



Institute of Geography



Research Paper

**Sensitivity of WRF model in simulation of surface wind in Tehran to physical schemas and boundary conditions**

Naser Izadi <sup>a</sup>, Ali Akbar Shamsipur <sup>b\*</sup>, Ghasem Azizi <sup>c</sup>

<sup>a</sup>. *Ph.D. Student of Climatology, Tehran University, Tehran, Iran*

<sup>b</sup>. *Associate Professor of Climatology, Tehran University, Tehran, Iran*

<sup>c</sup>. *Professor of Climatology, Tehran University, Tehran, Iran*

**Extended Abstract**

**Introduction**

The wind has always been considered an energy source from two perspectives: pattern and behavior in urban contexts and potential in suburban environments. There are usually two major strategies for this purpose: one based on observational data and the other providing simulation data with the creation of climate models at various numerical scales (Han et al., 2014: 17). Numerical models are used in most studies to evaluate regional winds nowadays (Haman et al., 2010: 954; Shimada et al., 2011: 21). Simulated weather research and forecasting (WRF) has been used to conduct studies on this topic (Liu et al., 2018; Salvato et al., 2018; Matar et al., 2016; Charabi et al., 2019; Tokhtenhagen et al., 2020). The sensitivity and performance of the WRF model to initial and boundary conditions, as well as its impact on wind simulation, are investigated in this study. A planetary boundary layer scheme is also chosen to simulate the wind field in the city of Tehran.

**Materials and methods**

The Meteorological Organization provided observational data on wind direction and speed for Mehrabad, Chitgar, Geophysical, and North Tehran (Shemiran) synoptic stations from 2018 on a three-hour time scale (Table 2). Data analysis time series from two databases, the National Environmental Forecasting Center (NCEP-FNL) and the European Center for Medium-Term Weather Forecasting (ECMWF-) ERA5), were used as the initial and boundary conditions to achieve the frequency and distribution of wind direction and velocity for January, May, July, and October. The WRF model, version 4.1.2, was used to simulate the components of wind speed and direction using boundary condition data in this investigation. The RRTM longwave radiation model, the Goddard shortwave radiation design, the Noah surface model, the WSM6 microphysical schema, the two-dimensional Cumulus Betts-Miller-Janjic schema, and the three-dimensional Grell-Freitas schema were all employed in the study. The MRF Medium-Range Prediction Model, the Younesi University YSU Scheme, the MYJ Scheme, the second ACM2 Asymmetric Convection Scheme, the QNSE Normal Gaussian Scale, and the second and third MYNN Turbulence Scale are all used to test the performance sensitivity of the planetary boundary layer schemas.

\* . Corresponding author ([shamsipr@ut.ac.ir](mailto:shamsipr@ut.ac.ir))

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.334891.1007661>

**Received: 26 June 2022; Received in revised form: 1 September 2022; Accepted: 27 October 2022**

Copyright © 2022 The Authors. Published by University of Tehran. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### **Result and discussion**

By checking the characteristics of the observation stations according to table 9, all the selected stations have an average height difference of at least 110 meters, and the difference between the lowest (Mehrabad) and the highest (Shimiran) station is 360 meters. According to the results from the selected stations, this feature can be effective in the accuracy of the simulations by the weather prediction research model. It can be stated that the model cannot correctly simulate the topography due to the low horizontal resolution in the inner domain (7 km) and static data (such as DEM and land cover (by default, these data in the model have a horizontal resolution of approximately 1 km)) to do. Therefore, it is not possible to establish a meaningful relationship between the height difference of the stations and the output of the model. Still, the lack of proper introduction of the elevations of the land to the model causes the performance of the model to be weak so that it can simulate the surface currents resulting from local factors correctly.

### **Conclusion**

According to the analyzes done with wind and statistics, it seems that the weather research and forecasting model is more weak in estimating the wind direction in the months when the average monthly wind speed is lower, and it can be said that in the months of July and October, the wind is generally controlled by local factors with Low speed is formed, on the other hand, due to static data with low spatial resolution, the morphology and morphology of the model is weak and due to the dependence of surface currents on topography, it causes a large error in the estimation of the wind direction by the model in the mentioned months, but this weakness in The cold months decrease with the passage of dynamic systems and the increase of the monthly average wind speed, but contrary to the wind direction, the wind speed estimation outputs by the model show that the increase of the monthly average wind speed causes a decrease in the accuracy of the model in the estimation of the wind speed variable, that is why in all the statistics, July has the best simulation in wind speed variable.

From the results of these studies, the selected configuration for the direction may not necessarily be associated with the desired results for the speed. It may even be possible to achieve the best output in the months of the year with different configurations. According to the selected boundary configurations and data, the results of this study seem to be consistent with the research of Santos et al. (2013), Gholami et al., Ghafarian et al. (2018), and Laighi et al. (2015) are confirmed.

**Keywords:** Initial conditions, Wind direction and speed, Simulation, WRF, Tehran.

## حساسیت سنجی مدل WRF در شبیه‌سازی باد سطحی شهر تهران نسبت به طرح‌واره فیزیکی و شرایط مرزی

ناصر ایزدی - دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران  
علی اکبر شمسی‌پور<sup>۱</sup> - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران  
قاسم عزیزی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

### چکیده

کلان‌شهرها عموماً با بار گرمای محیطی بالای ناشی از تولید گرمای انسان‌ساخت و با آلودگی هوا ناشی از تولید انواع آلاینده‌های گازی و ذرات معلق روبرو هستند. سنجش نقش باد در کیفیت اقلیم و تهویه طبیعی هوای فضاهای شهری با روش‌های مختلفی مورد توجه پژوهشگران است. اما شبیه‌سازی باد با مدل‌های عددی آب‌وهوا مانند مدل تحقیقات و پیش‌بینی وضع هوا (WRF همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است. در این پژوهش نقش داده‌های شرایط مرزی (اولیه) ECMWF-ERA5 و NCEP-FNL همراه با هفت پیکربندی فیزیکی متفاوت بر الگوی وزش باد مورد سنجش قرار گرفته است. هدف از تحقیق ارزیابی برون‌داد مدل WRF در شبیه‌سازی جهت و سرعت باد سطحی و همچنین تعیین اثر انواع طرح‌واره‌های فیزیکی بر بهبود نتایج ارزیابی است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که جهت باد شبیه‌سازی‌شده با مدل WRF با اختلاف قابل توجهی از داده‌های مشاهداتی همراه است، اما این اختلاف برای سرعت باد انحراف کمتری دارد. برون‌داد مدل در پیکربندی‌های مختلف فیزیکی بیانگر میزان اثربخشی آن‌ها در شبیه‌سازی مدل است. بر همین اساس برای متغیر سرعت باد به ترتیب پیکربندی‌های  $Exp(2,6,1)$  و برای متغیر جهت باد پیکربندی‌های  $Exp(3,7)$  دارای نزدیک‌ترین شبیه‌سازی به مشاهدات هستند و به‌عنوان پیکربندی‌های برتر انتخاب گردیدند. خروجی‌های مدل نشان داد که داده‌های اولیه شرایط مرزی همانند طرح‌واره‌های فیزیکی اثر قابل توجهی در شبیه‌سازی جهت و سرعت باد دارند؛ به‌طوری‌که در شهر تهران، عموماً شرایط مرزی ERA5 برای شبیه‌سازی جهت باد به‌استثنای ماه ژانویه و شرایط مرزی FNL برای سرعت باد به‌غیر از جولای، گویای عملکرد بهتری هستند.

**واژگان کلیدی:** شرایط مرزی، جهت و سرعت باد، مدل تحقیقات و پیش‌بینی وضع هوا (WRF)، طرح‌واره فیزیکی.

## مقدمه

باد همواره از جنبه الگوی وزش در محیط‌های شهری و پتانسیل آن در تولید انرژی در محیط‌های برون‌شهری مورد توجه هست. عموماً مطالعه باد با دو روش (۱) مبتنی بر داده‌های مشاهداتی و (۲) شبیه‌سازی با مدل‌های عددی میان‌مقیاس آب‌وهوا انجام می‌شود (Han et al., 2014:17). امروزه بیشتر مطالعات ارزیابی باد منطقه‌ای بر اساس مدل‌های عددی انجام می‌شود (Hahmann et al., 2010:954; Shimada et al., 2011:21). در سال‌های اخیر با افزایش توجه به نقش باد در تولید انرژی تجدید پذیر، عمده پژوهش‌های پتانسیل‌یابی قدرت باد، برای مکان‌یابی توربین‌های بادی تمرکز یافته است. مطالعاتی زیادی با مدل تحقیقات و پیش‌بینی وضع هوا (WRF<sup>۱</sup>) به شبیه‌سازی در این موضوع پرداخته است (Mattar et al., 2016:22; Liu et al., 2018:582; Salvação et al., 2018:276; Charabi et al., 2019:1; Tuchtenhagen et al., 2020:119).

مدل‌های پیش‌بینی عددی، تقریبی از وضعیت واقعی جو را نشان می‌دهند. اندازه انحراف بین جو واقعی و شبیه‌سازی شده به مواردی مانند پیکربندی مدل، انتخاب طرح‌واره‌ها برای فرآیندهای فیزیکی، توپوگرافی و پوشش گیاهی سطح، اندازه دامنه مدل، تفکیک مکانی و زمانی و تعیین شرایط مرزی بستگی دارد (Awan et al., 2011:3107). کاربر مدل قادر است از طریق پیکربندی دقیق، مدل را برای یک منطقه یا رویداد آب‌وهوایی خاص بهینه کند. مثلاً در برآورد انرژی باد، شناسایی دلایل انحراف مدل از جو و محدودسازی و کاهش عوامل خطا بسیار مهم است، زیرا یک خطای کوچک در تخمین سرعت باد باعث ایجاد خطای بزرگ در تخمین میزان انرژی می‌شود. برای مدل‌های پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس، داده‌های جوی ورودی، شرایط اولیه و مرزی را در طول زمان شبیه‌سازی فراهم می‌کنند و معمولاً توسط داده‌های باز تحلیل جهانی ارائه می‌شوند (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۴:۱۱۶). داده‌های باز تحلیل جهانی از طریق مدل‌های پیش‌بینی عددی جهانی به دست می‌آیند که مشاهدات هواشناسی را با پیش‌بینی‌های مدل از طریق فرآیند همسان‌سازی در یک توصیف فیزیکی منسجم از تحول جو ترکیب می‌کنند (Dee et al., 2011:553; Hersbach et al., 1999:2020).

در شبیه‌سازی باد با مدل‌های عددی آب‌وهوا، نقش طرح‌واره‌ها و میزان تفکیک افقی داده‌های فیزیکی مانند توپوگرافی و پوشش سطحی زمین در مطالعات مختلف موردسنجش قرار گرفته است. ارزیابی نقش نسبی پیکربندی متفاوت طرح‌واره‌ها و تفکیک افقی داده‌های جغرافیایی در شبیه‌سازی باد با مدل WRF برای ۴ ایستگاه ناهمگون اقلیمی در جنوب اسپانیا توسط سانتوس و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد که در آن نخست، ۳۲ پیکربندی متفاوت با استفاده از دو طرح‌واره مختلف برای میکرو فیزیک، ابر کومه‌ای، لایه‌مرزی سیاره‌ای (PBL<sup>۲</sup>)، تابش موج کوتاه و موج بلند بررسی شده است. سپس، تأثیر تغییر تفکیک افقی بر تخمین باد انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل اولیه نشان داد که باد در منطقه مورد مطالعه عمدتاً به انتخاب پارامترهای لایه‌مرزی سیاره‌ای حساس است، ولی هیچ‌یک از پیکربندی‌های انتخابی به‌وضوح نتوانستند جهت و سرعت باد را با دقت بالایی نمایش دهند و عملکرد آن‌ها در بین ایستگاه‌ها متفاوت است، اما در بین پیکربندی‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای، YSU و MYNN با شرط ثابت بودن سایر پارامترها از دقت بیشتری برخوردار بودند. از این‌رو برای تجزیه و تحلیل تأثیر وضوح مکانی (توپوگرافی زمین) در برآورد باد با WRF از این دو پیکربندی استفاده کردند و نشان دادند که مقادیر انحراف معیار استاندارد و اریبی به سه عامل لایه‌مرزی سیاره‌ای، موقعیت ایستگاه و تفکیک مکانی وابستگی قابل توجهی داشتند. اما، تأثیر تفکیک مکانی نسبت به دو عامل دیگر ضعیف و مقادیر انحراف استاندارد سرعت باد بسیار وابسته به ارتفاع ایستگاه ارزیابی شد. بعلاوه اریبی در تخمین سرعت باد WRF به تفکیک مکانی مدل بسیار حساس بوده چرا که تفکیک بالاتر، نمایش ارتفاع زمین را بهبود می‌بخشد و میزان بیش برآورد و کم برآورد سرعت باد به مورفولوژی

