

## ارزیابی مدل با قابلیت تفکیک توفان ICON برای فرایندهای سطح

میلاد بهروش<sup>۱</sup>، علیرضا محبالحجه<sup>۲</sup>، محمد میرزائی<sup>۴</sup>، فرهنگ احمدی گیوی<sup>۵</sup>  
<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، [milad.behraveh@ut.ac.ir](mailto:milad.behraveh@ut.ac.ir)  
<sup>۲</sup> موسسه ماکس پلانک برای هواشناسی، [milad.behravesh@mpimet.mpg.de](mailto:milad.behravesh@mpimet.mpg.de)  
<sup>۳</sup> استاد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، [amoheb@ut.ac.ir](mailto:amoheb@ut.ac.ir)  
<sup>۴</sup> دانشیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، [mirzaeim@ut.ac.ir](mailto:mirzaeim@ut.ac.ir)  
<sup>۵</sup> دانشیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، [ahmadig@ut.ac.ir](mailto:ahmadig@ut.ac.ir)

### چکیده

مدل‌های ناآبایستا اگرچه در سال‌های اخیر پیشرفت شگرفی داشته‌اند اما همچنان در شبیه‌سازی فرایندهای سطح با چالش‌هایی روبه‌رو هستند. در پژوهش حاضر از مدل با قابلیت تفکیک توفان ICON برای شبیه‌سازی شارهای سطحی و دمای سطح و مقایسه آن با مجموعه‌ای از داده‌های بازتحلیل در دو منطقه مشخص، استفاده شده است. همچنین حساسیت مدل به تنظیمات لازم برای محاسبه شارهای سطحی گرمان نهان و محسوس و اختلاف شایان توجه شار خالص تابش سطح با داده‌های بازتحلیل در مجموعه‌ای از خروجی‌های مدل با قابلیت تفکیک توفان در دو منطقه بررسی می‌شود. این‌طور به نظر می‌آید که مدل در دو گروه تنظیمات مختلف عملکرد مختلفی را در محاسبه شارهای سطحی گرمای نهان و محسوس در منطقه مشخص مرطوب و خشک داشته است. همچنین، اختلاف زیاد شار تابش خالص سطح در مقایسه با داده‌های بازتحلیل احتمالاً به عدم تعادل تابشی در بالای جو مربوط می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** مدل با قابلیت تفکیک توفان، مدل‌های ناآبایستا، شارهای سطحی، دمای سطح

## Assessment of the results of a storm resolving model for the surface processes

Milad Behraves<sup>1,2</sup>, Ali Reza Mohebalhojeh<sup>3</sup>, Mohammad Mirzaei<sup>4</sup>, Farhang Ahmadi Givi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. student of Meteorology, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

<sup>2</sup>Max-Planck Institute for Meteorology

<sup>3</sup>Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

<sup>4</sup>Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

<sup>5</sup>Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

### Abstract

Despite the significant progress made in the non-hydrostatic models in recent years, but there are still challenging issues for surface processes. The storm-resolving model of ICON has been utilized to simulate the surface fluxes and temperature as compared with a set of reanalysis data for a specific period. The current study aims to assess and highlight the model's sensitivity to the tunings required for the computation of the latent and sensible surface heat fluxes as well as the significant differences between the results of the model and the reanalysis data for the surface net radiative flux. The large difference in surface net radiative flux compared to the reanalysis data is probably related to the radiative imbalance at the top of the atmosphere.

**Keywords:** storm-resolving model, sensible heat flux, latent heat flux, surface net radiative flux

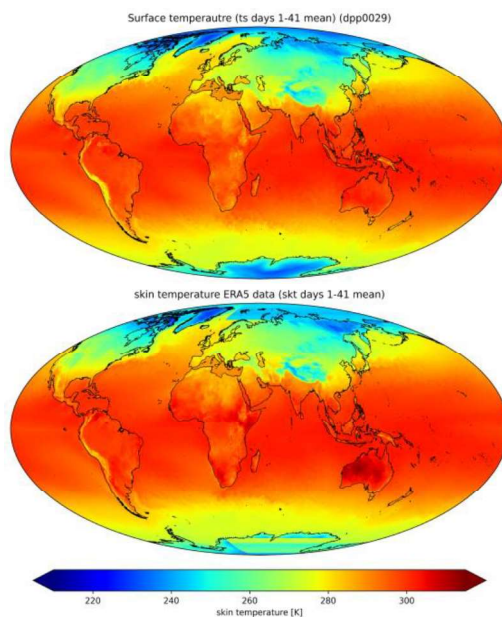
### ۱ مقدمه

ماتسونو در مطالعه مروری دینامیک گذرای همرفت عمیق در مناطق حاره، توسعه مدل‌های ناآبایستای جهانی را پیشنهاد کرد (ماتسونو، ۲۰۱۶؛ استیونس، ۲۰۱۹). برای انجام این کار نیاز است که فاصله شبکه‌ای مدل‌ها به میزان شایان توجهی تا مقیاس‌هایی در حدود ۵ کیلومتر کاهش یابد. تلاش‌های بسیار همراه با توسعه سخت‌افزارهای لازم منجر به پیدایش

