

توسعه هسته دینامیکی یک مدل گردش کلی جو در مختصه قائم $\sigma-p$ رضا لقائی زاده^{۱*}، علیرضا محب الحجه^۲، محمد جغتائی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد،

۲- استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۳- استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

چکیده

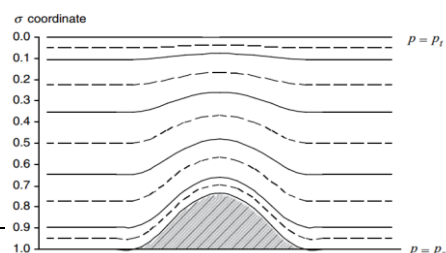
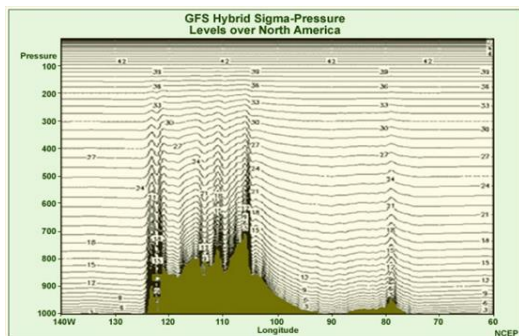
توسعه نسخه‌های مختلف هسته‌های دینامیکی و مقایسه نتایج بین آنها، کمک زیادی در ارزیابی نتایج دارد. به همین دلیل اکثر مدل‌های گردش کلی جو در ساختارهای قائم و شبکه‌بندی‌های متفاوت گسترش می‌یابند. در پژوهش حاضر نتایج مدل گردش کلی جو ساخته شده بر مبنای الگوریتم فرابرد پربندی نیمه‌لاگراتژی بادررو DCASL در مختصه قائم $\sigma-p$ ارائه می‌شود. DCASL الگوریتمی بر مبنای استفاده از نمایش پربندی برای یک کمیت بنیادی دینامیکی مانند تاوایی پتانسیلی می‌باشد که پیش‌تر در روند ساخت مدل گردش کلی جو برای معادلات بسیط آب کم‌عمق و همچنین آب کم‌عمق چندلایه‌ای بوسینسک، و نیز برای معادلات بسیط چندلایه‌ای نابوسینسک در مختصه قائم هیبریدی $\sigma-\theta$ روی کره و تحت شبکه‌بندی چارنی-فیلیپس به کار رفته است. در این مقاله هسته دینامیکی مدل در مختصه قائم $\sigma-p$ بر مبنای شبکه‌بندی‌های لورنتس و چارنی-فیلیپس مقایسه خواهد شد. به منظور ارزیابی و مقایسه هسته‌های دینامیکی از آزمون توسعه موج کز فشار یابلونوسکی-ویلیامسون (۲۰۰۶) برای میدان‌های مختلف مدل استفاده و مقایسه‌ای کیفی و کمی با نتایج چند هسته دینامیکی مدل‌های مرجع جهانی انجام شده است. این مقایسه نشان می‌دهد مشکل آغازگری موجود در مختصه قائم $\sigma-\theta$ برای این آزمون، در مختصه $\sigma-p$ برطرف و جواب‌ها به جواب ارائه شده به‌عنوان جواب مرجع نزدیک‌تر می‌شود.

کلمات کلیدی: مدل گردش کلی جو، مختصه قائم $\sigma-p$ ، هسته دینامیکی، شبکه چارنی-فیلیپس، شبکه لورنتس، الگوریتم DCASL

مقدمه

شکل (۱): ساختار قائم $\sigma-p$ و عدم قطع کوهساری در آن. در اکثر مدل‌های کاربردی امروزی همچون ECMWF، GFS، CAM، GME از مختصه قائم $\sigma-p$ استفاده می‌شود (شکل ۲).