1 . Weather Research and Forecasting Model

2 . Planetary Boundary Layer

زمین و وضوح مکانی بستگی داشته است. از طرف دیگر، مشخص شد که پیکربندی فیزیکی تأثیر کمی در برآورد توزیع جهت باد دارد. این برآوردها نسبت تفکیک مکانی به نمایش مورفولوژی زمین در اطراف ایستگاه حساس تر هستند. به‌طور کلی این برآوردها نشان داد مدل WRF به ریخت‌شناسی زمین در اطراف ایستگاه نسبت به تفکیک مکانی حساس تر است و می‌توان این‌طور بیان نمود که ورود داده‌ها با تفکیک افقی بالای توپوگرافی سطح زمین در مدل، باید به‌عنوان یک عامل کلیدی مهم برای دستیابی به خروجی دقیق از جریان باد در سرزمین‌های با توپوگرافی پیچیده در نظر گرفته شود (Carvalho et al., 2014:116; Mughal et al., 2017:107). مطالعات خارجی زیادی در زمینه حساسیت مدل WRF به طرح‌واره‌ها و شرایط مرزی مختلف انجام گردیده است که برای نمونه می‌توان مطالعات بالزارینی و همکاران (۲۰۱۴) در مورد تجزیه و تحلیل حساسیت طرح‌واره‌های لایه‌مرزی را در کنار مطالعات ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) در زمینه تأثیر طرح‌واره لایه‌مرزی سیاره‌ای بر دقت شبیه‌سازی باد عمودی نام برد.

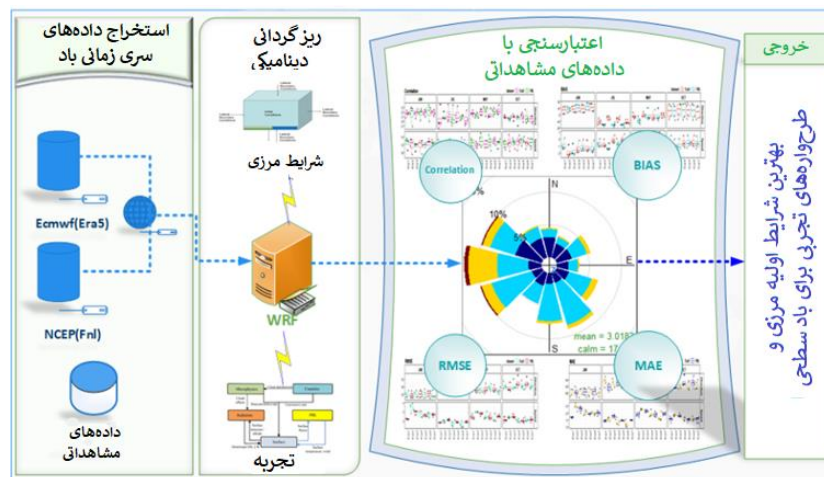
غلامی و همکاران (۱۳۹۷) طی پژوهشی به تحلیل حساسیت باد ۱۰ متری با ۶ پیکربندی مختلف و شرایط مرزی ERA-Interim، NCEP<sup>۱</sup>-FNL و NCEP-R2 بر فراز خلیج فارس پرداختند و نشان دادند که در بین پیکربندی‌های انتخابی و داده‌های شرایط اولیه و مرزی، طرح‌واره YSU و داده ERA-Interim از نظر همبستگی بیشترین نزدیکی را با داده‌های مشاهداتی داشته است. اما همین طرح‌واره با داده NCEP-FNL همبستگی بهتری با جهت باد داشته است، همچنین بدون در نظر گرفتن نوع طرح‌واره، شرایط مرزی NCEP-R2 دارای بیشترین خطای شبیه‌سازی در متغیر جهت و سرعت باد است. غفاریان و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای با عنوان شبیه‌سازی میدان باد سطحی در منطقه دریای عمان توسط مدل WRF با شرایط مرزی متفاوت نشان دادند تفکیک بالاتر داده ورودی به‌تنهایی نمی‌تواند باعث بهبود شبیه‌سازی شود به‌گونه‌ای که شبیه‌سازی با داده‌های FNL که پایین‌ترین تفکیک افقی بین داده‌ها را دارا است بهترین عملکرد بین سه شبیه‌سازی مختلف را داشته است، همچنین آن‌ها نشان دادند که داده‌های GFS<sup>۲</sup> (NCEP) و FNL نسبت به ECMWF<sup>۳</sup> دارای عملکرد بهتری در شبیه‌سازی میدان باد در منطقه مورد مطالعه هستند. پژوهشی که در محدوده خلیج فارس و دریای عمان در زمان مونسون تابستانی انجام گردید نشان داد که برای سرعت باد، پیکربندی خردفیزیک لین، لایه‌مرزی سیاره‌ای ACM2<sup>۴</sup>، ابر کومه‌ای کین فریج، تابش موج‌بلند<sup>۵</sup> RRTM، تابش موج کوتاه گودارد، لایه سطحی و سطح زمین XIU-PLEIM خطای کمتری نسبت به سایر پیکربندی‌ها دارد. این امر نشان‌دهنده آن است که دما و باد سطحی به نوع طرح‌واره‌های لایه‌مرزی حساسیت بیشتری دارند (لابقی و همکاران، ۱۳۹۵).

طبق بررسی به‌عمل آمده مطالعات منسجمی برای ارزیابی قابلیت مدل WRF در شبیه‌سازی جهت و سرعت باد کلان‌شهر تهران صورت نگرفته است و بر طبق نتایج مطالعات انجام‌شده و پویایی جو زمین، شرایط اولیه و مرزی در مدل‌سازی دارای نقش کلیدی است. از سوی دیگر دقت پیش‌بینی‌های یک مدل عددی به‌ویژه در ترازهای پایین جو به‌شدت به پارامتر سازی‌های فیزیکی لایه‌مرزی سیاره‌ای و لایه سطحی وابسته است (Skamarock et al., 2008). از این‌رو در این تحقیق حساسیت و عملکرد مدل تحقیقات و پیش‌بینی وضع هوا به شرایط اولیه مرزی و طرح‌واره‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی میدان باد به‌عنوان یکی از متغیرهای شاخص در هواشناسی در محدوده شهر تهران بررسی می‌شود.

- 1 . National Centers for Environmental Prediction
- 2 . Global Forecast System
- 3 . European Centre for Medium-range Weather Forecasting
- 4 . Asymmetric Convection Model 2 Scheme
- 5 . rapid and accurate radiative transfer model

## روش پژوهش

در این مطالعه از مدل تحقیقات و پیش‌بینی عددی وضع هوا، نسخه ۴,۱,۲ که برای شبیه‌سازی گردش جو در مقیاس بزرگ و منطقه‌ای طراحی شده در شبیه‌سازی متغیر جهت و سرعت باد استفاده شده است. روند انجام پژوهش در چکیده گرافیکی شماره ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک کلی روش پژوهش (داده‌ها، ریزمقیاس‌نمایی و اعتبارسنجی با آماره‌ها)

در این مطالعه اصلی‌ترین پارامترهای فیزیکی لایه مرزی به کاررفته شامل طرح‌واره تابش موج‌بلند RRTM (Mlawer et al., 1997:16663)، طرح‌واره تابش موج کوتاه Goddard (Chou et al., 1994:85)، طرح‌واره سطح زمین Noah (Tewari et al., 2004:11)، طرح‌واره میکرو فیزیک WSM6 (Hong et al., 2006:129)، طرح‌واره دو بعدی ابر کومه‌ای BMJ<sup>۱</sup> (Janjic et al., 1994:927) و سه بعدی Grell-Freitas (Grell et al., 2014:5233) است. برای آزمایش حساسیت عملکرد طرح‌واره‌های لایه مرزی، هفت پیکربندی مطابق جدول ۱، شامل طرح‌واره دانشگاه یونسی<sup>۲</sup> YSU، طرح‌واره MYJ<sup>۳</sup> (Janjic et al., 1994:927)، طرح‌واره حذف مقیاس شبه نرمال QNSE<sup>۴</sup> (Hong et al., 2006:129)، طرح‌واره آشفتگی مرتبه دوم و سوم MYNN<sup>۵</sup> (Nakanishi et al., 2009:397)، طرح‌واره دوم مدل همرفت نامتقارن ACM2 (Pleim et al., 2007:1383) و طرح‌واره پیش‌بینی بازه متوسط MRF<sup>۶</sup> (Hong et al., 1996:2322) انتخاب گردیدند. تفاوت بین هفت طرح‌واره لایه مرزی به پیچک، پارامتره شدن بخش بالای لایه مرزی و رفتار منطقه جذب در شرایط پایدار، خنثی و همرفت مربوط می‌شود.

- 1 . Betts-Miller-Janjic
- 2 . Youngstown State University
- 3 . Mellor-Yamada-Janjic Scheme
- 4 . Quasi-normal Scale Elimination
- 5 . Mellor-Yamada Nakanishi Nino (MYNN) Level 2.5 and Level 3 Schemes
- 6 . Medium-Range Forecast Model

جدول ۱. مشخصات پیکربندی طرح‌واره‌های فیزیکی مورد مطالعه

پیکربندی‌ها	لایه‌مرزی	خردفیزیک	تابش طول موج بلند	تابش طول موج کوتاه	لایه سطحی	سطح	همرفت کومه‌ای
Exp(1)	YSU(1)	WSM6(6)	RRTM(1)	Goddard(2)	MM5 (1)	Noah(2)	Grell-Devenyi (3)
Exp(2)	MYJ(2)				Eta (2)		BMJ (2)
Exp(3)	QNSE(4)				QNSE (4)		BMJ (2)
Exp(4)	MYNN2(5)				MYNN (5)		BMJ (2)
Exp(5)	MYNN3(6)				MYNN (5)		BMJ (2)
Exp(6)	ACM2 (7)				Pleim-Xiu (7)		BMJ (2)
Exp(7)	MRF (99)				MM5 (1)		BMJ (2)

برای اعتبارسنجی برون‌داد مدل، داده‌های مشاهداتی جهت و سرعت باد چهار ایستگاه همدیدی مهرآباد، چیتگر، ژئوفیزیک و شمال تهران در سال ۲۰۱۸ با تفکیک زمانی ۳ ساعته از سازمان هواشناسی اخذ و متناسب با بازه مورد مطالعه (ماه‌های ژانویه، می، جولای و اکتبر) استخراج گردید (جدول ۲). در ادامه برای دستیابی به فراوانی و توزیع سری زمانی جهت و سرعت باد داده‌های باز تحلیل در ماه‌های منتخب، از دو پایگاه NCEP-FNL و ECMWF-ERA5 به‌عنوان شرایط مرزی استفاده شد (جدول ۳). این داده‌ها در شبکه‌های  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  درجه در دسترس بوده در صورتی که برای انجام این مطالعه نیاز به تفکیک افقی بالاتر است، بنابراین مقیاس گاهی دینامیکی این داده‌ها ضروری است. مقیاس گاهی روشی برای به دست آوردن اطلاعات آب و هوایی از تفکیک افقی درشت‌تر است. بنابراین، مقیاس گاهی دینامیکی می‌تواند از مدل با تفکیک افقی درشت که توسط شرایط مرزی هدایت می‌شود، برای استخراج اطلاعات در تفکیک افقی بالاتر استفاده کند. مدل تحقیقات و پیش‌بینی وضع هوا یک سیستم پیش‌بینی عددی جوی برای تحقیقات و پیش‌بینی‌های عملیاتی است و اغلب از پارامترهایی برای نشان دادن تعامل بین مقیاس‌های مختلف در فرآیند محاسبات استفاده می‌کند و طرح‌واره‌های خردفیزیک، تابش موج کوتاه و تابش موج بلند جو، ابر کومه‌ای و لایه‌مرزی می‌تواند نتایج شبیه‌سازی مدل را بهبود بخشد (Han et al., 2014: 17).

