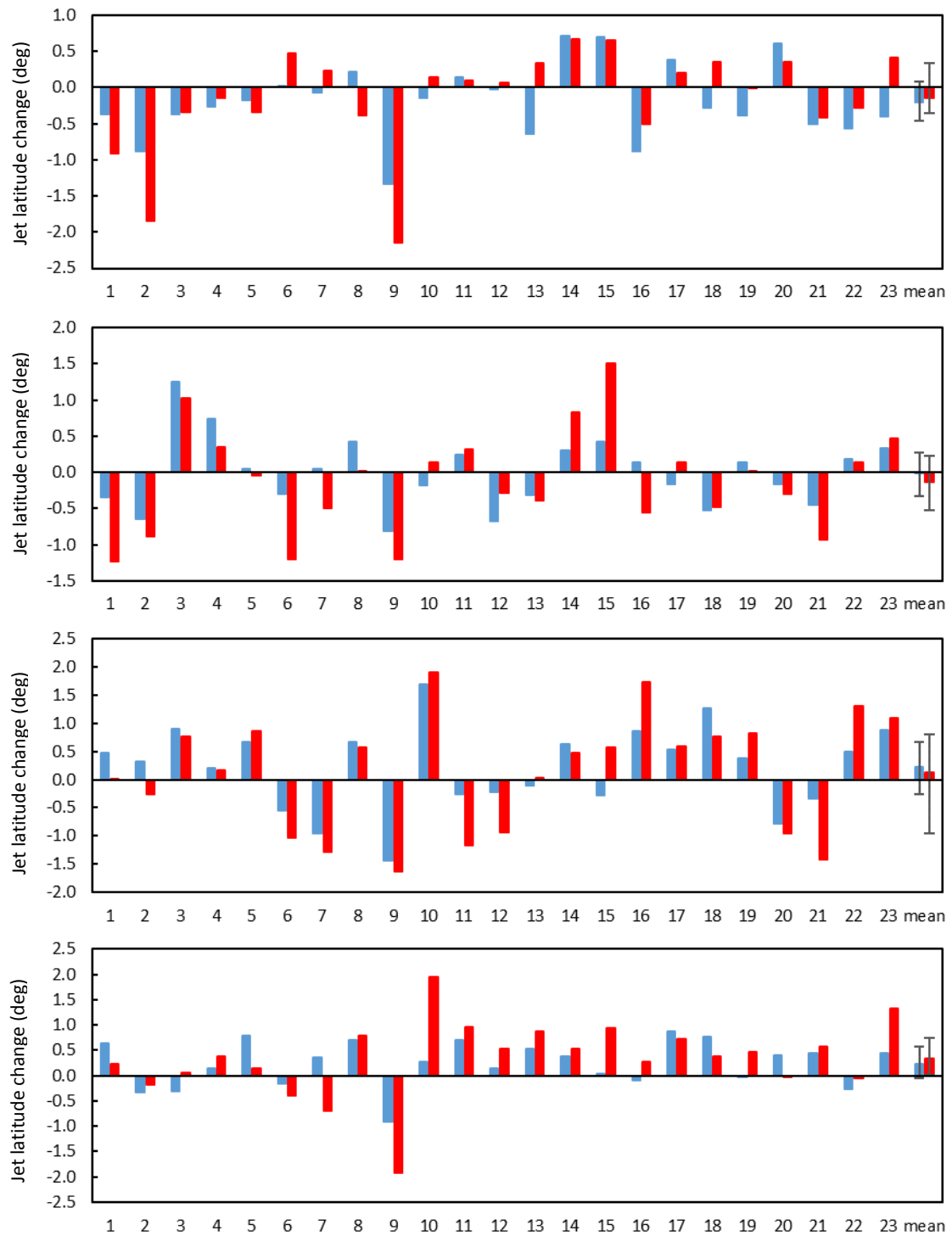
پراکندگی بین مدلی (بازه میان چارکی) پاسخ جت به میانگین چند مدلی پاسخ، نسبتاً کوچک است و فقط مقادیر کوچک‌تر از صفر را در برمی‌گیرد. به بیانی دیگر، پراکندگی نتایج مدل‌ها در علامت و مقدار جابه‌جایی جت کم است. این نتیجه را از سازگاری پاسخ جت در بین ۲۳ مدل (میل) نیز می‌توان استنباط کرد و همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر یک از دو سناریو، همه مدل‌ها (میل‌ها) به جز چهار مدل، جابه‌جایی عرض جت را استواسو نشان می‌دهند. بنابراین در تابستان، جابه‌جایی استواسوی جت در پاسخ به گرمایش زمین در میانگین چند مدلی به‌عنوان یک پاسخ استوار و محکم تلقی می‌شود که مقدار آن برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب حدود ۰/۴ و ۰/۸ درجه است. برخلاف نتایج فوق، بارنز و پولوانی (۲۰۱۳) نشان دادند که جت‌های اطلس و آرام واقع در نیمکره شمالی و نیز جت نیمکره جنوبی در فصل تابستان، در پاسخ به گرمایش زمین دچار جابه‌جایی قطب‌سو خواهند شد. بنابراین جابه‌جایی استواسوی جت جنب‌حاره‌ای قطاع آسیا در فصل تابستان در پاسخ به افزایش گازهای گلخانه‌ای، خاص این قطاع است که شاید بتوان آن را ناشی از تضعیف گردش‌های موسمی تابستانه جنوب آسیا در اثر گرمایش زمین تلقی کرد، پدیده‌ای که امروزه خشک‌سالی موسمی نامیده می‌شود. در پاییز قطاع آسیا (شکل ۸، ردیف آخر)، بزرگی جابه‌جایی جت در میانگین چند مدلی تقریباً مانند تابستان و بیشتر از زمستان و بهار بوده و علامت آن مثبت (قطب‌سو) است؛ اما نسبت پراکندگی بین مدلی نتایج به میانگین چند مدلی در این فصل در مقایسه با تابستان بزرگ‌تر است؛ یعنی در پاییز، جابه‌جایی جت در پاسخ به گرمایش زمین در میانگین چند مدلی، به‌اندازه پاسخ جت در تابستان استوار و قوی تلقی نمی‌شود.