ساختار قائم یک مدل گردش کلی (GCM) اهمیت بسزایی در تشریح رفتار آن مدل و پیش‌بینی‌های انجام گرفته مدل در سطوح مختلف جو دارد. ساده‌ترین حالت برای نوشتن معادلات حرکت مدل در مختصات فشاری است، ولی به دلیل قطع کوهساری، ناگزیر از استفاده هم‌زمان آن با مختصه فشار بهنجار شده موسوم به σ خواهیم بود. (شکل ۱).



شکل (۲): بکارگیری ساختار قائم $\sigma-p$ در مدل جهانی GFS.

در شبکه‌بندی L، (لورنتس)، دمای پتانسیلی در ترازهای اصلی مدل که سرعت افقی و ژئوپتانسیل بر روی آنها است (ترازهای صحیح)، قرار دارند و شارهای قائم جرم بر روی ترازهای کسری قرار می‌گیرند.

۲- فرمول‌بندی

در شبکه بندی CP (چارنی-فیلیپس) دماهای پتانسیلی در ترازهایی که شارهای قائم جرم هستند، قرار دارند (تراز کسری) و هر دو در میان ترازهای سرعت افقی (ژئوپتانسیل) قرار می‌گیرند. در حالی که در شبکه بندی L، (لورنتس)، دمای پتانسیلی در ترازهای اصلی مدل که سرعت افقی و ژئوپتانسیل بر روی آنها است (ترازهای صحیح)، قرار دارند و شارهای قائم جرم بر روی ترازهای کسری قرار می‌گیرند.

۲-۱) مختصه قائم $\sigma-p$ در شبکه چارنی-فیلیپس

حالت خاصی از مختصه قائم $\sigma-\theta$ معرفی شده در [3] با رابطه $\xi = f(\sigma) + g(\sigma)\theta$ که در آن f و g دو تابع تحلیلی با خواص مورد نظر هستند، با فرض $g(\sigma) = 0$ و $f(\sigma) = \sigma$ بدست می‌آید:

$$\xi = f(\sigma) = \sigma$$

بازنویسی تابع f به صورت تابعی از فشار و فشار سطح زمین، می‌توان با استفاده از جدول موجود در [2] و رابطه زیر، مقادیر فشار را در ترازهای کسری به صورت زیر نوشت:

$$p_{k+\frac{1}{2}} = a_{k+\frac{1}{2}} p_0 + B_{k+\frac{1}{2}} p_s$$

استفاده از رابطه فوق، حل مستقل معادله دمای پتانسیلی را بر روی ترازهای کسری ایجاب می‌کند. به علاوه، با حل بخش افقی معادله پیوستگی جرم، فشار سطح زمین و از آنجا فشار بر روی ترازهای کسری تعیین می‌شود. این امر به شرطی بر روی شار قائم جرم و در نتیجه تعیین یکتای آن بر روی ترازهای کسری منجر می‌شود.

در این مقاله، مختصه قائم هسته دینامیکی GCM مورد مطالعه که بر مبنای تاوایی پتانسیلی و با الگوریتم DCASL ساخته شده است، در مختصه قائم $\sigma-p$ و در دو شبکه بندی مختلف یعنی چارنی-فیلیپس (شبکه بندی CP) و لورنتس (شبکه بندی L) توسعه داده می‌شود. سپس با مختصه قائم پیشین مدل، یعنی $\sigma-\theta$ با شبکه بندی چارنی-فیلیپس و همچنین با چهار هسته دینامیکی GCM های مرجع جهانی اوپلری، نیمه لاگرانژی، حجم متناهی و GME (مدل هواشناسی آلمان)، از طریق آزمون توسعه موج کژ فشار یابلونوسکی-ویلیامسون (۲۰۰۶) مقایسه می‌شود.