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک انتخابی

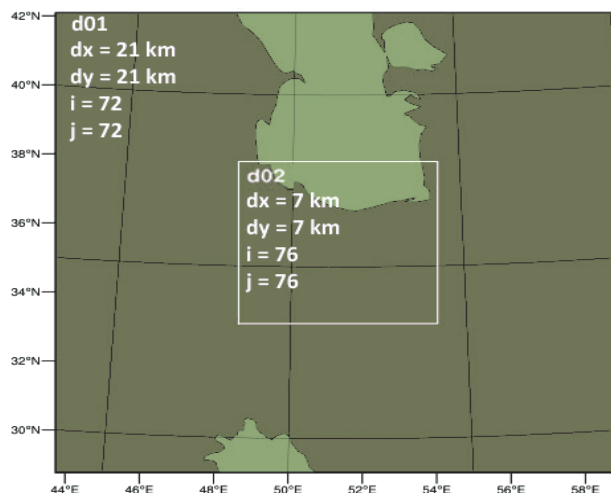
کد ایستگاه	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
۴۰۷۵۴	مهرآباد	۳۵/۶۹	۵۱/۳۰	۱۱۹۱
۹۹۳۲۰	چیتگر	۳۵/۷۳	۵۱/۱۶	۱۳۰۵/۲
۹۹۳۳۱	ژئوفیزیک	۳۵/۷۴	۵۱/۳۸	۱۴۱۸/۶
۴۰۷۵۱	شمیران	۳۵/۷۹	۵۱/۴۸	۱۵۴۹/۱

جدول ۳. ویژگی داده‌های شرایط اولیه و مرزی مورد مطالعه

شرایط اولیه مرزی	نوع	تفکیک افقی	گام زمانی	تراز فشاری	ابعاد	پوشش زمانی
ERA5	Reanalysis	$0.25^\circ$	4 time daily	۳۸	4D-Var	1979-present
FNL	Analysis	$0.25^\circ$	4 time daily	۲۸	3D-Var	۲۰۲۰-۲۰۱۵

مدل در دو دامنه تودرتو با تفکیک افقی ۲۱ و ۷ کیلومتر با نسبت ۱ به ۳ همانند شکل ۳ تنظیم شده است. محدوده دامنه ۱ با تفکیک افقی ۲۱ کیلومتر و شبکه  $72 \times 72$  و دامنه داخلی با تفکیک افقی ۷ کیلومتر و شبکه  $76 \times 76$  به مرکزیت  $51.35^\circ$  درجه طول شرقی و  $35.71^\circ$  درجه عرض شمالی است. گام زمانی مدل با ضرب ۴ تفکیک افقی برابر با ۸۴ ثانیه تنظیم و

طول زمان شبیه‌سازی (ماهانه) ۷۳۸ ساعت با توجه به تعداد روز هرماه در نظر گرفته شده است و در محاسبات آماری ۶ ساعت اول به‌عنوان زمان تطبیق (spin-up) گذارنده و از ساعت ۰۶:۰۰ به بعد تحلیل شدند.



شکل ۳. موقعیت دامنه‌های شبیه‌سازی مدل همراه با فاصله شبکه‌ای هر دامنه و تعداد نقاط شبکه

### اعتبار سنجی برون‌داد مدل

در این مطالعه از آماره‌های میانگین سوگیری مدل (اریبی)، ضریب همبستگی و میانگین مجذور خطا و میانگین خطای مطلق طبق فرمول‌های جدول (۴) برای ارزیابی قابلیت شبیه‌سازی مدل در تولید مشخصه‌های باد استفاده شد، و خطاهای خروجی WRF برای پیکربندی لایه‌مرزی در قالب Exp<sup>1</sup>(1) تا Exp<sup>7</sup>(7) در چهار دوره یک‌ماهه (در هر فصل یک دوره) مورد ارزیابی قرار گرفت. این بررسی در قالب سنجش دو سری مقادیر شرایط مرزی برگرفته از داده‌های ERA5 و FNL صورت گرفته است، منابع دیگر خطاها، مانند خطاهای اندازه‌گیری باد و خطاهای مربوط به داده‌های استاتیکی سطح زمین مورد توجه قرار نگرفته است. شکل‌های (۴ تا ۸) و جداول (۵ تا ۸)، گلباد و توزیع آماری مقادیر همبستگی، میانگین مجذور خطا، میانگین خطای مطلق و اریبی پیکربندی‌ها را در هرماه برای جهت و سرعت باد نشان می‌دهد.

### جدول ۴. مشخصه‌های آماری به همراه روابط ریاضی

ردیف	فرمول	عنوان	مرجع
(۱)	$MB = \bar{y} - \bar{x}$	میانگین اریبی	Everitt, B. S.; Skrondal, A. (2010), <a href="#">The Cambridge Dictionary of Statistics</a> , Cambridge University Press.
(۲)	$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$	میانگین خروجی مدل و مشاهداتی	
(۳)	$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}$	ضریب همبستگی	Kotz, S.; et al., eds. (2006), <a href="#">Encyclopedia of Statistical Sciences</a> , Wiley.
(۴)	$MAE = n^{(-1)} \sum_{i=1}^n  x_i - y_i $	میانگین خطای مطلق	Everitt, B. S.; Skrondal, A. (2010), <a href="#">The Cambridge Dictionary of Statistics</a> , Cambridge University Press.
(۵)	$RMSE = \sqrt{\left( n^{(-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \right)}$	میانگین مجذور خطا	Salkind, N. J. (2010). Encyclopedia of research design (Vols. 1-0). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, Inc.

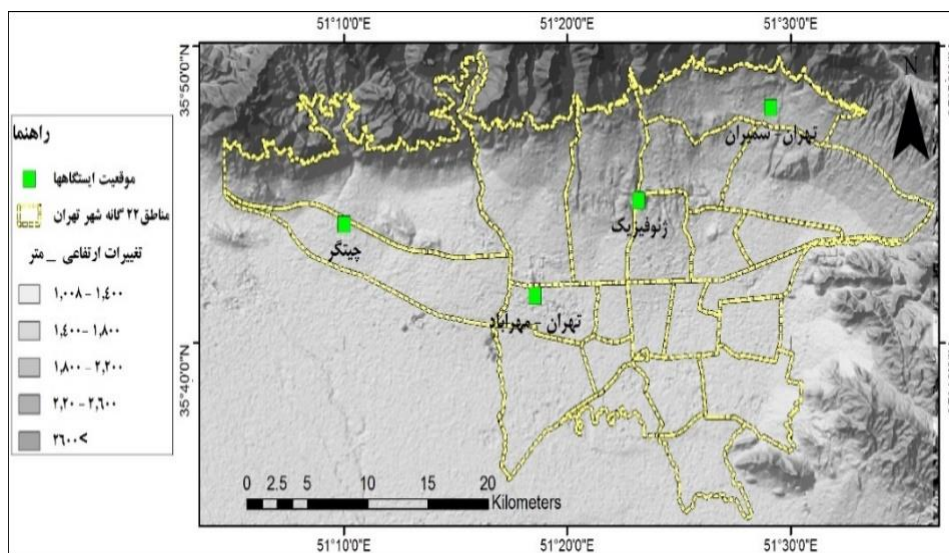
جهت و سرعت باد بین خروجی مدل (x) و داده‌های مشاهداتی (y).

<sup>1</sup> Experimental



## محدوده مورد مطالعه

کلان‌شهر تهران به‌عنوان پایتخت ایران در دامنه جنوبی البرز مرکزی قرار گرفته و از شمال توسط ارتفاعات توچال احاطه گردیده است. جهت وزش باد در شهر تهران متناسب با فصل‌های سال متغیر و باد غالب آن غربی است. امتداد کوه‌های البرز بین تهران و کرج باعث انحراف این باد به سمت دشت شهریار می‌شود. باد غالب در فصل تابستان از سمت جنوب جریان داشته که موجب انتقال گرمای کویر و حمل گردوغبار به سمت شهر می‌شود. در کنار این جریانات در روز نسیم دشت به کوه به طرف ارتفاعات شمال تهران و بالعکس در شب‌ها این نسیم کوه به سمت دشت، از شمال به جنوب سرازیر می‌شوند. شکل ۲، موقعیت ایستگاه‌های انتخابی و توپوگرافی شهر را نشان می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های مشاهداتی و توپوگرافی محدوده مورد مطالعه

## بحث و یافته‌ها

## تحلیل گلبادهای ماهانه

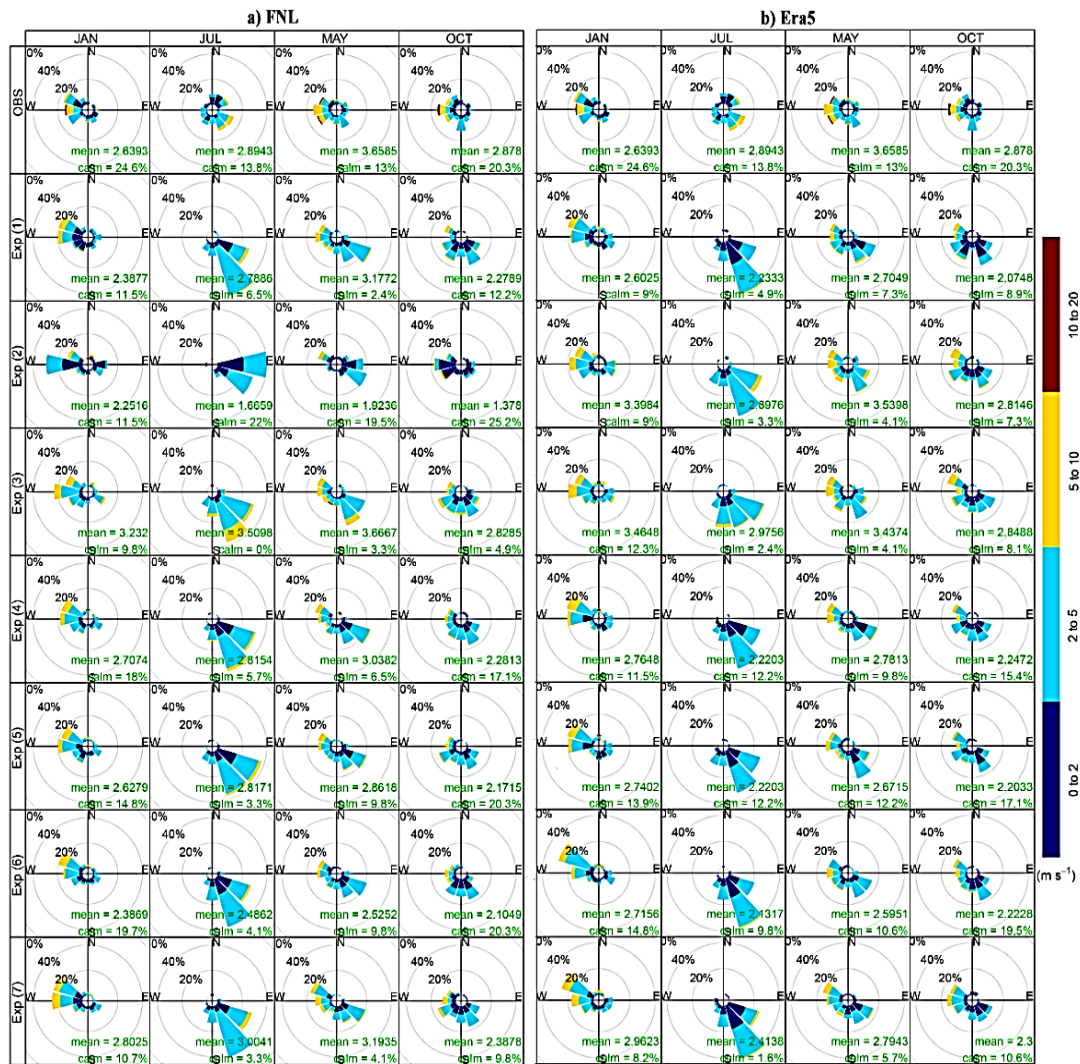
نمودار گرافیکی از فراوانی نسبی جهت و سرعت باد در یک ایستگاه برای دوره زمانی معین را گلباد می‌گویند که با تعیین جهت باد غالب، در مکان‌یابی جهت گسترش فضای شهری و طراحی‌های شهری، طراحی باند فرودگاه‌ها و امکان‌سنجی برای استفاده از انرژی باد به کار گرفته می‌شود. شکل (۴) گلباد ماهانه داده‌های مشاهداتی و برون‌داد مدل WRF برای پیکربندی‌های مختلف لایه‌مرزی را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در ماه ژانویه مدل با پیکربندی‌های مختلف و شرایط مرزی ERA5، جهت باد غالب را همانند داده‌های مشاهداتی به صورت غربی و شمال غربی شبیه‌سازی نموده است، اما در تمامی پیکربندی‌های مدل، درصد باد آرام<sup>۱</sup> به مراتب کمتر از داده‌های مشاهداتی است و همچنین میانگین سرعت باد در تمامی پیکربندی‌ها به استثنای Exp(1) با بیش برآورد همراه بوده است. در همین ماه شبیه‌سازی‌های انجام شده با شرایط مرزی FNL، به استثنای پیکربندی Exp(2) که در برآورد فراوانی باد غالب غربی دارای خطای قابل ملاحظه‌ای با داده‌های مشاهداتی است سایر پیکربندی‌ها، باد غالب را متناسب با داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی کردند؛ اما در برآورد درصد باد آرام نسبت به ERA5 دارای خطای کمتری است. بررسی میانگین سرعت باد نشان می‌دهد پیکربندی‌های Exp(1,2,5,6) نسبت به داده‌های مشاهداتی برآورد کمتری داشته و تنها پیکربندی Exp(5) دارای عملکرد بهتری است. در ماه می، پیکربندی‌های مدل با شرایط اولیه و مرزی ERA5 و FNL در تخمین فراوانی باد غالب غربی و بادهای جنوب شرقی نسبت به داده‌های مشاهداتی به ترتیب با کم برآوردی و بیش برآوردی همراه بوده و نتوانسته باد غالب و