به‌صورت نمودار میله‌ای نشان داده شده است. نمودارهای آبی و قرمز، جابه‌جایی عرض جت از دوره تاریخی به آینده را به ترتیب برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و هر یک از ۲۳ مدل نشان می‌دهند. در هر شکل، آخرین میله در سمت راست، بیانگر میانگین چند مدلی جابه‌جایی عرض جت و علامت‌های بار، نشان‌دهنده بازه چارک اول تا سوم از توزیع جابه‌جایی عرض جت در مدل‌ها بوده که معیاری از پراکندگی بین مدلی در شبیه‌سازی پاسخ جت به گرمایش زمین است. در قطاع آسیا و در فصل‌های زمستان و بهار، بزرگی میانگین چند مدلی جابه‌جایی عرض جت ناچیز و کمتر از ۰/۵ درجه است (شکل ۸، ردیف‌های اول و دوم). به‌علاوه، در این دو فصل نسبت پراکندگی بین مدلی (بازه میان چارکی) به میانگین چند مدلی جابه‌جایی جت در هر دو سناریو بزرگ است. توزیع نتایج مدل‌ها (بازه میان چارکی) حول مقدار صفر، تقریباً متقارن بوده و می‌توان گفت نیمی از توزیع جابه‌جایی جت در مدل‌ها مقادیر بزرگ‌تر از صفر و نیمی دیگر مقادیر کوچک‌تر از صفر دارند. بنابراین، پراکندگی نتایج مدل‌ها در مقدار و علامت جابه‌جایی جت زیاد است. این نتیجه را می‌توان از مشاهده عدم سازگاری بین میله‌های ۲۳ مدل نیز دریافت، به‌طوری‌که برای هر یک از دو سناریو تقریباً نیمی از مدل‌ها (میل‌ها)، جابه‌جایی عرض جت را مثبت (قطب‌سو) و نیمی دیگر آن را منفی (استواسو) نشان می‌دهند. این وضع بدین معنی است که در فصل‌های زمستان و بهار در قطاع آسیا، پاسخ استوار و قوی از شاخص عرض جت به گرمایش زمین در میانگین چند مدلی وجود ندارد.

در تابستان قطاع آسیا (شکل ۸، ردیف سوم)، بزرگی جابه‌جایی جت در پاسخ به هر دو سناریوی گرمایش زمین در میانگین چند مدلی بیشتر از دو فصل بهار و زمستان بوده و علامت آن منفی (استواسو) است. نکته مهم آن است که در این فصل و در هر دو سناریو، نسبت



شکل ۸. تغییر میانگین فصلی شاخص عرض جت از دوره تاریخی به RCP4.5 (نمودار آبی) و RCP8.5 (نمودار قرمز) در ۲۳ مدل برای قطب آسیا. آخرین میله در هر شکل، میانگین چندمدلی و علامت‌های بار بر روی آن، بازه چارک اول تا سوم از توزیع ۲۳ مدل را نشان می‌دهد.



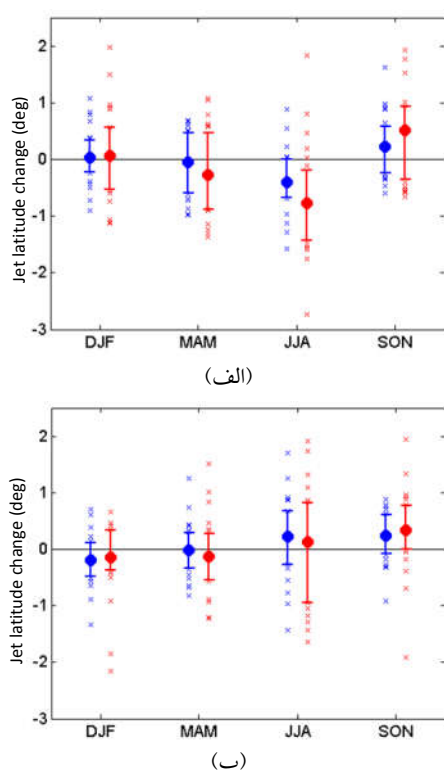
شکل ۹. مشابه شکل ۸ ولی برای قطاع آفریقا.

