

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(7) (2021) 1001-1004 DOI: 10.22060/mej.2021.18863.6905



Wind simulation in a complex terrain by numerical weather prediction method using large eddy simulation

S. Malekmohammadi, P. Hashemi Tari*

Mechanical Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Researchers are interested in wind resource assessment studies for mountainous terrains using numerical weather prediction methods. In present study the wind over Martigny located in Switzerland has been simulated using weather research and forecasting model. Due to high resolution of the simulation (100 m), large eddy simulation is employed to perform turbulence modeling. The objective of this study is to assess the credibility of model in wind simulation and to examine the effect resolution and two different sub-grid scale turbulence models. The results reveal that model is able to properly generate the wind in comparison with the data obtained from wind measurement stations. The results also show a promising simulation for the region, located within a wide and flat valley. However, the discrepancies between the results and those obtained from the wind station are bold for regions at mountainous peaks. At the time at which the maximum wind speed occurs, it is found that the wind error decreases from 22m/s to 17m/s by changing the sub-grid scale model from Smagronisnky3D to turbulence kinetic energy 1.5 model. Also, the predicted wind speed declines from 17m/s to 7m/s by reducing the vertical size of the grid cells.

Review History: Received: Aug. 15, 2020

Revised: Jan. 11, 2021 Accepted: Jan. 22, 2021 Available Online: Feb. 04, 2021

Keywords:

Wind Numerical weather prediction Weather research and forecasting Large eddy simulation Wind resource assessment

1.INTRODUCTION

Wind resource assessment in a mountainous and complex area is one of the concerns in renewable energy field. Wind potential assessment was initially done by data collection method [1]. This method is very limited due to the limited number of measuring stations and the challenges in installing measuring towers in mountainous areas. Therefore, researchers have used numerical simulation in order to predict wind characteristics in complex terrains [1, 2]. One of the challenges in using numerical methods is the discrepancies in estimation of the average wind speed by a numerical model and the actual wind observed in the region.

Numerical weather prediction (NWP) method is one of the numerical methods employed for wind prediction. Nevertheless, NWP method is quite complex and its performance is influenced by various factors. Steffel et al. showed that previous wind resource assessments of Switzerland using NWP with low resolutions underestimated the wind energy potential of this country [3]. They claimed that the lack of accuracy in predicted wind potential was because of the complexity of the terrain in Switzerland. Thus Jafari et al., Kruyt et al. and Pickering et al. tried to improve the simulations using more advanced NWP models [4-6]. They showed that by increasing the size of grid cells (horizontal resolution) performance of NWP models improves. Their results also indicate that by increasing the resolution to 300m,

the potential wind energy predicted in this area increases. However, even by 300m resolution, a high bias is observed in some specific locations. It is expected that by performing high-resolution simulations (on a scale of 100m and less) the error of predicted wind speed decreases [4].

Hence, the purpose of this study is to achieve a simulation with results similar to reality and to perform simulations in WRF with 100m resolution using large eddy simulation (LES) method. In addition, the effect of using the sub-grid scale (SGS) turbulence models i.e. the Turbulence Kinetic Energy model (TKE 1.5) and the Smagorinsky3D SGS model while using LES is investigated. On the other hand, the high aspect ratio of grid cells (ratio of height to length of grid cells) in WRF at steep areas will lead to skewness error [7] and it is necessary to investigate the effect of changing this ratio on improving WRF performance. . This type of research has been done in very rare cases. Performing the simulation in a very complex terrain is the next key features of this research. In this research, the WRF model, which is very powerful in performing simulations in a wide range of resolutions has been selected to perform a simulation in 100m resolution.

2.METHODOLOGY

For this study, three realistic simulations with a horizontal resolution of 100m in a complex terrain were performed. The effect of changing the SGS turbulence model and also changing the height of the grid cells have been investigated.

*Corresponding author's email: P hashemi@sbu.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article Copyrights for this article are retained by the aution(s) with pathematical former information 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

S im ulat ion	S GS mo del	V erti cal Res olu tin
1	TKE1.5	47
2	Smagorins ky3D	47
3	Smagorins ky3D	37

Table 1. summary of simulations

Verical Resolution and Turbulence Closure effect on WRF Simulations in 100 m Horizontal Resolution



Fig. 1. Comparison of wind speed in three simulations with wind speed measured at 4 station on January 1, 2018

A 15 \times 15 km² domain in Martigny (Rhone valley) with a complex topography is selected for these simulations. The output of Cosmol model with 1km resolution have been used as initial data. The data of four measuring stations in the area, owned by the Meteoswiss, would be used for results validation.

In order to study the effect of vertical resolution, the horizontal length of cells is considered to be constant (100m) and the top pressure is set to be 100hPa for two and 400hPa for one simulation. Accordingly, the minimum heights of the cells near the ground (hereinafter referred to as vertical resolution) are 47m for first and second simulations and 37m for third simulations. To investigate the effect of using each of the SGS turbulence models the Turbulence Kinetic Energy model is used in the first simulation and the Smagorinsky 3D SGS model is used for second and third simulations. Table 1 shows the characteristics of these simulations.

3.DISCUSSION AND RESULTS

After performing three simulations with a resolution of 100m in the Martigny, the wind speed per hour at the height of ten meters above the ground was compared with wind measurement data at four stations. Figure 1 shows the results for all stations.

At the EVI station, the simulations perform reasonably well (Fig. 1). In the region of Evionnaz, due to the flatness of the terrain, the model can simulate the wind with a high accuracy. The simulations using the Smagorinsky SGS model are more time-consistent with the measurement data than the TKE1.5 model. This issue may be due to the poor performance of TKE1.5 in sloping areas and needs further study in future. Also, simulations with the lower vertical resolution are more successful in predicting deceleration than simulations with the higher vertical resolution. In SLFFUL and SLFFU2 stations, the first two simulations have poorer performance in terms of maximum wind speed prediction compared to the third simulation. Predicting excessive wind speed near the surface is a well-known problem in WRF [8-10]. One of the reasons for the error in the heights in WRF, may be due to the smoothing of the topography and losing some of the drag forces [8, 10]. At the MAR station located in a narrow valley throughout the day until noon all three simulations follow the pattern of measurement data. However, at 1 pm two simulations with a vertical resolution of 47m despite following the trend of the measurement data, show a relatively large error.

4.ONCLUSIONS

In the present study, the NWP method was performed for the windy complex region of Martigny (Rhone Valley) in Switzerland using WRF model. Three real simulations were performed. One of the key features of this research is the implementation of a real simulation in WRF with high resolution (100m) using the LES method. In this study, the effects of grid cell height (vertical resolution) and SGS turbulence model of TKE1.5 and Smagorinsky3D have been investigated.

Measured data of four wind speed measuring stations in the domain is used. The results of simulations in these stations showed that depending on the type of topography of the region, the performance of simulations were different such that the simulated wind speed for the flat area had an acceptable agreement with the measurement data. However, in the narrow valley and on the mountain tops when the wind speed was increasing, discrepancy between the simulations and measurements was observed. Yet on average, the error due to the change of the SGS model from TKE1.5 to Smagorinsky, decreased from 10.37m/s to 8.37m/s and due to the reduction of the vertical height of grid cells from 47m to 37m, error reduced to 1.125m/s. This shows that increasing resolution to 100m increases the accuracy of wind simulation and therefore the predicted wind potential of a domain in Switzerland. Also increasing the resolution up to 50m or more should be investigated in order to remove the error in mountain tops.

REFERENCES

- [1] B. Blocken, 50 years of computational wind engineering: past, present and future, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 129 (2014) 69-102.
- [2] K. Murthy, O. Rahi, A comprehensive review of wind resource assessment, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72 (2017) 1320-1342.
- [3] I. Staffell, S. Pfenninger, Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output, Energy, 114 (2016) 1224-1239.
- [4] S. Jafari, T. Sommer, N. Chokani, R.S. Abhari, Wind resource assessment using a mesoscale model: the effect of horizontal resolution, in: Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, American Society of Mechanical Engineers, 2012, pp. 987-995.
- [5] B. Kruyt, J. Dujardin, M. Lehning, Improvement of wind power assessment in complex terrain: the case of COSMO-1 in the Swiss Alps, Frontiers in Energy Research, 6 (2018) 102.
- [6] B. Pickering, C.M. Grams, S. Pfenninger, Sub-national variability of wind power generation in complex terrain and its correlation with large-scale meteorology, Environmental Research Letters, 15(4) (2020) 044025.
- [7] M.H. Daniels, K.A. Lundquist, J.D. Mirocha, D.J. Wiersema, F.K. Chow, A new vertical grid nesting capability in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model, Monthly Weather Review, 144(10) (2016) 3725-3747.
- [8] P.A. Jiménez, J. Dudhia, Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51(2) (2012) 300-316.
- [9] F. Ngan, H. Kim, P. Lee, K. Al-Wali, B. Dornblaser, A study of nocturnal surface wind speed overprediction by the WRF-ARW model in southeastern Texas, Journal of applied meteorology and climatology, 52(12) (2013) 2638-2653.
- [10] L. van Veen, The Perdigão field campaign: evaluation of the Cell Perturbation Method in atmospheric simulations, University of Twente, 2018.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Malekmohammadi, P. Hashemi Tari, Wind simulation in a complex terrain by numerical weather prediction method using large eddy simulation, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 1000-1004.