۱. در این مطالعه همانند داده‌های مشاهداتی سرعت کمتر از ۱ متر بر ثانیه به‌عنوان باد آرام در نظر گرفته شده است

نایب غالب این ماه را به‌درستی شبیه‌سازی کند. در این ماه شرایط مرزی ERA5 با پیکربندی‌های مختلف در برآورد درصد باد آرام با کم برآوردی همراه بوده و بهترین تخمین با پیکربندی‌های Exp(5,6) به‌دست‌آمده است، همچنین در تخمین میانگین سرعت باد، تمامی پیکربندی‌های مدل با کم برآوردی همراه بوده و پیکربندی‌های Exp(2,3) عملکرد بهتری را برای شبیه‌سازی ارائه کردند. در همین ماه با داده‌های FNL فقط پیکربندی Exp(2) با بیش برآوردی درصد باد آرام همراه بوده و همانند داده‌های ERA5 بهترین تخمین در پیکربندی‌های Exp(5,6) حاصل گردید. بررسی میانگین سرعت باد شبیه‌سازی‌شده با شرایط مرزی FNL نشان داد فقط پیکربندی Exp(3) دارای دقیق‌ترین برآورد نسبت به مقادیر مشاهداتی بوده و سایر پیکربندی‌های مدل با کم برآوردی میانگین سرعت باد همراه بودند. در ماه جولای، پیکربندی‌های مدل با شرایط مرزی ERA5 و FNL، فراوانی جهت باد غالب جنوب شرقی و باد نایب غالب شمال شرقی را نسبت به داده‌های مشاهداتی به ترتیب با بیش برآورد و بدون برآورد شبیه‌سازی کرده‌اند. در این ماه شرایط مرزی ERA5، باد آرام را در برون‌داد مدل با پیکربندی‌های مختلف با درصد کمتری نسبت به مشاهدات شبیه‌سازی کرده و بهترین تخمین به ترتیب با پیکربندی‌های Exp(4,5) به‌دست‌آمده است و به‌غیراز پیکربندی Exp(2,3) که در برآورد میانگین سرعت باد دارای نزدیک‌ترین شبیه‌سازی به داده‌های مشاهداتی بودند، سایر پیکربندی‌ها با کم برآوردی همراه بودند. در همین ماه با داده‌های FNL در تخمین درصد باد آرام فقط پیکربندی Exp(2) با بیش برآوردی همراه بوده و سایر پیکربندی‌ها با کم برآوردی همراه بودند. بررسی میانگین سرعت باد شبیه‌سازی‌شده با داده‌های شرایط مرزی FNL نشان داد فقط پیکربندی Exp(3,7) دارای بیش برآوردی نسبت به داده‌های مشاهداتی بوده و در سایر موارد دارای برآوردی پایینی است.

در ماه اکتبر جهت باد غالب و نایب غالب داده‌های مشاهداتی به ترتیب غربی و جنوبی بوده درحالی‌که باد غالب به‌دست‌آمده از تمام پیکربندی‌ها با شرایط مرزی هر دو پایگاه داده دارای پراکندگی زیادی است به‌طوری‌که جهت شمال غربی و جنوب شرقی و جنوبی و جنوب غربی را پوشش می‌دهد. همچنین از لحاظ درصد فراوانی باد آرام به‌غیراز پیکربندی Exp(2) در شرایط مرزی FNL بقیه پیکربندی‌ها با کم برآوردی همراه بوده و بهترین تخمین درصد فراوانی باد آرام نسبت به داده‌های مشاهداتی در پیکربندی‌های Exp(5,6) به‌دست‌آمده است، ضمناً هر دو پایگاه داده در تخمین میانگین سرعت باد مشابه هم عمل نموده و با کم برآوردی نسبت به داده‌های مشاهداتی همراه هستند و فقط در پیکربندی Exp(3) بهترین برآورد به‌دست‌آمده است.

برون‌داد مدل در شبیه‌سازی باد ژانویه (فصل زمستان) نسبت به جولای (فصل گرم) موفق‌تر بوده و با نگاه دقیق‌تر می‌توان گفت که برون‌داد مدل در پیکربندی‌های مختلف با افزایش سرعت باد در شبیه‌سازی دارای برآورد دقیق‌تری است و این امر مبین آن است که مدل در شبیه‌سازی جهت و سرعت باد منتج از سامانه‌های دینامیکی نسبت به جریانات محلی قوی‌تر بوده و در برآورد جریان‌های محلی در غیاب سامانه‌های دینامیکی دارای ضعف بیشتری است (شکل ۴). بررسی‌ها نشان می‌دهد طرح‌واره‌های لایه‌مرزی و لایه سطحی تخمین دقیقی از واداشت‌های محلی نداشته و نیز شبیه‌سازی توپوگرافی منطقه با استفاده از داده‌های استاتیکی به‌درستی انجام نگردیده است.



شکل ۴. گلاب داده‌های مشاهده‌ای و برون‌داد مدل با پیکربندی‌های مختلف و شرایط مرزی ERA5 و FNL در ماه‌های منتخب (ردیف اول داده‌های مشاهده‌ای، ردیف‌های بعدی برون‌داد مدل به ترتیب Exp(1) تا Exp(7))

#### تحلیل همبستگی جهت و سرعت باد

جهت باد: با بررسی و تحلیل همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و برون‌داد مدل در پیکربندی‌های مختلف برای متغیر جهت باد در شکل و جدول (۵) نتایج زیر حاصل گردید. در ماه ژانویه توزیع مقادیر همبستگی جهت باد بین داده‌های مشاهده‌ای و برون‌داد مدل در پیکربندی‌های مختلف با شرایط مرزی ERA5 نشان می‌دهد پیکربندی Exp(3) با مقدار ۰/۲۷ درصد نسبت به سایر پیکربندی‌ها از عملکرد بهتری برخوردار است در صورتی که با شرایط مرزی FNL، Exp(6) با مقدار ۰/۳۹ درصد دارای همبستگی قوی‌تری بوده و در این ماه بدون در نظر گرفتن آماره‌های دیگر، شرایط مرزی FNL منجر به نتایج بهتر می‌گردد. در ماه می بیشینه همبستگی در بین پیکربندی‌های مختلف برابر با ۰/۳۶ درصد برای داده‌های ERA5 و ۰/۳۲ درصد در FNL به ترتیب در Exp(4) و Exp(7) به دست آمده که نشان می‌دهد شرایط مرزی ERA5 توانسته است در این ماه در شبیه‌سازی جهت باد موفق‌تر عمل کند. در ماه جولای بیشینه همبستگی بین پیکربندی‌ها از ۰/۲۴ تا ۰/۴۳ درصد برای داده‌های ERA5 و از ۰/۱۴ تا ۰/۴۳ درصد برای FNL به دست آمده و به ترتیب پیکربندی‌های Exp(3) و Exp(4) دارای بهترین عملکرد بوده و طبق مقادیر بیشینه همبستگی این ماه، شرایط مرزی‌ها دارای توانمندی یکسانی در شبیه‌سازی جهت باد برخوردارند.

در ماه اکتبر مشابه ژانویه عملکرد شرایط مرزی‌ها در شبیه‌سازی جهت باد کاهش یافته و پیکربندی Exp(2) با ضعیف‌ترین عملکرد همراه بوده است. با بررسی میانه آماره همبستگی جهت باد مطابق شکل (۵) می‌توان گفت که هر دو داده شرایط مرزی در شبیه‌سازی جهت باد در ماه اکتبر نسبت به سه ماه دیگر با ضعف قابل توجهی همراه بوده و بیشترین همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و برون‌داد مدل در دو ماه ژانویه و می مشاهده می‌گردد.

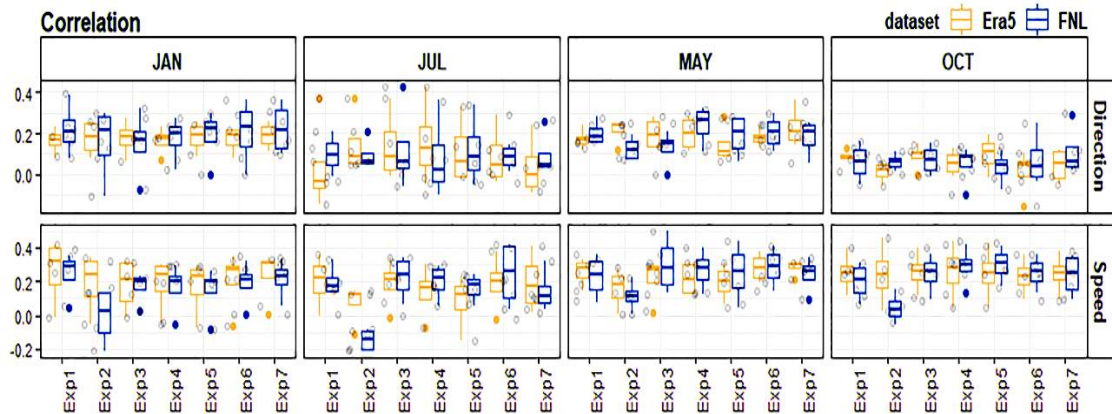
سرعت باد: در ماه ژانویه دامنه تغییرات بیشینه همبستگی سرعت باد در پیکربندی‌های مختلف از ۰/۲۹ در Exp(5) تا ۰/۴۲ در Exp(1) با داده‌های ERA5 و نیز از ۰/۱۳ در Exp(2) تا ۰/۳۵ درصد در Exp(1) برای داده‌های FNL تغییر کرده به طوری که پیکربندی Exp(5) با شرایط مرزی ERA5 و FNL با ضعیف‌ترین عملکرد همراه بوده است. در ماه می مقادیر بیشینه همبستگی در پیکربندی‌های مختلف با شرایط مرزی FNL به مراتب بیشتر از ERA5 بوده به طوری که در پیکربندی Exp(3) برابر ۵۰ درصد است. ماه جولای با شرایط مرزی ERA5 و FNL حداقل همبستگی در پیکربندی Exp(2) مشاهده گردید و در سایر پیکربندی‌ها، با داده‌های FNL دامنه تغییرات از ۰/۲۴ در Exp(5) تا ۰/۴۲ در Exp(6) در نوسان بوده در حالی که این مقادیر با داده‌های ERA5 از ۰/۲۴ در Exp(7) تا ۰/۴۳ در Exp(4) همراه بوده است. نتایج نشان می‌دهد در این ماه از لحاظ مقادیر بیشینه همبستگی، شرایط مرزی ERA5 نسبت به FNL عملکرد موفق‌تری داشته است. در ماه اکتبر مقادیر کمینه همبستگی سرعت باد با داده‌های FNL در پیکربندی‌های مختلف از ۰/۱۷ درصد برای پیکربندی Exp(5) تا ۰/۰۵- در Exp(2) همراه بوده و همچنین این مقادیر با شرایط مرزی ERA5 از ۰/۰۳ در Exp(2) تا ۰/۱۱ درصد در Exp(1) دارای نوسان بوده است. نتایج همبستگی پیکربندی‌های مختلف در ماه اکتبر نشان می‌دهد از لحاظ مقادیر بیشینه، شرایط مرزی ERA5 نسبت به FNL عملکرد موفق‌تری داشته است.