نمودارهای آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده جابه‌جایی میانگین فصلی عرض جت از دوره تاریخی به دوره‌های RCP4.5 و RCP8.5 هستند. دایره‌ها معرف میانگین چند مدلی، علامت‌های بار مانند شکل‌های ۸ و ۹ معرف بازه چارک اول تا سوم از توزیع ۲۳ مدل و علامت‌های ضربدر نشان‌دهنده مدل‌های خارج از این بازه هستند. همان‌طور که در تحلیل شکل‌های ۸ و ۹ نیز بیان شد، اگر نسبت پراکندگی بین مدلی (بازه میان‌چارکی) به مقدار میانگین چند مدلی بزرگ باشد و یا پراکندگی بین مدلی در دو طرف محور صفر (بازه‌ای از مقادیر منفی و مثبت) قرار گیرد - یعنی مرکز توزیع مدل‌ها تقریباً منطبق بر صفر باشد - جابه‌جایی شبیه‌سازی شده جت در پاسخ به گرمایش زمین، در مجموعه مدل‌ها و میانگین چند مدلی، استوار و قوی نخواهد بود. فصل‌های زمستان و بهار قطاع آسیا (شکل ۱۰-الف) و فصل‌های زمستان، بهار و تابستان در قطاع آفریقا (شکل ۱۰-ب) از این دسته هستند؛ یعنی در آنها جابه‌جایی جت در میانگین چند مدلی ناچیز بوده و استوار و قابل استناد محسوب نمی‌شود. این وضع در شکل ۸ به تفصیل و با نشان دادن نتیجه همه مدل‌ها به تفکیک شرح داده شد. برعکس، در حالت‌هایی که نسبت پراکندگی بین مدلی به مقدار میانگین چند مدلی کوچک است و یا توزیع نتایج مدل‌ها تنها یک طرف محور صفر (فقط مقادیر مثبت یا منفی) قرار دارند - یعنی مرکز توزیع مدل‌ها دور از محور صفر است - نتیجه می‌گیریم که جابه‌جایی جت در شبیه‌سازی مجموعه مدل‌ها و میانگین چند مدلی استوار و قوی است. فصل تابستان در قطاع آسیا (شکل ۱۰-الف) و فصل پاییز در قطاع آفریقا (شکل ۱۰-ب) از این جمله هستند که به ترتیب جابه‌جایی استوار و قوی است. نتایج برای شاخص‌های تندی و پهنا به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. علائم و رنگ‌ها مانند شکل ۱۰ است. تغییرات تندی جت در میانگین چند

در قطاع آفریقا (شکل ۹) و در سه فصل زمستان، بهار و تابستان، در هر دو سناریو، جابه‌جایی جت در میانگین چند مدلی کوچک است. همچنین، نسبت پراکندگی بین-مدلی نتایج به میانگین چند مدلی بزرگ است. مرکز بازه پراکندگی بین مدلی تقریباً منطبق بر صفر بوده و این بازه مقادیر منفی و مثبت را در بر گرفته است. بنابراین در این سه فصل، جابه‌جایی استواری در عرض جت در پاسخ به گرمایش زمین در میانگین چند مدلی وجود ندارد. در فصل پاییز، اگرچه مقدار جابه‌جایی قطب‌سوی جت در میانگین چند مدلی کوچک و در حدود کمتر از ۰/۵ درجه است، ولی نسبت پراکندگی بین مدلی به میانگین چند مدلی در مقایسه با فصل‌های دیگر کوچک بوده و بازه پراکندگی فقط دارای مقادیر مثبت است. در واقع، همین مقدار کم جابه‌جایی قطب‌سو در میانگین چند مدلی، تغییر نسبتاً استواری در پاسخ به گرمایش زمین محسوب می‌شود. سازگاری بین اکثر ۲۳ مدل (میل‌ها) در علامت جابه‌جایی جت (قطب سو) و مقدار آن نیز مؤید استواری پاسخ در مجموعه مدل‌ها است. از فصل‌های مهم برای کشور ایران، فصل زمستان است که جابه‌جایی جت در هر دو قطاع در پاسخ به گرمایش زمین در میانگین مدل‌ها نااستوار و ناچیز است. جالب آن‌که بارنز و پولوانی (۲۰۱۳) نیز جابه‌جایی استواری برای جت اطلس در پاسخ به گرمایش زمین در فصل زمستان مشاهده نکردند، اما نشان دادند که جت آرام در فصل زمستان تا آخر قرن بیست‌ویکم دچار جابه‌جایی قطب‌سوی استوار و نسبتاً قابل توجهی (حدود ۱ درجه عرض جغرافیایی در میانگین چند مدلی) خواهد شد.

شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب، به ترتیب برای قطاع‌های آسیا و آفریقا، هم‌ارز با آخرین نمودار میله‌ای در سمت راست از شکل‌های ۸ و ۹، نتایج میانگین چند مدلی و توزیع مدل‌ها از شبیه‌سازی جابه‌جایی عرض جت در پاسخ به گرمایش زمین را به تفکیک فصل نشان می‌دهند.

نزدیک به صفر و ناستوار نشان می‌دهد.