DOI: 10.22060/mej.2021.18863.6905

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۲۲۱ تا ۴۲۴۰ DOI: 10.22060/mej.2021.18863.6905

شبیهسازی باد در یک منطقه کوهستانی فوق پیچیده به روش پیشبینی عددی هوا با دقت بسیار بالا و با استفاده از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ

شکوفه ملک محمدی، پویان هاشمی طاری*

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

خلاصه: پتانسیل سنجی انرژی باد در مناطق کوهستانی با استفاده از روش پیش بینی هوای عددی مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش به کمک این روش، باد در مارتینی در کشور سوئیس شبیه سازی شده است. این شبیه سازی دارای دقت افقی بسیار بالا (۱۰۰متر) بوده که امکان استفاده از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ را فراهم می کند. هدف از انجام این پژوهش بررسی میزان موفقیت مدل در شبیه سازی باد و اثر افزایش دقت عمودی و استفاده از دو مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه اسماگورینسکی و مدل انرژی جنبشی توربولانسی ۱/۵ بوده است. نتایج نشان می دهد که مدل به خوبی قادر به شبیه سازی باد در مقایسه با داده های دریافتی از ایستگاه های اندازه گیری بوده و الگوی روزانه باد را به خوبی تولید کرده است. در منطقه ای که درون درمای عریض و هموار قرار گرفته، دقت نتایج بسیار بالا بوده ولی در قله کوه ها خطای اندازه سرعت باد زیاد بوده است. در زمان وقوع بیشینه سرعت باد در قله کوه ها، با تغییر مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه ان اسماگورینسکی سه بعدی به مدل انرژی جنبشی توربولانسی ۱/۵، خطا از ۲۲ به ۱۷ متر بر ثانیه و سپس با کاهش ار تفاع عمودی سلول ها از ۴۷ متر به ۳۷ متر، خطا از ۱۷ به ۷ متر برثانیه کاهش یافته است.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳ ارائه آنلاین:۱/۱۹/۱۱

كلمات كليدى:

باد پیش بینی هوای عددی شبیه سازی گردابه های بزرگ پتانسیل سنجی باد

۱– مقدمه

یکی از موضوعاتی که محققان در زمینه انرژی بادی به آن پرداختهاند، بررسی پتانسیل انرژی بادی و رفتار باد در مناطق ناهموار کوهستانی و پیچیده است. سرعت بالای باد در ارتفاعات و کم بودن زمینهای هموار برای نصب توربینهای بادی در این مناطق، از علتهای اصلی اجرای این دسته از پژوهش ها بودهاست [۱]. بررسی پتانسیل انرژی بادی در یک منطقه، در ابتدا به روش دادهبرداری به کمک مراکز ثبت اطلاعات هواشناسی و بادسنجها انجام می شدهاست [۲]. این روش به دلیل محدودیت در تعداد ایستگاههای اندازه گیری و چالش در نصب دکلهای دادهبرداری^۱ دارای محدودیت زیادی است. از این رو پژوهشگران به شبیهسازی عددی جریان باد در این مناطق روی آوردهاند [۲, ۳]. شبیهسازی جریان باد در یک منطقه

با توپوگرافی کوهستانی و پیچیده با چالشهایی روبهروست. یکی از چالشهایی که در این زمینه وجود دارد، تخمین زدن متفاوت سرعت متوسط باد توسط مدل عددی با مقدار واقعی باد مشاهدهشده در منطقه است. به همین سبب محققان برای شبیهسازی دقیق تر سرعت باد در مناطق ناهموار و پیچیده تلاش میکنند. برای شبیهسازی عددی باد از دو روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش پیشبینی عددی هوا^۲ استفاده میشود.

طی ۵۰ سال گذشته پژوهشهای بسیاری مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی در زمینه شبیهسازی رفتار باد در مناطق کوهستانی، صورت گرفتهاست [۲]. در سال ۱۹۶۳ اولین شبیهسازی جریان اتمسفر به روش شبیهسازی گردابههای بزرگ^۳ توسط اسماگورینسکی و محققان دیگری اجرا شد [۴–۹]. با توجه به

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: P_hashemi@sbu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) که بون و دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

1Mast

²Numerical Weather Prediction (NWP) 3Large Eddy Simulation (LES)

چالشهای موجود در استفاده از این روش در مقیاس بزرگ، توجه گروه دیگری از پژوهشگران در بیست سال اخیر به یافتن روشهای دیگری که دقیقتر و مبتنی بر واقعیت باشند مانند روش پیشبینی عددی هوا جلب شدهاست [۱۰]. روش پیشبینی عددی هوا ماهیت پیچیدهتری داشته و عملکرد آن تحت تاثیر عوامل مختلفی است که به مرور زمان توسط محققان مطالعه و بررسی شدهاست.

اشتفل و همکاران در پژوهشی نشان دادند که وجود ناهمواریهای زیاد و توپوگرافی پیچیده در کشور سوئیس، باعث ایجاد خطا در عملکرد مدلهای پیشبینی هوای عددی شده که در گذشته برای مطالعه يتانسيل بادى اين كشور استفاده شدهاند. اين مدلها ميزان یتانسیل انرژی بادی در کشور سوئیس را کمتر از میزان واقعی تخمین زدهاند [۱۱]. جعفری و همکاران، کریوت و همکاران و پیکرینگ و همکاران اثر افزایش اندازه طول و عرض سلول های شبکه بندی ناحیه محاسباتی (دقت افقی') را بر عملکرد این مدل ها در شبیه سازی باد مطالعه کردند. آنها نشان دادند که با افزایش دقت تا ۳۰۰ متر، میزان انرژی باد پیشبینیشده در این منطقه بیش از پیشبینیهای صورت گرفته در گذشته بودهاست. اما با این حال حتی در دقت ۳۰۰ متر نیز در برخی مناطق خطای زیادی وجود داشته است [۱۲-۱۴]. از این رو افزایش دقت افقی تا ابعاد صد متر اهمیت ویژهای در این مناطق می یابد. زیرا انتظار می رود که با اجرای شبیه سازی با دقت بالا (در مقیاس صد متر و کمتر از آن) خطا در سرعت باد پیش بینی شده کاهش یافتهشده و پتانسیلسنجی انرژی بادی صحیحتری برای این منطقه ممكن شود [۱۲].

برای این منظور، مدل ورف^۲ که در اجرای شبیهسازی با دقتهای مختلف بسیار قدرتمند بوده و نیز دارای جامعه کاربری گسترده و و پشتیبانی بهروزی است، برای این پژوهش انتخاب شدهاست. مدل ورف یکی از مدلهای پرکاربرد در زمینه پیشبینی هوای عددی است. در مدل ورف میتوان اتمسفر را در یک ناحیه محاسباتی با دقتهای مختلف، دقت کم (اندازه سلول بزرگ حدود ۱۰۰ کیلومتر) و با استفاده از معادلات ناویر استوکس به روش میانگین گیری رینولدز و یا دقت بسیار زیاد (اندازه سلول کمتر از ۱۰۰ متر) و با استفاده از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ شبیهسازی کرد [۱۵]. نخستین بار ییمنز تلاش کرد قابلیت مدل ورف را در زمینه تعیین رفتار باد در