تحلیل و بررسی میانه آماره همبستگی سرعت باد در شکل (۵) بیانگر این است که به استثنای ژانویه در ماه‌های می، جولای و اکتبر، شرایط مرزی FNL با عملکرد بهتری نسبت به ERA5 همراه بوده و پیکربندی Exp(2) با شرایط مرزی FNL عموماً عملکرد خیلی ضعیفی را نسبت به سایر پیکربندی‌ها برای برآورد سرعت باد از خود نشان داده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در دو ماه ژانویه و می به علت درصد فراوانی بالای باد در محدوده سرعت‌های بیشینه، برون‌داد مدل در پیکربندی‌های مختلف برای متغیر جهت باد از همبستگی بهتری نسبت به ماه جولای و اکتبر برخوردار است و این امر مؤید خروجی گلبادها و نیز مبین ضعف برون‌داد مدل در برآورد و شبیه‌سازی جهت و سرعت باد توسط عوامل محلی در ماه‌های جولای و اکتبر است. بررسی همبستگی متغیر سرعت باد طبق برون‌داد مدل نشان می‌دهد ماه می دارای بهترین عملکرد بوده و با بیشینه میانگین ماهانه سرعت باد در داده‌های مشاهداتی تطابق دارد.

#### جدول ۵. نتایج آماره همبستگی جهت و سرعت باد با شرایط مرزی ERA5 و FNL

(سطح معنی‌داری همبستگی ها ۰,۰۵ در نظر گرفته شده است)

EXP	JAN				MAY				JUL				OCT			
	ERA	FN	ERA	FN	ERA	FN	ERA	FN	ERA	FN	ERA	FN	ERA	FN	ERA	FN
	5	L	5	L	5	L	5	L	5	L	5	L	5	L	5	L
	DIR		SPD		DIR		SPD		DIR		SPD		DIR		SPD	
EXP 1	0.23	0.3	0.42	0.3	0.24	0.2	0.33	0.3	0.37	0.2	0.36	0.33	0.13	0.1	0.40	0.3
		9		5		8		6		1				6		1
EXP 2	0.26	0.3	0.34	0.1	0.25	0.1	0.28	0.2	0.37	0.2	0.14	-	0.06	0.1	0.46	0.1
		0		3		9		2		1		0.08		1		5
EXP 3	0.27	0.3	0.32	0.2	0.28	0.2	0.31	0.5	0.37	0.4	0.34	0.34	0.15	0.1	0.40	0.3
		2		3		1		0		3				5		6
EXP 4	0.23	0.2	0.30	0.2	0.28	0.3	0.31	0.4	0.43	0.3	0.30	0.29	0.13	0.1	0.44	0.4
		7		9		2		0		6				2		2
EXP 5	0.26	0.3	0.29	0.2	0.28	0.2	0.31	0.4	0.33	0.3	0.23	0.24	0.19	0.1	0.43	0.4
		0		6		7		4		4				1		1
EXP 6	0.22	0.3	0.35	0.3	0.24	0.3	0.38	0.4	0.29	0.1	0.38	0.42	0.10	0.2	0.36	0.3
		6		2		0		1		4				5		6
EXP 7	0.26	0.3	0.34	0.3	0.36	0.2	0.32	0.3	0.24	0.2	0.41	0.32	0.12	0.2	0.38	0.3
		6		3		5		4		6				9		5



شکل ۵. نمودار گرافیکی توزیع آماری همبستگی جهت و سرعت باد در دو مجموعه داده ERA5 و FNL  
(ردیف بالا همبستگی متغیر جهت باد و ردیف پایین متغیر سرعت باد است سطح معنی‌داری همبستگی‌ها ۰,۰۵ در نظر گرفته شده است)

### تحلیل اریبی جهت و سرعت باد

از دیگر معیارهای انتخابی برای بررسی دقت شبیه‌سازی جهت و سرعت باد، اریبی و به عبارتی میزان انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهداتی است که نتایج آن در شکل و جدول ۶ نشان داده شده است. طبق فرمول شماره ۱، مثبت بودن مقدار اریبی بیانگر کم برآورد مدل و مقادیر منفی بیانگر بیش برآورد مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی است.

جهت باد: نتایج نشان می‌دهند میزان انحراف متغیر جهت باد شبیه‌سازی شده از مشاهداتی در پیکربندی‌ها با عملکرد ضعیفی همراه بوده‌اند و بیشترین انحراف مثبت و منفی با داده‌های ERA5 برابر با  $۷۳/۰۶$  درجه در پیکربندی Exp(5) ماه اکتبر تا  $-۶۲/۰۶$  درجه در Exp(1) جولای ثبت شده و با داده‌های FNL این مقادیر از  $۷۵/۰۹$  در پیکربندی Exp(5) ماه اکتبر تا  $-۷۴/۷$  درجه در Exp(4) جولای در تغییر است. در ماه ژانویه میزان کمترین انحراف در داده‌های ERA5 برابر با  $۱/۵$  درجه برای پیکربندی Exp(2) و بیشترین انحراف برابر  $۶۹/۲$  درجه برای پیکربندی‌های Exp(4,6) است اما در FNL کمترین میزان انحراف در پیکربندی Exp(2) با مقدار  $۱۱/۳$  و بیشترین مقدار آن در Exp(7) با مقدار  $۶۹/۳$  درجه شکل گرفته است.

در ماه می میزان کمترین انحراف در ERA5 برابر با  $-۱$  درجه برای پیکربندی Exp(3) و بیشترین انحراف برابر  $-۳۴/۸$  درجه برای Exp(4) به دست آمده است اما در داده‌های FNL کمترین میزان انحراف در پیکربندی Exp(7) با مقدار  $-۳/۸$  و بیشترین مقدار آن در Exp(5) به مقدار  $۴۷/۱$  درجه مشاهده گردید. در ماه جولای میزان انحراف منفی در تمام پیکربندی‌ها برای داده‌های FNL به بیشینه مقدار خود رسیده و ضعف مدل را در برآورد جهت باد در ماه‌های گرم نشان می‌دهد. در ماه اکتبر طبق شکل (۶) نوسانات زیادی در میزان اریبی نسبت به داده‌های مشاهداتی مشاهده می‌گردد؛ اما علیرغم این نوسانات در شرایط میانگین عملکرد قابل قبولی نسبت به سایر ماه‌ها مشاهده می‌گردد.

سرعت باد: بررسی میزان انحرافات متغیر سرعت باد شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهداتی نشان داد در شرایط مرزی ERA5 تغییرات اریبی در ماه ژانویه بین  $۰$  در پیکربندی Exp(1) تا  $-۲/۷$  متر بر ثانیه در Exp(3) همراه بوده و در داده‌های FNL این تغییرات از  $۰/۳$  در پیکربندی Exp(2) تا  $-۲/۳$  متر بر ثانیه در Exp(3) به دست آمده است، نتایج نشان می‌دهد. داده‌های ERA5 و FNL در تمام پیکربندی‌ها به استثنای Exp(2) بیش برآوردی همراه است. بیشترین مقادیر مثبت و منفی اریبی در ماه می بین  $۱$  تا  $-۱/۹$  در داده‌های ERA5 و در FNL بین  $۱/۱$  تا  $-۱/۹$  متر بر ثانیه ثبت گردید و

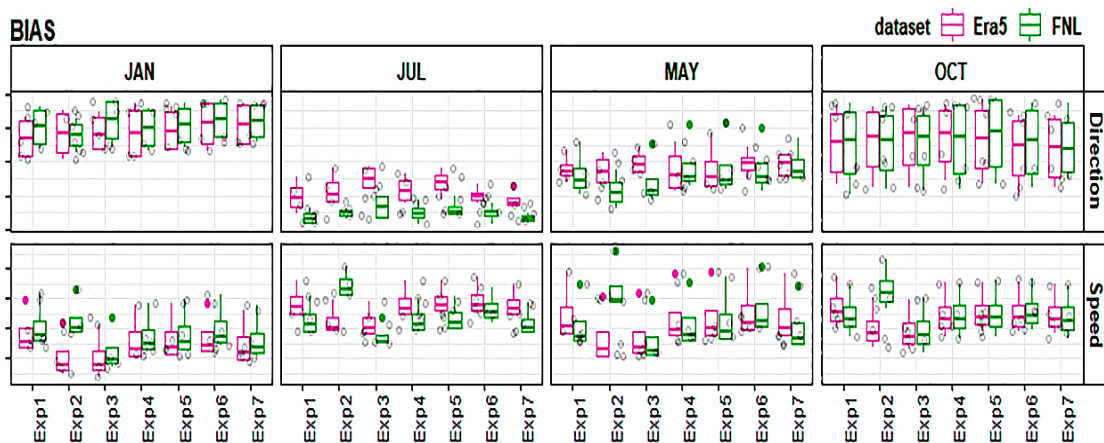


نیز در ماه جولای دامنه نوسان این مقادیر با شرایط مرزی ERA5 بین ۰/۷ تا ۱/۲- و در FNL از ۱/۸ تا ۱/۵- متر بر ثانیه بوده است، همچنین این مقادیر در ماه اکتبر با داده‌های ERA5، از ۰/۸ تا ۱/۷- و در FNL بین ۱/۳ تا ۱/۸- متر بر ثانیه به دست آمده است. برحسب نتایج حاصله کمترین میزان متوسط اریبی پیکربندی‌ها در ماه جولای حاصل گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد برحسب آماره اریبی برخلاف همبستگی، پیکربندی Exp(2) با شرایط مرزی FNL دارای بهترین عملکرد در برآورد متغیر سرعت باد در تمام ماه‌ها است.

نتایج بررسی میانه آماره اریبی (شکل ۶) گویای شبیه‌سازی سرعت باد با شرایط مرزی ERA5 و FNL در ماه‌های ژانویه و می نسبت به سایر ماه‌ها ضعیف‌تر بوده و متقابلاً در جولای دارای عملکرد بهتری است، به طوری که برای متغیر سرعت باد، افزایش میانگین سرعت باد با بیشینه شدن اریبی و بالعکس آن، با کمینه شدن مقدار اریبی همراه است. برابر پرونداد مدل با پیکربندی‌های مختلف، عموماً اریبی متغیر سرعت باد دارای مقادیر منفی (بیش برآورد) است و مؤید این است که تمامی پیکربندی‌ها در شبیه‌سازی اثر اصطکاک سطحی دارای ضعف بوده و یا داده‌های استاتیکی مدل، توپوگرافی را به درستی شبیه‌سازی نمی‌نماید. مقدار اریبی متغیر جهت باد در ماه‌های ژانویه و اکتبر با انحراف مثبت و در ماه‌های می و جولای با انحراف منفی همراه است که مبین کم برآورد نمودن مدل در ماه‌های سرد و بیش برآورد نمودن آن در ماه‌های گرم نسبت به داده‌های مشاهداتی است (شکل ۶).