بنابراین، در بخش ۲ فرمول بندی و گسسته سازی لازم، افزون بر مقاله ۲۰۱۶ محب الحجه و همکاران [6] و با استفاده از مقالات [3] و [7] و جدول B-1 از مقاله یابلونوسکی-ویلیامسون (۲۰۰۶)، [2]، ارائه و ساختار قائم $\sigma-p$ بر اساس دو شبکه بندی CP و L ساخته می‌شود. در بخش ۳ مقایسه هسته دینامیکی GCM ساخته شده در مختصات قائم و تفکیک افقی مختلف، با چهار مدل مرجع جهانی انجام می‌پذیرد. این مقایسه ها با استفاده از آزمون یابلونوسکی-ویلیامسون (۲۰۰۶) و شامل مقایسه میدان های دما و فشار سطح در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز نهم توسعه ناپایداری کژ فشار به عنوان یک نمونه و همچنین مقایسه میدان تاوایی نسبی در روزهای هفتم و نهم و همچنین مقایسه الگوی فشار سطح طی روزهای یازدهم، چهاردهم و شانزدهم پس از اجرای مدل می‌باشد. در پایان، دو مقایسه کمی از میدان فشار سطح در مختصات گوناگون مدل با تفکیک 256×256 نسبت به مدل مرجع اوپلری CAM3، موسوم به EUL T170 انجام خواهد شد. این مقایسه ها حاکی از کاربرد موفق مختصه قائم $\sigma-p$ (به ویژه کنترل میدان دما و برطرف شدن مشکل آغازگری موجود در مختصه $\sigma-\theta$ برای این آزمون) در هسته دینامیکی GCM مورد مطالعه می‌باشد.

فرمول بندی

در شبکه بندی CP (چارنی-فیلیپس) دماهای پتانسیلی در ترازهایی که شارهای قائم جرم هستند، قرار دارند (تراز کسری) و هر دو در میان ترازهای سرعت افقی (ژئوپتانسیل) قرار می‌گیرند. در حالی که

مختصه قائم $\sigma-p$ در شبکه لورنتس

که در آنها φ ژئوپتانسیل، φ_s ژئوپتانسیل سطح زمین، T دما، p فشار، R ثابت گاز برای هوای خشک، $\kappa = R/c_p$ به ازای ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت است.

معادله هیدرواستاتیک، نیروی شیو (گرادیان) فشار، انرژی ترمودینامیکی و مقادیر فشار با استفاده از [7] و به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\varphi_{k+\frac{1}{2}} = \varphi_s + \sum_{r=k+1}^{NLEV} RT_r \ln \frac{p_{r+\frac{1}{2}}}{p_{r-\frac{1}{2}}}$$

$$\varphi_k = \varphi_{k+\frac{1}{2}} + \alpha_k RT_k$$

$$\alpha_k = 1 - \frac{p_{k-\frac{1}{2}}}{\Delta p_k} \ln \frac{p_{k+\frac{1}{2}}}{p_{k-\frac{1}{2}}}$$

$$\left(\frac{RT}{p} \nabla p \right)_k = \frac{RT_k}{\Delta p_k} \left[\left(\ln \frac{p_{k+\frac{1}{2}}}{p_{k-\frac{1}{2}}} \right) \nabla p_{k-\frac{1}{2}} + \alpha_k \nabla (\Delta p_k) \right]$$

$$\left(\frac{\kappa T \omega}{p} \right)_k = \frac{\kappa T_k}{\Delta p_k} \left[\left(\ln \frac{p_{k+\frac{1}{2}}}{p_{k-\frac{1}{2}}} \right) \sum_{r=1}^{k-1} \nabla \cdot (v_r \Delta p_r) + \alpha_k \nabla \cdot (v_k \Delta p_k) + v_k \cdot \left(\frac{1}{p} \nabla p \right)_k \right]$$

$$p_k = \begin{cases} \frac{\Delta p_k}{\ln \left(\frac{p_{k+\frac{1}{2}}}{p_{k-\frac{1}{2}}} \right)}, & k > 1 \\ \frac{1}{2} \Delta p_1, & k = 1 \end{cases}$$