مناطق ناهموار بررسی کند [۱۶–۱۹]. پژوهشگران دیگری نیز تاثیر دقت شبیهسازی (اندازه سلولهای شبکهبندی ناحیه محاسباتی) و نیز اثر مدلهای مختلف پارامتریسازی پدیدههای فیزیکی^۳ را بر عملكرد ورف مطالعه كردند [٢٠-٢٣]. گروهي از پژوهشها بر بررسي عملکرد ورف در صورت استفاده از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ در حل کردن اغتشاشات در حالت ایدهآل و بهبود این روش تمرکز کردند. در حالت ایدهآل، یک شبیهسازی سادهسازی شده در ورف انجام می شود تا تاثیر عوامل مدنظر محققان بر عملکرد ورف سنجیده شود. خروجی این شبیهسازیها نتایج واقعی برای پیشبینی هوا نبوده و قابل استفاده برای مطالعه متغیرهای مختلف همچون باد، بارش یا تشعشع در حالت واقعی نیست [۲۹-۲۹]. در مقابل، در حالت واقعى بخشى از اتمسفر با دريافت شرايط مرزى و شرايط اوليه واقعى از شبیهسازیهای دیگر، در مقطع زمانی معینی شبیهسازی می شود و قابل استفاده برای مطالعه اتمسفر و پیش بینی هوا خواهد بود [۲۹]. فرضیه این است که استفاده از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ در حالت واقعی بر عملکرد ورف اثر مثبتی داشته و منجر به شبیهسازیهای دقیقتری شود [۲۹]. به علت عدم وجود سیستمهای کامپیوتری قوی و در نتیجه هزینهبر بودن این نوع شبیهسازیها، در گذشته چنین شبیهسازیهایی انجام نشده و اثر این روش به خوبی مطالعه نشده است. اما خوشبختانه با پیشرفت قدرت ابر کامپیوترهای موجود در چند سال اخیر، تعداد بسیار انگشت شماری به اعتبار سنجی و بررسی عملکرد مدل ورف در دقت بسیار بالا و در حالت واقعی که از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ استفاده می کند، پرداختهاند. به طور مثال لیو و همکاران به بررسی عملکرد ورف در حالت شبیهسازی گردابههای بزرگ با کاربرد انرژی باد در حالت واقعی -در یک منطقه شهری- با دقت افقی ۱۰۰ متر پرداختهاند [۳۰]. نتایج آنها نشان داد که اختلاف بین نتایج بدست آمده و دادههای اندازه گیری شده، ناشی از کمی دقت افقی (یا بزرگ بودن اندازه سلولهای) شبیهسازی است. رای و همکاران نیز به اعتبارسنجی اغتشاشات تولیدشده توسط ورف در دو توپوگرافی هموار و کوهستانی در حالت شبیهسازی گردابههای بزرگ و حالت واقعی پرداختهاند. در پژوهش رای و همکاران به کمک روش تلسكوپی دقت افقی از ده كیلومتر به ۳۰ متر افزایش یافتهاست [۳۱]. مرور پژوهشهای ذکرشده نشان میدهد که تاکنون در هیچ

¹Horizontal Resolution

²Weather Research and Forecasting Model (WRF)

³Physical parameterizations

پژوهشی شبیه سازی یک منطقه بسیار ناهموار با توپو گرافی پیچیده در حالت واقعی در ورف با دقت افقی بسیار بالا در حالتی که از شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده کند، انجام نشده و اعتبار سنجی نشده است.

از سویی دیگر با مرور بر پژوهشهای صورت گرفته در این زمینه، مشاهده می شود که تاکنون افزایش دقت افقی در ورف تا صد متر و حتى ده متر انجام شده، ولى در تمامي پژوهشها به جز يكي از أنها، این افزایش با روش تلسکوپی یا تو در تو بودهاست [۳۱, ۳۲]. روش تلسکوپی از قابلیتهای نرم افزار ورف است که برای افزایش دقت افقی استفاده می شود. در این روش کاربران یک ناحیه بزرگ را به نام ناحیه والد ۲ در نظر گرفته و به طور مثال با دقت ۱۰ کیلومتر شبیهسازی میکنند. سپس ناحیه کوچکتری که ناحیه فرزند^۳ خوانده میشود و درون ناحیه والد بوده و تنها قسمتی از آن را پوشش میدهد، انتخاب شده و ابعاد سلول های آن با نسبت یک سوم یا یک پنجم کمتر از ابعاد سلولهای والد در نظر گرفته می شود. از نتایج حاصل از شبیه سازی در ناحیه والد به عنوان شرایط مرزی و نیز شرایط اولیه و دادههای ورودی برای اجرای شبیه سازی در ناحیه فرزند استفاده شده و شبیه سازی اجرا می شود. این روند حل تو در تو ادامه می یابد تا در نهایت یک ناحیه با دقت افقی بسیار بالا (به طور مثال ۱۰ متر) شبیه سازی شود [۲۹]. اما چو و همکاران در پژوهشی نشان دادند که استفاده از روش تلسکوپی منجر به شکل گیری خطا در فرایند حل اغتشاشات درون اتمسفر می شود و اگر بدون استفاده از روش تلسکویی از دادههایی با دقت کم مانند ۱ کیلومتر برای شرایط ورودی شبیهسازی با دقت ۱۰۰ متر استفاده شود (نسبت یک دهم)، نتایج خطای کمتری داشته و به واقعیت نزدیک خواهند بود [۳۳].

تنها پژوهشی که در آن یک شبیهسازی در ورف بدون استفاده از روش تلسکوپی با دقت بسیار بالا (۳۰ متر) و با استفاده از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ اجرا شدهاست، پژوهش هالد و همکاران است [۳۴]. دادههای اولیه این شبیهسازی از پایگاه داده ارا-اینتریم^۴ با دقت ۸۰ کیلومتر گرفتهشدهاست. در پژوهش هالد و همکاران علی رغم استفاده از ایده پیشنهادی چو و همکاران، نسبت دقت دادههای اولیه (۸۰ کیلومتر) به دقت شبیهسازی انجامشده (۳۰ متر) یک دو هزارم

1Nesting 2Parent 3Child 4ERA Interim Reanalysis

بوده که بسیار بیشتر از نسبت پیشنهادی چو و همکاران است و منجر به شکل گیری خطا در بخشی از نتایج آنها شدهاست. بنابراین برای دستیافتن به یک شبیهسازی با نتایج مشابه با واقعیت، نیاز است شبیهسازیهای دیگری با دادههای ورودی که دقت بالاتری داشته باشند، انجام شود. به همین منظور در این پژوهش، خروجی مدل کوسمو^۵۱ با دقت افقی یک کیلومتر به عنوان دادههای اولیه و شرایط مرزی برای اجرای شبیهسازی با دقت افقی ۱۰۰ متر انتخاب شده و از روش تلسکوپی برای رسیدن به دقت افقی ۱۰۰ متر چشم_اپوشی میشود.

در مجموع می توان بیان کرد که هدف در این پژوهش، اجرای شبیهسازی در ورف با دقت افقی ۱۰۰ متر و در حالت استفاده از شبیهسازی گردابههای بزرگ است. مطالعه عوامل موثر بر عملکرد ورف در تولید نتایج نزدیک به واقعیت هدف دیگر این پژوهش خواهد بود. با توجه به اینکه در این پژوهش روش شبیهسازی گردابههای بزرگ بکار گرفتهخواهدشد، لازم است اثر عوامل تاثیر گذار بر عملکرد ورف در این حالت نیز بررسی شود. به دلیل اینکه در ورف تنها دو مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه اسماگورینسکی سه بعدی و مدل انرژی جنبشی توربولانسی ۱/۵ برای استفاده از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ تعبیه شدهاست [۲۹]، در این پژوهش اثر این دو مدل در بهبود نتایج بررسی خواهدشد. شایان ذکر است که این حساسیتسنجی تاکنون در هیچ پژوهشی انجام نشدهاست. از سوی دیگر نسبت منظر زیاد سلولهای شبکهبندی سه بعدی (نسبت ارتفاع به طول سلولهای شبکه) در ورف در مناطق شیبدار منجر به بروز خطای کجی ٔ خواهدشد [۳۵] و به همین سبب لازم است اثر تغییر این نسبت بر بهبود عملکرد ورف بررسی شود. به همین دلیل، در این پژوهش طول افقی سلولها ثابت درنظر گرفتهشده (۱۰۰ متر) و اثر كاهش ارتفاع سلولها (يا افزايش دقت عمودي) مطالعه خواهدشد.