جدول ۶. نتایج آماره اریبی جهت و سرعت باد با شرایط مرزی ERA5 و FNL

EXP	JAN				MAY				JUL				OCT			
	ERA5		FNL		ERA5		FNL		ERA5		FNL		ERA5		FNL	
	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD		
EXP1	52.51	64.59	-0.02	0.19	12.96	22.41	0.90	0.47	-19.07	-55.71	0.63	0.06	67.15	68.73	0.75	0.51
EXP2	1.85	11.26	-0.79	0.31	11.34	-9.47	0.10	1.62	-7.52	-54.81	-0.02	1.07	65.92	65.89	0.01	1.33
EXP3	58.97	70.95	-0.89	-0.65	17.92	22.15	0.20	-0.03	-5.94	-40.06	-0.10	-0.62	67.12	62.74	-0.04	0.02
EXP4	7.42	13.48	-1.94	-1.76	-34.77	-27.66	-1.29	-1.44	-49.74	-74.67	-0.54	0.04	-22.53	-32.17	-1.25	-1.33
EXP5	64.63	68.89	-0.18	-0.05	32.82	47.07	0.91	0.72	-8.66	-40.07	0.60	0.06	73.61	75.93	0.57	0.58
EXP6	12.35	27.88	-1.83	-1.59	-20.99	-34.58	-1.10	-0.96	-49.95	-73.60	-0.54	-0.78	-40.54	-30.42	-1.09	-1.05
EXP7	21.64	22.39	-2.11	-1.91	-21.16	-19.97	-1.28	-1.57	-53.31	-70.18	-0.58	-1.18	-29.84	-20.84	-1.15	-1.36



شکل ۶. نمودار گرافیکی توزیع آماری اریبی جهت و سرعت باد در دو مجموعه داده ERA5 و FNL

### تحلیل RMSE جهت و سرعت باد

نتایج RMSE با پیکربندی‌های مختلف مدل در شکل و جدول (۷) ارائه شده و به عنوان یکی دیگر از معیارهای ارزیابی پرونداد مدل با داده‌های مشاهداتی برای متغیر جهت و سرعت باد در نظر گرفته شده است. جهت باد: مطابق انتظار با توجه به نتایج دو معیار همبستگی و اریبی، آماره میانگین مجذور خطا نیز برای متغیر جهت باد نسبت به متغیر سرعت باد با نتایج ضعیف‌تری همراه است. به طوری که در ماه ژانویه حداقل میانگین مجذور خطا از ۱۱۲/۸

برای پیکربندی Exp(5) تا حداکثر ۱۴۳ درجه برای Exp(2) با داده‌های ERA5 به‌دست‌آمده است. این مقادیر برای FNL برابر با ۱۰۶/۳ در Exp(1) و ۱۴۲/۸ درجه برای Exp(3) حاصل گردید.

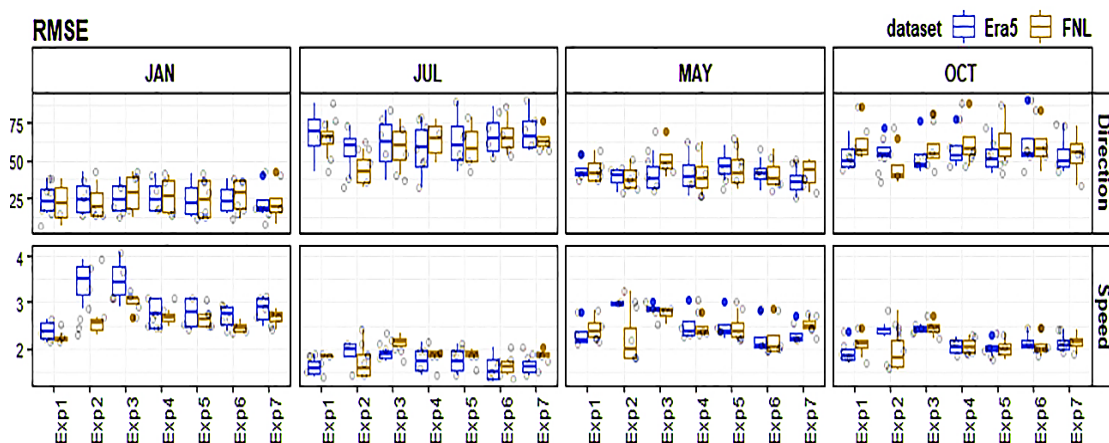
در ماه می همانند ژانویه مقادیر خطا برای شبیه‌سازی متغیر جهت باد با شرایط مرزی ERA5 و FNL نیز قابل‌توجه است به‌طوری‌که متوسط میانگین مجذور خطا در داده‌های ERA5 برابر ۱۴۲/۱ و در FNL برابر ۱۴۵ درجه است. در ماه جولای این روند صعودی ادامه یافته به‌طوری‌که حداکثر میانگین مجذور خطا با داده‌های ERA5 در پیکربندی Exp(7) برابر ۱۹۰/۹ و برای داده‌های FNL در Exp(6) مقدار ۱۸۲/۳ درجه به‌دست‌آمده است. در ماه اکتبر نیز بیشترین میانگین مجذور خطا با شرایط مرزی ERA5 در پیکربندی Exp(6) برابر ۱۹۰/۱ و در FNL برابر ۱۸۸/۶ متعلق به پیکربندی Exp(4) است. این نتایج هم‌راستا با مقادیر آماره‌های اریبی و همبستگی توانمندی نسبی پیکربندی‌های مختلف مدل را در شبیه‌سازی متغیر جهت باد نشان می‌دهند.

سرعت باد: برای متغیر سرعت باد آماره میانگین مجذور خطا نسبت به جهت باد با نتایج بهتری همراه است به‌طوری‌که در ماه ژانویه با داده‌های ERA5، دامنه تغییرات از ۲/۲ تا ۴/۱ متر بر ثانیه در پیکربندی‌های Exp(1) و Exp(3) و در FNL از ۲/۱ تا ۳/۱ متر بر ثانیه در Exp(1) و Exp(3) به‌دست‌آمده است که حاکی از مزیت نسبی شرایط مرزی FNL با متوسط ۲/۶ در ERA5 با مقدار ۲/۹ متر بر ثانیه است. در ماه می با پیکربندی Exp(6) مقدار ۲/۲ متر بر ثانیه کمترین و Exp(2) با ۳ متر بر ثانیه بیشترین میزان میانگین مجذور خطا را در ERA5 به همراه داشته و با داده‌های FNL این مقادیر در Exp(6) با ۲/۲ و Exp(3) با ۲/۸ متر بر ثانیه کمترین و بیشترین میانگین مجذور خطا را تشکیل داده‌اند. در ماه جولای با شرایط مرزی ERA5 پیکربندی‌های Exp(1,6,7) دارای کمترین میزان میانگین مجذور خطا با مقدار ۱/۶ متر بر ثانیه همراه بوده‌اند که از کمینه مقادیر میانگین مجذور خطاهای به دست در ماه‌های ژانویه و می کمتر است. در شرایط مرزی FNL همانند ERA5 این مقدار برابر ۱/۶ متر بر ثانیه برای پیکربندی Exp(6) به‌دست‌آمده و مقدار آن از دو ماه ژانویه و می کمتر است. در ماه اکتبر دامنه تغییرات میانگین مجذور خطا در داده‌های ERA5 محدودتر بوده و از ۱/۹ در Exp(1) تا ۲/۴ متر بر ثانیه در Exp(2) متغیر بوده و در داده‌های FNL این مقادیر از ۲ تا ۲/۵ متر بر ثانیه در پیکربندی‌های Exp(2) و Exp(3) در نوسان است در مجموع به نظر می‌رسد شبیه‌سازی متغیر سرعت از عملکرد مناسب‌تری نسبت به جهت باد برخوردار هست.

تحلیل و بررسی میانه آماره میانگین مجذور خطا در شکل (۷) نشان می‌دهد که شبیه‌سازی متغیر جهت باد در ماه ژانویه و می نسبت به دو ماه دیگر دارای خطای کمتری است. بیشترین خطای شبیه‌سازی در ماه جولای (فصل گرم) دیده می‌شود. به‌طوری‌که می‌توان نتیجه گرفت هر قدر جریانات سطحی با منشأ عوامل محلی شکل گرفته باشد میزان خطای شبیه‌سازی متغیر جهت باد توسط مدل افزایش می‌یابد، هر چند با روند صعودی سرعت باد، میزان خطا کاهش می‌یابد. این امر مبین آن است که نتایج به‌دست‌آمده از آماره‌های همبستگی، اریبی و گلباده‌ها را تأیید و تصدیق می‌نماید. برای متغیر سرعت باد نتایج برخلاف جهت باد با افزایش میانگین ماهانه سرعت باد، مقدار اریبی و میانگین مجذور خطا افزایش یافته و با کاهش آن، مقدار خطا و انحراف از داده‌های مشاهداتی به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابند. میزان میانگین مجذور خطای سرعت باد در ماه‌های جولای و اکتبر نسبت به دو ماه دیگر دارای عملکرد بهتری است، علیرغم خطای بیشینه شبیه‌سازی متغیر سرعت باد در ماه ژانویه نسبت به سایر ماه‌ها، برون‌داد مدل با داده‌های FNL دارای اختلاف قابل‌توجهی با ERA5 است؛ که بیانگر برتری FNL در این ماه است اما در سایر ماه‌ها هر دو داده مرزی از شرایط شبیه‌سازی یکسانی برخوردارند (شکل ۷).

جدول ۷. نتایج آماره RMSE جهت و سرعت باد با شرایط مرزی ERA5 و FNL

EXP	JAN				MAY				JUL				OCT			
	ERA5		FNL		ERA5		FNL		ERA5		FNL		ERA5		FNL	
	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD		
EXP 1	115.2	106.3	2.15	2.12	140.4	137.0	2.11	2.21	143.2	151.4	1.38	1.82	144.4	152.3	1.70	1.81
EXP 2	113.0	113.6	2.87	2.29	128.9	130.5	2.89	1.80	138.5	132.5	1.84	1.42	152.4	135.2	2.27	1.55
EXP 3	115.8	112.8	2.90	2.68	129.5	138.8	2.81	2.52	137.0	140.2	1.73	2.01	143.2	150.7	2.35	2.23
EXP 4	116.0	113.9	2.44	2.48	126.4	126.9	2.25	2.28	132.4	148.8	1.43	1.82	145.8	146.5	1.89	1.85
EXP 5	112.8	110.9	2.42	2.48	136.6	130.7	2.21	2.18	142.7	149.5	1.41	1.82	141.5	149.3	1.84	1.78
EXP 6	114.7	111.1	2.36	2.33	130.4	134.2	2.00	1.95	152.1	153.3	1.33	1.42	152.9	142.8	1.99	1.83
EXP 7	115.3	107.6	2.47	2.42	125.5	129.2	2.16	2.42	156.3	157.0	1.43	1.82	143.1	133.2	1.90	1.86



شکل ۷. نمودار گرافیکی توزیع آماری RMSE جهت و سرعت باد در دو مجموعه داده ERA5 و FNL

### تحلیل MAE جهت و سرعت باد

آماره میانگین خطای مطلق (MAE) دیگر معیار ارزیابی برونداد مدل با داده‌های مشاهداتی برای متغیر جهت و سرعت باد است که نتایج آن در شکل و جدول (۸) ارائه شده است.

جهت باد: طبق نتایج، میانگین MAE متغیر جهت باد در ماه ژانویه با داده‌های ERA5 از  $100/3$  در پیکربندی  $Exp(7)$  تا  $129/7$  درجه در  $Exp(4)$  متغیر بود. به‌طور میانگین بین پیکربندی‌های مختلف اجرا شده توسط مدل برابر  $102/8$  درجه به دست آمد. در FNL این مقادیر برابر  $99/8$  در  $Exp(7)$  تا  $104/8$  در  $Exp(3)$  و میانگین بین پیکربندی‌ها برابر  $100/9$  درجه ثبت گردیده است. در ماه می مقدار میانگین بین پیکربندی‌ها در شرایط مرزی ERA5 و FNL برابر  $113/3$  و  $117/4$  درجه به دست آمد. ماه جولای میانگین بین پیکربندی‌ها همچنان دارای روند افزایشی بوده و برونداد مدل با داده‌های ERA5 و FNL مقادیر  $130/7$  و  $127/4$  درجه به دست آمد. همچنین در ماه اکتبر با داده‌های ERA5 مقدار آن برابر  $128/4$  و FNL برابر  $132/3$  درجه به دست آمده است.