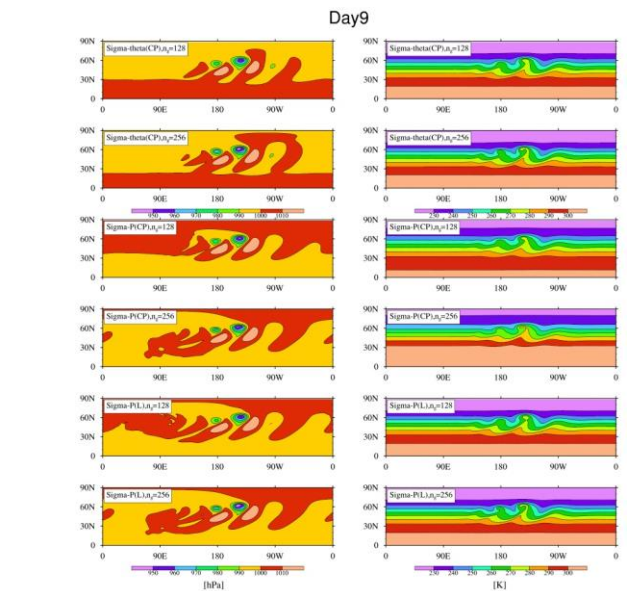
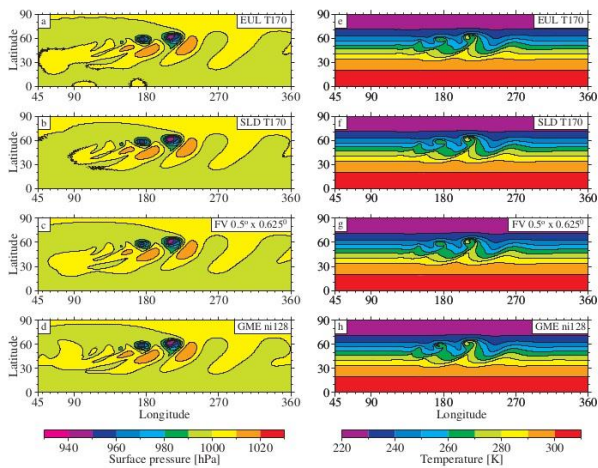
$$p_{k+\frac{1}{2}} = a_{k+\frac{1}{2}} p_0 + B_{k+\frac{1}{2}} p_s$$

فاقد اصطکاک به کار می‌روند. با این آزمون، می‌توان ویژگی‌های مهم طرحواره‌های عددی مانند نوسانات گیس، خطاهای برشی و تاخیرهای زمانی جواب را مشخص کرد. همچنین این آزمون به منظور ارزیابی هسته‌های دینامیکی، که برای شبیه‌سازی پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP) و اقلیم هستند، به کار می‌رود. در این مقاله، از آنجا که جواب تحلیلی مسئله نامشخص است، ما از این آزمون برای تخمین دقت و ارزیابی جواب‌های به دست آمده از هسته دینامیکی در تفکیک‌های افقی و مختصه‌های قائم گوناگون

نتایج آزمون مدل با ساختار قائم گوناگون

ارزیابی مدل‌های گردش کلی (GCMs) و به‌ویژه ارزیابی هسته‌های دینامیکی آنها گام مهمی در بهبود عملکرد مدل خواهد بود. آزمون توسعه موج کژفشار یابلونوسکی-ویلیامسون (۲۰۰۶) برای ارزیابی هسته‌های دینامیکی خشک روی کره در دو حالت معادلات اولیه هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک با تقریب جو کم عمق به کار می‌رود. برای هر دو حالت فوق شرایط اولیه جوابهای متوازی هستند که برای مجموعه معادلات بی‌دررو و