در مجموع برای این پژوهش، سه شبیهسازی واقعی با دقت افقی ۱۰۰ متر در ورف که در منطقه بسیار ناهموار و پیچیدهای قرار داشته، انجام شدهاست. در این شبیهسازیها اثر تغییر مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه و نیز اثر تغییر ارتفاع سلولهای شبکه مورد بررسی قرارگرفتهاست. برای اجرای این شبیهسازیها یک منطقه با توپوگرافی پیچیده انتخاب شدهاست. این ناحیه دارای یک دره ۷ شکل، با شیب

⁵Consortium for Small-scale Modeling1 (COSMO1) 6Skewness



شکل ۱. نمایی از شبکهبندی سه بعدی از یک ناحیه محاسباتی در ورف [۲۹]. Fig. 1.Three dimensional grid in WRF [29]



شکل ۲. مختصات عمودی میبریدی سیگما- فشار ثابت. Fig. 2.Hybrid Sigma - Constant Pressure Vertical Coordinates



(۲۹] شکل ۳. شبکه غیرمتمرکز نوع آرکاوا –سی در مدل ورف. راست: شبکهبندی عمودی چپ: شبکهبندی افقی [۲۹] Fig. 3. Arkawa-C type staggered grid in WRF model. Right: Vertical grid Left: Horizontal grid [29]

		schemes		
درجه حل عددی فضایی (انتقال)				روش حل زمانی
6	A 14 A	۴	۳. Jan 3	

جدول ۱. وابستگی عدد کورانت به درجه روش انتقال یک بعدی و روش رانگ کوتا درجه سه [15] Table 1. The dependence of Courant number to 1st order Advection and 3rd order Rung Kutta time integration

درجه حل عددی فضایی (انتقال)			روش حل زمانی	
درجه ۶	درجه ۵	درجه ۴	درجه ۳	₩ 1- 1" C E1
١/•٨	1/47	۱/۲۶	١/٦١	رائک لونا درجه ۲

بالای ۷۰ درجه با حداکثر ارتفاع ۳۵۰۰ متر از سطح دریا (منطقه ناهموار بادخیز مارتینی در کشور سوییس) است. در این شبیهسازیها از دادههای اولیه (خروجی مدل کوسمو۱) با دقت ۱ کیلومتر استفاده شدهاست. این پژوهش با همکاری و در گروه کرایوس دانشگاه پلی تکنیک لوزان^۲ در کشور سوییس صورت گرفتهاست. در ادامه ابتدا در بخش ۲- مدل ورف به اختصار معرفی شده و فرایند شبیهسازی به تفصیل بیان می شود. سپس در بخش ۳- نتایج سه شبیه سازی تحلیل و بررسی خواهد شد و سپس در بخش ۴- جمع بندی و نتیجه گیری ارائه خواهدشد.

۲-فرآیند شبیهسازی در مدل ورف ۱-۲ معرفی مدل ورف

مدل ورف یک مدل عددی برای شبیهسازی عددی اتمسفر و ییش بینی هوا در مقیاسهای مختلف (گستره جهانی تا گستره چند کیلومتری) است. در این مدل می توان اتمسفر را در یک ناحیه محاسباتی، در دو حالت ایدهآل یا واقعی به روش عددی شبیهسازی کرد. هر مدل پیشبینی عددی آبوهوا دارای دو بخش هسته دینامیک یا حلگر^۳ و بخش فیزیکی است. در مدل ورف نیز دو حلکنندهی ارو ^۴ و ان ام ام ^۵ طراحی شدهاند که کاربریهای متفاوتی دارند. برای این شبیه سازی از حل کننده ارو استفاده شده است. هر دو حلگر ارو و ان ام ام حلگرهای غیرهیدرواستاتیکی هستند که برای اجرای شبیهسازی در مدل ورف طراحی شدهاند. حلگر ارو با توجه به اینکه توانمندیهای بیشتری در مقایسه با حل گر ان ام ام دارد در پژوهشهای مرتبط به اتمسفر بیشتری مورد استفاده قرار می گیرد.

1Cryos 2EPFL

به همین دلیل تعداد افرادی که از این حل گر استفاده کردهاند بسیار بیشتر بوده و دسترسی کاربران به اطلاعات دیگر افراد برای استفاده از این مدل و نیز به تیم پشتیبانی آسان تر است. از سویی دیگر به دلیل بهروزشدن مداوم کد حل گر و اصلاح و بهبود مداوم آن توسط تیم پشتیبانی آن، این حل گر برای اجرای شبیهسازی انتخاب شدهاست .[79]

در این مدل از شبکهبندی سه بعدی و از روش تفاضل محدود استفاده می شود. باتوجه به مکعب مستطیلی بودن هندسه سلول های این شبکهبندی سهبعدی، می توان شبکه را به نوعی شبکه باسازمان تلقی کرد. اندازه طول و عرض شبکه در راستای طول و عرض جغرافیایی ثابت بوده و این اندازه با نام دقت افقی⁶ شناخته می شود (شکل ۱). در این پژوهش این اندازه ۱۰۰ متر است. در حالی که اندازه ارتفاع سلولها یا دقت عمودی^۷ متغیر است. این ارتفاع در نزدیکی سطح زمین (دیواره) کمتر بوده و با فاصله گرفتن از سطح زمين ارتفاع سلولها افزايش مي يابد. لازم به ذكر است كه در اين مدل امکان استفاده از دو نوع مختصات عمودی خطوط تعقیب کننده زمین (سیگما) یا هیبریدی (سیگما-فشار ثابت) وجود دارد. استفاده از مختصات هیبریدی در نسخه نهایی این نرمافزار مرسوم شدهاست و عملکرد بهتری در مقایسه با مختصات سیگما دارد [۲۹]. در این شبیهسازی نیز از مختصات عمودی هیبریدی استفاده شدهاست که برشی افقی از این مختصات در شکل ۲ نشان دادهشدهاست. در مختصات سیگما تمامی سطوح عمودی از ناهمواریهای سطح زمین تبعیت میکنند. در حالی که در مختصات هیبریدی این سطوح تا ارتفاع معینی از ناهمواریهای سطح زمین پیروی کرده و بعد از آن به خطوط فشار ثابت تبدیل می شوند. باتوجه به اینکه در سطوح

³Dynamical Solver - Dynamical Core 4The Advanced Research WRF (ARW) 5Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM)

⁶Horizontal Resolution

⁷Vertical Resolution

بالای جریان تاثیرپذیری کمتری از توپوگرافی دارد، تغییر مختصات عمودی از سیگما به خطوط فشار ثابت، باعث کاهش پیچیدگی محاسبات و سرعت بیشتر آنها میشود [۲۹]. پس از شبکهبندی ناحیه محاسباتی برای آرایش متغیرهای درون شبکه، میتوان تمامی متغیرها را در یک نقطه درون سلول تعریف کرد که به این حالت شبکه متمرکز¹ میگویند. حالت دیگر آن است که متغیرها در بیش از یک نقطه از شبکه تعریف شوند. در این حالت شبکه به نام شبکه غیر متمرکز⁷ شناخته میشود. شبکه غیرمتمرکز نوع آرکاوا –سی⁷ در این شبیه سازی استفاده شدهاست (شکل ۳).

۲-۱-۱- روش حل عددی در حل گر ارو

معادلههای حاکم مورد استفاده در این مدل عبارتند از معادله حالت، معادله پایستگی مومنتم، معادله پایستگی انرژی، معادله پایستگی جرم هوای خشک و پایستگی جرم آب. برای حل معادلههای پایستگی ابتدا به کمک روش انتقال[†]، هریک از متغیرهای سرعت در زمان *t* حل شده و سپس با تبدیل معادله دیفرانسیلی به معادله مشتق معمولی^۵ متغیر برای گام زمانی بعدی، به کمک روش رانگ کوتای درجه سه^۶ محاسبه میشود. مدل ورف قابلیت استفاده از روش انتقال درجه سه^۶ محاسبه میشود. مدل ورف قابلیت استفاده از روش انتقال ویکر و اسکاماروک[۱۳] نشان دادند که بیشینه عدد کورانت برای حفظ پایداری، در صورت استفاده از هریک از روش های انتقال خطی یکبعدی و رانگ کوتای درجه سه چه مقداری خواهد بود (جدول ۱)

برای حالت انتقال سهبعدی، این عدد باید $\frac{1}{\sqrt{3}}$ برابر عدد موجود در جدول ۱ باشد. بنابراین در حل گر ارو گام زمانی لازم برای شبیه سازی سهبعدی به صورت رابطه (۱) خواهد بود. Cr_{theory} عدد کورانت درون جدول بوده و u_{max} بیشنیه سرعتی است که انتظار می رود مدل شبیه سازی کند. Δx نیز اندازه هر سلول است. برای تامین یک محدوده اطمینان، به طور معمول گام زمانی که ۲۵٪ کمتر

1 Unstaggered grid 2Staggered Grid 3 Arkawa C-staggering 4 Advection 5 Ordinary Differential Equation (ODE) 6 3rd order Rung Kutta time integration schemes 7 Courant number

