

Development and assessment of the non-hydrostatic dynamical core of the University of Tehran Global Atmospheric Model (NH-UTGAM)

Laghaeizadeh, R.¹  | Mohebalhojeh, A. R.¹   | Ahmadi-Givi, F.¹  | Mirzaei, M.¹  | Mohammadi, A.² 

1. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Department of Marine Sciences, Faculty of Navigation and Ship Command, Imam Khomeini Naval University of Noshahr, Noshahr, Iran.

Corresponding Author E-mail: amoheb@ut.ac.ir

(Received: 1 July 2024, Revised: 19 Oct 2024, Accepted: 4 Jan 2025, Published online: 10 June 2025)

Summary

The changes made to build a fully compressible global atmospheric model are presented. The non-hydrostatic dynamical core named NH-UTGAM is based on the atmospheric and hydrostatic model developed by University of Tehran, built on the DCASL algorithm for its dynamical core. The distinct feature of the DCASL algorithm is the simultaneous use of a contour and a grid representation for a potential vorticity (PV) like variable, enabling it to achieve effective resolutions for the PV-like variable much higher than that of conventional grid-based algorithms. With the inclusion of non-hydrostatic processes, this model is able to represent scales as small as kilometer in horizontal direction. Like the hydrostatic model, the new model uses the hybrid generalized vertical coordinate, with the definition of sigma in terms of hydrostatic pressure, which provides both the possibility of sigma-theta and sigma-pressure vertical coordinates. Therefore, while maintaining its originality, the model will be able to switch from non-hydrostatic to hydrostatic and vice versa with minimal changes. For this purpose, in the vertical direction, an implicit method is used to suppress the vertical propagation of sound waves, which is combined with an explicit method in the horizontal direction, leading to the HEVI (Horizontally Explicit-Vertically Implicit) scheme. After presenting the formulation and the changes made, as a first assessment, the way the new model works in simulating the evolution of synoptic-scale Rossby waves in mid-latitudes is discussed. This is done through implementation of the (dry) Jablonowski–Williamson baroclinic wave test. The performance of the models constructed are then investigated in the face of meso-scale waves such as the mountain wave. This is done by simulating non-hydrostatic gravity waves through the ideal test of the mountain wave presented in the reference tests of the Dynamical Core Model Intercomparison Project (DCMIP). The results obtained for this test are comparable to those by the world-famous models available and indicate the power of the dynamical core of the new model in the detection and time evolution of meso-scale and non-hydrostatic scale waves. Finally, by using a set of full physics parameterization schemes, the non-hydrostatic model has been evaluated in a five-day weather forecast. The output of the rainfall field as a clear example of the model's performance and rainfall forecast has been compared with the results obtained from the hydrostatic version of the model with similar horizontal and vertical resolution. Comparison with two global reference models has also been carried out: GFS (Global Forecast System) with horizontal resolution of 0.5 degrees and ERA5 reanalysis data from ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) with horizontal resolution of 0.25 degrees. In general, the performance of the developed UTGAM model is acceptable compared to the reference models given their much higher spatial resolution and more accurate settings related to the physical parametrizations of the model such as the boundary layer, surface turbulence fluxes, and cumulus convection.

Keywords: Non-hydrostatic atmospheric model, DCASL algorithm, Jablonowski–Williamson baroclinic wave test, mountain wave test, physical parameterization.

Cite this article: Laghaeizadeh, R., Mohebalhojeh, A. R., Ahmadi-Givi, F., Mirzaei, M., & Mohammadi, A. (2025). Development and assessment of the non-hydrostatic dynamical core of the University of Tehran Global Atmospheric Model (NH-UTGAM). *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(1), 151-173. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.378776.1007617>

E-mail: (1) laghaei.reza@gmail.com | ahmadig@ut.ac.ir | mirzaeim@ut.ac.ir (2) mohammadi.a4682@gmail.com



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.378776.1007617>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

توسعه و ارزیابی هسته دینامیکی نآب‌ایستایی مدل جهانی جوی دانشگاه تهران (NH-UTGAM)

رضا لقائی‌زاده^۱ | علیرضا محب‌الحجه^{۱*} | فرهنگ احمدی‌گیوی^۱ | محمد میرزائی^۱ | علی محمدی^۲

۱. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. گروه علوم دریایی، دانشکده ناوبری و فرماندهی کشتی، دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خمینی نوشهر، نوشهر، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: amoheb@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۳/۲۰)

چکیده

در این مقاله، تغییرات انجام‌شده برای ساخت هسته دینامیکی نآب‌ایستایی کاملاً تراکم‌پذیر NH-UTGAM ارائه می‌شود. این مدل در واقع توسعه هسته دینامیکی مدل جوی آب‌ایستایی دانشگاه تهران برپایه الگوریتم DCASL است. همچون مدل آب‌ایستایی، مدل جدید از مختصه قائم تعمیم‌یافته بهره می‌برد و با تعریف جدید سیگما برحسب فشار آب‌ایستایی هر دو امکان سیگما-تتا و سیگما-پی را فراهم می‌کند. بنابراین مدل به راحتی می‌تواند با کمترین تغییر و با حفظ اصالت خود، در حل معادلات از حالت نآب‌ایستایی به آب‌ایستایی و به عکس تغییر یابد. بدین منظور، در راستای قائم برای مهار انتشار قائم امواج صوتی از روش ضمنی و در راستای افقی از روش صریح استفاده شده است. برای بررسی عملکرد مدل جدید در هر دو مقیاس همدیدی و میانی، پس از ارائه فرمول‌بندی و تغییرات صورت‌گرفته، به ترتیب از آزمون‌های آرمانی موج کُفشار یابلونوسکی-ویلیامسون و موج کوهستان استفاده شد. به طور کلی، نتایج حاصل از این آزمون‌ها قابل مقایسه با مدل‌های مطرح جهانی بوده و بیانگر درستی عملکرد هسته دینامیکی مدل جدید است. در پایان، با کاربست مجموعه‌ای از طرحواره‌های پارامترسازی فیزیک کامل، مبادرت به ارزیابی مدل نآب‌ایستایی در یک پیش‌بینی پنج‌روزه وضع هوا شد. مقایسه‌ای با دو مدل جهانی مرجع GFS با تفکیک افقی ۰/۵ درجه و داده‌های بازتحلیل ERA5 از ECMWF با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه نیز انجام شد. عملکرد مدل توسعه‌یافته در مقایسه با مدل‌های مرجع، با در نظر گرفتن تفکیک مکانی به مراتب بالاتر آنها و نیز تنظیمات دقیق‌تر موارد فیزیکی مدل همچون لایه مرزی، شارهای تلاطم سطح و همرفت کومه‌ای، قابل قبول است.

واژه‌های کلیدی: مدل جوی نآب‌ایستایی، الگوریتم DCASL، آزمون موج کُفشار یابلونوسکی-ویلیامسون، آزمون موج کوهستان، پارامترسازی فیزیکی.

۱. مقدمه

عملیاتی پیش‌بینی عددی وضع هوا به ارائه نسخه‌های نآب-ایستایی مدل‌های خود پرداخته‌اند. کارهای انجام‌شده توسط اسکاماروک و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۲۱) و کلمپ و همکاران (۲۰۱۵) در مورد مدل MPAS و کوهن‌لین و همکاران (۲۰۱۹) در مورد مدل IFS-FVM ECMWF را می‌توان تنها نمونه‌هایی در این راستا برشمرد. به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد، مدل‌های نآب‌ایستایی برای ساخت مدل‌های جهانی با قابلیت تشخیص و حل دینامیکی ابرها یا GCRM (Global Cloud Resolving Model) در حد تفکیک‌پذیری کیلومتر به کار رفته‌اند. این مسئله با

توسعه مدل‌های پیش‌بینی وضع هوا و اقلیم در راستای یکپارچه‌سازی کامل آنها حرکت می‌کند، بدین معنی که برای پیش‌بینی میدان‌های مختلف جوی، چنین مدل‌های با مقیاس‌های گوناگون مکانی و زمانی قابلیت حل صریح و یک‌جای دینامیکی معادلات مربوطه را خواهند داشت. برای نمونه، به مرور گرایش مدل‌ها به آن است که به جای پارامترسازی همرفت، به حل مستقیم معادلات دینامیکی در مقیاس‌های هرچه خُردتر بپردازند. در راستای تلفیق دینامیک و فیزیک همرفت، که گام مهم و جالبی در توسعه مدل‌های جوی بوده است، در سال‌های اخیر اکثر مراکز

استناد: لقائی‌زاده، رضا؛ محب‌الحجه، علیرضا؛ احمدی‌گیوی، فرهنگ؛ میرزائی، محمد و محمدی، علی (۱۴۰۴). توسعه و ارزیابی هسته دینامیکی نآب‌ایستایی مدل جهانی جوی دانشگاه تهران (NH-UTGAM). *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۵۱(۱)، ۱۵۱-۱۷۳. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.378776.1007617>

رایانامه: (۱) laghaei.reza@gmail.com | ahmadig@ut.ac.ir | mirzaeim@ut.ac.ir (۲) mohammadi.a4682@gmail.com

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.378776.1007617>

الگوریتم DCASL به معادلات ناآب‌ایستایی در تکمیل زنجیره توسعه فوق انجام گرفته است.

هدف این مقاله بررسی توسعه هسته دینامیکی UTGAM در زمینه تبدیل این مدل به مدلی با احتساب دینامیک ناآب‌ایستایی است. بدین منظور پس از مقدمه و در بخش دوم، فرمول‌بندی هسته دینامیکی مدل جدید و تغییرات صورت گرفته نسبت به نسخه آب‌ایستایی ارائه می‌شود. بخش سوم به ارائه و تحلیل نتایج کیفی و کمی آزمون موج کژ فشار خشک یا بلونوسکی-ویلیامسون برای شبیه‌سازی تحول موج در مقیاس همدیدی و عرض‌های میانه اختصاص دارد. در بخش چهارم، عملکرد مدل جدید در مواجهه با امواج میان‌مقیاس همچون موج کوهستان بررسی می‌شود. این کار با شبیه‌سازی تحول امواج گرانی ناآب-ایستایی پس از برخورد جریان با کوه و با پیاده‌سازی آزمون آرمانی موج کوهستان پروژه مقایسه متقابل هسته دینامیکی مدل‌ها موسوم به DCMIP یا Dynamical Core Model Intercomparison Project (اولریش و همکاران، ۲۰۱۲) انجام خواهد شد. عملکرد مدل در این مقیاس، برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش پنجم، به ارزیابی عملکرد مدل NH-UTGAM با تفکیک افقی ۲۵۶ × ۵۱۲ معادل فاصله شبکه‌ای تقریباً ۸۰ کیلومتر در راستای نصف‌النهار و در نظر گرفتن فیزیک کامل در دو ساختار قائم مختلف سیگما-تا و سیگما-پی در مقایسه با مدل آب‌ایستایی متناظر و همچنین چند مدل جهانی مرجع پرداخته می‌شود. بخش پایانی مقاله به نتیجه‌گیری اختصاص خواهد داشت.

۲. فرمول‌بندی هسته دینامیکی مدل جدید

۲-۱. معادلات حاکم

الگوریتم DCASL برای پیش‌یابی متغیر شبه‌تاوایی Q با افراز این متغیر به دو بخش بادررو و بی‌دررو به حل ترکیبی می‌پردازد. در این راستا، DCASL با استفاده از الگوریتم فرآبرد پربندی برای بخش بی‌دررو متغیر یعنی Q_d و حل شبکه‌محور (در اینجا روش نیمه‌لاگرانژی) برای بخش بادرروی متغیر یعنی Q_d عمل می‌کند، یعنی به زبان ریاضی

پیشنهاد حدود سه دهه پیش ناکاجیما و ماتسونو (۱۹۸۸) در خصوص توسعه مدل‌های جهانی ناآب‌ایستایی به‌عنوان یک GCRM برای پروژه شبیه‌ساز زمین توسط آبرایانه (ساتو و همکاران، ۲۰۰۸؛ استیونس و همکاران، ۲۰۱۹) اهمیت بیشتری یافته است.

چندمقیاس بودن یک مدل، مدیون پیشرفت‌های حاصل‌شده در زمینه‌های محاسباتی، عددی و همچنین الگوریتم‌هایی است که از درک عمیق‌تر و دقیق‌تر حرکات شار و دینامیک جو به‌دست آمده است. افزایش تفکیک مکانی مستلزم توانایی مدل در نمایش ساختار جو در مقیاس ناآب‌ایستایی (تفکیک مکانی افقی در حدود کمتر از ۱۰ کیلومتر) و همچنین مهار انتشار قائم امواج صوتی و در نتیجه تحول زمانی چگالی و محاسبه مستقیم شتاب قائم خواهد بود، که این موارد خود از دلایل توسعه مدل‌های جوی با هسته دینامیکی ناآب‌ایستایی کاملاً تراکم‌پذیر هستند.

مدل‌های جوی بر مبنای تاوایی پتانسیلی، به‌ویژه با مختصات قائم مبتنی بر دمای پتانسیلی، در نمایش فرایندهای متوازن و نامتوازن دقت و کارایی بهتری دارند (محب‌الحجه و همکاران، ۲۰۱۶). مدل جوی دانشگاه تهران به نام UTGAM (برای اختصار University of Tehran Global Atmospheric Model) که در نسخه عملیاتی خود از ساختار قائم تعمیم‌یافته هیبریدی سیگما-تا بهره می‌برد، بر مبنای تاوایی پتانسیلی بوده و در معادلات پیش‌یابی خود از الگوریتم DCASL (Diabatic Contour-Advective Semi Lagrangian یا فرآبرد پربندی نیمه‌لاگرانژی بادررو) استفاده می‌کند. لازم به ذکر است که در طی مراحل مختلف توسعه این مدل، الگوریتم DCASL از معادلات شبه‌زمینگرد بوسینسک تا معادلات بسیط آب‌ایستایی، از هندسه دودوره‌ای تا کروی و همچنین در مختصات قائم مختلف به کار برده شده است (دریچل و آمبام، ۱۹۹۷؛ دریچل و همکاران، ۱۹۹۹؛ محب‌الحجه و دریچل، ۲۰۰۴، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹؛ دریچل و آمبام، ۲۰۰۶؛ میرزائی و همکاران، ۲۰۱۲؛ محب‌الحجه و همکاران، ۲۰۱۶؛ لقائی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰). لذا کاربر

مؤلفه‌های u ، v و w به ترتیب در راستاهای مداری، نصف‌النه‌ای و قائم، ξ مختصه قائم تعمیم‌یافته که در قسمت ۲-۲ تعریف خواهد شد، g شتاب گرانی، Φ ژئوپتانسیل، p فشار، p_h فشار آب‌ایستایی و $\Pi = c_p (p / p_0)^\kappa$ تابع اکسیر به ازای c_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت و $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ است.