حال به عنوان نمونه، به بررسی و ارزیابی کیفی اجرای مدل در روز نهم و مقایسه در همان روز با جواب مدل‌های مرجع برای میدان-های دما و فشار سطح می‌پردازیم. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، بیشترین شباهت با مدل‌های مرجع را شبکه‌بندی L و مختصه قائم $\sigma - p$ دارد. دلیل این امر بیش از هر چیز آن است که مدل‌های مرجع خود بر مبنای شبکه‌بندی L هستند. مختصه قائم $\sigma - \theta$ تحول موج را به خوبی نمایان می‌سازد و ساختارهای ریزتری را در میدان دما نسبت به مختصه‌های قائم (به‌ویژه با تفکیک افقی 256×256) ایجاد می‌کند.



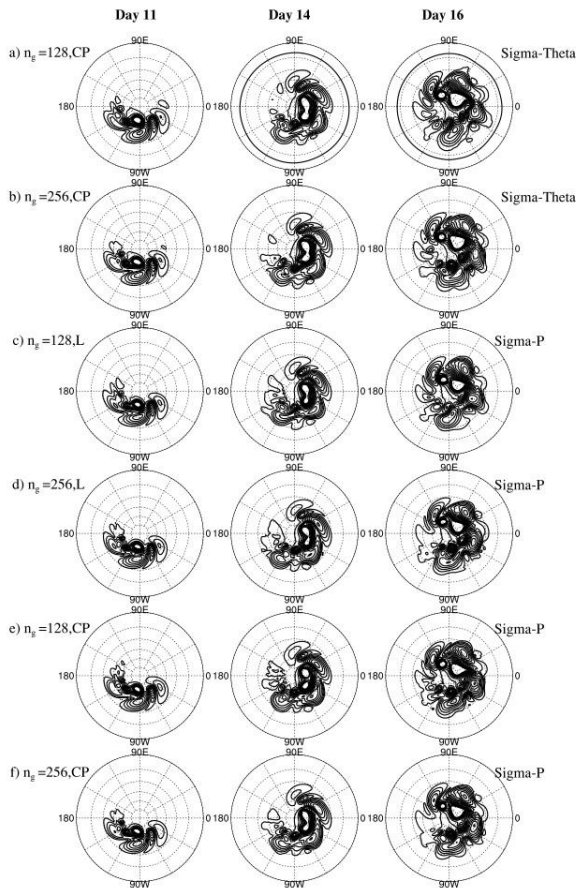
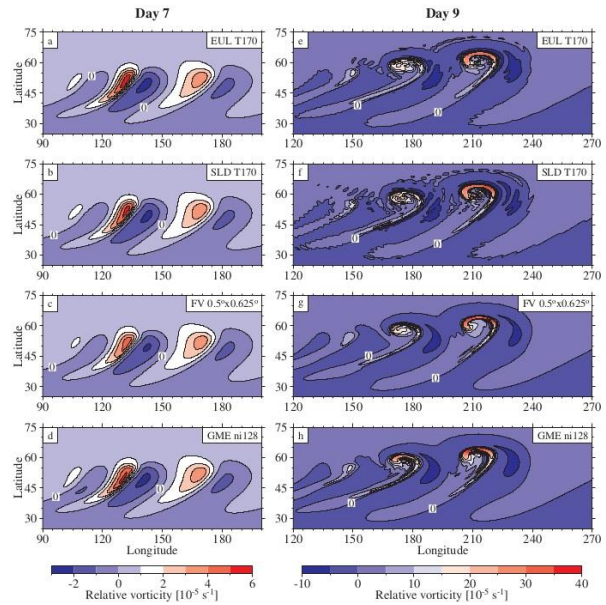
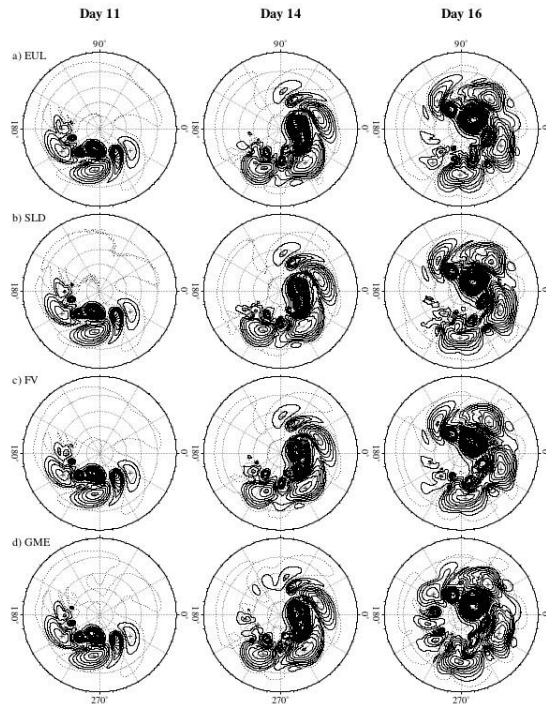
شکل (۳): مقایسه میدان‌های دما و فشار سطح هسته‌های دینامیکی در مختصات قائم $\sigma - p$ و $\sigma - \theta$ با تفکیک 128×128 و 256×256 در روز نهم با هسته دینامیکی مدل‌های مرجع.