از عدد بهدست آمده از رابطه (۱)، انتخاب می شود [۲۹].

$$\Delta t < \frac{Cr_{theory}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta x}{u_{\max}} \tag{1}$$

۲-۱-۲- طرح های توربولانسی مقیاس زیر شبکه در حالت شبیهسازی گردابههای بزرگ

در مدل ورف برای حل معادلات در حالت شبیه سازی گردابه های بزرگ، فیلتر اندازه ی سلول شبکه تعریف شده و گردابه های کوچکتر از این فیلتر با مدل مقیاس زیر شبکه مدل می شوند. برای مدل سازی مقیاس زیر شبکه گرینه مدل می شوند. برای مدل سازی مقیاس زیر شبکه گرینه های مختلفی در ورف وجود دارد [۲۹]. مدل توربولانسی اسماگورینسکی سه بعدی که یک مدل خطی ضریب لزجت آشفتگی C_s استفاده انتخاب می شود، برای محاسبه ضریب لزجت آشفتگی $K_{h,v}$ می کند که در آن P مدد پرانتل با مقدار یک سوم ، N فرکانس برانت واسالا و D تنسو ر تا می مود (۲۹).

$$K_{h,v} = C_s^2 l_{h,v}^2 \max \left[0, \left(D^2 - P_r^{-1} N^2 \right)^{1/2} \right]$$
(7)

مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱^{۱٬}/۵ نیز یک مدل خطی دیگر برای محاسبه ضریب لزجت آشفتگی است. که انرژی جنبشی آشفتگی مقیاس زیر شبکه *P* را به کمک یک معادله اضافه محاسبه میکند. روش محاسبه انرژی جنبشی در این روش در فصل چهارم مرجع (۲۹] به تفصیل بیان شدهاست. ضریب لزجت آشفتگی در این روش از رابطه (۳) محاسبه میشود.

$$K_{h,v} = C_k l_{h,v} \sqrt{e} \tag{(7)}$$

۲-۲- شرایط مرزی و شرایط اولیه

در ورف امکان دو نوع شبیهسازی واقعی و ایدهآل تعبیه شدهاست. شبیهسازیهای ایدهآل این امکان را فراهم میکنند تا محققان در یک تست ساده اثر یکی از تنظیمات مد نظر خود را بر عملکرد حل گر مطالعه کنند ولی این نتایج در پیشبینی هوا به طور مستقیم

⁸Smagorinsky 3D 9Eddy Viscosity Coefficient (ECV) 10Turbulence Kinetic Energy (TKE 1.5)



شکل ۴ . ملایم سازی داده^{های} اولیه و شرایط مرزی جانبی [۲۹] Fig. 4. Mitigation of initial data and lateral boundary conditions[29]

قابل استفاده نیستند. شرایط اولیه و شرایط مرزی برای این دسته از شبیهسازیها توسط کاربر به صورت دستی انتخاب میشوند (شرایط مرزی اعم از شرایط پریودیک، متقارن و باز هستند [۳۰]). در حالی که برای یک شبیهسازی واقعی برای داشتن یک پیشبینی هوای حقیقی، دادههایی که از شبیهسازیهای واقعی دیگر (با مدل ورف یا دیگر مدلهای موجود با دقت کمتر) به دست آمدهاند، برای پارامترهای جریان در ورودی حجم کنترل در نظر گرفته شده و برای استاتیک عبارتند از : ۱-متغیرهای سه بعدی: دما، رطوبت نسبی و مولفههای سرعت ۲- متغیرهای سه بعدی دما، رطوبت نسبی و مولفههای سرعت ۲- متغیرهای دوبعدی که در طول شبیهسازی ثابت هستند اعم از ارتفاع سطح زمین، درصد بازتاب تابش، پوشش گیاهی و کاربری زمین، نوع بافت خاک، دمای متوسط سالانه و طول و عرض جغرافیایی و ۳-متغیرهای دوبعدی وابسته به زمان چون فشار در سطح دریا، دمای لایههای خاک و رطوبت خاک، عمق برف، دمای

شرایط مرزی عمودی در پایین ترین لایه شرط عدم لغزش و در بالاترین لایه شرط فشار ثابت با شار صفر در نظر گرفته می شود. متغیرهای سرعت، دمای پتانسیل، نسبت اختلاط : نسبت جرم بخار آب به جرم هوای خشک، ستون فشار هوای خشک و پتانسیل نسبت به زمین، به عنوان قیود در مرزها (بیرونی ترین سلول های ناحیه محاسباتی) استفاده می شوند. برای هریک از متغیرها علاوه بر خود متغیر در زمان اولیه، مشتق متغیر نسبت به زمان نیز محاسبه

شدهاست. این مشتقها برای بهدست آوردن مقدار متغیر در گامهای زمانی بعدی در مرزهای جانبی استفاده می شوند. برای سرعت عمودی در بخش تعیینشده لایه مرزی جانبی، شرط مرزی گرادیان صفر تعریف شده و برای متغیرهای میکروفیزیکی به جز بخار، شرایط مرزی وابسته به جریان تعریف شدهاست به نحوی که اندازه متغیر در ورودی صفر بوده و گرادیان صفر برای متغیر در خروجی در نظر گرفته شده است [۲۹]. لازم به ذکر است که به علت امکان وجود اختلاف بین مقادیر متغیرهای حل شده وابسته به زمان در مدل و مقادیر مرزی که برای مدل تعیین شدهاست ، یک ناحیه ملایمسازی در ورف بعد از مرز جانبی و درون ناحیه محاسباتی تعریف می شود تا گرادیان شدید بین متغیر محاسبه شده در مدل و متغیر تعیین شده در مرز جانبی را به کمک تابع ملایم ساز، کمتر کند (شکل ۴). این ناحیه به دو بخش معین و ملایمسازی تقسیم می شود. بخش معین در واقع همان اطلاعات مرزی بوده و بخش ملایم سازی به کمک یک تابع ملایم سازی درجه ینج و اندازه متغیر در لایه بیرونی، متغیر را در هر سطر و ستون محاسبه می کند.

۲-۲-۱ هموارسازی توپوگرافی:

در یک توپوگرافی پیچیده با شیبهای بسیار تند، اگر از مختصات تعقیب کننده زمین استفاده شود، سلولهای نزدیک سطح زمین مورب شده و اختلاف ارتفاع دو سلول مجاور از اختلاف ارتفاع دو سطح عمودی بیشتر می شود. این پدیده احتمال بروز خطا و ناپایداری نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحه ۴۲۲۱ تا ۴۲۲۰



شکل ۵. محل ایستگاههای ای وی آی، امایآر، اسالافافیوال، اسالافافیو۲ و شهر مارتینی در ناحیهی شبیهسازی شده Fig. 5. Location of stations EVI, MAR, SLFFUL, SLFFU2 and Martigny in domain



شکل ۶. نمای سه بعدی مکان عمودی پنج سطح از ۲۴ سطح عمودی Fig. 6. Three-dimensional view of the vertical location of five levels out of 74 vertical levels



شکل ۷. توپوگرافی ورودی به مدل الف) پیش از هموارسازی، ب) پس از هموارسازی Fig. 7. Input topography to model a) before smoothing, b) after smoothing

فشار تعیینشده برای آخرین لایه (پاسکال)	بیشینه ارتفاع دورترین سلول (متر)	کمینه ارتفاع نزدیکترین سطح (متر)	دقت (متر)	اندازه ناحیه محاسباتی (کیلومتر)	دقت ۱۰۰ متر
10	١٧٧	۴۷)	۱۵×۱۵	شبيەسازى اول
10	١٧٧	۴۷	۱۰۰	1 &× 1 &	شبیهسازی دوم
۴۰۰۰۰	٨۶	٣٧	۱۰۰	10×10	شبيەسازى سوم

جدول ۲. مشخصات شبیه سازیهای اجراشده در دقت ۱۰۰ متر Table 2. Specifications of simulations performed at 100 meters resolution

را افزایش میدهد [۱, ۳۶]. طبق پژوهش گربر و همکاران لازم است حداکثر شیب در ناحیه شبیهسازی به حدود ۵۰ تا ۴۵ درجه تقلیل یابد [۳۶]. برای حل این چالش در ورف، یک روش هموارسازی توپوگرافی با فیلتر متحرک ۱:۲:۱ ایجاد شده که با استفاده از آن می توان حداکثر شیب موجود در ناحیه محاسباتی را کاهش داد. این روش یک روش میانگین گیری برای هموار کردن ارتفاع در یک ناحیه است. در این روش به ارتفاع سلول آ وزن ۲ و به ارتفاع سلولهای مجاور، آ-۱ و آ+۱ وزن یک داده شده و با جمع کردن و میانگین گیری این سه ارتفاع، مقدار ارتفاع حاصل به سلول آ اختصاص دادهمیشود. به این ترتیب ارتفاع در هر نقطه متوسط گیری شده و اختلاف ارتفاع بین نقاط مجاور کاهش یافته و در کل توپوگرافی ناحیه محاسباتی هموارتر می شود. این روش کمک می کند که مدل در حین شبیه سازی ناپایدار نشود. در ورف امکان تکرار این هموارسازی نیز فراهم شدهاست تا با تكرار این روند به تعداد دلخواه، شیب مطلوب حاصل شود [۲۹]. در پژوهش حاضر نیز از این روش استفادهشده و فرآیند هموارسازی دو بار تکرار شدهاست که جزئیات آن در بخش ۲-۴- ارائه شدهاست.