برای مهار مدهای آکوستیکی انتشاریابنده در راستای قائم که محدودیت بسیار زیادی بر روی گام زمانی ایجاد می‌کنند، از روش افقی صریح-قائم‌ضمنی (horizontally explicit-vertically implicit) استفاده می‌شود (توی، ۲۰۱۳؛ کلمپ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳). ایده اصلی در این روش، گسسته‌سازی ضمنی جملات عامل ایجاد مدهای صوتی انتشاریابنده در راستای قائم و گسسته‌سازی صریح سایر بخش‌ها در طرحواره زمانی است. بر اساس کارهای قبلی، در اینجا روش افقی صریح-قائم‌ضمنی به مختصه قائم کلی ξ تعمیم داده شده است. برای این کار، ابتدا معادله حالت برای هوای خشک

$$p = R_d \rho T \quad (2)$$

بر حسب دمای پتانسیلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \rho \theta}{p_0} \right)^\gamma \quad (3)$$

که در آن $\gamma = c_p / c_v$ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت است. پس از گرفتن مشتق لگاریتمی و استفاده از تعریف فشار آب-

ایستایی $\partial \Phi / \partial p_h = -1 / \rho$ داریم:

$$\frac{dp}{p} = \gamma \left[\frac{d\theta}{\theta} + \frac{d\rho}{\rho} \right] = \gamma \left[\frac{d\theta}{\theta} + \frac{d(\partial \Phi / \partial p_h)}{\partial \Phi / \partial p_h} \right] \quad (4)$$

با توجه به رابطه $\frac{\partial \Phi}{\partial p_h} = \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial p_h}$ و پس از مقداری

عملیات جبری می‌توان نشان داد:

$$\frac{dp}{p} = \gamma \left[\frac{d\theta}{\theta} - \frac{d(\partial \Phi / \partial \xi)}{\partial \Phi / \partial \xi} + \frac{d(\partial p_h / \partial \xi)}{\partial p_h / \partial \xi} \right] \quad (5)$$

که پس از گسسته‌سازی پیش‌رو می‌توان رابطه فوق را اینگونه نوشت:

$$\frac{DQ}{Dt} = \frac{D(Q_a + Q_d)}{Dt} = S_Q \leftrightarrow \begin{cases} \frac{DQ_a}{Dt} = 0 & (CA) \\ \frac{DQ_d}{Dt} = S_Q & (SL) \end{cases}$$

در اینجا D / Dt عملگر مشتق تام افقی و S_Q دربردارنده جملات مربوط به فرارفت قائم و اثرات ناپایستار است. سایر متغیرهای پیش‌یابی به روش تبدیل طیفی در راستای مداری و تفاضل متناهی با روش فشرده مرتبه چهارم در راستای نصف‌النه‌ای همراه با پالایه‌های زمانی و کاربست میرایی مناسب از جمله برای متغیر واگرایی محاسبه و حل می‌شوند (برای جزئیات بیشتر رجوع شود به محب‌الحججه و همکاران، ۲۰۱۶؛ لقائی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰).

به‌منظور رسیدن به معادلات پیش‌یابی هسته دینامیکی مدل توسعه‌یافته NH (ناآب‌ایستایی)، علاوه بر تغییرات انجام‌شده در معادلات افقی، از جمله نیروی گرادبان فشار، روشی برای محاسبه تکانه و سرعت قائم که در مدل آب‌ایستایی متغیر پیش‌یابی نیست و امکان برآورد مستقیم ندارد، ارائه خواهد شد. در اینجا معادلات حاکم در شکل ناآب‌ایستایی و در مختصه قائم تعمیم‌یافته ξ به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{DQ}{Dt} &= S_Q \\ \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} &= -\nabla \cdot [(1 + \tilde{h})\mathbf{v}] + S_{\tilde{h}} \\ \frac{\partial \delta}{\partial t} &= \gamma - 2 \left[\frac{\partial u}{\partial \phi} \left(\frac{\partial u}{\partial \phi} + \zeta \right) + \frac{\partial v}{\partial \phi} \left(\frac{\partial v}{\partial \phi} - \delta \right) \right] - \nabla \cdot (\delta \mathbf{v}) - \frac{|\mathbf{v}|^2}{a^2} + S_\delta \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\mathbf{v} \cdot \nabla w - \xi \frac{\partial w}{\partial \xi} + g \frac{\partial p}{\partial p_h} - g \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} &= -\mathbf{v} \cdot \nabla \Phi - \xi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + gw \end{aligned} \quad (1)$$

که در رابطه فوق

$$S_Q = Q \left\{ \frac{1}{\frac{\partial p}{\partial \xi}} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial p}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{f + \zeta} \mathbf{k} \cdot \left[\nabla \times \left(\Pi' \nabla \theta' - \left(\frac{\partial p}{\partial p_h} \right)' \nabla \Phi - \xi \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \xi} \right) \right] \right\}$$

$$S_{\tilde{h}} = -\frac{1}{\frac{\partial p}{\partial \xi}} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial p}{\partial \xi} \right)$$

$$S_\delta = \nabla \cdot \left(\Pi' \nabla \theta' - \left(\frac{\partial p}{\partial p_h} \right)' \nabla \Phi - \xi \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \xi} \right)$$

چشمه‌های Q متغیر شبه‌تاوایی پتانسیلی، $\tilde{h}$ متغیر ضخامت فشاری بهنجار شده و δ متغیر واگرایی هستند.

$\mathbf{V} = (\mathbf{v}, w) = (u, v, w)$ بردار سه‌بعدی سرعت با

$$\begin{aligned} (2\Delta t g C_\beta)^2 \left(\frac{\gamma p^n}{\Delta \Phi^n} \right)_k w_{k+1/2}^{n+1} + \left[\Delta p_{h,k+1/2}^{n+1} - (2\Delta t g C_\beta)^2 \left(\frac{\gamma p^n}{\Delta \Phi^n} \right)_{k+1} - (2\Delta t g C_\beta)^2 \left(\frac{\gamma p^n}{\Delta \Phi^n} \right)_k \right] w_{k+1/2}^{n+1} + \\ (2\Delta t g C_\beta)^2 \left(\frac{\gamma p^n}{\Delta \Phi^n} \right)_{k+1} w_{k+3/2}^{n+1} = \Delta p_{h,k+1/2}^{n+1} w^{**} \end{aligned} \quad (12)$$

در اینجا برای مرز بالا، $w_{1/2}$ برابر صفر و برای مرز پایین، شرط مرزی جنبشی Φ_s جنبشی $\mathbf{v}^{n+1} \cdot \nabla \Phi_s / g$ به ازای $w_{L+1/2}^{n+1}$ به ازای Φ_s ژئوپتانسیل سطح زمین، به کار برده می‌شود. شایان ذکر است که چون فاصله شبکه‌ای در راستای قائم متغیر است، علی‌رغم به کار بردن تفاضل مرکزی، گسسته‌سازی منجر به معادله (۱۲) دارای درستی از مرتبه یکم است. معادله (۱۲) را می‌توان به شکل یک معادله ماتریسی سه قطری برای بردار ستونی متشکل از سرعت قائم در ترازهای کسری (لقائی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰) هر نقطه از شبکه افقی درآورد که روش استاندارد سریع برای حل آن الگوریتم توماس (دورن، ۲۰۱۰) است.

برای مدل آب‌ایستایی، نیروی گرادیان فشار در مختصه قائم تعمیم‌یافته به صورت زیر نوشته می‌شود (محب‌الحجه و همکاران، ۲۰۱۶):

$$-\nabla M + \Pi \nabla \theta = -\nabla M + (\bar{\Pi} + \Pi') \nabla \theta = -\nabla (M - \bar{\Pi} \theta') + \Pi' \nabla \theta' \quad (13)$$

در همین راستا و به طور مشابه، اما در حالت ناآب‌ایستایی، پس از برخی محاسبات جبری می‌توان نشان داد که روابط زیر برقرارند:

$$\begin{aligned} -\theta \nabla \Pi + \theta \frac{\partial \Pi}{\partial z} \nabla z = -\nabla (\theta \Pi) + \Pi \nabla \theta + \theta \frac{\partial \Pi}{\partial z} \nabla z \\ = -\nabla (\theta \Pi - \bar{\Pi} \theta') + \Pi' \nabla \theta' + \theta \frac{\partial \Pi}{\partial z} \nabla z \end{aligned} \quad (14)$$

با استفاده از تعریف $\Pi = c_p (p / p_0)^K$ برای تابع اکسیر و گرفتن مشتق لگاریتمی از آن نسبت به z خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial z} &= \frac{\Pi}{c_p} \frac{R_d}{p} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{T}{\theta} \frac{R_d}{p} \frac{\partial p}{\partial z} \\ &= \frac{1}{\rho \theta} \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{g}{\theta} \frac{\partial p / \partial z}{\partial p_h / \partial z} = -\frac{g}{\theta} \frac{\partial p}{\partial p_h} \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\theta \frac{\partial \Pi}{\partial \Phi} = -\frac{\partial p}{\partial p_h} = -\left[1 + \left(\frac{\partial p}{\partial p_h} \right)' \right] \quad (15)$$

$$\begin{aligned} p^{n+1} - p^n &= \gamma p^n \left[\frac{\theta^{n+1} - \theta^n}{\theta^n} - \frac{(\partial \Phi / \partial \xi)^{n+1} - (\partial \Phi / \partial \xi)^n}{(\partial \Phi / \partial \xi)^n} + \frac{(\partial p_h / \partial \xi)^{n+1} - (\partial p_h / \partial \xi)^n}{(\partial p_h / \partial \xi)^n} \right] \\ &= \gamma p^n \left[\frac{\theta^{n+1}}{\theta^n} - \frac{(\partial \Phi / \partial \xi)^{n+1}}{(\partial \Phi / \partial \xi)^n} + \frac{(\partial p_h / \partial \xi)^{n+1}}{(\partial p_h / \partial \xi)^n} - 1 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن بالانویس n مربوط به مقدار در گام زمانی n است. حال معادلات پیش‌یابی سرعت قائم و ژئوپتانسیل در راستای قائم به صورت زیر گسسته‌سازی می‌شوند:

$$\begin{cases} w^{n+1} = w^n - 2\Delta t \left(\mathbf{v} \cdot \nabla w + \xi \frac{\partial w}{\partial \xi} \right)^n + 2\Delta t g \left[C_\alpha \left(\frac{\partial p / \partial \xi}{\partial p_h / \partial \xi} \right)^{n-1} + C_\beta \left(\frac{\partial p / \partial \xi}{\partial p_h / \partial \xi} \right)^{n+1} - 1 \right] \\ \Phi^{n+1} = \Phi^{n-1} - 2\Delta t \left(\mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + \xi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right)^n + 2\Delta t g \left[C_\alpha w^{n-1} + C_\beta w^{n+1} \right] \end{cases} \quad (7)$$

که در آن C_β و C_α وزن گام‌های زمانی به ترتیب $n-1$ و $n+1$ در طرحواره زمانی هستند. برحسب متغیرها در گام زمانی $n+1$ و با تعریف متغیرهای کمکی w^* و Φ^* ، رابطه (۷) به صورت زیر مرتب می‌شود:

$$\begin{cases} w^{n+1} = w^* + 2\Delta t g C_\beta \left(\frac{\partial p / \partial \xi}{\partial p_h / \partial \xi} \right)^{n+1} \\ \Phi^{n+1} = \Phi^* + 2\Delta t g C_\beta w^{n+1} \end{cases} \quad (8)$$

در ادامه با مشتق‌گیری نسبت به مختصه قائم معادله فشار (رابطه ۶) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial p^{n+1}}{\partial \xi} = \frac{\partial p^n}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ p^n \left[\frac{\theta^{n+1}}{\theta^n} - \frac{(\partial \Phi^* / \partial \xi)}{(\partial \Phi / \partial \xi)^n} - \frac{2\Delta t g C_\beta (\partial w^{n+1} / \partial \xi)}{(\partial \Phi / \partial \xi)^n} + \frac{(\partial p_h / \partial \xi)^{n+1}}{(\partial p_h / \partial \xi)^n} - 1 \right] \right\} \quad (9)$$

با جای‌گذاری معادله (۹) در معادله اول رابطه (۸)، سرعت قائم در گام زمانی $n+1$ به دست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} w^{n+1} &= w^* + \frac{2\Delta t g C_\beta}{(\partial p_h / \partial \xi)^{n+1}} \left\{ \frac{\partial p^n}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial}{\partial \xi} \left[p^n \left[\frac{\theta^{n+1}}{\theta^n} - \frac{(\partial \Phi^* / \partial \xi)}{(\partial \Phi / \partial \xi)^n} - \frac{2\Delta t g C_\beta (\partial w^{n+1} / \partial \xi)}{(\partial \Phi / \partial \xi)^n} + \frac{(\partial p_h / \partial \xi)^{n+1}}{(\partial p_h / \partial \xi)^n} - 1 \right] \right] \right\} \\ &= w^* - (2\Delta t g C_\beta)^2 \gamma \frac{\partial}{\partial p_h} \left[\frac{p^n (\partial w^{n+1} / \partial \xi)}{(\partial \Phi / \partial \xi)^n} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

که در رابطه فوق:

$$w^{**} = w^* + \frac{2\Delta t g C_\beta}{(\partial p_h / \partial \xi)^{n+1}} \left\{ \frac{\partial p^n}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial}{\partial \xi} \left[p^n \left[\frac{\theta^{n+1}}{\theta^n} - \frac{(\partial \Phi^* / \partial \xi)}{(\partial \Phi / \partial \xi)^n} + \frac{(\partial p_h / \partial \xi)^{n+1}}{(\partial p_h / \partial \xi)^n} - 1 \right] \right] \right\} \quad (11)$$

در معادله (۱۰)، پس از گرفتن تفاضل متناهی در راستای قائم و مرتب‌کردن جملات، می‌توان معادله زیر را برای سرعت قائم به دست آورد (پایین‌نویس k مربوط به تراز قائم می‌باشد):

شود، متغیر ξ فقط تابعی از سیگما یعنی فقط برحسب p و p_s خواهد بود. این وضعیت با تعریف فشار در ترازهای کسری و به صورت رابطه (۱۸)، مدل سیگما-پی با شبکه بندی چارنی-فیلیس و متغیرهای پیش یابی (Q, θ, δ) خواهد ساخت:

(۱۸)

$$p_{k+\frac{1}{2}} = a_{k+\frac{1}{2}} p_{\text{ref}} + b_{k+\frac{1}{2}} p_s$$

که در آن $p_{\text{ref}} = 10^5 \text{ Pa}$ و ضرایب a و b مطابق جداول مرجع همچون مقاله یابلونوسکی و ویلیامسون (۲۰۰۶) تنظیم می شوند. در صورتی که مطابق مقاله سیمونز و بریج (۱۹۸۱) به ترکیب ساختار قائم پیردازیم، مدل سیگما-پی با شبکه بندی لورنس و متغیرهای پیش یابی (Q, T, δ) خواهیم داشت [جزئیات بیشتر و تنظیمات ساختار قائم در محب الحجه و همکاران (۲۰۱۶) و همچنین لقائی زاده و همکاران (۲۰۲۰) آمده است] که برای مدل ناآب ایستایی پیاده سازی نشده است.