با جواب چندین هسته دینامیکی مرجع، در تفکیک‌های افقی مناسب، استفاده می‌کنیم. سه هسته دینامیکی مرجع هیدرواستاتیکی به کار رفته در اینجا از نسخه سوم مدل مرکز ملی تحقیقات جوی امریکا (NCAR) موسوم به CAM3 هستند: هسته دینامیکی حجم متناهی [4] و دو هسته دینامیکی طیفی یعنی اوپلری و نیمه‌لاگرانژی [1]. همچنین هسته دینامیکی مدل کاربردی پیش‌بینی وضع هوای آلمان، یعنی GME از مرکز خدمات وضعیت هوای آلمان (DWD) در این آزمون به عنوان مرجع دیگر استفاده شده است. این مدل تفاضل متناهی هیدرواستاتیکی بر مبنای شبکه‌بندی بیست‌وجهی با ساختار شبکه مثالی شده می‌باشد [5]. خلاصه‌ای از تفکیک و شبکه‌بندی افقی و گام‌های زمانی مراجع نامبرده به همراه هسته دینامیکی مورد ارزیابی شده در دو تفکیک افقی، در جدول شماره ۱ ارائه شده است [2].

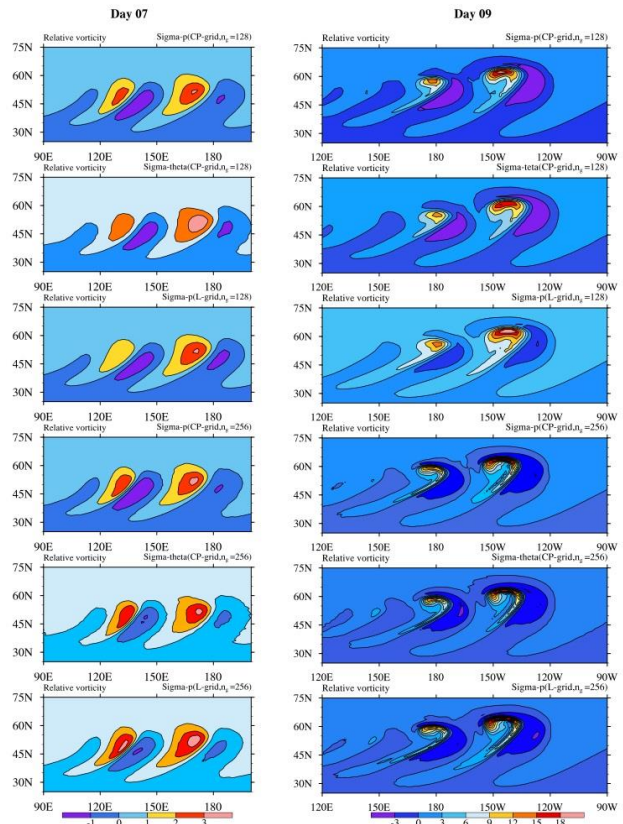
هسته دینامیکی	تعداد نقاط شبکه (km) lat * lon	فاصله شبکه‌ای (km)	گام زمانی (ثانیه)	تفکیک
CAM3 اوپلری	۵۱۲*۲۵۶	۷۸	۳۰۰	طیفی T170
CAM3 حجم متناهی	۵۷۶*۳۶۱	۶۹*۵۵	۹۰	۰/۶۲۵*۰/۵
GAM ۲۰ وجهی	۱۶۳۸۴۲	۵۵	۲۰۰	۱۲۸
DCASL 1	۱۲۸*۱۲۸	۷۸	۲۷۰	۱۲۸
DCASL 2	۲۵۶*۲۵۶	۱۵۶	۱۳۵	۲۵۶