۲-۳-بخش فیزیکی مدل ورف

همانطور که در بخش ۲-۱- ذکر شد، یک مدل شبیهسازی اتمسفری دارای دو بخش هسته دینامیکی و بخش فیزیکی است. در بخش فیزیکی یک مدل، پدیدههای فیزیکی پارامتری میشوند که به خاطر کوچک بودن و پیچیدگیشان حل آنها بسیار پرهزینه یا غیرممکن است. اهمیت وجود پارامتری سازی را میتوان از این منظر توضیح داد که بدون وجود پارامتری سازی درون مدل، نتایج

خروجی مدل کاربردی نخواهندبود؛ چراکه مهمترین روندهای اثرگذار بر متغیرهای مطلوب مدل مانند تابش، دما و بارش، از مدل حذف شدهاند. چهار پدیده فیزیکی مهم در پارامتریسازی عبارتند از: میکروفیزیک ابرها، آشفتگی یا لایه مرزی، تشعشعهای خورشید و همرفت تودهای [۳۷]. در این شبیهسازی برای پارامتریسازی میکروفیزیک ابرها از مدل موریسون، برای تشعشع خورشید با طول موج کوتاه و بلند از مدل آر آر تی ام جی^۱ استفاده شدهاست. با توجه به اینکه در این پژوهش دقت شبیهسازی بالا بوده و روش شبیهسازی گردابههای بزرگ برای حل اغتشاشات در نظر گرفته شدهاست، نیازی به انتخاب مدل پارامتریسازی برای آشفتگی نبودهاست.

۲-۴- تنظیمات عددی شبیهسازی در ورف

شبیهسازی با ویرایش چهارم نرمافزار ورف در سوپر کامپیوتر پیز دینت^۲ واقع در مرکز ملی ابرمحاسبات سوئیس^۲ صورت گرفتهاست. ناحیه محاسباتی انتخابشده برای این پژوهش یک منطقه ۱۵×۱۵ کیلومتر مربعی، واقعشده بین دو طول جغرافیایی ۶/۹۸ تا ۷/۲۱ درجه شرقی و دو عرض ۶/۰۶۴ و ۶۶/۲۴ شمالی است. در این ناحیه چهار ایستگاه اندازه گیری متعلق به سازمان هواشناسی سوئیس^۴ ، موجود است. دو ایستگاه اسالافافیوال^۵ و اسالافافیو^۶۲ در ارتفاعات کوههای فویی-گراند شاوالارد^۷ و فویی-گراند کوغ^۸ قرار گرفتهاند.

1RRTMG 2Piz Daint

3The Swiss National Supercomputing Centre

4Meteoswiss (the Federal Office of Meteorology and Climatology) 5SLFFUL 6SLFFU2 7Fully - Grand Chavalard 8Fully - Grand Cor



شکل ۸ . مقایسه سرعت باد در سه شبیه سازی با سرعت باد اندازه گیری شده در ایستگاه ای وی آی در روز یکم ژانویه ۲۰۱۸ Fig. 8. Comparison of wind speed in three simulations with measured wind speed at EVI station on January 1, 2018

نسبت منظر^۵ مناسب در ابعاد سلول، بالاترین فشار که تعیین کننده ارتفاع آخرین سطح است، برای دو شبیه سازی ۴۰۰ هکتوپاسکال و برای یک شبیه سازی ۱۵۰ هکتوپاسکال در نظر گرفته شده است. بنابراین کمترین ارتفاع سلول ها در نزدیکی سطح زمین (از این پس به نام دقت عمودی ذکر خواهد شد) به ترتیب ۴۷، ۴۷ و ۳۷ متر بوده به نام دقت عمودی ذکر خواهد شد) به ترتیب ۴۷، ۲۷ و ۳۷ متر بوده متر رسیده است. در شکل ۶ نمایی سه بعدی از پنج سطح عمودی که به صورت تصادفی انتخاب شده اند، ترسیم شده است. در این شکل اولین سطح کاملا از شکل توپوگرافی تبعیت می کند در حالی که به تدریج با افزایش ارتفاع این تبعیت کاهش یافته و اخرین لایه کاملا مسطح شده است.

اطلاعات توپوگرافی منطقه از مدل دیجیتالی ارتفاعات زمین استر⁵ با دقت یک آرکثانیه^۷ که معادل سیمتر است، دریافتشدهاست. در این ناحیه به علت کوهستانیبودن منطقه و وجود شیب بالاتر از ۷۰ درجه ، با کمک روش ملایم سازی، حداکثر شیب به ۵۰ درجه رسیدهاست. توپوگرافی ورودی به مدل قبل و پس از هموارسازی به ترتیب در شکل ۷ الف و ب نشان داده شدهاند. برای دادههای کاربری زمین^۸ از دادههای کورین^۹ متعلق به آژانس محیطزیست اروپا^{۱۰} استفاده شده و به کمک جدول موجود در [۳۶, ۳۸] به

5Aspect Ratio 6Aster Global Digital Elevation Model 7Arc second 8Land use 9Corine dataset 10European environmental agency ایستگاه ایوی آی^۱ در منطقه هموار و پهن درون دره در منطقه اویونا^۲ و ایستگاه امای آر^۳ در دره باریک مونتنیه بنیی^۴ واقع شدهاند. نقطه مرجع شبیه سازی در طول و عرض ۷/۱۱ و ۴۶/۱۵ قرار داشته و شهر مارتینی در جنوب این ناحیه قرار دارد. این منطقه به همراه نقاط ذکر شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

زمان شبیهسازی شده روز ۱ ژانویه سال ۲۰۱۸ و به مدت ۲۴ ساعت در نظر گرفتهشدهاست. گام زمانی، لازم برای حفظ پایداری مدل، شبیهسازی ۲۰/۵ ثانیه در نظر گرفتهشدهاست. در این مدل حداکثر گام زمانی قابل استفاده ۲۱/۸ = ۲۰/۳ ×۶ ثانیه (بخش بررسی پایداری مدل، مقدار بهینه ۲۰/۵ ثانیه انتخاب شدهاست [۲۹]. بررسی پایداری مدل، مقدار بهینه ۲۰۵۵ ثانیه انتخاب شدهاست [۲۹]. دادههای مدل کوسمو۱ با دقت یک کیلومتر به عنوان پارامترهای ورودی برای تعیین شرایط مرزی و اولیه در این شبیهسازی استفاده شدهاند. لازم به ذکر است که برای ترکیب مدل کوسمو۱ و ورف از روشی که توسط گربر و همکاران [۳۶] در گروه کرایوس پیش از این پژوهش طراحی و بکار گرفتهشده، استفاده شدهاست. دقت افقی انتخابشده برای شبیهسازی (اندازه سلولهای افقی) ۱۰۰ متر است. مختصات عمودی انتخابشده برای این شبیهسازی ، مختصات هیبریدی بوده و تعداد سطوح عمودی ۲۴ عدد است. به منظور رعایت

1EVI 2Evionnaz 3MAR 4Montagnier Bagnes

فرمت یواس جی اس^۱ تبدیل شدهاند. در این شبیه سازی ها به علت بالابودن دقت شبیه سازی (۱۰۰ متر)، اغتشاشات درون لایه مرزی پارامتری سازی نشده و به صورت صریح به کمک روش شبیه سازی گردابه های بزرگ حل می شوند. برای برر سی اثر استفاده از هریک از مدل های توربولانسی مقیاس زیر شبکه، از هردو مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ و اسماگورینسکی سه بعدی برای سه شبیه سازی مجزا استفاده شده و اثر آن ها را بر نتایج برر سی شده است. در جدول ۲ مشخصات این شبیه سازی ها نشان داده شده است.