۳. نتایج

در این بخش به بررسی عملکرد هسته دینامیکی مدل ناآب-ایستایی با استفاده از چند آزمون آرمانی و همچنین آزمونی عملیاتی با فیزیک کامل خواهیم پرداخت.

۳-۱. آزمون موج کژ فشار

یکی از آزمون های آرمانی مطرح در مقیاس همدیدی برای ارزیابی عملکرد هسته دینامیکی مدل های جوی از نظر طراحی الگوریتمی و شبکه بندی افقی، آزمون موج کژ فشار یابلونوسکی و ویلیامسون (۲۰۰۶) است که برای ارجاع به آن از اختصار JW06 استفاده می کنیم. این آزمون برای حالت های خشک و مرطوب و در مراحل مختلف سنجش یک مدل به کار گرفته می شود که در این قسمت به آزمون خشک خواهیم پرداخت. حالت اولیه در این آزمون شامل جت متقارن مداری آرمانی است که به طور کژ فشار ناپایدار بوده و امواج کژ فشار در عرض های میانی با افزودن پریشیدگی فشارورد ضعیفی بر روی میدان باد اولیه راه-اندازی می شود. به استثنای مقدار فشار بر روی ترازهای مدل

با جای گذاری رابطه (۱۵) در (۱۴) و استفاده از رابطه $\Pi \theta = c_p T$ خواهیم داشت:

$$-\theta \nabla \Pi + \theta \frac{\partial \Pi}{\partial z} \nabla z = -\nabla (M - \bar{\Pi} \theta') + \Pi' \nabla \theta' - \left(\frac{\partial p}{\partial p_h} \right)' \nabla \Phi \quad (۱۶)$$

با مقایسه روابط (۱۶) و (۱۳) مشاهده می شود که در نیروی گرادیان فشار، آخرین جمله سمت راست رابطه (۱۶) در معادلات ناآب ایستایی افزوده می شود و بنابراین در مدل ناآب ایستایی این جمله مد نظر قرار خواهد گرفت.

۲-۲. مختصات قائم

مختصه قائم تعمیم یافته و دنبال کننده سطح سیگما-تتا، طبق ایده کُور و آراکاوا (۱۹۹۷) با رابطه $\xi = F(\sigma, \theta) = f(\sigma) + \theta g(\sigma)$ و پس از انتخاب مناسب توابع f ، g و σ به گونه ای تعریف می شود که تغییر ملایمی از مختصه سیگما در سطح زمین به دمای پتانسیلی یا تتا در بام مدل را ایجاد کند. در این رابطه، متغیر سیگما برحسب فشار سطح زمین p_s و فشار در بام مدل p_{top} به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{p - p_{\text{top}}}{p_s - p_{\text{top}}} \quad (۱۷)$$

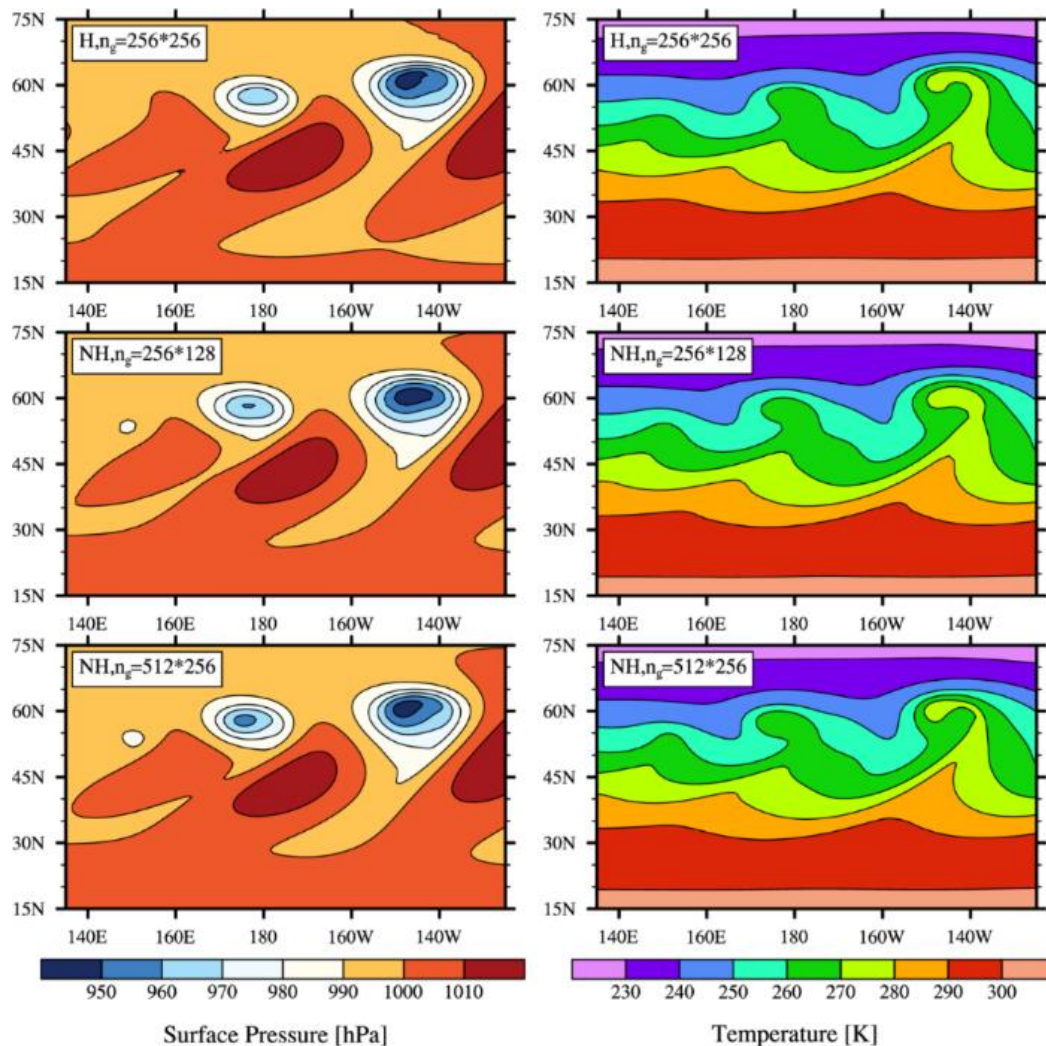
با مختصه قائم ترکیبی سیگما-تتا، امکان چیدمان متغیرها در راستای قائم به صورت شبکه بندی چارنی-فیلیس به طور طبیعی فراهم می شود (لقائی زاده و همکاران، ۲۰۲۰). برای مدل ناآب ایستایی، می توان به راحتی مختصه قائم سیگما-تتا در مدل آب ایستایی را با استفاده از فشار آب ایستایی به جای فشار در رابطه (۱۷) تعمیم داد. این کار با روش های معمول بر اساس ساختار قائم ترکیبی دنبال کننده کوهساری فشار-آب ایستایی یا مختصه جرمی (لپرایز، ۱۹۹۲) مشابهت دارد. در ادامه بدون تأکید بر نام فشار آب ایستایی، جاهایی که فشار به کار رفته منظور همان فشار آب ایستایی است و در این مقاله از نام دو مختصه قائم سیگما-تتا و سیگما-پی استفاده خواهیم کرد.

با اشاره ای گذرا به مختصه سیگما-پی، می توان گفت اگر در مختصه قائم تعمیم یافته فوق، تابع $g = 0$ در نظر گرفته

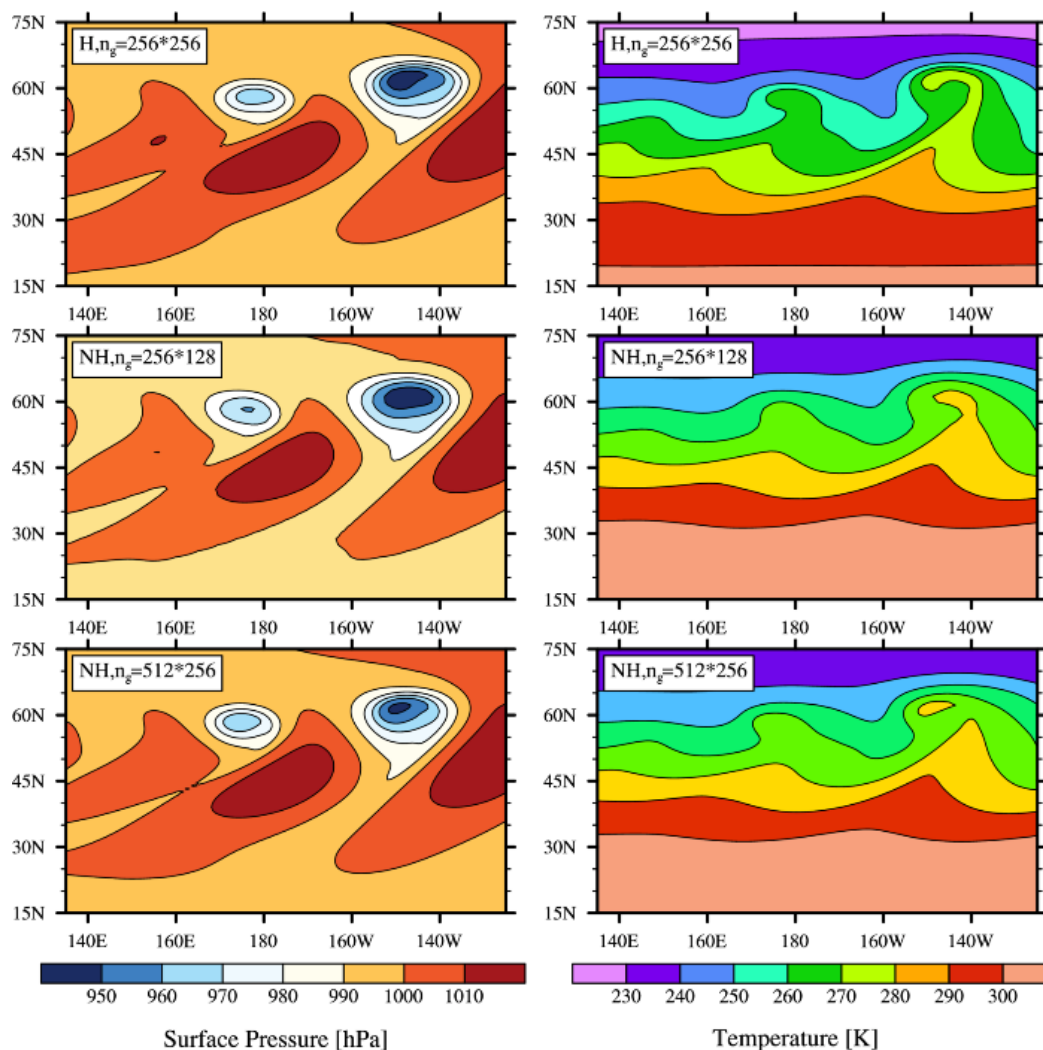
تعداد نقاط شبکه‌ای به‌ترتیب در راستاهای نصف‌النهاری و مداری) که به‌ترتیب معادل فاصله شبکه‌ای تقریباً ۱۶۰ و ۸۰ کیلومتر در راستای نصف‌النهاری هستند، انجام پذیرفته است. میدان‌های فشار سطح، دما و تاوایی نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال طی دوره زمانی و روزهای مهم‌تر آزمون از نظر دینامیکی، همچون روزهای تقویت و شکست موج و نیز ظهور جبهه‌های مختلف و هماهنگ با روزهای موجود در آزمون مذکور برای مدل‌های مرجع، در شکل‌های ۱ تا ۴ ارائه شده‌اند. در این شکل‌ها، مقایسه نتایج مدل با مختصه‌های قائم‌گوناگون و همچنین مقایسه با مدل‌های آب‌ایستایی متناظر که از این به بعد با H از آنها یاد می‌کنیم، نیز آورده شده است.

برای مختصه قائم سیگما-تتا که با حل عددی معادله‌ای غیرخطی به روش نیوتن به‌دست می‌آید، آغازگری هسته دینامیکی با روابط تحلیلی انجام و پس از ساخته‌شدن حالت اولیه متوازن، مدل به‌مدت ۳۰ روز اجرا می‌شود. طی این شبیه‌سازی، مراحل مختلف رشد آشفتگی موج کثرفشار شامل چرخندزایی، شکست موج، توسعه جبهه‌های دمایی قوی متناظر با سامانه‌های پرفشار و کم‌فشار و همچنین خارج از بازه زمانی پیش‌بینی‌پذیری با قطعیت انجام می‌پذیرد.