جدول (۱): مشخصات هسته‌های دینامیکی مورد مقایسه قرار گرفته. گام شبکه‌ای برای DCASL در راستای نصف‌النهاری و برای سایر هسته‌ها در استوا است.

با توجه به شکل ۴ می‌توان میدان تاوایی نسبی در روزهای هفتم و نهم مدل‌های مرجع را با جواب‌های هسته دینامیکی مدل حاضر در مختصات قائم و با تفکیک‌های افقی مختلف مقایسه کرد. مشاهدات مقایسه‌ای بیانگر شباهت بیشتر در شبکه‌بندی L و مختصه قائم $\sigma-p$ دارد.



شکل (۵): مقایسه الگوی میدان فشار سطح هسته‌های دینامیکی.



شکل (۴): مقایسه میدان تاوایی نسبی هسته‌های دینامیکی مرجع و هسته دینامیکی مورد مطالعه در تفکیک‌های افقی مختلف در روزهای هفتم و نهم.

نتیجه گیری

با توجه به مقایسه‌های کمی و کیفی انجام شده بین چهار هسته دینامیکی مرجع جهانی با هسته دینامیکی مورد مطالعه می‌توان گفت که کاربرد مختصه قائم $\sigma-p$ در شبکه‌بندی لورنتس برای این هسته دینامیکی همراه با کمترین اختلاف در میدان‌های مختلف نسبت به مدل‌های مرجع در ۱۵ روز اول اجرای مدل است. همچنین هر دو شبکه‌بندی لورنتس و چارنی-فیلیپس در مختصه قائم $\sigma-p$ ، دیگر مشکل آغازگری در میدان فشار سطح را ندارند. به علاوه این که، با مقایسه الگوی میدان فشار سطح هسته‌های دینامیکی مرجع و هسته دینامیکی مورد مطالعه به ویژه در تفکیک افقی 256×256 طی روزهای یازدهم، چهاردهم و شانزدهم می‌توان از تشابه الگوهای میدان فشار سطح هسته دینامیکی با سه مدل مرجع CAM3 پی برد. نتایج به دست آمده به خوبی امکان استفاده از DCASL و توانایی آن در مختصه قائم $\sigma-p$ را نشان می‌دهند.

مراجع

1-Collins, W. D., Rasch, P. J., Boville, B. A., Hack, J. J., McCaa, J. R., Williamson, D. L., Kiehl, J. T., Briegleb, B. P., Bitz, C. M., Lin, S.-J., Zhang, M. and Dai, Y., 2004: Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3.0). NCAR Technical Note NCAR/TN-464+STR. National Center for Atmospheric Research, PO Box 3000, Boulder CO80307-3000, USA.