۳-نتايج و بحث

۳-۱-اعتبارسنجی توزیع زمانی سرعت باد

پس از انجام سه شبیهسازی با دقت صد متر در ناحیه مارتینی، اندازه سرعت باد در هر ساعت در ارتفاع ده متری از سطح زمین در هر سه شبیهسازی، با دادههای اندازه گیری باد در چهار ایستگاه موجود در این ناحیه مقایسه شدند. این نتایج در شکل ۸، شکل ۹، شکل ۱۰ و شکل ۱۱ ارائه شدهاند.

در ایستگاه ای وی آی واقعشده در شمال غربی ناحیه محاسباتی، بهطور کلی شبیه سازی ها عملکرد قابل قبولی دارند (شکل ۸). با وجود اینکه بهتر است شش ساعت از شبیهسازی در ورف گذشته باشد تا مدل توانایی توسعهدادن توربولانسها را داشته و نتایج به واقعیت نزدیکتر شود [۳۳]، مدل از ابتدای شبیهسازی به خوبی قادر به دنبال کردن الگوی موجود در دادههای اندازه گیری بودهاست. باتوجه به شکل ۸، افزایش شدید سرعت باد بین ساعت ۱ تا ۲ وجود دارد. این افزایش از مقدار ۲ متر بر ثانیه در ساعت ۱ صبح تا مقدار بیشینه ۷ متر بر ثانیه در ساعت ۲ صبح بودهاست. هر سه شبیهسازی به خوبی این افزایش را نمایش دادهاند. شبیهسازی با دقت عمودی ۴۷ متر و مدل توربولانسی انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵(رنگ سبز) از سرعتی کمتر از ۱ متر بر ثانیه این افزایش سرعت را آغاز کرده و دقیقا به سرعت بیشنیه ۷ متر بر ثانیه مطابق با دادههای اندازه گیری رسیدهاند. شبیهسازی با مدل توربولانسی اسماگورینسکی با دقت عمودی ۴۷ متر (رنگ سیاه)، مقدار بیشینه سرعت در حدود ۶ متر بر ثانیه و شبیه سازی با دقت عمودی ۳۷ متر (رنگ نارنجی)، بیشنیه سرعت ۸ متر بر ثانیه را پیشبینی کردهاند. در ادامه هر سه شبیهسازی کاهش

در سرعت باد نشان میدهند. در بازه ساعت ۶ صبح تا ۱۰ صبح در این ایستگاه، سرعت باد به صورت یکنواخت حدود ۲ متر بر ثانیه بوده و نوسانات اندکی دارد. دو شبیهسازی با دقت عمودی کمتر (۴۷ متر) توانستهاند سرعت یکنواخت مشابهی با سرعت واقعی باد شبیهسازی کنند ولی در شبیهسازی با دقت عمودی ۳۷ متر، سرعت باد تا کمتر از ۱ متر بر ثانیه کاهش یافتهاست.

در مرحله بعدی افزایش سرعت باد در دادههای اندازه گیری در بعد از ظهر، بین ساعت دوازده تا شانزده وجود دارد. با فرض اینکه در این زمان در این منطقه پدیدههای بادی بزرگ مقیاس رخ ندادهباشد و هوای آرام باشد، می توان این افزایش سرعت باد را مربوط به الگوی رفتار روزانه باد در مناطق کوهستانی و درمها نسبت داد. در این الگو در طول روز بادهای اناباتیک از درون دره به سمت قله کوه و در شب بادهای کاتاباتیک از ارتفاعات سرد شده به سمت دره میوزند. در واقع می توان گفت به احتمال زیاد این افزایش مرتبط با بادهای آناباتیک است ً. ولي با اين حال بررسي اين موضوع نياز به تحقيق در دادههاي اندازه گیری داشته و مطالعه عمیق تری را می طلبد و موضوعی خارج از بحث این پژوهش است. پس از عبور از بیشینه سرعت باد در ساعت ۱۶، سرعت باد رو به کاهش گذاشته و در نهایت در انتهای روز یکم ژانویه به ۲ متر بر ثانیه رسیدهاست. مجددا با فرض اینکه در این روز هوا در حالت آرام باشد می توان این کاهش سرعت باد را مربوط به پایدارشدن لایه مرزی در نزدیکی سطح زمین در انتهای روز و ابتدای شب دانست. این کاهش در هر سه شبیهسازی به خوبی پیشبینی شده و مدل ورف عملکرد رضایت بخشی داشتهاست. دو شبیهسازی با دقت عمودی ۴۷ متر قادر بودهاند کمینه سرعتی مشابه با دادههای اندازه گیری (۲ متر بر ثانیه) تولید کنند ولی شبیه سازی با دقت بیشتر (۱۶ متر) کاهش شدیدتری را پیشبینی کردهاست.

به طور کلی در شبیهسازی باد در منطقه اویونز، با توجه به همواربودن منطقه و عریضبودن دره، مدل به خوبی میتواند با دقت ۱۰۰ متر، جریان باد را شبیهسازی کند. با وجود کوههای مرتفع در اطراف دره و وجود شیبهای تند، به علت دوری این نقطه از ارتفاعات به اندازهی کافی و در میانه دره قرار داشتن این ایستگاه، مدل به خوبی خطاهای احتمالی ناشی از ارتفاعات را دمپ کرده و قادر به

1USGS

۲در طول روز در اثر گرمشدن سطوح شیب دار کوه، هوای چگال درون یک دره به سمت قله کوه جاری شده و بادهای اناباتیک را ایجاد میکند. در شب به علت سردشدن ارتفاعات، هوای سرد ارتفاعات به سمت دره حرکت کرده و بادهای کاتاباتیک را ایجاد میکنند. به این سیکل، سیکل روزانه باد گفته میشود.



شکل ۹. مقایسه سرعت باد در سه شبیهسازی با سرعت باد اندازه گیری شده در ایستگاه اس ال ف اف یوال در روز یکم ژانویه ۲۰۱۸ Fig. 9. Comparison of wind speed in three simulations with measured wind speed at SLFFUL station on January 1, 2018



شکل ۱۰. مقایسه سرعت باد در سه شبیهسازی با سرعت باد اندازه گیری شده در ایستگاه اس ال اف اف یو۲ در روز یکم ژانویه ۲۰۱۸ Fig. 10. Comparison of wind speed in three simulations with measured wind speed at SLFFU2 station on January 1, 2018

باشد و نیاز به مطالعه بیشتر و بررسی عمیقتری در آینده دارد. از جهت دقت عمودی، شبیهسازیهای با دقت عمودی کمتر (اندازه اولین سلول تقریبا ۴۷ متر)، در پیشبینی کاهش سرعت (بین ساعت ۶ تا ۱۲ و ۱۶ تا ۲۱)، موفقتر از شبیهسازی با دقت عمودی بیشتر بوده و کمینه سرعت مشابهی با واقعیت ارائه میدهند. در حالی که شبیهسازی با دقت عمودی بیشتر، برآوردهای کمتری از واقعیت دارد. از سویی دیگر در زمان افزایش سرعت باد، این شبیهسازی برآوردهای بیش از واقعیت داشته و دو شبیهسازی مذکور توانستهاند بیشینه سرعت باد را بهتر محاسبه کنند.

در ایستگاههای اس ال اف اف یوال و اس ال اف اف یو ۲ که در ارتفاعات فویی قرار گرفته اند، شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب، اختلاف اندازه شبیه سازی جریان با دقت کافی بوده است. با این وجود، هریک از این شبیه سازی ها دارای تفاوت هایی هستند که میتوان از دو جنبه دقت عمودی و مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه، آن ها را مقایسه کرد. شبیه سازی هایی که از مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه اسماگورینسکی استفاده کرده اند، در مقایسه با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵، از لحاظ زمانی با داده های اندازه گیری تطابق بیشتری دارند. در حالی که شبیه سازی با مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵، افزایش یا کاهش سرعت را یک یا دو ساعت پیش تر از واقعیت و دیگر شبیه سازی ها پیش بینی کرده است. این موضوع ممکن است ناشی از ضعف عملکرد مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ در مناطق شیب دار



شکل ۱۱ . مقایسه سرعت باد در سه شبیهسازی با دادههای اندازه گیری شده در ایستگاه امای آر در روز یکم ژانویه ۲۰۱۸ Fig. 11. Comparison of wind speed in three simulations with measured wind speed at MAR station on January 1, 2018

این بخش عملکرد موفق تری داشته و روند صعود و نزول سرعت باد را مشابه با دادههای اندازه گیری شبیه سازی کردهاست. با این حال هر سه مدل در انتهای روز افزایش شدید سرعت باد (افزایش ۱۰ متر بر ثانیه) را پیشبینی می کنند که با اندازه گیری تطابق ندارد.