برای مدل NH-UTGAM که از این به بعد با NH از آن یاد می‌کنیم، اجرای آزمون یابلونوسکی و ویلیامسون (۲۰۰۶) با دو تفکیک افقی 256×128 و 512×256 (مشخص‌کننده



شکل ۱. مقایسه میدان‌های فشار (پربندهای مشکی و سایه روشن رنگی با فاصله پربندی 10 hPa) و دمای سطح (پربندهای مشکی و سایه روشن رنگی با فاصله پربندی 10 K) مدل‌های NH و H سیگما-تتا طی روز نهم آزمون JW06. شکل بالا مدل H با تفکیک 256×256 و شکل‌های وسط و پایین به‌ترتیب مدل NH با تفکیک‌های 256×128 و 512×256 می‌باشند.



شکل ۲. مشابه شکل ۱ ولی برای مدل‌های NH و H سیگما-پی.

بازه پیش‌بینی‌پذیری با قطعیت شارش، توسعه سامانه‌ها چگونه خواهند بود. از این منظر، با مقایسه عملکرد پس از روز دهم اجرای مدل (شکل ۳)، شاهد گسترده‌تری بیشتر سامانه‌های پرفشار و کم‌فشار در مدل H هستیم. شایان ذکر است که در تفکیک بالاتر مدل NH، به‌ویژه سیگما-تتا، تعداد مراکز و ظرافت جبهه‌های نمایش داده‌شده بیشتر ولی گسترده‌گی آنها ضعیف‌تر به‌نظر می‌رسند. در تفکیک‌های بالاتر مدل NH چنانچه انتظار می‌رود به‌جای به‌هم‌پیوستگی، نواحی کم‌فشار و پرفشار مجزاتر هستند. در مجموع می‌توان گفت که تا روز شانزدهم، مدل H با وجود تفکیک کمتر، در شبیه‌سازی فشار سطح قوی‌تر عمل کرده است و مراکز و سامانه‌های بیشتری را طی روزهای پس از روز دهم اجرای مدل می‌بینیم. نتایج مدل NH نیز همچون

دقت مدل جدید با تفکیک‌های تقریباً برابر، در مقایسه با حالات گوناگون همانند مدل H، در شبیه‌سازی میدان‌های مختلف پس از اجرای آزمون قابل ملاحظه است. همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، خروجی میدان‌های فشار و دمای سطح مدل NH، به‌ویژه در مختصه سیگما-تتا، حتی با تفکیک افقی کمتر همانند حالت H در شبیه‌سازی مراکز کم‌فشار و جبهه‌ها و همچنین شکست موج دقیق می‌باشد. تنها مدل NH سیگما-پی در تحول میدان دمای سطح و نمایش دقیق جبهه‌های دمایی نسبت به بقیه حالات دارای کمی خطا است.

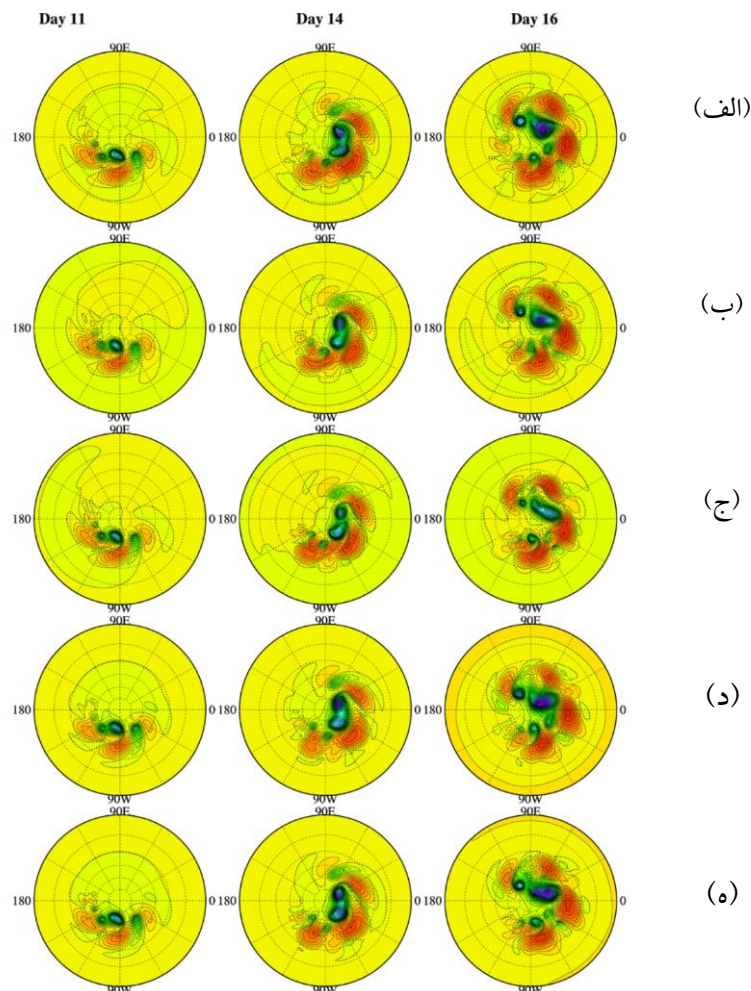
تا اینجا به بررسی روز نهم اجرای آزمون که رخداد شکست موج کژفشار انجام می‌گیرد، پرداخته شد. این موضوع نیز حائز اهمیت است که پس از روز دهم، در زمانی خارج از

می‌شود که مدل NH سیگما-تا، با وجود تفکیک افقی کمتر، در شبیه‌سازی میدان تاوایی نسبی به‌خوبی و قابل قیاس با نتایج مدل‌های جهانی مرجع (مثلاً مدل حجم متناهی CAM، Community Atmospheric Model، با تفکیک افقی بالاتر $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ در شکل ۸، یابلونوسکی و ویلیامسون، ۲۰۰۶) عمل کرده است.

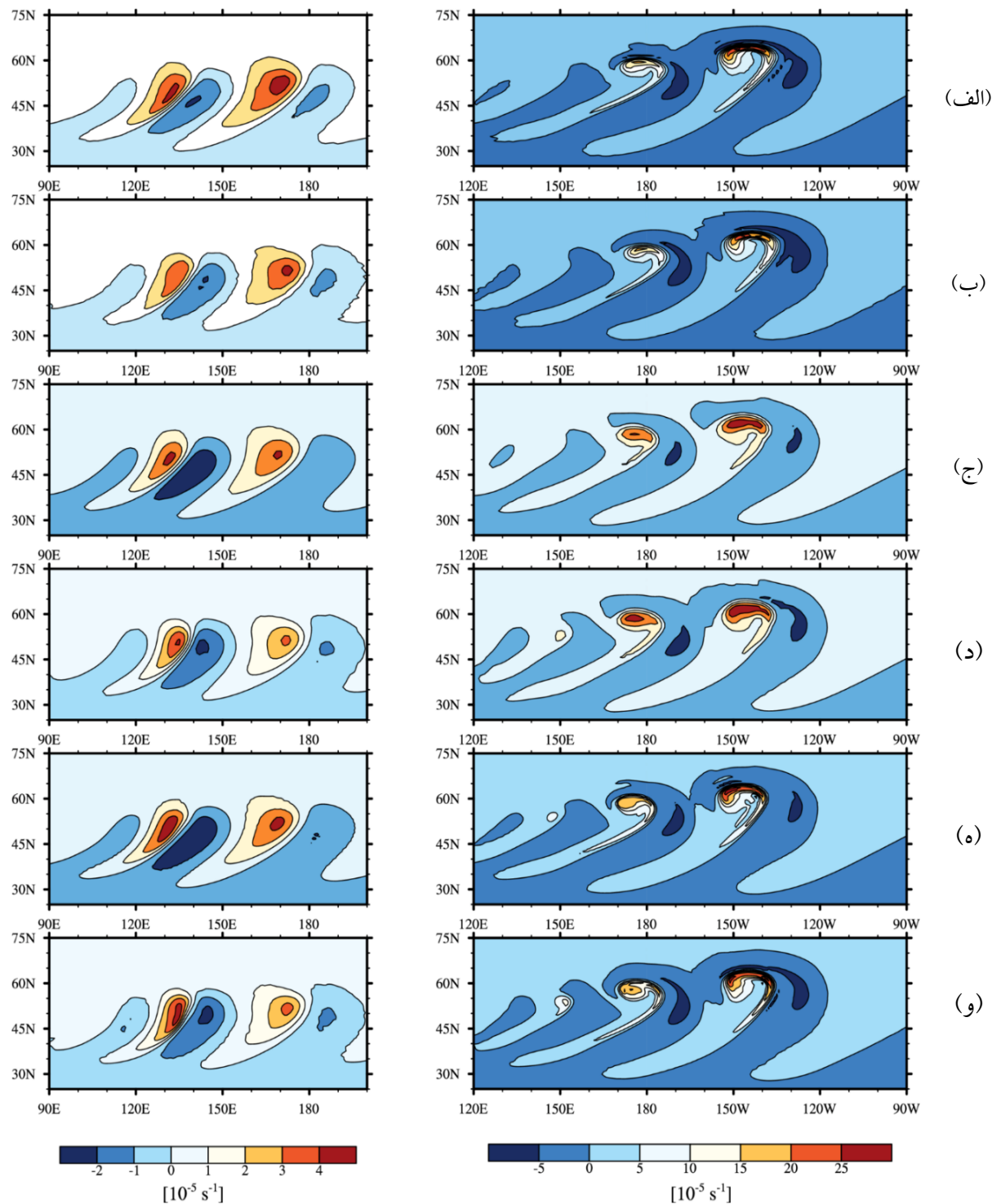
در ارزیابی هسته‌های دینامیکی، افزون بر مقایسه کیفی و شهودی تحول موج کُرفشار، برخی محاسبات کمی نیز طی این آزمون در ارتباط با مقادیر انرژی، تکانه زاویه‌ای، نُرم جهانی میدان‌های گوناگون و طیف انرژی جنبشی انجام گرفته است که این معیارهای کمی نیز بیانگر عملکرد مناسب مدل NH هستند.

نسخه H مدل، در مقیاس همدیدی و پس از روز دهم آزمون قابل قیاس با مدل‌های مرجع می‌باشد (مقایسه شود با شکل ۹، یابلونوسکی و ویلیامسون، ۲۰۰۶).

بررسی میدان تاوایی نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال طی روزهای هفتم و نهم اجرای آزمون نیز به‌وضوح از عملکرد مناسب مدل NH به‌ویژه در مختصه قائم سیگما-تا حکایت دارد که مشخصه اصلی آن تعداد بیشتر مراکز و همگرایی قوی‌تر در رفتن به تفکیک بالاتر در مقایسه با NH سیگما-پی است (مقایسه شکل ۴-ج با شکل ۴-د یا شکل ۴-ه با شکل ۴-و). البته در مقایسه با نتایج لقائی‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) برای مدل H باید به تفاوت در تفکیک مداری توجه داشت. با مقایسه شکل‌های ۴-ب و ۴-د مشاهده



شکل ۳. تصویر برجسته‌نگاشت قطب شمال (North polar-stereographic projection) از میدان فشار سطح (فاصله پربندی ۵ hPa؛ پربند ۱۰۰۰ هکتوپاسکال با نقطه‌چین مشخص شده و رنگ‌های قرمز و آبی به‌ترتیب نشان‌دهنده مراکز و پربندهای پرفشار و کم‌فشار هستند) طی روزهای ۱۱، ۱۴ و ۱۶ حالت‌های مختلف مدل پس از اجرای آزمون JW06 (الف) مدل H سیگما-تا با تفکیک افقی 256×256 ، (ب) و (ج) مدل NH سیگما-پی با تفکیک‌های افقی 256×128 و 512×256 ، (د) و (ه) مدل NH سیگما-تا با تفکیک‌های افقی 256×128 و 512×256 .



شکل ۴. مقایسه میدان تاوایی نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (سایه روشن رنگی با یکای 10^{-5} s^{-1}) حالت‌های مختلف مدل طی روزهای ۷ و ۹ پس از اجرای آزمون JW06 (ستون چپ مربوط به روز ۷ و ستون راست مربوط به روز ۹)؛ (الف) مدل H سیگما-تتا با تفکیک افقی 256×256 و (ب) و (ج) مدل NH سیگما-پی با تفکیک افقی 256×128 و 512×256 و (د) و (ه) مدل NH سیگما-تتا با تفکیک افقی 256×128 و 512×256 .

مدل NH با مختصه سیگما-تتا طی شش روز اول، همانند مدل H سیگما-تتا، مربوط به مشکل آغازگری مدل با مختصه سیگما-تتا است. در l_2^* یا نرم پریشیدگی فشار سطح اثر چندانی از مشکل آغازگری نیست و هر دو نسخه مدل NH اختلاف نرم مشابهی با یکدیگر نسبت به مرجع دارند (شکل ۵-ب).

از مقایسه شکل ۵ با شکل متناظر برای مدل H (شکل ۵ در مقاله لقائی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰)، می‌توان گفت که بر اساس نرم l_2 ، مدل NH سیگما-تتا نسبت به مدل H سیگما-تتا تا اندازه‌ای دارای اختلاف فشار سطح بیشتری نسبت به مدل مرجع است؛ حتی مدل NH سیگما-پی هم تا حدود هفته اول همین وضعیت را دارد، یعنی تفاوت بیشتری میان این مدل با مدل مرجع در میدان فشار سطح نسبت به مدل H سیگما-پی مشاهده می‌شود. در مورد نرم پریشیدگی نیز، به‌ویژه در ۲۰ روز ابتدایی، این حالت وجود دارد و کمترین اختلاف در میان چهار حالت موجود مربوط به مدل H سیگما-پی است.