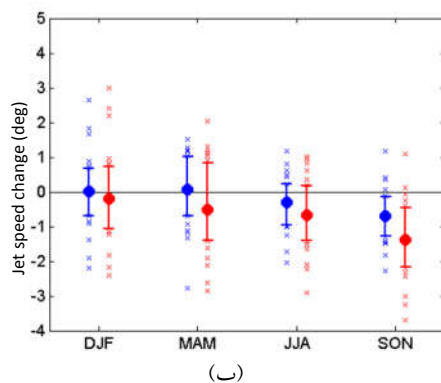
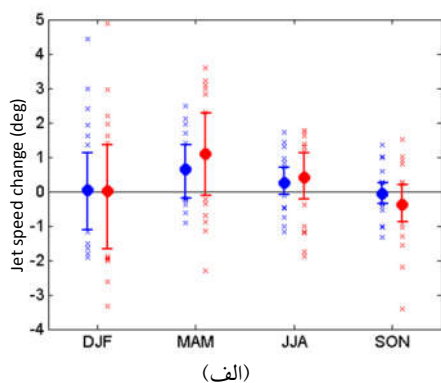
شکل ۱۰. تغییر میانگین فصلی شاخص عرض جت از دوره تاریخی به RCP4.5 (نمودار آبی) و RCP8.5 (نمودار قرمز) برای قطعات آسیا (الف) و آفریقا (ب). دایره‌ها معرف میانگین چند مدلی (۲۳ مدل)، علامت‌های بار معرف بازه چارک اول تا سوم از توزیع ۲۳ مدل و علامت‌های ضربدر نشان‌دهنده مدل‌های خارج از این بازه هستند.

پهنای جت در هر دو قطعه، بیشترین تغییر را در فصل بهار دارد که در میانگین چند مدلی و بر مبنای هر دو سناریو به صورت افزایشی و استوار و قوی است (شکل ۱۲). برای سناریوی RCP8.5، این افزایش پهنا در قطعه آفریقا نسبت به آسیا به صورت قابل توجهی بزرگ‌تر و استوارتر است. در قطعه آفریقا، مقدار پهن‌شدگی جت برای سناریوی RCP8.5 تقریباً  $5/0$  درجه بوده و به جز یک مدل، همه مدل‌ها نشان‌دهنده افزایش پهنای جت هستند (شکل ۱۲-ب)؛ اما در قطعه آسیا، افزایش پهنای جت حدود  $0/2$  درجه است و فقط پنج مدل مقادیر منفی و مختلف‌العلامت با میانگین چند مدلی را نشان می‌دهند

مدلی، در زمستان هر دو قطعه نزدیک به صفر است و مجموعه مدل‌ها تغییرات استواری را نشان نمی‌دهند (شکل ۱۱). در قطعه آسیا، بیشترین تغییرات تندی مربوط به فصل بهار است و به ترتیب بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، تندی جت در میانگین چند مدلی حدود  $8/0$  و  $1/1$  متر بر ثانیه افزایش می‌یابد (شکل ۱۱-الف) که تقریباً استوار و قوی است؛ زیرا بخش عمده مدل‌ها و بازه میان‌چارکی نشان‌دهنده افزایش تندی جت برای هر دو سناریو هستند. در فصل تابستان نیز افزایش تندی کمتر از  $5/0$  m/s دیده می‌شود که نسبتاً استوار بوده و مقدار آن در سناریوی RCP8.5 کمی بیشتر از RCP4.5 است. تغییرات تندی در پاییز قطعه آسیا، بر اساس سناریوی RCP4.5 حدوداً صفر و ناستوار و بر اساس سناریوی RCP8.5 کمتر از  $5/0$  m/s و ناستوار است. در قطعه آفریقا (شکل ۱۱-ب)، بیشترین تغییرات تندی مربوط به فصل پاییز است. در این فصل، میانگین چند مدلی، نشان‌دهنده آن است که تندی جت در پاسخ به گرمایش زمین در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب حدود  $0/7$  و  $1/5$  متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. این تغییر در مجموعه مدل‌ها به دلیل آنکه بخش عمده آنها مقادیر منفی را برای تغییرات تندی جت نشان می‌دهند، استوار است. استواری فوق در سناریوی RCP8.5 بیشتر شایان توجه است، زیرا به جز دو مدل، در سایر مدل‌ها کاهش تندی جت دیده می‌شود. در تابستان قطعه آفریقا نیز بر مبنای سناریوی RCP8.5، میانگین چند مدلی، نشان‌دهنده کاهش تندی در حدود  $0/7$  m/s است که تقریباً استوار می‌باشد؛ اما بر مبنای سناریوی RCP4.5، کاهش تندی جت در میانگین چند مدلی ناچیز و ناستوار است. در بهار قطعه آفریقا و بر اساس سناریوی RCP8.5، اگرچه تغییرات جت در میانگین چند مدلی تقریباً برابر با تابستان است، ولی پراکندگی نتایج مدل‌ها بیانگر عدم استواری این تغییر است. سناریوی RCP4.5 در این فصل نیز تغییرات تندی را