2-Jablonowski, C. and D. L. Williamson (2006): A baroclinic instability test case for atmospheric model dynamical cores. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 132, 2943-2975.

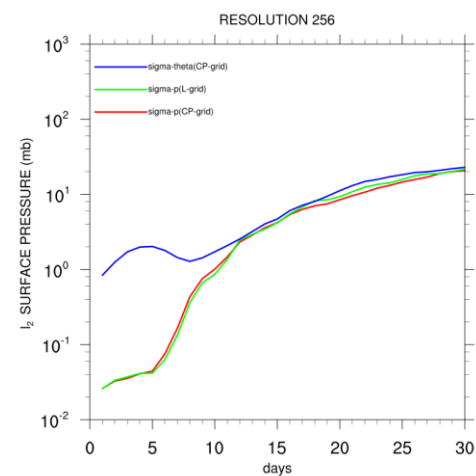
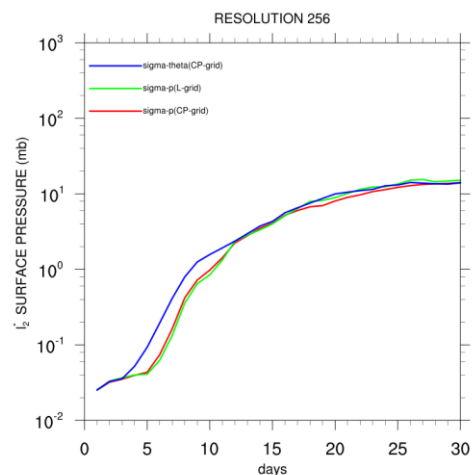
3-Konor, C. S., and A. Arakawa, 1997: Design of an atmospheric model based on a generalized vertical coordinate. Mon. We Rev., 125, 1649-1673, doi:10.1175/1520-0493(1997)125,1649:DOAAMB.2.0.CO;2

4-Lin, S.-J., 2004: A 'vertically Lagrangian' finite-volume dynamical core for global models. Mon. Weather Rev., 132, 2293-2307.

با مقایسه الگوی میدان فشار سطح هسته‌های دینامیکی مرجع و هسته دینامیکی مورد مطالعه به ویژه در تفکیک افقی 256×256 طی روزهای یازدهم، چهاردهم و شانزدهم می‌توان از تشابه الگوهای میدان فشار سطح هسته دینامیکی با سه مدل مرجع CAM3 پی برد.

۱- مقایسه کمی با هسته دینامیکی مدل مرجع اوپلری

با استفاده از تعاریف نرم‌های l_2 و l_2^* واقع در [2] می‌توانیم اختلاف میدان‌های فشار سطح هسته دینامیکی در مختصات قائم گوناگون را در تفکیک افقی 256×256 نسبت به مدل اوپلری CAM3 T170 محاسبه کنیم (شکل ۶). رفع مشکل آغازگری موجود در مختصه قائم $\sigma-\theta$ با این آزمون با استفاده از مختصه $\sigma-p$ به خوبی پیدا است.



شکل

(۶): مقایسه کمی نرم‌های l_2 و l_2^* در تفکیک افقی 256×256 نسبت به مدل اوپلری CAM3 T170.

5-Majewski, D., Liermann, D., Prohl, P., Ritter, B., Buchhold, M., Hanisch, T., Paul, G., Wergen, W. and Baumgardner, J., 2002: The Operational Global Icosahedral-Hexagonal Gridpoint Model GME: Description and high-resolution tests. *Mon. Weather Rev.*, 130, 319–338.

6-Mohebalhojeh, A. R., and Joghataei M., D. G. Dritschel, 2016: Toward a PV-based algorithm for the dynamical core of hydrostatic global models. *Mon. Wea. Rev.*, 144, NO.7.

7-Simmons, A. J., and D. M. Burridge, 1981: An energy and angular momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 758–66.