در ادامه تحلیل کمی آزمون موج کژفشار برای مدل NH، به موارد انرژی و تکانه زاویه‌ای می‌پردازیم. رابطه صورت آب‌ایستایی انرژی کل برابر است با

$$E = \int_A \frac{1}{g} \left[\int_{\xi_{top}}^{\xi_s} \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{2} + c_p T \right) \frac{\partial p}{\partial \xi} d\xi + \Phi_s p_s \right] dA \quad (21)$$

همچنین، مقدار تکانه زاویه‌ای کل، با صرف‌نظر از سهم مستقل از شارش، به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$J = \int_A \int_{\xi_{top}}^{\xi_s} \left(u \frac{\partial p}{\partial \xi} + \Omega \cos \phi \frac{\partial p'}{\partial \xi} \right) A \cos \phi d\xi dA \quad (22)$$

که منظور از Ω سرعت زاویه‌ای زمین است. برای E درصد تغییرات نسبی با رابطه $E(t) = ((E(t) - E(0)) / E(0)) \times 100$ و رابطه متناظری هم برای تکانه زاویه‌ای تعریف می‌شود.

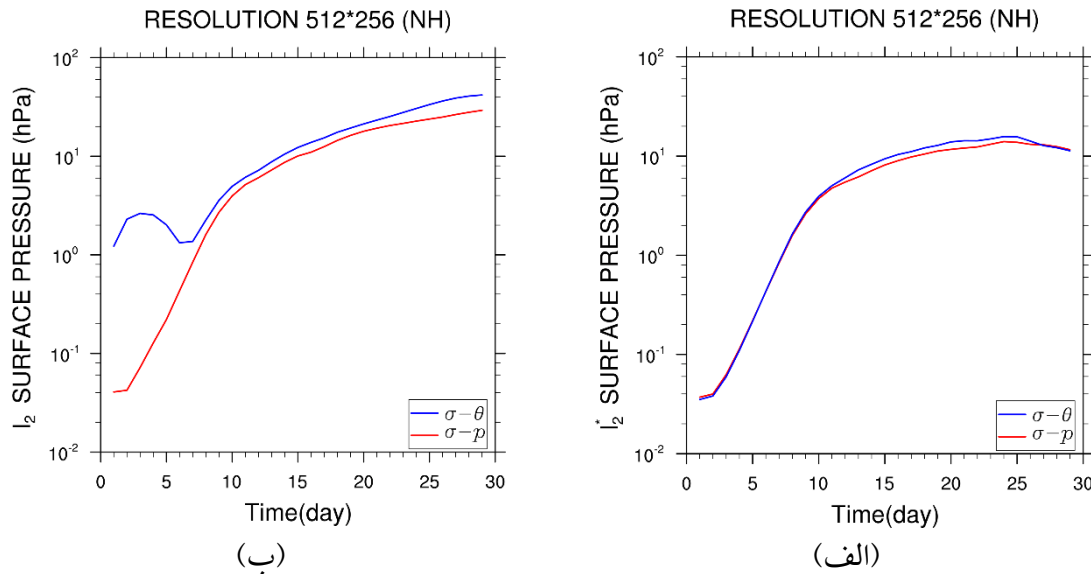
$$\begin{aligned} &\text{با تعریف نرم } l_2 \text{ به‌صورت زیر می‌توان به محاسبه اختلاف} \\ &\text{مقادیر میدان‌های گوناگون همچون میدان فشار سطح دو} \\ &\text{مدل با جمع کردن روی کلیه نقاط شبکه } (\lambda_i, \phi_i) \text{ پرداخت:} \\ &l_2^2(p_s(t)) = \|p_{s_1}(t) - p_{s_2}(t)\|_2^2 = \langle p_{s_1}(t), p_{s_2}(t) \rangle^2 = \\ &\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{p_{s_1}(\lambda, \phi, t) - p_{s_2}(\lambda, \phi, t)\}^2 \cos \phi d\phi d\lambda \approx \\ &\frac{\sum_i \sum_j (p_{s_1}(\lambda_i, \phi_i, t) - p_{s_2}(\lambda_i, \phi_i, t))^2 \cos \phi_{i,j}}{\sum_i \sum_j \cos \phi_{i,j}} \end{aligned} \quad (19)$$

از رابطه فوق در تعیین اختلاف فشار سطح مدل NH با نتایج مدل مرجع به کار رفته استفاده می‌شود. با توجه به رابطه (۱۹) به‌عنوان اولین مقایسه کمی، برای میدان فشار سطح با تعریف این اختلاف با نرم l_2 زیر، خواهیم داشت:

$$\|p_s - p_{s,ref}\|_2 = \left[\frac{\sum_i \sum_j (p_s - p_{s,ref})^2 \cos \phi_{i,j}}{\sum_i \sum_j \cos \phi_{i,j}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

مشابه رابطه فوق و با در نظر گرفتن p_s^* به‌عنوان پریشیدگی فشار سطح p_s از میانگین مداری، اگر نرم l_2 مربوطه یعنی $\|p_s^* - p_{s,ref}^*\|_2$ را l_2^* بنامیم، نیز به‌منظور مقایسه‌ای کمی محاسبه شده است. مدل مرجع به کار رفته در این آزمون برگرفته از مدل اوپلری CAM3 T170 (Community Atmospheric Model) است.

شکل ۵ نتایج حاصل از محاسبه دو نرم فوق طی ۳۰ روز آزمون موج کژفشار JW06 را برای فشار سطح و پریشیدگی فشار سطح نشان می‌دهد. پس از بررسی مقایسه کمی به‌دست آمده دو مختصه قائم متفاوت مشاهده می‌شود که مدل NH نیز همچون حالت H مدل با مختصه قائم سیگما-پی، به‌ویژه در شش روز اول اجرای آزمون، تفاوت نرم کمتری در میدان فشار سطح نسبت به مدل مرجع جهانی به کار رفته دارد (شکل ۵-الف). این اختلاف فشار سطح



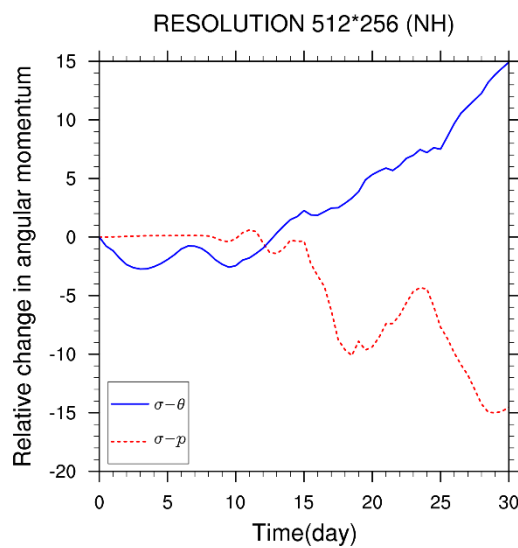
شکل ۵. مقایسه کمی تغییرات زمانی میزان اختلاف (الف) فشار سطح و (ب) پریشیدگی فشار سطح با مدل مرجع (نرم I_2 با یکای hPa) در دو حالت سیگما-تا (خط آبی) و سیگما-پی (خط قرمز) مدل NH.

با مقایسه تکانه زاویه‌ای مدل‌های NH و H، مجدداً با استفاده از مقاله لقائی‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) می‌توان گفت، برخلاف مدل H سیگما-تا که دارای روند تغییرات کمی در تکانه زاویه‌ای است و طی آزمون افت تا ۵ درصدی از خود نشان داده که تا پایان تقریباً جبران شده است (شکل ۶-ب)، در مدل NH سیگما-تا حدوداً پس از هفته دوم افزایش نسبی تغییرات تکانه زاویه‌ای تا ۱۵ درصد دیده می‌شود. در مورد مقایسه دو مدل NH و H سیگما-پی می‌توان به وضعیت مشابه دو مدل تا حدود هفته دوم با حدود ۵ درصد افت تکانه زاویه‌ای کل اشاره کرد. تفاوت در تغییرات تکانه زاویه‌ای کل پس از آن زمان رخ می‌دهد که مدل H دارای افت باروند یکنواخت است، در حالی که در مدل NH دوره‌ای از افزایش تکانه زاویه‌ای کل هم در اثنای روند کلی افت دیده می‌شود.

تغییرات بیشینه و کمینه فشار سطح که به ترتیب معرف مراکز سامانه‌های کم‌فشار و پرفشار حاصل از آزمون آرمانی هستند در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود. همانند مدل‌های H (شکل ۷ لقائی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰)، در مدل‌های NH نیز با مختصه سیگما-تا دارای کمینه کمتر و با مختصه سیگما-پی دارای بیشینه به نسبت بزرگ‌تری است. در ضمن، مقادیر کمینه فشار سطح در مدل NH سیگما-تا نسبت به H سیگما-تا نسبتاً کمتر است

همان‌طور که در شکل ۶-الف مربوط به سری زمانی انرژی کل روی کره مشاهده می‌شود، درصد تغییرات انرژی نسبت به حالت اولیه پس از حدود روز پنجم در مدل NH سیگما-تا بیشتر است. تا روز پانزدهم این کاهش در حدود یک درصد، به نسبت مدل NH سیگما-پی که تقریباً افت انرژی ندارد، کاملاً مشهود است و از این منظر می‌توان مدل سیگما-پی را در حالت خشک، در وضعیت مناسب‌تری دید. این روند در ادامه و پس از روز پانزدهم محسوس‌تر می‌شود، تا آنجا که کاهش نسبی انرژی در پایان آزمون خشک برای نسخه سیگما-تا به حدود ۰/۰۴ درصد هم می‌رسد، حال آنکه مدل سیگما-پی انرژی کمتری از دست می‌دهد. البته این مقادیر تغییرات انرژی برای حالت مرطوب مدل‌ها که تبدیلات انرژی مربوط به گرمای نهان نیز قابل توجه است باید مورد آزمون و بررسی قرار گیرند. مقایسه بین مدل‌های NH و H طی این آزمون از لحاظ تغییرات انرژی و تکانه زاویه‌ای با استفاده از شکل ۶ مقاله لقائی‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) امکان‌پذیر است. به‌طور کلی برای مختصه قائم سیگما-پی، در مقابل رفتار مناسب‌تر مدل NH و حالت نسبتاً یکنواخت مدل H با شبکه‌بندی لورنتس در پایستاری انرژی، پس از هفته دوم با افزایش انرژی در مدل H سیگما-پی و افت شدید انرژی در مدل NH سیگما-تا مواجه هستیم.

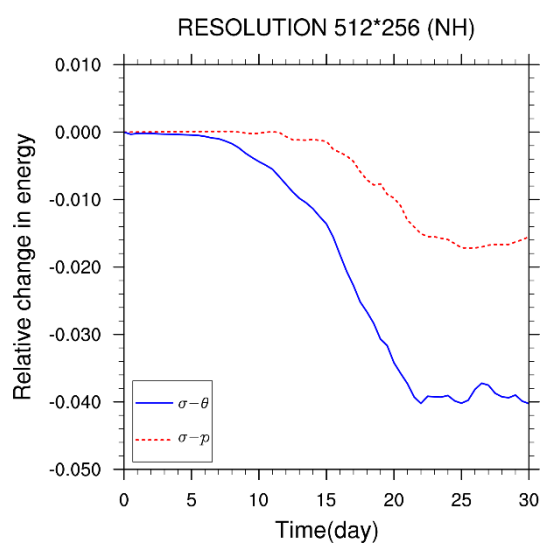
مختصه سیگما-تتا نشان‌دهنده آن است که چرخندهای قوی‌تری در مقایسه با مختصه سیگما-پی شبیه‌سازی می‌شوند، زیرا در ۱۵ روز نخست آزمون به‌وضوح مقادیر کمینه فشار سطح و بیشینه تاوایی نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به‌ترتیب مقادیر کمتر و بیشتری از مدل NH سیگما-پی دارند (شکل‌های ۷-الف و ۷-ب). این مسئله با نمایش میدان فشار سطح طی روز نهم در شکل‌های ۱ و ۲ نیز سازگار است.



(ب)

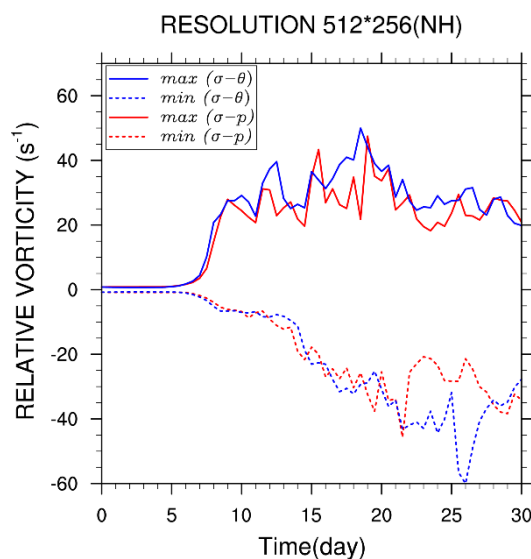
به‌طوری‌که در روزهای پایانی آزمون، در مدل NH سیگما-تتا مقادیر فشار سطح تا حدود ۸۲۵ هکتوپاسکال نیز می‌رسد (شکل ۷-الف).

در ادامه تحلیل کمی تکانه زاویه‌ای پس از آزمون آرمانی موج کثرفشار، مشاهده می‌شود که از حدود روز دوازدهم، رشد تغییرات نسبی تکانه زاویه‌ای مدل NH با مختصه قائم سیگما-تتا در مقایسه با سیگما-پی بیشتر است (شکل ۶-ب). همچنین خروجی مدل NH با

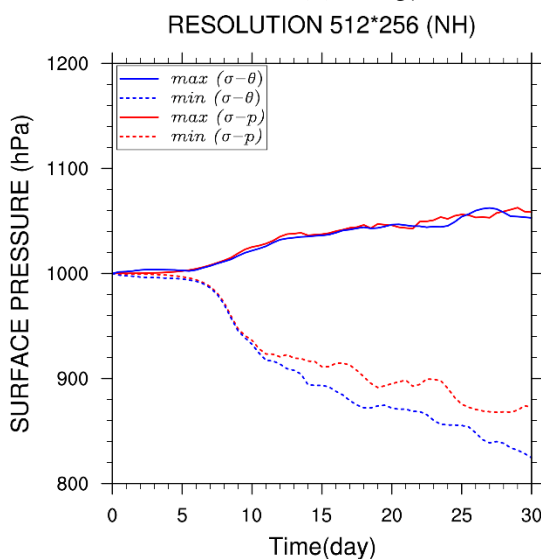


(الف)

شکل ۶. تغییرات زمانی درصد تغییرات نسبی مربوط به (الف) انرژی و (ب) تکانه زاویه‌ای برای مدل NH با مختصه‌های قائم سیگما-تتا (خط آبی) و سیگما-پی (خط قرمز).