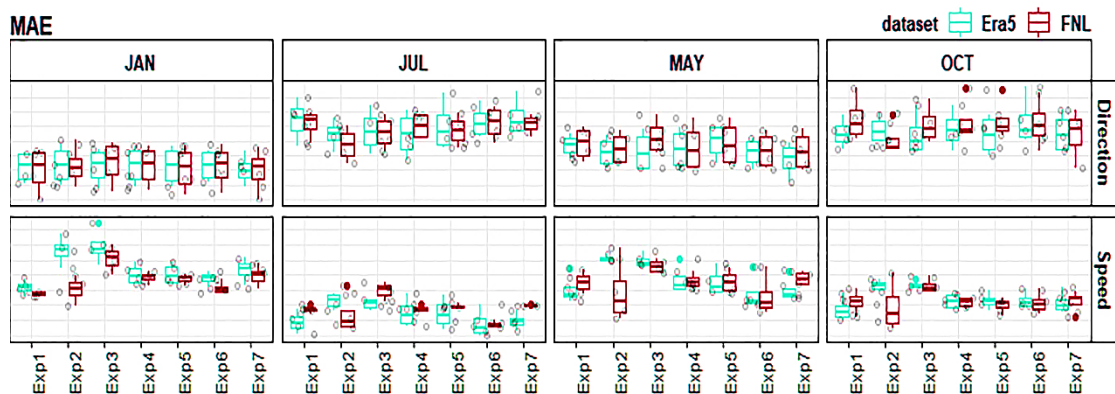
سرعت باد: بیشینه مقدار MAE برای شبیه‌سازی سرعت باد در ماه ژانویه با شرایط مرزی ERA5 و FNL به ترتیب  $2/9$  و  $2/5$  متر بر ثانیه در پیکربندی  $Exp(3)$  و کمینه مقدار آن با داده‌های ERA5 در پیکربندی  $Exp(1)$  برابر  $1/6$  و داده‌های FNL برابر  $1/5$  متر بر ثانیه در  $Exp(2)$  ثبت شده است. در ماه می بیشینه MAE با شرایط مرزی ERA5 متعلق به  $Exp(3)$  و با داده‌های FNL در پیکربندی  $Exp(2)$  شکل گرفته است. مقدار کمینه آن به ترتیب در پیکربندی‌های  $Exp(6)$  و  $Exp(2)$  به دست آمده است. در ماه جولای دامنه بیشینه میانگین خطای مطلق با شرایط مرزی ERA5 بین پیکربندی‌ها از  $1$  در  $Exp(1,6)$  تا  $1/7$  متر بر ثانیه در  $Exp(2,4,5)$  و در FNL با مقدار  $1/1$  در  $Exp(2,6)$  تا  $1/9$  متر بر ثانیه در  $Exp(3)$  دیده شد. در ماه اکتبر نیز مقادیر MAE در پیکربندی‌ها به‌طور میانگین برابر  $1/6$  متر بر ثانیه در جفت داده‌های شرایط مرزی بوده است.



نتایج تحلیل میانه آماره میانگین خطای مطلق از برون‌داد پیکربندی‌های مختلف مدل دقیقاً مطابق خروجی‌های آماره میانگین مجذور خطا بوده و کاملاً روند شکل (۷) را تأیید می‌کند. می‌توان گفت که نتایج آماره میانگین خطای مطلق صحه‌ای بر خروجی آماره‌های دیگر است (جدول ۸). مقادیر MAE برای سرعت باد در ماه‌های جولای و اکتبر با عملکرد بهتری نسبت به ماه‌های ژانویه و می همراه بوده و بدترین عملکرد در ماه ژانویه دیده می‌شود و نتایج متغیر سرعت این آماره را می‌توان همانند آماره میانگین مجذور خطا تفسیر نمود. علیرغم خطای بیشینه میانگین خطای مطلق در ماه‌های ژانویه نسبت به سایر ماه‌ها، شرایط مرزی FNL عملکرد بهتری نسبت به ERA5 در پیش‌بینی سرعت باد ماه ژانویه نشان داده است. در سایر ماه‌ها عملکرد داده‌های مرزی تقریباً دارای شرایط یکسانی هستند. نتایج شبیه‌سازی جهت باد بر اساس میانگین خطای مطلق دقیقاً همانند میانگین مجذور خطا، در دو ماه ژانویه و می نسبت به دو ماه دیگر با خطای کمتری همراه بوده که ضعف عنوان‌شده در آماره‌های قبلی کاملاً مشهود است. تقریباً مقدار MAE حاصله در داده‌های مرزی FNL و ERA5 مشابه بوده و بر اساس نتایج مشاهده‌شده در پیکربندی‌های مختلف برون‌داد مدل، جهت داده‌های مرزی در شبیه‌سازی متغیر جهت باد در ماه گرم با خطای بیشتری همراه هستند (شکل ۸).

جدول ۸. نتایج آماره MAE جهت و سرعت باد با شرایط مرزی ERA5 و FNL

EXP	JAN				MAY				JUL				OCT			
	ERA5		FNL		ERA5		FNL		ERA5		FNL		ERA5		FNL	
	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD	DIR	SPD		
EXP 1	90.2	80.3	1.64	1.63	107.4	105.1	1.57	1.69	116.7	118.1	1.02	1.36	114.4	121.3	1.26	1.29
EXP 2	89.4	88.4	2.10	1.49	101.4	104.6	2.24	1.27	112.4	104.7	1.41	1.12	120.8	115.4	1.73	1.11
EXP 3	87.4	85.1	2.15	2.00	101.0	111.9	2.11	2.03	110.6	113.5	1.40	1.55	112.7	119.4	1.79	1.72
EXP 4	103.5	86.8	1.84	1.82	99.5	101.4	1.74	1.78	106.4	121.8	1.15	1.37	113.6	125.1	1.45	1.42
EXP 5	88.5	83.5	1.86	1.83	104.8	104.0	1.71	1.69	115.1	115.2	1.10	1.43	110.1	123.5	1.41	1.32
EXP 6	91.5	83.7	1.81	1.70	100.8	100.8	1.51	1.37	122.9	118.6	0.98	1.12	120.7	112.8	1.46	1.35
EXP 7	88.9	79.6	1.82	1.77	92.0	100.6	1.62	1.82	125.6	122.9	1.07	1.48	112.9	101.7	1.37	1.30



شکل ۸. نمودار گرافیکی توزیع آماری MAE جهت و سرعت باد در دو مجموعه داده ERA5 و FNL

## تحلیل نتایج جهت و سرعت باد

با بررسی مشخصات ایستگاه‌های مشاهداتی طبق جدول (۹)، همه ایستگاه‌های منتخب به‌طور متوسط دارای حداقل ۱۱۰ متر اختلاف ارتفاع نسبت به هم بوده و اختلاف بین پایین‌ترین (مهرآباد) و بالاترین (شمیران) ایستگاه برابر ۳۶۰ متر است. با توجه به نتایج حاصله از ایستگاه‌های منتخب به نظر می‌رسد این مشخصه می‌تواند در میزان دقت شبیه‌سازی‌ها توسط مدل تحقیقاتی پیش‌بینی وضع هوا اثرگذار باشد. به‌طور قطع می‌توان بیان نمود که مدل نمی‌تواند به علت پایین بودن تفکیک افقی در دامنه داخلی (۷ کیلومتر) و داده‌های استاتیکی (مانند DEM و پوشش زمین) به‌طور پیش‌فرض این داده‌ها

در مدل دارای تفکیک افقی تقریبی ۱ کیلومتر هستند)) توپوگرافی را به‌درستی شبیه‌سازی نماید. پس به‌طور قطع نمی‌توان ارتباطی معنی‌داری بین اختلاف ارتفاع ایستگاه‌ها و برون‌داد مدل ایجاد نمود؛ اما بسیار واضح و روشن است که عدم معرفی دقیق پستی بلندی‌های زمین به مدل باعث ضعف عملکرد مدل است. به‌طوری‌که قادر به شبیه‌سازی درست جریانات سطحی منتج از عوامل محلی است. بررسی نتایج آماره اریبی برای متغیر جهت باد با داده‌های مرزی نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع، اریبی در ماه‌های ژانویه و اکتبر روند صعودی دارد. برای سرعت باد این روند تقریباً در اکثر موارد با افزایش ارتفاع ایستگاه افزایشی بوده و بر مقدار اریبی افزوده می‌گردد. با بررسی میزان همبستگی جهت باد، ایستگاه‌ها برای ماه‌های ژانویه و می‌روند کاهشی میزان همبستگی را با افزایش ارتفاع نشان می‌دهند. با توجه به موقعیت مکانی ایستگاه‌ها در شهر تهران می‌توان به پیچیدگی توپوگرافی منطقه مورد مطالعه نسبت به سطوح هموار و یکنواخت پی برد که این امر می‌تواند دارای تأثیر مثبت یا منفی در دقت شبیه‌سازی‌ها خصوصاً برای متغیر جهت و سرعت باد به لحاظ وابستگی شدید جریانات سطحی به توپوگرافی و شیب زمین باشد. طبیعتاً با توجه به نیاز مدل به داده‌های جغرافیایی با تفکیک افقی بالا (مانند توپوگرافی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، جنس خاک، رطوبت خاک و سپیدایی) و فقدان این داده‌ها در مدل تحقیقاتی پیش‌بینی وضع هوا، بستر ایجاد خطا و افزایش میزان عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌ها فراهم می‌گردد.

جدول شماره (۹) پیکربندی‌ها و شرایط مرزی منتخب جهت و سرعت باد برای ۴ ماه ژانویه، می، جولای و اکتبر را برای دو پایگاه داده شرایط مرزی نشان می‌دهد. در انتخاب پیکربندی برتر، برای آماره‌ها و ایستگاه‌ها وزن یکسان در نظر گرفته شده و در نهایت پیکربندی منتخب با بیشترین امتیاز تعیین و در ستون Final Experience نمایش داده شده است. برای تعیین شرایط مرزی برتر برحسب میانگین آماره‌ها در هر ایستگاه یک مدل انتخاب گردید به‌طوری‌که برای آماره‌ها وزن یکسان در نظر گرفته شده و در نهایت شرایط مرزی منتخب با بیشترین امتیاز بین ۷ پیکربندی تعیین و در ستون Final Dataset نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در بعضی از ماه‌ها به دلیل امتیاز یکسان دو پیکربندی یا هر دو داده مرزی، دو مورد منتخب به‌عنوان بهترین پیکربندی یا شرایط مرزی نمایش داده شده است.

جدول ۹. پیکربندی‌ها و شرایط مرزی منتخب برای متغیر جهت و سرعت باد در ۴ ماه (ژانویه، می، جولای و اکتبر)

(ردیف اول متغیر جهت باد، ردیف دوم متغیر سرعت باد)

Parameters	Final Experience														Final Dataset (Boundary conditions)		Month		
	Exp(1) (YSU)		Exp(2) (MYJ)		Exp(3) (QNSE)		Exp(4) (MYNN2)		Exp(5) (MYNN3)		Exp(6) (ACM2)		Exp(7) (MRF)		ER	FN			
	ER	FN	ER	FN	ER	FN	ER	FN	ER	FN	ER	FN	ER	FN					
Dir	A5	L	A5	L	A5	L	A5	L	A5	L	A5	L	A5	L	A5	L	×	□	JAN
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	□	□	×	□	MAY
	×	×	×	□	×	□	□	×	×	×	×	×	×	×	□	□	×	□	JUL
	×	×	×	×	□	×	×	×	□	×	×	×	×	×	□	□	×	□	OCT
SPD	□	□	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	□	JAN
	×	×	×	□	×	×	×	×	×	×	□	×	×	×	×	×	×	□	MAY
	×	×	×	□	×	×	×	×	×	×	□	□	×	×	□	×	×	×	JUL
	□	×	□	□	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	□	□	×	□	OCT

## نتیجه‌گیری

بر طبق مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته، موارد متعددی دارای نقش کلیدی در بهینه‌نمودن شبیه‌سازی توسط مدل WRF بوده و باعث کاهش بخش عمده‌ای از انحرافات و خطاهای موجود در برون‌داد مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی می‌گردد. از جمله می‌توان به نقش داده‌های شرایط اولیه و مرزی، طرح‌واره‌های لایه‌مرزی و سطحی، تفکیک افقی دامنه مدل، تفکیک مکانی داده‌های استاتیکی در راستای ریخت‌شناسی و مورفولوژی زمین، موقعیت مکانی و ارتفاع ایستگاه‌ها را نام برد. بر همین اساس در این مطالعه به بررسی نتایج ارزیابی برون‌داد مدل توسط شاخص‌های آماری برای تعیین مناسب‌ترین پیکربندی و شرایط مرزی (کمترین مقدار اریبی، میانگین مجذور خطا و میانگین خطای مطلق و بیشترین همبستگی) در شبیه‌سازی جهت و سرعت باد پرداخته و نتایج ماهانه آن مطابق جدول (۹) استخراج شده است و در راستای دو محور زیر دسته‌بندی گردید:

جهت باد: بر اساس مطالعات انجام‌شده، شبیه‌سازی متغیر جهت باد نسبت به سرعت باد عموماً با ضعف بیشتری همراه است. در ماه ژانویه بهترین شبیه‌سازی مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی برای متغیر جهت باد در پیکربندی‌های Exp(3) با داده ERA5 و Exp(1) با داده FNL صورت گرفته است. مقایسه مقادیر میانگین آماره‌ها نشان می‌دهد با کاربست داده‌های مرزی FNL، شبیه‌سازی جهت باد با عملکرد بهتری همراه است. مطابق جدول (۹) در ماه می، Exp(7) به‌عنوان قوی‌ترین پیکربندی در هر دو پایگاه داده مرزی انتخاب شده و همچنین داده‌های ERA5 با بیشترین توانمندی در شبیه‌سازی متغیر جهت باد، به‌عنوان شرایط مرزی برتر انتخاب شد. در ماه جولای با شرایط مرزی ERA5 و FNL بهترین پیکربندی‌ها در شبیه‌سازی جهت باد به ترتیب Exp(4) و Exp(2,3) بوده و طبق مقادیر میانگین آماره‌ها، هر دو پایگاه داده مرزی دارای توانمندی یکسان در شبیه‌سازی هستند. در ماه اکتبر (نماینده فصل پاییز) Exp(3,5) با شرایط مرزی ERA5 و Exp(7) با داده‌های FNL به‌عنوان بهترین پیکربندی در برآورد جهت باد انتخاب شده و با مقایسه مقادیر میانگین آماره‌ها، ERA5 با کمی برتری به‌عنوان شرایط مرزی برتر در نظر گرفته شده است.