مدل‌های نآب‌ایستایی شده که امکان چنین شبیه‌سازی‌هایی را در مقیاس گفته‌شده و حتی کمتر فراهم آورده‌اند. برای مثال، می‌توان به ICON (ICOsaedral Nonhydrostatic model) و تنظیمات ICON-Sapphire اشاره کرد که شبیه‌سازی‌هایی تا مقیاس ۵ کیلومتر را فراهم آورده است (هَیْنِگِر، ۲۰۲۲). پیش‌تر هَیْنِگِر و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که کمینه فاصله شبکه‌ای ۱۰ کیلومتر برای نمایش همرفت عمیق لازم است. با وجود تمام پیشرفت‌هایی که تاکنون انجام شده است، همچنان مدل‌های نآب‌ایستا با کاستی‌هایی روبه‌رو هستند و بررسی خروجی‌هایشان برای حل ایرادات احتمالی و توسعه آنها ضروری به نظر می‌رسد. در اینجا به اختصار چند مورد از خروجی‌های ICON بررسی شده و نتایج آن با داده‌های بازتحلیل ERA5 از مجموعه داده‌های مرکز اروپا برای پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا (ECMWF) در بازه زمانی مشخصی مقایسه شده است. از داده‌های بازتحلیل که ترکیبی از دیدبانی‌ها و داده‌های حاصل از اجرای کوتاه‌مدت مدل پیش‌بینی عددی در طی فرایند داده‌گذاری هستند، به عنوان نماینده‌ای از واقعیت استفاده می‌شود.

## ۲ روش تحقیق و نتایج

در اینجا خروجی‌های ICON-Sapphire در بازه ۲۰ ژانویه ۲۰۲۰ تا ۱ مارس ۲۰۲۰ (۴۱ شبانه‌روز) با خروجی‌های ERA5 در همین بازه زمانی مقایسه شده است. در این میان، دو آزمایش مختلف به نام‌های dpp0029 و dpp0052 برای بررسی انتخاب شده است. برای فرایندهای لایه مرزی از طرح‌واره پخش اسماغورینسکی (۱۹۶۳) استفاده شده است. گام زمانی جوی برای dpp0029 به مقدار ۳۰ ثانیه و برای dpp0052 به مقدار ۴۰ ثانیه تنظیم شده است. گام زمانی اقیانوسی هم برای این دو آزمایش به ترتیب ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه است. dpp0052 شامل به‌روزرسانی در مدل سطح و تغییرات جزئی دیگری با رفع برخی اشکالات مدل است. شکل ۱ مقایسه‌ای از دمای سطح را برای میانگین ۴۱ روزه در بازه زمانی گفته‌شده برای خروجی‌های dpp0029 و ERA5 برای کل کره زمین نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خروجی‌های dpp0029 تا حد خوبی توانسته است الگوهای دمای را شبیه‌سازی کند.



شکل ۱. مقایسه دمای سطح برای میانگین ۴۱ روزه (۲۰ ژانویه تا ۱ مارس ۲۰۲۰) برای خروجی‌های dpp0029 (بالا) و ERA5 (پایین).

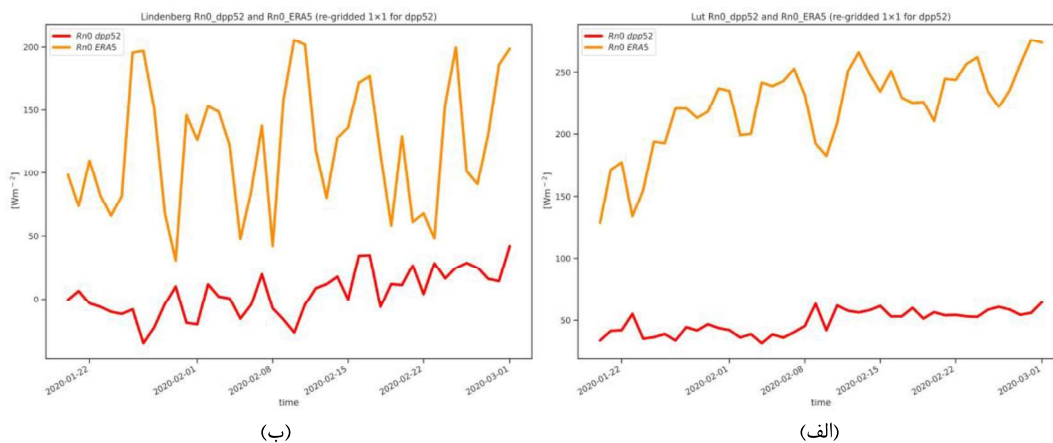
برای بررسی بهتر دمای سطح و همین‌طور شارهای سطحی گرمای نهان و محسوس به ترتیب دو منطقه خشک و مرطوب، کویر لوت در ایران و لیندنبرگ در آلمان انتخاب شده است. جدول ۱ مقادیر دمای سطح و شارهای سطحی گرمای نهان و محسوس را برای اجراهای dpp0029 و dpp0052 در مقایسه با خروجی‌های ERA5 برای میانگین بازه زمانی ۴۱ روزه