(ب)



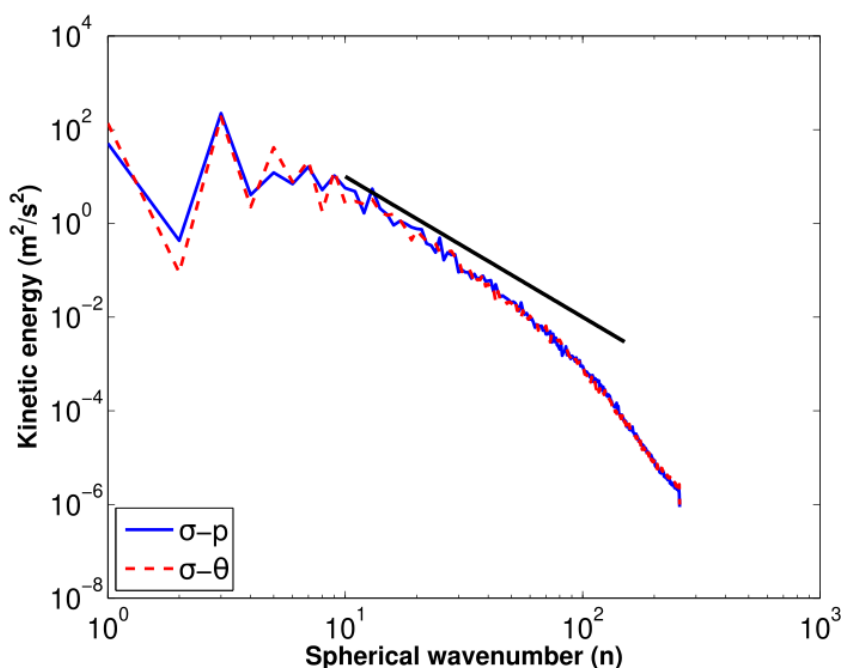
(الف)

شکل ۷. تغییرات زمانی مقادیر بیشینه (خط پُر) و کمینه (خط چین) بر روی کل کره برای (الف) فشار سطح زمین (با یکای hPa) و (ب) تاوایی نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (با یکای s^{-1}) حاصل از اجرای مدل NH با مختصه‌های قائم سیگما-تتا (آبی) و سیگما-پی (قرمز).

تلاطم دُبعدی یا همان حرکات در مقیاس همدیدی است و سپس انتقالی در میان مقیاس متناسب با $k^{-\frac{5}{3}}$ و شیب ملایم تر دارد. بنابراین در مدل NH متناظر با شکل ۸، در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال روز ۳۰ ام آزمون JW06، با توجه به اینکه در اینجا آزمون موج کُرفشار در بهترین حالت با تفکیک حدود ۰/۷ درجه اجرا شده است، نمی توان انتظار نتایج مربوط به تفکیک طیف $k^{-\frac{5}{3}}$ برای مقیاس های متناظر با تلاطم سه بُعدی را داشت. لذا لازم است مدل NH در تفکیک های بالاتر اجرا و مورد سنجش طیفی قرار گیرد تا بتوان تفکیک موثر مدل (مقیاسی که کمتر از آن، دیگر ویژگی های دینامیکی قابل شبیه سازی دقیق نبوده و پخش عددی غالب است) را به دست آورد، هرچند با آزمون های در مقیاس ناآب ایستایی نیز می توان به نتایجی دست یافت. با این وجود، طیف مقیاس همدیدی به وضوح بیانگر آن است که مدل NH قادر به نمایش طیف k^{-3} مربوط به مقیاس همدیدی (تلاطم دو بُعدی) است. اگرچه برای امواج با طول موج بلند، مدل NH سیگما-تتا نسبت به سیگما-پی تا اندازه ای دارای انرژی جنبشی کمتر است، اما با افزایش عدد موج تقریباً طیف مشابهی دیده می شود.

مقایسه میدان تاوایی نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مدل های NH و H، به وضوح حاکی از مقادیر بزرگ تر بیشینه تاوایی نسبی مدل H نسبت به مدل NH است. همچنین برخلاف مدل های H که طی هفته دوم اجرای آزمون مقادیر کمینه تاوایی پتانسیلی به نسبت یکنواختی در آن مشاهده می شود، در مدل های NH طی هفته مذکور این کمیت کاهشی است. به علاوه در هفته سوم، برخلاف مدل های H، تا اندازه زیادی مدل NH سیگما-تتا کمینه تاوایی پتانسیلی کوچک تری نسبت به مدل NH سیگما-پی دارد و همانند مدل های H طی این زمان، میدان تاوایی پتانسیلی دارای بیشینه بزرگ تری نسبت به مدل NH سیگما-پی است (شکل ۷-ب و شکل ۷، لقائی زاده و همکاران، ۲۰۲۰).

شکل ۸ طیف انرژی جنبشی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در روز ۳۰ ام آزمون JW06 را برای مدل NH با دو مختصه سیگما-تتا و سیگما-پی نشان می دهد. در مورد این نمودار طیف انرژی جنبشی، لازم به ذکر است که طیف به دست آمده از مشاهدات جو آزاد به عدد موج وابسته است و این بستگی متناسب با k^{-3} برای مقیاس های بزرگ، با مشخصه



شکل ۸. طیف انرژی جنبشی (با یکای m^2/s^2) در روز ۳۰ ام آزمون JW06 در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برای مدل NH با دو مختصه سیگما-تتا (خط قرمز) و سیگما-پی (خط آبی). خط ضخیم سیاه نشان دهنده شیب نظری k^{-3} مربوط به تلاطم دُبعدی است.

۳-۲. آزمون موج کوهستان

امواج گرانی ناآبایستایی که به وسیله کوهساری واداشت می‌شوند، پدیده‌های مهمی هستند که با مدل‌های آب‌ایستایی نمی‌توان شبیه‌سازی خوبی از آنها ارائه داد. در این قسمت، به منظور بررسی میزان توانمندی مدل ناآبایستایی موجود، به آزمون موج کوهستان بر فراز کوهی دوار از گونه Schär مطابق با آزمون ۱-۲ مرجع DCMIP2012 (اولریش و همکاران، ۲۰۱۲) خواهیم پرداخت. حالتی که در آن، جریان جوی با چینش ثابت باد بر روی سطح ناهموار کوه واقع بر کره‌ای بدون چرخش که شعاع آن با ضریب X کاهیده شده است، شارش می‌یابد. تقریب سیاره کوچک، این امکان را فراهم می‌سازد تا با هزینه محاسباتی بسیار کمتری بتوان به تفکیک‌های لازم برای مقیاس‌های دربردارنده اثر ناآبایستایی دست یافت. در اینجا مقدار ضریب کاهش، برخلاف مرجع فوق، برابر $X=166.7$ اختیار شده است. از این‌رو، به دلیل کمتر شدن اثر خمیدگی و همین‌طور اثر برهم‌نهی امواج طی ۲ ساعت انتگرال‌گیری، با چرخیدن موج به دور زمین در مقایسه با پیشنهاد $X=500$ در آزمون استاندارد DCMIP، کره کاهیده بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است. مقادیر اولیه دمای جو هم‌دما T_{eq} و باد u_{eq} به عنوان حالت اولیه و در استوا به ترتیب برابر ۳۰۰ کلوین و ۲۰ متر بر ثانیه فرض شده‌اند. آزمون موج کوهستان همچون آزمون موج کژفشار با دو تفکیک افقی 128×256 (تفکیک پایین) و 256×512 (تفکیک بالا) و با ۶۰ تراز در راستای قائم از سطح زمین تا ارتفاع ۳۰ کیلومتر انجام شده است. به این ترتیب برای تفکیک بالا، فاصله شبکه‌ای در راستاهای افقی (بر روی صفحه استوایی) و قائم به ترتیب حدود ۴۷۰ و ۵۰۰ متر و گام زمانی مورد استفاده نیز ۰/۲۵ ثانیه است. سایر روابط لازم برای ساخت حالت اولیه، از جمله روابط باد مداری و میدان فشار اولیه متوازن که از روابط معادله آب‌ایستایی و باد گردان به دست می‌آیند، در مرجع اصلی آمده است:

$$p(\lambda, \varphi, z) = p_{eq} \exp\left(-\frac{u_{eq}^2}{2R_d T_{eq}} \sin^2 \varphi - \frac{gz}{R_d T(\varphi)}\right) \quad (23)$$

که در آن $p_{eq}=1000\text{Pa}$ فشار سطح زمین مرجع در استوا، $T_{eq}=300\text{K}$ دمای مرجع در استوا و $u_{eq}=20\text{ms}^{-1}$ سرعت باد مداری مرجع است. میدان دما با رابطه زیر به دست می‌آید (با توجه به C ثابت، دما فقط به عرض جغرافیایی وابسته است):

$$T(\varphi) = T_{eq} \left(1 - \frac{cu_{eq}^2}{g} \sin^2 \varphi\right) \quad (24)$$

برای آزمون موج کوهستان، از کوهساری به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$r = \frac{a_{ref}}{X} \arccos[\sin \varphi_c \sin \varphi + \cos \varphi_c \cos \varphi \cos(\lambda - \lambda_c)] \quad (25)$$

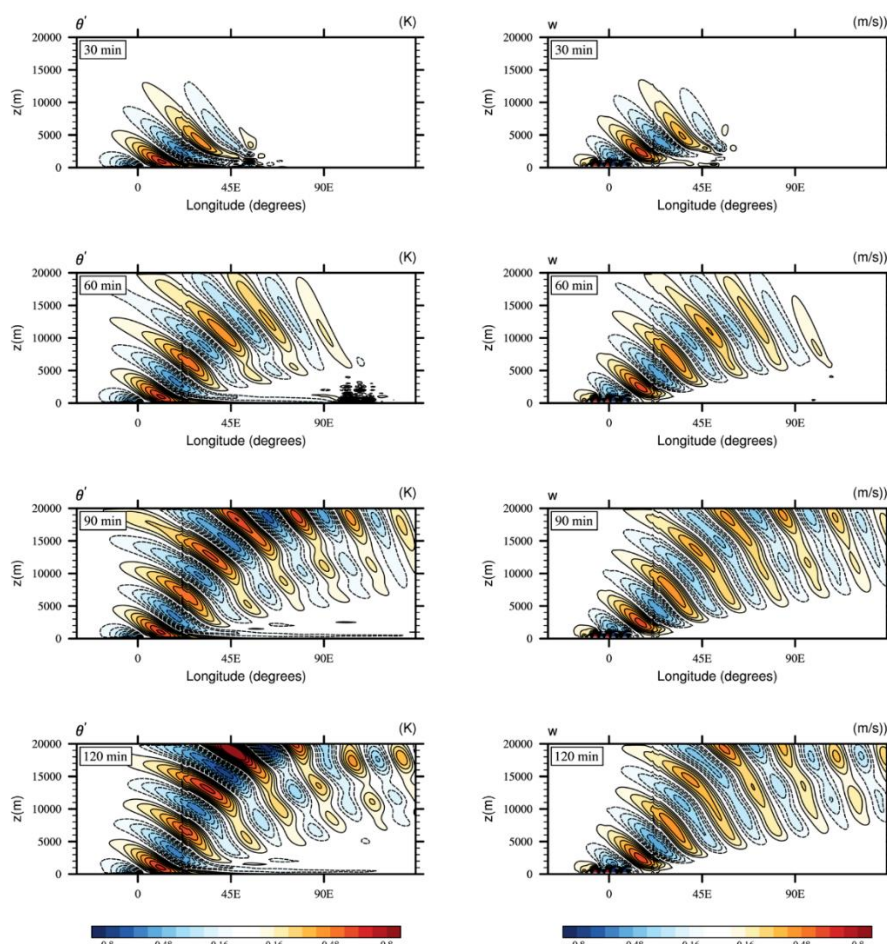
$$z_s(\lambda, \varphi) = h_0 \exp\left(-\frac{r(\lambda, \varphi)^2}{d^2}\right) \cos^2\left(\frac{\pi r(\lambda, \varphi)}{\varepsilon}\right) \quad (26)$$

که در آن z_s ارتفاع سطح، $h_0=250\text{m}$ بیشینه ارتفاع کوهستان، $d=5000\text{m}$ نیم‌پهنای کوهستان، $\varepsilon=4000\text{m}$ طول موج کوهستان، r فاصله دایره عظیمه از نقطه مرکز کوهستان (برحسب رادیان) و φ_c و λ_c به ترتیب عرض و طول جغرافیایی مرکز کوهستان هستند ($a_{ref}=6.37122 \times 10^6\text{m}$).