نمی‌دهند. خطاهای استوار برای شاخص عرض، به تابستان و زمستان قطاع آفریقا (انحراف استواسو نسبت به بازتحلیل) و برای شاخص پهنا، به تابستان قطاع آسیا (پهن‌شدگی نسبت به بازتحلیل) محدود می‌شود. همچنین، خطای میانگین چند مدلی برای تندی جت، در قطاع آسیا، تنها در فصل تابستان و در قطاع آفریقا در فصل‌های زمستان و پاییز، استوار می‌باشد. یافتن چشمه‌های این خطاها و اصلاح آنها و در نتیجه نزدیک کردن نتایج مدل‌ها به داده بازتحلیل و نیز کم کردن بازه پراکندگی بین‌مدلی از چالش‌های بزرگ و مهم پژوهشگران اقلیمی



شکل ۱۱. مانند شکل ۱۰ ولی برای شاخص تندی جت.

(شکل ۱۲-الف). همچنین، مقدار پهن‌شدگی جت در سناریوی RCP4.5 کمتر از RCP8.5 است؛ این اختلاف در قطاع آسیا کمتر از ۰/۲ درجه و در قطاع آفریقا بیشتر از ۰/۲ درجه است. در هر دو قطاع، در زمستان نیز میانگین چند مدلی نشان‌دهنده افزایش پهنای جت با مقداری کمتر از فصل بهار است. این افزایش، در قطاع آسیا با در نظر گرفتن نحوه توزیع بین‌مدلی نتایج در هر دو سناریو، از استواری کمی برخوردار است؛ ولی در قطاع آفریقا و در سناریوی RCP8.5، مقدار این افزایش و استواری آن نسبت به قطاع آسیا بیشتر است. در سناریوی RCP4.5 مقدار این تغییرات کم و تقریباً بی معنی است.

همچنین، در هر دو قطاع، کمترین تغییرات پهنای جت مربوط به پاییز است که این تغییرات در میانگین چند مدلی و برای هر دو سناریو تقریباً صفر و ناستوار است. در تابستان، تغییرات پهنای جت در میانگین چند مدلی و در قطاع آفریقا صفر و ناستوار است؛ ولی در قطاع آسیا، کاهش جزئی در پهنای جت در میانگین چند مدلی دیده می‌شود که استواری آن کم است.

## ۵ بحث

نتایج نشان داد که بین ویژگی‌های شبیه‌سازی شده در مدل‌های CMIP5 با آنچه از داده‌های بازتحلیل به دست می‌آید تفاوت چندانی وجود ندارد، زیرا همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، به جز چند حالت (اعداد پررنگ) که میانگین چند مدلی خطای شاخص‌ها استوار است، مجموعه مدل‌ها خطای استوار و سامانندی را در شبیه‌سازی شاخص‌ها نسبت به داده بازتحلیل نشان

جدول ۳. خطای میانگین چندمدلی (تفاوت مدل و داده بازتحلیل) در شبیه‌سازی میانگین فصلی شاخص‌های هندسی جت در دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) برای قطاع‌های آسیا (اعداد سمت راست) و آفریقا (اعداد سمت چپ). خطاهای استوار پررنگ نمایش داده شده است.

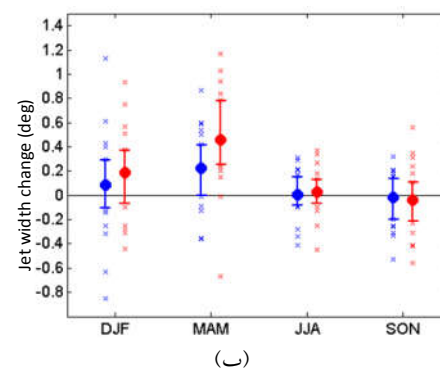
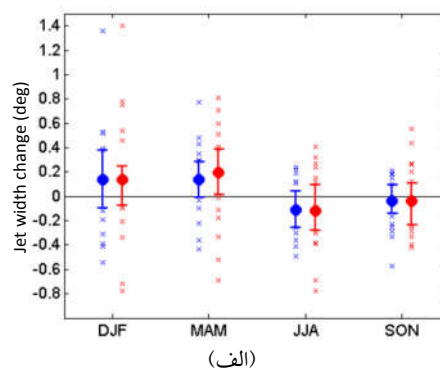
Season	DJF	MAM	JJA	SON
Lat (deg.)	-0.90, -0.66	-0.38, -0.59	-1.86, -0.50	-0.67, -0.73
Speed (m/s)	-2.92, 0.85	0.60, 1.79	1.05, -2.99	1.82, 1.08
Width (deg.)	0.20, -0.43	-0.20, -0.16	0.19, 0.91	0.07, 0.33

جدول ۴. تغییر میانگین فصلی شاخص‌های هندسی جت در میانگین چند مدلی از دوره تاریخی به دوره RCP8.5 در قطعات آسیا (اعداد سمت راست) و آفریقا (اعداد سمت چپ). تغییرات استوار پرننگ نشان داده شده است.