سرعت باد: شبیه‌سازی سرعت باد نسبت به جهت باد به‌مراتب با نتایج بهتری همراه بوده است. با بررسی مقادیر میانگین آماره‌ها در شبیه‌سازی سرعت باد طبق جدول ۹، شرایط مرزی FNL در ۲ ماه ژانویه و می دارای برتری عملکرد بوده و در ماه جولای داده‌های ERA5 توانمندی بیشتری نشان داده و در ماه اکتبر هر دو پایگاه داده مرزی تقریباً از شرایط یکسانی برخوردارند. در ماه ژانویه برای شبیه‌سازی متغیر سرعت باد، پیکربندی Exp(1) در هر دو پایگاه داده مرزی دارای بهترین عملکرد است. در ماه می پیکربندی‌های Exp(2) و Exp(6) به ترتیب در شرایط مرزی FNL و ERA5 نزدیک‌ترین شبیه‌سازی را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی دارا هستند. با بررسی شبیه‌سازی سرعت باد در ماه جولای با داده‌های FNL و ERA5 به ترتیب Exp(2,6) و Exp(6) به‌عنوان بهترین پیکربندی‌ها انتخاب شده‌اند، اما در ماه اکتبر پیکربندی‌های Exp(2) و Exp(1,2) به ترتیب در داده‌های FNL و ERA5 با قوی‌ترین شبیه‌سازی سرعت باد همراه بوده‌اند.

برابر تحلیل‌های انجام‌شده با گلبادها و آماره به نظر می‌رسد مدل تحقیقات و پیش‌بینی وضع هوا در برآورد جهت باد ماه‌هایی که میانگین ماهانه سرعت باد کمتر بوده دارای ضعف بیشتری است و این‌طور می‌توان بیان نمود که در ماه‌های جولای و اکتبر باد عموماً توسط عوامل محلی با سرعت پایین شکل می‌گیرد، از طرف دیگر به دلیل داده‌های استاتیکی با تفکیک مکانی پایین، ریخت‌شناسی و مورفولوژی مدل دارای ضعف بوده و به علت وابستگی جریانات سطحی به توپوگرافی، باعث خطای زیاد در برآورد جهت باد توسط مدل در ماه‌های مذکور می‌گردد ولی این ضعف در ماه‌های سرد با عبور سامانه‌های دینامیکی و افزایش میانگین ماهانه سرعت باد کمتر می‌شود، اما برخلاف جهت باد، خروجی‌های برآورد سرعت باد توسط مدل نشان می‌دهد افزایش میانگین ماهانه سرعت باد باعث کاهش دقت مدل در برآورد متغیر سرعت باد می‌گردد به همین دلیل در تمامی آماره‌ها، ماه جولای از بهترین شبیه‌سازی در متغیر سرعت باد برخوردار است.

همان‌طوری که از نتایج این مطالعات برآمده ممکن است پیکربندی انتخابی برای جهت الزاماً برای سرعت با نتایج مطلوبی همراه نباشد و حتی ممکن است در ماه‌های سال با پیکربندی‌های مختلفی بتوان به بهترین خروجی دست‌یافت. با توجه به پیکربندی‌ها و داده‌های مرزی منتخب به نظر می‌رسد نتایج حاصله از این مطالعه علیرغم گستردگی بیشتر از لحاظ بازه زمانی، تعداد پیکربندی‌های مورد آزمون و داده‌های شرایط مرزی و اولیه، با تحقیقات سانتوس و همکاران (۲۰۱۳)، غلامی و همکاران (۱۳۹۷)، غفاریان و همکاران (۱۳۹۸) و لایقی و همکاران (۱۳۹۵) مورد تأیید قرار می‌گیرد.

## تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

## منابع

- ۱) غلامی، سیاوش؛ قادر، سرمد؛ خالقی زواره، حسن و غفاریان، پروین. (۱۳۹۸). حساسیت‌سنجی میدان باد سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF به شرایط اولیه و طرح‌واره‌های پارامترسازی لایه‌مرزی سیاره‌ای (مطالعه موردی: منطقه خلیج فارس). *مجله ژئوفیزیک / ایران*، ۱۳(۱)، ۱۴-۳۱.
- ۲) غفاریان، پروین؛ پگاه فر، نفیسه و محمدپور پنجاه، محمدرضا. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی میدان باد سطحی در منطقه دریای عمان با مدل WRF با شرایط مرزی متفاوت. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۵(۱)، ۲۰۹-۱۹۷.
- ۳) لایقی، بهزاد؛ سرمد، قادر؛ علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی و آزادی، مجید. (۱۳۹۵). حساسیت سنجی شبیه‌سازی‌های مدل WRF به پارامترسازی‌های فیزیکی در محدوده خلیج فارس و دریای عمان در زمان مونسون تابستانی. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۱(۱)، ۱-۱۹.

## References

- 1) Awan, N.K., Truhetz, H., & Gobiet, A. (2011). Parameterization-induced error characteristics of MM5 and WRF operated in climate mode over the alpine region: an ensemble-based analysis. *J. Clim.* 24 (12), 3107-3123.
- 2) Balzarini, A., Angelini, F., Ferrero, L., Moscatelli, M., Perrone, M. G., Pirovano, G., & Bolzacchini, E. (2014). Sensitivity analysis of PBL schemes by comparing WRF model and experimental data. *Geoscientific Model Development Discussions*, 7(5), 6133-6171.
- 3) Bernier, N. B., & S. Belair, (2011). High horizontal and vertical resolution limited-area model: Near-surface and wind energy forecast applications, *J. Appl. Meteor. Climatol*, 51, 1061-1078.
- 4) Carvalho, D., Rocha, A., Gomez-Gesteira, M., & Silva Santos, C., (2014). WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. *Appl. Energy* 117, 116-126.
- 5) Charabi, Y., Al Hinai, A., Al-Yahyai, S., Al Awadhi, T., & Choudri, BS. (2019). Offshore wind potential and wind atlas over the Oman Maritime Zone. *Energy, Ecology and Environment*, 4, 1-14.
- 6) Chauhan, H. M., Pomal, M. M., & Bhuta, G. N. (2013), A comparative study of wind forces on high-rise buildings as per is 875-Iii (1987) and proposed draft code (2011). *Global journal for research analysis*, 2 (5), 2277- 8160.
- 7) Chou M.-D., & Suarez, M. J. (1994). An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *NASA Tech. Memo.* 104606(3), 85pp.
- 8) Dee, D.P., Uppala, S.M, Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van den Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Holm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Kohler, 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., & Vitart, F., (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137 (656), 553-597.
- 9) Ghafarian, P., Pegahfar, N., & Mohammadpour Penchah, M. (2019). Simulation of the surface wind

- field by the WRF model in Oman Sea region with different initial and boundary conditions. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(1), 197-209. [In Persian].
- 10) Gholami, S., Ghader, S., Khaleghi Zavareh, H., & Ghafarian, P. (2019). Sensitivity of the WRF model surface wind simulations to initial conditions and planetary boundary layer parameterization schemes (case study: over Persian Gulf). *Iranian Journal of Geophysics*, 13(1), 14-31. [In Persian].
  - 11) Gholami, S., Ghader, S., Khaleghi-Zavareh, H., & Ghafarian, P. (2021). Sensitivity of WRF-simulated 10 m wind over the Persian Gulf to different boundary conditions and PBL parameterization schemes. *Atmospheric Research*, 247, 105147.
  - 12) Grell, G. A., & Freitas, S. R., (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 5233-5250.
  - 13) Hahmann, A., D. Rostkier-Edelstein, F. Vandenbergh, Y. Liu, S. Swerdlin, T. Warner, and R. Babarsky, 2010: A reanalysis system for the generation of mesoscale climatographies. *J. Appl. Meteor. Climatol*, 49, 954-972.
  - 14) Han, J. Y., Baik, J. J., & Lee, H. (2014). Urban impacts on precipitation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1), 17-30.
  - 15) Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, 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., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R., Holm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J.-N., (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146 (730), 1999-2049.
  - 16) Hong, S.-Y., & H.-L. Pan, (1996). Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.
  - 17) Hong, S.-Y., & J.-O. J. Lim, (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129-151.
  - 18) Hong, Song-You., Yign, N., Jimy, D., (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318-2341.
  - 19) Janjic, Zavisla I., (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.
  - 20) Layeghi, B., Ghader, S., Ali Akbari Bidokhti, A. A., & Azadi, M. (2017). Sensitivity of WRF model simulations to physical parameterization over the Persian Gulf and Oman Sea during summer monsoon. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(1), 1-19. [In Persian].
  - 21) Li, Ji-Hang., Guo, Zhen-Hai., & Wang, Hui-Jun. (2014) Analysis of Wind Power Assessment Based on the WRF Model. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(2), 126-131.
  - 22) Liu Y, Chen D, Li S, Chan PW. Discerning the spatial variations in offshore wind resources along the coast of China via dynamic downscaling. *Energy*, 160, 582-596.
  - 23) Mattar, C., Borvaran, D. (2016). Offshore wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile. *Renewable Energy*, 94, 22-31.
  - 24) Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
  - 25) Mughal, M.O., Lynch, M., Yu, F., McGann, B., Jeanneret, F., & Sutton, J., (2017). Wind modeling, validation, and sensitivity study using Weather Research and Forecasting model in complex terrain. *Environ. Model. Software* 90, 107-125.
  - 26) Nakanishi, M., & Niino, H. (2006). An improved Mellor-Yamada level 3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advecting fog. *Bound. Layer Meteor.* 119, 397-407.
  - 27) Pleim, Jonathan E. (2007). A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. *J. Appl. Meteor. Climatol*, 46, 1383-1395.
  - 28) Salvação, N., & Soares, CG. (2018). Wind resource assessment offshore the Atlantic Iberian coast with the WRF model. *Energy*, 145, 276-287.

- 29) Santos-Alamillos, F. J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Lara-Fanego, V., & Tovar-Pescador, J. (2013). Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(7), 1592-1609.
- 30) Shimada, S., & Ohsawa, T. (2011). Accuracy and characteristics of offshore wind speeds simulated by WRF. *SOLA*, 7, 21–24.
- 31) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note-475+ STR.
- 32) Sukoriansky, S., B. Galperin, & Perov, V. (2005). Application of a new spectral model of stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice. *Bound. –Layer Meteor.*, 117, 231–257.
- 33) Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, & Cuenca, R. H. (2004). Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. *20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, pp. 11–15.
- 34) Tuchtenhagen, P., De Carvalho, G. G., Martins, G., Da Silva, P. E., De Oliveira, C. P., Andrade, L. D. M. B., & e Silva, C. M. S. (2020). WRF model assessment for wind intensity and power density simulation in the southern coast of Brazil. *Energy*, 190, 116341.
- 35) Zhang, L., Xin, J., Yin, Y., Chang, W., Xue, M., Jia, D., & Ma, Y. (2021). *A Major Impact of WRF Planetary Boundary Layer Schemes on Simulation Accuracy of Vertical Wind Structure by 3D Doppler Wind Lidar*.