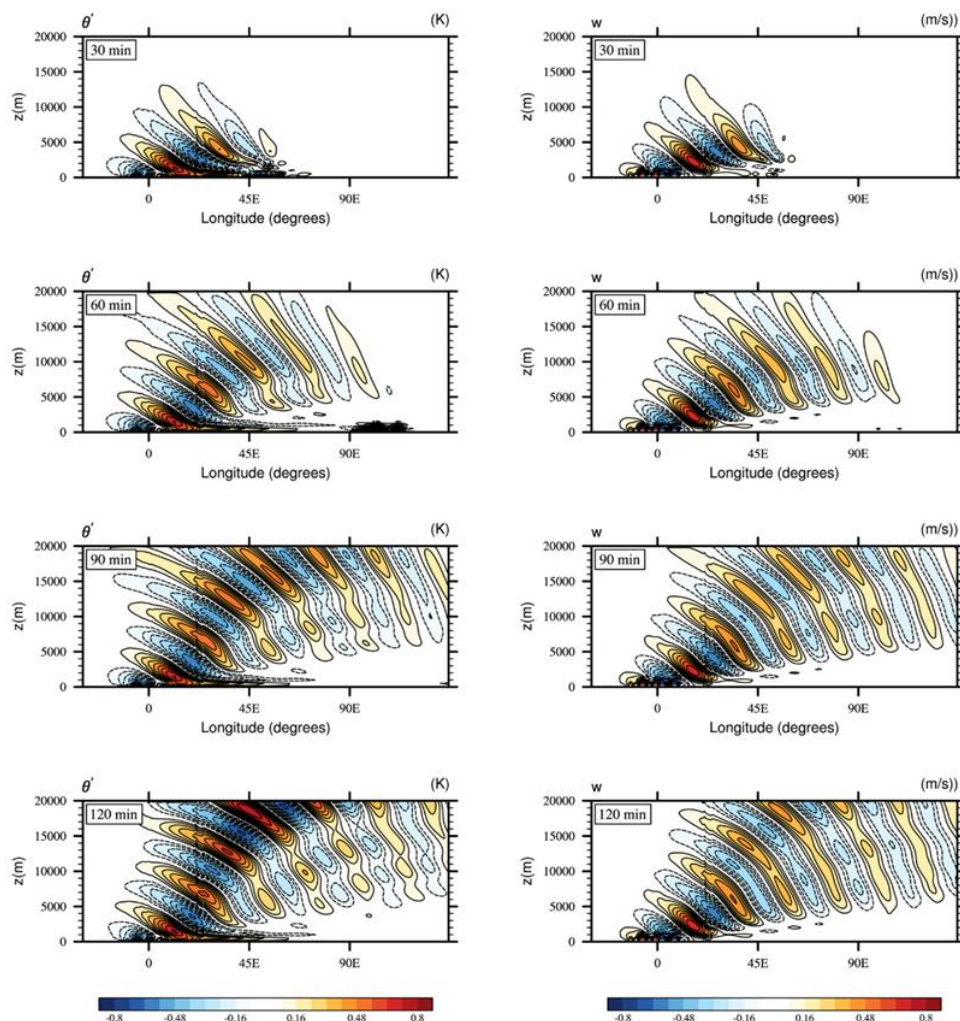
در آزمون استاندارد به منظور جذب امواج گرانی انتشار یابنده بالاسو و جلوگیری از بازتاب آنها در بام مدل از اصطکاک رایی برای هر سه مولفه سرعت استفاده می‌شود (بالای ۲۰ کیلومتر). برای آزمون موج کوهستان، پس از آماده‌سازی شرایط اولیه، مدل NH تا $t=7200$ ثانیه اجرا شده و میدان‌های سرعت سه‌بعدی، دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی و فشار سطح در بازه‌های زمانی ۱۰۰ s محاسبه و بررسی شدند. مقایسه عملکرد تعیین سرعت قائم و نمایش نیم‌رخ قائم آن و همین‌طور نقشه‌های افقی حاصل از مدل‌های ناآبایستایی در ارتفاع مثلاً ۸۰۰۰ متر از مهم‌ترین بررسی‌های مطرح در این آزمون است. در ادامه به بررسی نتایج و

گفت که با وجود تشابه نسبی الگوهای به وجود آمده حول استوا پس از برخورد جریان با کوه و نمایش رفتار کاملاً ناآب‌ایستایی، مدل NH سیگما-پی با گذشت زمان سرعت انتشار قائم به نسبت بیشتری دارد. به نظر می‌رسد از این جنبه، با وجود تشابه بسیار زیاد، نتایج مدل NH سیگما-تتا مشابهت بیشتری با نتایج مراجع جهانی و همچنین جواب‌های ارائه شده در مقاله کلمپ و همکاران (۲۰۱۵) دارد. با بررسی عملکرد مدل در ساختار افقی و در راستای کوهساری در ارتفاع ۸۰۰۰ متری، برای میدان پریشیدگی دمای پتانسیلی و میدان سرعت قائم به وضوح مشاهده می‌شود که مدل NH سیگما-تتا در نمایش افقی امواج گرانی در این ارتفاع برای هر دو میدان بهتر عمل کرده و جزئیات بیشتری از امواج را تحت شرایط یکسان، نسبت به مدل NH سیگما-پی، نشان می‌دهد. (برای اختصار شکل‌ها آورده نشده است).

مقایسه آنها با نتایج مرجع خواهیم پرداخت. در اینجا نتایج میدان سرعت قائم تا ۷۲۰۰ ثانیه پس از اجرا و برای تفکیک افقی 256×512 با ۶۰ تراز در راستای قائم آمده است. نتایج شامل ساختار قائم این میدان در استوا و همین‌طور نمایش افقی در ارتفاع ۸ کیلومتر از سطح زمین است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج پریشیدگی میدان سرعت قائم و دمای پتانسیلی به ترتیب در راستای قائم، برای مدل NH با مختصه قائم سیگما-پی و سیگما-تتا و با فواصل زمانی نیم‌ساعته مشاهده می‌شود که قابل مقایسه با نتایج مدل‌های مرجع جهانی هستند. پس از ۲ ساعت اجرا، مدل، شکل‌گیری ۱۰ موج واقع در پایین دست کوه را شبیه‌سازی کرده است و انتشار موج به پایین دست و بالادست نیز نمایش درستی دارد. با مقایسه نتایج مدل NH با دو مختصه سیگما-پی و سیگما-تتا تحت شرایط یکسان، از جمله محل قرارگیری لایه اسفنجی در ارتفاع ۲۰ کیلومتر، می‌توان



شکل ۹. ساختار قائم پریشیدگی سرعت قائم (سمت راست؛ با یکای m/s) و دمای پتانسیلی (سمت چپ؛ با یکای K) در نیم‌رخ مداری-قائم در امتداد استوا حاصل از اجرای آزمون موج کوهستان با مدل NH سیگما-پی از بالا به پایین به ترتیب پس از ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه.



شکل ۱۰. مانند شکل ۹ ولی برای مدل NH سیگما-تتا.

۳-۳. آزمون با داده‌های واقعی

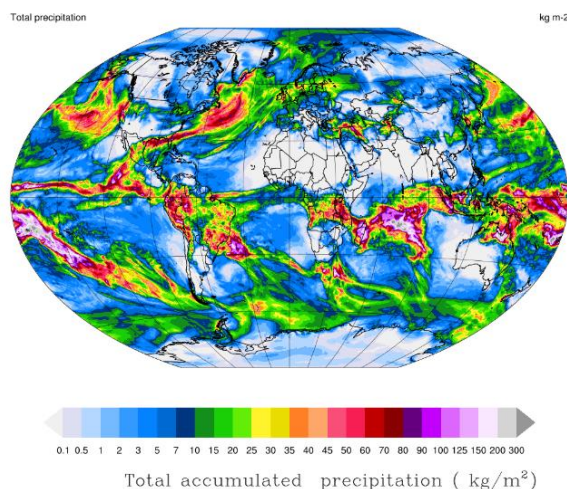
در ادامه ارزیابی عملکرد هسته دینامیکی ناآب‌ایستایی، با توجه به امکانات موجود، به بررسی مدل با کاربری یک مجموعه از پارامترسازی‌های فیزیکی پرداخته شده است. در بخش فیزیک از طرحواره‌های RRTMG (آیاکونو، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴؛ کاویانی و همکاران، ۲۰۲۰) برای تابش طول-موج‌های بلند و کوتاه، TNT یا تیتکه-نُردنگ-تیتکه (تیتکه، ۱۹۸۹؛ نُردنگ، ۱۹۹۴) برای همرفت، مجموعه کارهای لَهْمَن و روئگنر (۱۹۹۶)، ساندکویست و همکاران (۱۹۸۹) و تامکنز (۲۰۰۲) برای خُردفیزیک ابر، TKE برای لایه مرزی (برینکاپ و روئگنر، ۱۹۹۵) و مجموعه پودمان‌های موجود در مدل ECHAM6 (استیونس و همکاران، ۲۰۱۳) برای فرایندهای سطحی استفاده شده

است. در مورد فرایندهای سطح زمین، کمیت‌های گوناگونی لازم است تعیین و به کار گرفته شوند. از این میان، تا کنون نوع کاربری زمین (land cover type) و سپیدایی (albedo) با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های ماهواره مودیس (modis)، دمای سطح زمین (شامل خشکی‌ها، دریاها و پوشش یخ دریا) و داده‌های GFS با تدوین و پیاده‌سازی الگوریتم‌های خاص به شبکه افقی مدل تبدیل و به کار رفته‌اند. کمیت‌های دیگر، چون نوع خاک، پس از یافتن مجموعه داده‌های مناسب برای آن در آینده استفاده خواهند شد. کوهساری از داده‌های ETOPO1 (www.ngdc.noaa.gov/mgg/global) با تفکیک مکانی یک دقیقه استخراج و به شبکه مدل تبدیل شده، سپس برای کاهش نوفه کوهستان با استفاده از وارون عملگر لاپلاسی

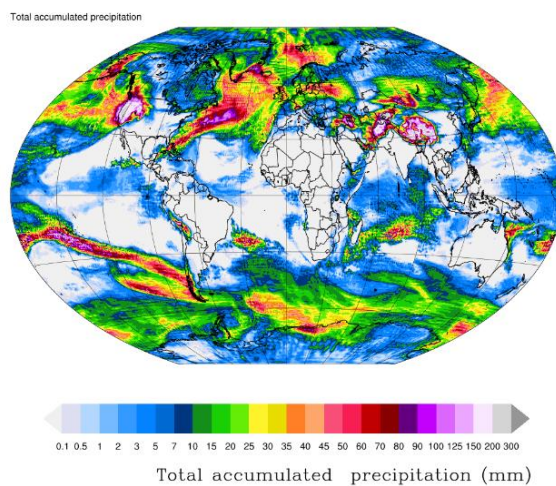
مدل‌های مرجع، مشاهده می‌شود که برای میدان بارش، اختلاف‌ها بیشتر به‌صورت فروبرآورد بارش در نواحی سرزمینی منطقه حاره، همچون جنگل‌های نواحی آمازون و جنوب آفریقا، و نیز در ناحیه گلف‌استریم وجود دارد. از طرف دیگر، فرابرآورد بزرگ بارش در مناطق مرتفع هیمالیا و اطراف آن به‌چشم می‌خورد که احتمالاً ریشه در نادرستی دمای سطح زمین آغازگری‌شده با داده‌های GFS به دلیل تفاوت در کوهساری آن با کوهساری مدل توسعه‌یافته دارد. به‌هر حال، این موارد اختلاف نیازمند بررسی بیشتر در آینده است. در شکل ۱۲ مقایسه بارش تجمعی ۲۴ ساعته روز چهارم اجرای مدل با نسخه‌های گوناگون آب‌ایستایی و ناآب‌ایستایی با دو مدل مرجع ارائه شده است. بر اساس هر دو شکل ۱۱ و ۱۲ می‌توان گفت که با وجود موارد فروبرآورد و فرابرآورد اشاره‌شده در مقایسه با مدل‌های مرجع، مدل‌های آب‌ایستایی و NH سیگما-پی در نواحی اقیانوسی منطقه حاره، به‌ویژه جنوب-شرق و جنوب آسیا و اطلس جنوبی، شبیه‌سازی بهتری نسبت به سیگما-تتا داشته‌اند. وضعیت شبیه‌سازی در بخش حاره‌ای اقیانوس آرام برعکس است و مدل‌های با مختصه سیگما-تتا نسبت به مناظرشان با مختصه سیگما-پی شرایط مناسب‌تری دارند. علاوه بر موارد ذکر شده، به‌نظر می‌رسد در کل مدل‌های با مختصه قائم سیگما-پی موفقیت بیشتری در مورد پیش‌بینی بارش منطقه و کشور ایران داشته‌اند.

موجود در مدل هموار شده است. با تفکیک افقی ۰/۷ درجه و درنظر گرفتن ۲۶ تراز در راستای قائم، پیش‌بینی ۵ روزه‌ای برای بارش از روز ۱۴ فوریه ۲۰۲۴ و با آغازگری پیش‌بینی با استفاده از مدل GFS (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>) در این روز انجام گرفته است. با توجه به فعالیت سامانه‌های بارشی در این ایام از سال در داخل کشور، دوره انتخاب‌شده مورد جالبی برای مقایسه است. شایان توجه است که این اجرا در مقیاس همدیدی انجام شده و برای پیش‌بینی میان‌مقیاس، به سخت‌افزارهای پیشرفته‌تر نیاز است.

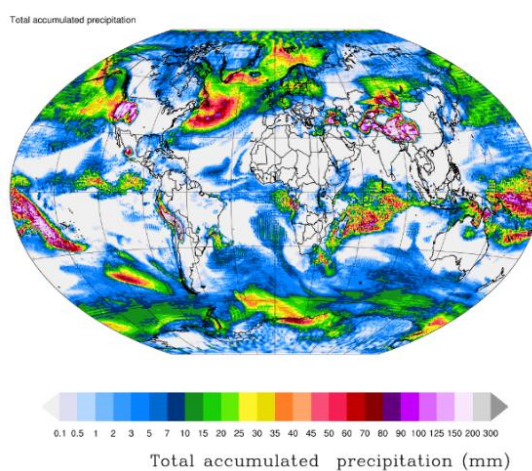
نتایج مدل‌های مرجع شامل پیش‌بینی مدل GFS ذخیره‌شده با تفکیک افقی ۰/۵ درجه و داده‌های بازتحلیل ERA5 (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰) مربوط به ECMWF با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه می‌باشند. مقایسه میدان بارش تجمعی پنج‌روزه مدل NH در دو مختصه قائم با مدل مرجع GFS در شکل ۱۱ ارائه شده است. مطابق شکل، الگوهای بارش و همچنین مراکز و شدت سامانه‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل NH همانند مدل‌های مرجع هستند و این امر در یک دید کلی نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل NH (و همین‌طور مدل آب‌ایستایی H) توسعه‌یافته در نمایش تحول زمانی امواج در آزمونی تجربی است. با درنظر گرفتن تفاوت در تفکیک‌های به‌کار رفته در اجرای مدل NH و



(الف)

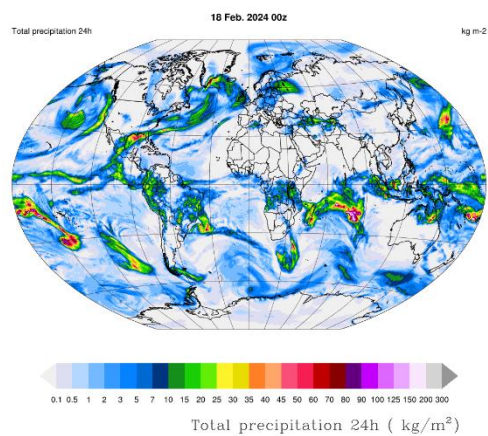


(ب)

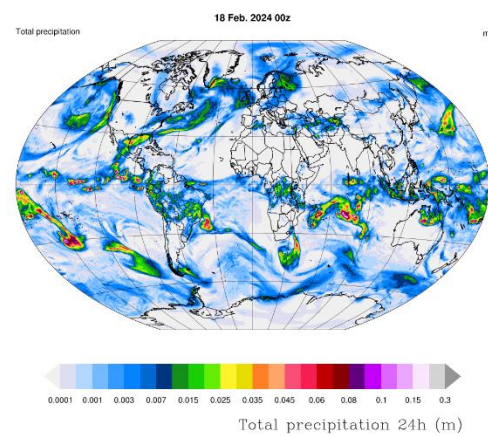


(ج)

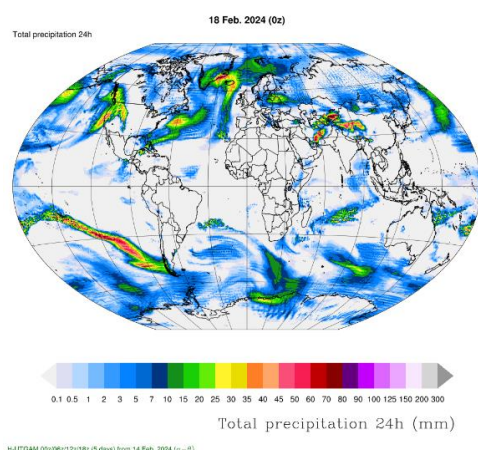
شکل ۱۱. میدان بارش تجمعی پنج‌روزه (با یکای kg/m^2 یا mm) برای (الف) مدل GFS، (ب) مدل NH سیگما-تا و (ج) مدل NH سیگما-پی.