Season	DJF	MAM	JJA	SON
Lat (deg.)	-0.15, 0.07	-0.13, -0.27	0.13, -0.77	0.34, 0.51
Speed (m/s)	-0.19, 0.01	-0.51, 1.09	-0.67, 0.40	-1.39, -0.38
Width (deg.)	0.19, 0.14	0.46, 0.19	0.03, -0.12	-0.04, -0.04

شاخص‌های هندسی جت به گرمایش زمین بر اساس سناریوی RCP8.5 در جدول ۴ آمده است که اعداد پرننگ نشان‌دهنده پاسخ‌های استوارند. در میان پاسخ‌های استوار، تغییرات تندی در تابستان قطعات آسیا و پاییز قطعات آفریقا کمتر از بقیه پاسخ‌ها قابل اعتماد است، زیرا در این حالت‌ها بر اساس جدول ۳ خطای مدل‌ها در تعیین تندی جت استوار و بزرگ است. مقدار و استواری پاسخ در هر یک از شاخص‌ها تابعی از فصل و قطعات است. در فصل زمستان، مدل‌ها پاسخ استواری را در هیچ‌یک از شاخص‌ها و هیچ‌یک از دو قطعات پیش‌بینی نمی‌کنند به جز افزایش جزئی پهنا در قطعات آفریقا. در فصل بهار، مدل‌ها پهن‌شدگی استواری را در جت هر دو قطعات تا اواخر قرن بیست‌ویکم نشان می‌دهند که با افزایش استوار و نسبتاً قابل توجه تندی جت در قطعات آسیا همراه است (حدود 1 m/s). در فصل تابستان، تندی جت قطعات آفریقا تا اواخر قرن بیست‌ویکم کاهش می‌یابد، اما در قطعات آسیا جت ضمن تقویت (0.4 m/s)، در حدود 0.8 درجه عرض جغرافیایی به سمت استوا جابه‌جا می‌شود. در فصل پاییز، همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، پیش‌بینی مدل‌ها برای قطعات آفریقا حاکی از کاهش استوار و قابل توجه تندی جت در حدود 1/4 m/s و جابه‌جایی استوار و قطب‌سوی آن به اندازه 0.34 درجه عرض جغرافیایی است. در قطعات آسیا نیز کاهش تندی و جابه‌جایی قطب‌سوی جت، هرچند با استواری ناچیز، پیش‌بینی می‌شود.

بازه نسبتاً بزرگ پراکندگی بین مدلی در پاسخ جت به گرمایش زمین از چالش‌هایی است که سبب عدم قطعیت در پیش‌بینی پاسخ جت می‌شود و علت و چشمه این عدم



شکل ۱۰. مانند شکل ۱۰ ولی برای شاخص پهنای جت.

است که تا جایی که ما اطلاع داریم در مورد جت آفریقا-آسیا انجام نشده است و در آینده باید به آن پرداخته شود. با توجه به اینکه به جز چند حالت ذکر شده، مدل‌ها خطای سامانمند و استواری را در شبیه‌سازی ویژگی‌های جت نشان نمی‌دهند، بررسی تغییرات جت در پاسخ به گرمایش زمین در این مدل‌ها، مطالعه‌ای منطقی، معتبر و قابل اتکا می‌باشد. نتایج در این مورد نشان می‌دهد که تغییرات شاخص‌های هندسی جت آفریقا-آسیا از گذشته به آینده در سناریوی RCP4.5 در تقریباً همه موارد از پاسخ جت در سناریوی RCP8.5 ضعیف‌تر است. جمع‌بندی نتایج مربوط به میانگین چند مدلی پاسخ

است، زیرا می‌تواند به معنای افزایش کثرفشاری جت و تولید کثرفشاری پیچک‌ها در این فصل باشد. در فصل تابستان، رفتار مشاهده شده مبنی بر جابه‌جایی استواسوی جت جنب‌حاره‌ای در قطاع آسیا نیز نتیجه‌ای امیدوارکننده است، زیرا در این فصل تقویت جت و جابه‌جایی استواسوی آن می‌تواند به افزایش تندی باد و در نتیجه کاهش دمای ترازهای پایین جو و نیز افزایش فعالیت‌های پیچکی کثرفشار در مناطق شمالی کشور ما کمک کند. از سوی دیگر این مسئله می‌تواند به معنای تضعیف گردش‌های موسمی (مونسونی) تابستانی و در نتیجه کاهش احتمالی بارش‌های ناشی از آن در مناطق جنوب شرقی کشورمان باشد که در این مورد باید در پژوهش‌های آینده بیشتر تحقیق شود. ولی در فصل پاییز از نظر اثر بر بارندگی و منابع آبی نگران‌کننده است. کاهش تندی جت در قطاع آفریقا در فصل پاییز می‌تواند به معنای کاهش کثرفشاری جت و در نتیجه کاهش تولید پیچک‌های کثرفشار مدیترانه‌ای و نیز تضعیف انتشار شرق‌سوی این پیچک‌ها به سمت منطقه ما باشد. همچنین، جابه‌جایی قطب‌سوی جت می‌تواند منجر به جابه‌جایی قطب‌سوی مسیر توفان مدیترانه و انحراف مسیر انتشار پیچک‌ها به عرض‌های بالاتر و کاهش نفوذ آنها به کشور ما شود.