نشان می‌دهد. مطابق این جدول به نظر می‌رسد برای دمای سطح در هر دو منطقه مرطوب و خشک dpp0052 مقادیر نزدیک‌تری را به ERA5 شبیه‌سازی کرده است اما برای هردوی شارهای گرمای نهان و محسوس در سطح برای منطقه مرطوب dpp0029 عملکرد بهتری را در مقایسه با dpp0052 نشان داده ولی در منطقه خشک dpp0052 دوباره مقادیر نزدیک‌تری را به مقادیر ERA5 برای میانگین بازه زمانی گفته‌شده شبیه‌سازی کرده است.

**جدول ۱.** میانگین زمانی در دوره ۴۱ روزه برای شارهای گرمای نهان و محسوس در سطح (به ترتیب slhf و sshf) برحسب  $Wm^{-2}$  و دمای سطح (st) برحسب کلونین برای لیندنبرگ و کویر لوت.

کویر لوت	لیندنبرگ	
۱۰/۳	۹۲/۶	slhf-dpp0052
۶/۷	۱۱۲/۸۴	slhf-dpp0029
۱۱/۰۳	۱۲۶/۲۲	slhf-ERA5
۴۳/۷	۱۱/۶	sshf-dpp0052
۵۰/۶	۲۹/۳	sshf-dpp0029
۴۱/۱۳	۳۳/۷	sshf-ERA5
۲۸۷/۴	۲۸۳/۹	st-dpp0052
۲۸۳/۹	۲۸۴/۴۳	st-dpp0029
۲۹۰/۳	۲۸۳/۳	st-ERA5

شکل ۲ تابش خالص سطح را برای خروجی‌های بازشبکه‌سازی‌شده یک درجه dpp0052 در مقایسه با خروجی‌های ERA5 در دو منطقه کویر لوت و لیندنبرگ نشان می‌دهد. مقدار میانگین بازه زمانی ۴۱ روزه حوزه کویر لوت برای ERA5 ۲۲۲/۲ وات بر مترمربع و برای dpp0052 ۴۸/۷ وات بر مترمربع است. همچنین مقادیر متناظر برای لیندنبرگ ۱۲۱ و ۴/۴ وات بر مترمربع می‌باشد. به نظر می‌رسد دلیل این اختلاف زیاد به عدم تعادل تابشی مدل در بالای جو مربوط باشد.



**شکل ۲.** مقایسه تابش خالص سطح برحسب  $Wm^{-2}$  برای خروجی‌های بازشبکه‌سازی‌شده یک درجه dpp0052 و خروجی‌های ERA5 برای کویر لوت (الف) و لیندنبرگ (ب).

### ۳ نتیجه‌گیری

اگرچه تفکیک بالاتر در مدل‌های ناآبایستا موجب نمایش فرایندهایی می‌شود که به‌طور عادی در تفکیک‌پذیری فعلی مدل‌های آبایستا مشخص نمی‌شوند، اما مشخص است که چنین مدل‌هایی نیز دارای حساسیت‌هایی هستند. برای مثال، نشان داده شد که تابش خالص سطح در دو منطقه انتخاب‌شده کویر لوت و لیندنبرگ بیشتر از ۱۰۰ وات بر مترمربع با

مقادیر حاصل از ERA5 اختلاف دارند، هرچند بهتر است برای مقایسه از برج‌های هواشناسی استفاده شود که در منطقه کویر لوت چنین امکانی در حال حاضر وجود ندارد. همچنین شبیه‌سازی‌های dpp0029 و dpp0052 دقت‌های مختلفی را در مناطق خشک و مرطوب انتخاب‌شده نشان دادند که نیازمند بررسی بیشتر برای سایر مناطق در ادامه پژوهش است.

## منابع

- Hohenegger, C., and Coauthors, 2022, ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth System and their interactions at kilometer and subkilometer scales. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1–42, <https://doi.org/10.5194/gmd-2022-171>.
- Hohenegger, C., Kornblueh, L., Klocke, D., Becker, T., Cioni, G., Engels, J. F., Schulzweida, U., and Stevens, B., 2020, Climate statistics in global simulations of the atmosphere, from 80 to 2.5 km grid spacing. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2020–005, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-005>.
- Matsuno, T., 2016, Prologue: Tropical Meteorology 1960–2010—Personal Recollections. *Meteorological Monographs*, 56, vii–xv, <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPH-D-15-0012.1>.
- Stevens, B., and Coauthors, 2019, DYAMOND: the DYNAMics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Prog Earth Planet Sci*, 6, 61, <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>.
- Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99–164, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2).