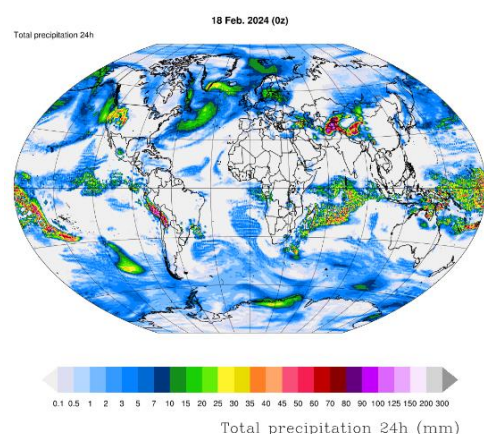
(ب)



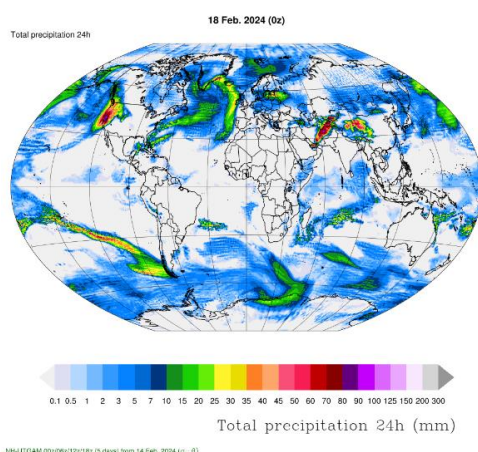
(الف)



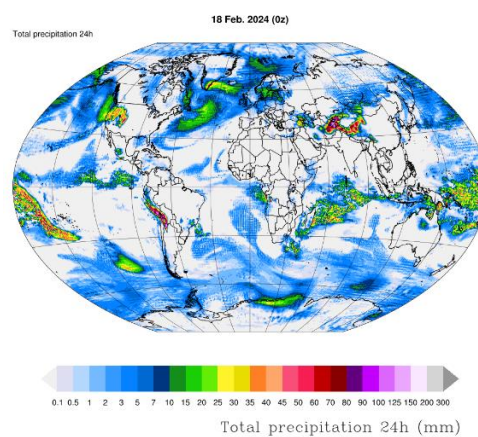
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۱۲. میدان بارش تجمعی ۲۴ ساعته (با یکای kg/m^2 یا mm یا m) در روز چهارم پیش‌بینی مربوط به (الف) داده‌های بازتحلیل ERA5، (ب) مدل GFS، (ج) مدل آب‌ایستایی سیگما-پی، (د) مدل آب‌ایستایی سیگما-تتا، (ه) مدل NH سیگما-پی و (و) مدل NH سیگما-تتا.

۴. نتیجه‌گیری

پس از ارائه و معرفی فرمول‌بندی جدید مدل جوی ناآب-ایستایی NH-UTGAM، با انجام دو آزمون استاندارد مدل‌های جوی، به بررسی عملکرد مدل جدید در دو مقیاس همدیدی و میان‌مقیاس پرداخته شد.

نتایج حاصل حاکی از حل صحیح مدل برای شبیه‌سازی امواج در هر دو مقیاس است. به علاوه، در بیشتر آزمون‌های آرمانی، مدل NH با مختصه قائم سیگما-تتا نسبت به مختصه سیگما-پی دارای نتایج کیفی و کمی بهتری است. با این وجود، در ادامه و در مقیاس همدیدی نیز نمونه‌ای از

مدل‌های جوی با دقت بالا، نیاز به توسعه برای فرامقیاس بودن و یکپارچگی دارند و این موضوع بدون به‌کارگیری دینامیک ناآب‌ایستایی امری محال به نظر می‌آید، اگرچه استفاده از رایانه‌های با قابلیت محاسباتی در مقیاس پتا (پتافلاپس) نیز از ملزومات ادامه کار تحقیقاتی در سطح مطالعات دینامیک ناآب‌ایستایی مدل‌ها است. مطالعه حاضر بر اساس امکانات موجود برای اجرای مدل جدید ناآب-ایستایی با نسخه‌های مختلف انجام شده است. در این مقاله،

امیدواریم پس از این مرحله از پژوهش، برای بررسی بیشتر عملکرد مدل بتوان با انجام آزمون‌های مرطوب در هر دو مقیاس، همچون آزمون‌های ابر، آبریاخته، توفان حاره‌ای، و همچنین آزمون‌های نهایی با فیزیک کامل همچون آزمون آرمانی سیاره آبی به منظور بررسی برهمکنش پارامترسازی‌های فیزیکی با یکدیگر و نیز با هسته دینامیکی، به تکمیل پژوهش حاضر مبادرت کرد.

مراجع

- Brinkop, S., & Roeckner, E. (1995). Sensitivity of a general circulation model to parameterizations of cloud-turbulence interactions in the atmospheric boundary layer. *Tellus A*, 47(2), 197–220.
- Chen, C., Li, X., Xiao, F., & Shen, X. (2023). A nonhydrostatic atmospheric dynamical core on cubed sphere using multi-moment finite-volume method. *Journal of Computational Physics*, 473, 111717.
- Dritschel, D. G., & Ambaum, M. H. P. (1997). A contour-advective semi-Lagrangian numerical algorithm for simulating fine-scale conservative dynamical fields. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123, 1097–1130.
- Dritschel, D. G., & Ambaum, M. H. P. (2006). The diabatic contour advective semi-Lagrangian model. *Monthly Weather Review*, 134, 2503–2514.
- Dritschel, D. G., Polvan, L. M., & Mohebalhojeh, A. R. (1999). The contour-advective semi-Lagrangian algorithm for the shallow-water equations. *Monthly Weather Review*, 127, 1551–1565.
- Durran, D. R. (2010). *Numerical Methods for Fluid Dynamics: With Applications to Geophysics*. New York, NY: Springer New York.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgre, P., Dee, D. P., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R. M., Fuentes, M., Geer, M., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R., Holm, E., Janiskova, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Roznum, I., Vamborg, F., Sebastien, V., & Thépaut, J., (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Clough, S. A., Morcrette, J. J., & Hou, Y. T. (2004). Development and evaluation of RRTMG_SW, a shortwave radiative transfer model for general circulation model applications. In *Proceedings of the 14th atmos. radiation measurement (ARM) science team meeting, Albuquerque, New Mexico, March* (p. 22–26).
- Iacono, M. J., Mlawer, E. J., Clough, S. A., & Morcrette, J. J. (2000). Impact of an improved longwave radiation model, RRTM, on the energy budget and thermodynamic properties of the NCAR community climate model, CCM3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D11), 14873–14890.
- Jablonowski, C., & Williamson, D. L. (2006). A baroclinic instability test case for atmospheric model dynamical cores. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132, 2943–2975.
- Kaviani, M., Ahmadi-Givi, F., Mohebalhojeh, A. R., & Yazgi, D. (2020). A quantitative assessment of the impact of increase in CO₂ concentration on baroclinic instability. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 682).
- Konor, C. S., & Arakawa, A. (1997). Design of an atmospheric model based on a generalized vertical coordinate. *Monthly Weather Review*, 125, 1649–1673.
- Kühnlein, C., Deconinck, W., Klein, R., Malardel, S., Piotrowski, Z. P., Smolarkiewicz, P. K., Szmelter, J., & Wedi, N. P. (2019). FVM 1.0: a nonhydrostatic finite-volume dynamical core for the IFS. *Geoscientific Model Development*, 12(2), 651–676.
- Klemp, J. B., Skamarock, W. C., & Park, S. H. (2015). Idealized global nonhydrostatic atmospheric test cases on a reduced-radius sphere. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(3), 1155–1177.
- Klemp, J. B., Skamarock, W. C., & Ha, S. (2018).

- Damping acoustic modes in compressible horizontally explicit vertically implicit (HEVI) and split-explicit time integration schemes. *Monthly Weather Review*, 146, 1911–1923.
- Laghaeizadeh, R., Joghataei, M., Yazgi, D., & Mohebalhojeh, A. R. (2020). The diabatic contour-advective semi-Lagrangian algorithms for the dynamical core of global models in terrain-following isentropic and pressure vertical coordinates. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(733), 3715–3728.
- Laprise, R. (1992). The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly weather review*, 120(1), 197–207.
- Lohmann, U., & Roeckner, E. (1996). Design and performance of a new cloud microphysics scheme developed for the ECHAM general circulation model. *Climate Dynamics*, 12, 557–572.
- Mirzaei, M., Mohebalhojeh, A. R., & Ahmadi-Givi, F. (2012). On imbalance generated by vortical flows in a two-layer spherical Boussinesq primitive equation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(9), 2819–2834.
- Mohebalhojeh, A. R., & Dritschel, D. G. (2004). Contour-advective semi-Lagrangian algorithms for many-layer primitive-equation models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(596), 347–364.
- Mohebalhojeh, A. R., & Dritschel, D. G. (2007). Assessing the numerical accuracy of complex spherical shallow-water flows. *Monthly Weather Review*, 135(11), 3876–3894.
- Mohebalhojeh, A. R., & Dritschel, D. G. (2009). The diabatic contour-advective semi-Lagrangian algorithms for the spherical shallow-water equations. *Monthly Weather Review*, 137, 2979–2994.
- Mohebalhojeh, A. R., Joghataei, M., & Dritschel, D. G. (2016). Toward a PV-based algorithm for the dynamical core of hydrostatic global models. *Monthly Weather Review*, 144, 2481–2502.
- Nakajima, K., & Matsuno, T. (1988). Numerical experiments concerning the origin of cloud clusters in the tropical atmosphere. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 66(2), 309–329.
- Nordeng, T. E. (1994). Extended versions of the convective parametrization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the tropics. *Research Department Technical Memorandum*, 206, 1–41.
- Satoh, M., Matsuno, T., Tomita, H., Miura, H., Nasuno, T., & Iga, S. I. (2008). Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3486–3514.
- Simmons, A. J. and Burridge, D. M. (1981) An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Monthly Weather Review*, 109, 748–766.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Duda, M. G., Fowler, L. D., Park, S. H., & Ringler, T. D. (2012). A multiscale nonhydrostatic atmospheric model using centroidal Voronoi tessellations and C-grid staggering. *Monthly Weather Review*, 140(9), 3090–3105.
- Skamarock, W. C., Ong, H., & Klemp, J. B. (2021). A fully compressible nonhydrostatic deep-atmosphere equations solver for MPAS. *Monthly Weather Review*, 149(2), 571–583.
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., Block, K., Brokopf, R., Fast, I., Kinne, S., Kornblueh, L., Lohmann, U., Pincus, R., Reichler, R., & Roeckner, E. (2013). Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5, 146–172.
- Stevens, B., Satoh, M., Auger, L., Biercamp, J., Bretherton, C. S., Chen, X., Duben, P., Judt, F., Khairoutdinov, M., Klocke, D., Kodama, C., Kornblueh, C., Lin, S., Neumann, P., Putman, W. M., Rober, N., Shibuya, R., Vanniere, B., Vidale, P. L., Wedi, N., & Zhou, L. (2019). DYAMOND: the Dynamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6(1), 1–17.
- Sundqvist, H., Berge, E., & Kristjánsson, J. E. (1989). Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model.
- Tiedtke, M. (1989). A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review*, 117(8), 1779–1800.
- Tompkins, A. M. (2002). A prognostic parameterization for the subgrid-scale variability of water vapor and clouds in large-scale models and its use to diagnose cloud cover. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(12), 1917–1942.
- Toy, M. D. (2013). A supercell storm simulation using a nonhydrostatic cloud-resolving model based on a hybrid isentropic-sigma vertical coordinate. *Monthly Weather Review*, 141, 1204–1215.
- Ullrich, P. A., Jablonowski, C., Kent, J., Lauritzen, P. H., Nair, R. D., & Taylor, M. A. (2012). Dynamical core model intercomparison project (DCMIP) test case document. *DCMIP Summer School*, 83 pp.
- Zhang, Y., Li, J., Yu, R., Zhang, S., Liu, Z., Huang,

J., & Zhou, Y., (2018). A layer-averaged nonhydrostatic dynamical framework on an unstructured mesh for global and regional atmospheric modeling: Model description,

baseline evaluation, and sensitivity exploration. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 11, 1685–1714.