بررسی پیامدهای دینامیکی مرتبط با تغییرات جت و چگونگی اثر آن بر بارش و دما و منابع آبی از مسائل مهم و کاربردی است که در حوصله این مطالعه نمی‌گنجد و باید در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

نگارندگان از ادوین گرب و تیفانی شاو برای ارائه پیشنهادها و نظرات سودمند در مرحله طراحی این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند. هم‌چنین، از «مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا» (ECMWF) برای تولید و در اختیار

قطعیت در مورد جت آفریقا-آسیا تا کنون بررسی نشده است. به‌علاوه، علت و چشمه‌های دینامیکی تفاوت پاسخ جت به گرمایش زمین در فصل‌های مختلف از مسائل مهمی است که در مورد جت آفریقا-آسیا باید بررسی شود. به‌طور مثال، اینکه در پاییز جت تضعیف و دچار جابه‌جایی قطب‌سو می‌شود اما در تابستان برعکس آن رخ می‌دهد شاید به این علت باشد که در تابستان با گرمایش و رددسپهر در مناطق حاره‌ای، گردش‌های موسمی و تابستانه تضعیف می‌شوند ولی در فصل پاییز برآیند اثر افزایش دمای مناطق حاره‌ای و قطبی به گونه‌ای است که از سویی یاخته هادلی پهن و از سوی دیگر تولید کثرفشاری در مدیترانه تضعیف می‌شود. البته استدلال ارائه شده، مبتنی بر فرضیاتی است که لازم است هرکدام در مطالعات آینده مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد.

### ۶ نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی این مسئله پرداخته شد که مدل‌های اقلیمی CMIP5، مشخصه‌های هندسی جت جنب‌حاره‌ای آفریقا-آسیا در ورددسپهر زیرین را در فصل‌های گوناگون چگونه و با چه خطایی نسبت به داده‌های بازتحلیل شبه‌سازی می‌کنند و همچنین، پاسخ این جت به سناریوهای گرمایش زمین در این مدل‌ها از منظر هندسه جت چگونه است. مشخصه‌های هندسی جت در این مطالعه شامل سه شاخص عرض جغرافیایی، تندی جت و پهنای جت است و منطقه مورد بررسی به دو قطاع آفریقا و آسیا تقسیم شده است. بر مبنای نتایجی که در میان مدل‌ها دارای استواری کافی بوده‌اند، می‌توان به موارد زیر در خصوص هر فصل اشاره کرد.

در فصل زمستان بر مبنای مطالعه فعلی نمی‌توان نتیجه روشنی را در مورد مشخصه‌های هندسی جت در هیچ‌یک از دو قطاع بیان کرد. در فصل بهار، افزایش تندی جت در منطقه آسیا مشاهده می‌شود که برای ایران حائز اهمیت

- Gerber, E. P., and Son, S. W., 2014, Quantifying the summertime response of the Austral jet stream and Hadley cell to stratospheric ozone and greenhouse gases: *Journal of Climate*, **27**, 5538-5559.
- Koch, P., Wernli, H., and Davies, H. C., 2006, An event-based jet stream climatology and typology: *International Journal of Climatology*, **26**, 283-301.
- Kushner, P., Held, I., and Delworth, T., 2001, Southern Hemisphere atmospheric circulation response to global warming: *Journal of Climate*, **14**, 2238-2249.
- Lu, J., Chen, G., and Frierson, D. M. W., 2008, Response of the zonal mean atmospheric circulation to El Niño versus global warming: *Journal of Climate*, **21**, 5942-5959.
- Lu, J., Vecchi, G. A., and Reichler, T., 2007, Expansion of the Hadley cell under global warming: *Geophysical Research Letters*, **34**, L06805, doi:10.1029/2006GL028443.
- Miller, R. L., Schmidt, G. A., and Shindell, D. T., 2006, Forced annular variations in the 20<sup>th</sup> century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models: *Journal of Geophysical Research*, **111**, D18101, doi:10.1029/2005JD006323.
- Seidel, D. J., Fu, Q., Randel, W. J., and Reichler, T. J., 2008, Widening of the tropical belt in a changing climate: *Nature Geoscience*, **1**, 21-24.
- Shindell, D. T., Miller, R., Schmidt, G., and Pandolfo, L., 1999, Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing: *Nature*, **399**, 452-455.
- Shindell, D. T. and Schmidt, G. A., 2004, Southern Hemisphere climate response to ozone changes and greenhouse gas increases: *Geophysical Research Letters*, **31**, L18209, doi:10.1029/2004GL020724.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design: *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, **93**, 485-498.
- Thompson, D., and Solomon, S., 2002, Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change: *Science*, **296**, 895-899.
- Thompson, D. W. J., Wallace, J., and Hegerl, G., 2000, Annular modes in the extratropical circulation, Part II Trends: *Journal of Climate*, **13**, 1018-1036.
- قرار دادن داده‌های ERA-Interim قدردانی می‌شود. به‌علاوه از کارگروه مدل‌سازی اقلیمی در «برنامه جهانی پژوهش اقلیمی» (WCRP)، که مسئول CMIP است، و از گروه‌های مدل‌سازی اقلیمی (که فهرست آن در جدول ۱ این مقاله آمده است) برای تولید و در دسترس قرار دادن خروجی مدل‌هایشان صمیمانه سپاسگزاریم. لازم به ذکر است که «برنامه فرایابی و تقابل مدل اقلیمی (PCMDI) در اداره انرژی ایالات‌متحد آمریکا (DOE)»، حمایت راهبردی برای CMIP را فراهم نموده و در همکاری با «سازمان جهانی دروازه‌های علوم سامانه زمین» (GO-ESSP)، توسعه زیرساخت نرم‌افزاری را هدایت کرده است.

#### منابع

- Arblaster, J., and Meehl, G., 2006, Contributions of external forcings to southern annular mode trends: *Journal of Climate*, **19**, 2895-2905.
- Barnes, E. A. and Polvani, L., 2013, Response of the midlatitude jets and of their variability to increased greenhouse gases in the CMIP5 models: *Journal of Climate*, **26**, 7117-7135.
- Cai, W., Whetton, P., and Karoly, D., 2003, The response of the Antarctic Oscillation to increasing and stabilized atmospheric CO<sub>2</sub>: *Journal of Climate*, **16**, 1525-1538.
- Dee, D., Uppala, P., Simmons, S. M., Berrisford, A. J., Poli, P., Kobayashi, P., Andrae, S., Balmaseda, U., Balsamo, M. A., Bauer, G., Bechtold, P., Beljaars, P., van de Berg, A. C. M., Bidlot, L., Bormann, J., Delsol, N., Dragani, C., Fuentes, R., Geer, M., Haimberger, A. J., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., and Vitart, F., 2011, The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**, 553-597.
- Fyfe, J., Boer, G., and Flato, G., 1999, The Arctic and Antarctic oscillations and their projected changes under global warming: *Geophysical Research Letters*, **26**, 1601-1604.

- Yin, J. H., 2005, A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate: *Geophysical Research Letters*, **32**, L18701, doi:10.1029/2005GL023684.
- Vallis, G. K., 2006, *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics*: Cambridge University Press, 745 pp.
- Wittman, M. A., Charlton, A. J., and Polvani, L. M., 2005, On the meridional structure of annular modes. *Journal of Climate*, **18**, 2119-2122.

## The geometrical structure of the upper-tropospheric African–Asian jet and its response to global warming in the CMIP5 Models

Shahin Alemzadeh<sup>1</sup>, Farhang Ahmadi-Givi<sup>2\*</sup>, Alireza Mohebolhojeh<sup>2</sup>, and Daniel Yazgi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ph. D. student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 18 October 2016, Accepted: 27 February 2017)

### Summary

In this study, a set of models from the phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) is used to examine the simulation of the upper-tropospheric subtropical African–Asian jet and its response to global warming. The ERA-Interim re-analysis dataset is used here to assess the model biases in representing the seasonal-mean jet features in the historical period (1980–2005). This study analyzes the geometrical parameters of the jet including “latitude”, “speed” and “width” in each season and for two separate sectors of the jet region: “North Africa” and “Southwest Asia”, which is briefly named “African” and “Asian” hereafter.

The main features of the observed seasonal cycle of the jet in the re-analysis data is well captured in ensemble multimodel mean historical simulations: jet latitude increase (decrease) from cold (warm) to warm (cold) season and vice versa are correctly simulated for jet speed and width. In addition, in all seasons, the jet latitude and speed is greater in Asian sector than the African except for springtime jet speed. Despite the large inter-model spread in the historical jet simulations, the models do not show large systematic biases in most cases (seasons). However, systematic biases in each of the geometrical jet indices are found in some seasons: most models exhibit equatorward jet biases in summertime and wintertime of the African sector (about 1.8° and 0.9° of latitude respectively, in multimodel mean), positive biases in jet width in summertime Asia (0.9° in multimodel mean), negative biases in jet speed in summertime Asia and wintertime of the African sector (approximately 2.9 m/s) and positive jet speed biases in autumn of the African sector (1.8 m/s). There is large spread across the models in the historical jet simulations and finding the sources of this spread and the model biases is a significant challenge that should be addressed in future works.

In almost all seasons and for all of the geometrical jet indices, the multimodel mean jet response to climate change is stronger in RCP8.5 than RCP4.5 integrations. Robustness and the quantitative value of the multimodel mean jet response in each of the jet indices vary among different seasons and sectors. In winter months, we found no robust response in any of the geometrical jet indices in African or Asian sector except for a slight and relatively robust increase in jet width (0.2° of latitude in RCP8.5) in African sector. However, in other seasons, we found robust multimodel mean changes in jet indices between the historical period and the end of twenty first century (2076–2099) in the RCP8.5 scenario: In spring, models predict a robust increase in jet width of about 0.5° and 0.2° of latitude in African and Asian sectors, respectively, and also a robust increase in jet speed of 1.1 m/s for Asian sector. In summer, in the African sector, the jet speed is found to be decreased (0.7 m/s), whereas in the Asian sector, jet speed will increase (0.4 m/s), and it will move equatorward by 0.8° of latitude.

**Keywords:** African–Asian jet, global warming, CMIP5 models, model biases, geometric jet indices, multimodel mean

\*Corresponding author:

ahmadig@ut.ac.ir