در ایستگاه اسالافافیو۲ نیز این اختلاف بین شبیهسازی و اندازه گیری وجود دارد (شکل ۱۰). مانند ایستگاه قبلی، در این نقطه نیز روند کاهشی سرعت باد در ابتدای روز، در هر سه شبیهسازی به خوبی نشان داده می شود. در حالی که با افزایش سرعت باد در ساعت ۱۴، هر سه شبیهسازی رفتار متفاوتی نشان میدهند. بیشترین خطا مربوط به شبیهسازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۵ /۱ بوده که افزایش سرعت باد با شیب زیاد و از ۷ تا ۱۷ متر بر ثانیه را پیشبینی میکند. در مرتبه بعدی دو مدل توربولانسی اسماگورینسکی قرار می گیرند. هردو شبیه سازی مذکور جهش سرعت باد را به اندازه نزدیکتری به دادههای اندازه گیری (حدود ۴ متر بر ثانیه) پیشبینی کردهاند. در مرحله کاهش سرعت باد بین ساعت ۱۷ تا ۲۱، دو شبیهسازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی۱/۵، و مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۴۷ توانایی بهتری در پیشبینی کاهش سرعت باد داشتهاند. به طور کلی می توان بیان داشت که دو شبیهسازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی۱/۵ و مدل توربولانسی اسماگورینسکی با دقت عمودی ۴۷ متر در مقایسه با مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۳۷ عملکرد ضعیفتری از لحاظ سرعت باد زیادی بین دادههای اندازه گیری شده و هر سه شبیه سازی وجود دارد. میزان خطای بیشینه به ترتیب ۲۵ و ۱۲ متر بر ثانیه است. این در حالی است که نتایج توانستهاند از الگوی زمانی دادههای موجود تا ساعت ۱۴ پیروی کنند. به طور مثال کاهش سرعت باد در طول روز بین ساعات ۴ تا ۱۰ صبح از بیشنیه ۱۰ متر بر ثانیه تا كمينه ۴ متر بر ثانيه در ايستگاه اسالافافيوال اتفاق افتادهاست. در شبیهسازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵، کاهش سرعت از سرعت بیشنیه ۳۰ متر بر ثانیه در ساعت ۶ به ۱۷ متر بر ثانیه در ۸ صبح وجود داشتهاست. برای دو شبیهسازی دیگر این کاهش سرعت بین ساعت ۳ تا ۹ صبح پیش بینی شده است. اختلاف سرعت بیشنیه و کمینه شبیهسازی با مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۳۷ (نارنجی) حدود ۱۵ متر بر ثانیه بوده و در مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۴۷ این اختلاف ۶ متر بر ثانیه است. هر سه مدل افزایش تدریجی در سرعت باد تا ساعت ۱۲ را نشان میدهند. در بازه ساعت ۱۳ تا ۲۳ این روند تغییر میکند و شبیهسازیها عملکرد ضعیفی را نشان میدهند. دو شبیهسازی مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۴۷ و نیز شبیهسازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵، کاهش شدید سرعت باد را از ساعت ۱۲ تا ۱۴ نشان میدهند که این کاهش در دادههای اندازه گیری حدود ۲ متر بر ثانیه بین ساعت ۱۴ تا ۱۶ بودهاست. این در حالی است که شبیهسازی با مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۳۷ در

پیش بینی بیشنیه سرعت باد دارند. این خطا می تواند ناشی از وجود شیب زیاد در مناطق کوهستانی و اثر منفی آن بر شبیه سازی گردابه ها در مدل با ایجاد خطاهای زیاد باشد. از سوی دیگر به نظر می رسد در مناطق کوهستانی و پیچیده، مدل توربولانسی اسماگورینسکی عملکرد قابل قبول تری در مقایسه با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ داشته است.

در ایستگاه ام ای آر همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در ابتدای روز، شبیه سازی مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۴۷ جهش ناگهانی سرعت باد را در ساعت ۲ پیش بینی کرده است. اما در ادامه روز تا ساعت ۱۲ هر سه شبیه سازی از الگوی داده های اندازه گیری پیروی کرده اند. با این وجود، در ساعت ۱۳ دو شبیه سازی با دقت عمودی ۴۷ (هردو مدل توربولانسی اسماگورینسکی و مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵) علیرغم پیروی از الگوی رفتاری داده های اندازه گیری، جهش بسیار شدیدی در سرعت باد داشته و خطای بالایی دارند. در عین حال شبیه سازی با مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۳۷ با پیروی از الگوی داده های اندازه گیری، جهش می بر ا واقعیت را پیش بینی کرده است. در انتهای روز نیز هر سه مدل به هم همگرا شده و مقدار سرعت باد متوسط ۳ متر بر ثانیه را پیش بینی کرده اند.

این نتایج با دادههای اولیه مدل کوسمو ۱ که به عنوان شرایط مرزی و شرایط اولیه استفاده شدهاند، نیز مقایسه شدند. هدف بررسی عملکرد ورف در مقایسه با مدل کوسمو ۱ در اثر افزایش دقت افقی و تغییر به روش شبیهسازی گردابههای بزرگ در این مدل بودهاست. با توجه به شکل ۱۲ملاحظه میشود که در دو ایستگاه ام ای آر و ای وی آی هر سه شبیهسازی نتایج نزدیک به کوسمو ۱ داشته و در پیش بینی نوسانات سرعت باد عملکرد بهتری داشتهاند. به طور مثال در ساعت ۱ تا ۳ بامداد در ایستگاه ای وی آی ، مدل کوسمو ۱ افزایش سرعت را بسیار کمتر از ورف پیش بینی کردهاست. این در حالی است که آغاز شبیهسازی در کوسمو ۱ در ابتدای این روز نبوده و حتی مسئله یا به عنوان مثالی دیگر در ساعت ۱۱ تا ۱۸ در ایستگاه ام ای آر این مدل در پیش بینی نحوه نوسان سرعت ضعف داشته و کاهش سرعت نکردهاست. در ایستگاه اس ال فافیوال نیز این افزایش سرعت باد

در این بازه زمانی در مدل کوسمو۱ به درستی پیشبینی نشده و کاهش یکنواختی بدون افزایش سرعت باد نشان دادهشدهاست. با این حال در این ایستگاه، مدل کوسمو۱ اندازه سرعت را با خطای بسیار کمتری پیشبینی کردهاست. برای تبیین این موضوع میتوان به مسئله همگونسازی دادهها^۱ اشاره کرد. در مدلهای پیشبینی عددی هوا عموما این روش برای بهبود عملکرد مدل با استفاده از دادههای حاصل از اندازه گیری در ایستگاههای هواشناسی استفاده میشود. در این روش ابتدا یک شبیهسازی در مدل انجام شده و سپس با استفاده از دادههای حاصل از اندازه گیری در ایستگاههای هواشناسی در همان مدل نوش ابتدا یک شبیهسازی در مدل انجام شده و سپس با استفاده مینوان شرایط اولیه در گام زمانی بعدی استفاده میشوند [۳۷]. در مدل کوسمو۱ نیز این مکانیزم اجراشده و بخش اعظمی از تطابق نتایج با دادههای حاصل از اندازه گیری نشات گرفته از این روش است. میتوان ادعا کرد که این مقایسه مقایسهی منصفانهای نبوده و نتایج

در ایستگاه اسالافافیو۲ اندازه اختلاف خروجی کوسمو۱ با دادههای اندازه گیری مانند خروجی ورف بوده و تقریبا نتایج حاصل از ورف مشابه کوسمو ۱ بودهاست. با اینکه امکان دسترسی به لیست ایستگاههایی که در اصلاح نتایج کوسمو۱ استفاده شدهاند نیست، اما می توان گفت شاید علت وجود اختلاف بین نتایج کوسمو ۱ و دادههای اندازه گیری، عدم استفاده از این ایستگاه برای اصلاح کوسمو ۱ بوده است. از سویی دیگر در هر چهار نمودار، نتایج شبیهسازی با دقت عمودی ۳۷ متر، شباهت بیشتری به کوسمو۱ داشته و از الگوی آن پیروی میکند. از دیگر عوامل تفاوت عملکرد دو مدل میتوان به تفاوت در روش شبیهسازی اغتشاش درون جریان در مدلها اشاره کرد. در مدل کوسمو۱ به علت بزرگی سلولها و کمبودن دقت، از روش آماری برای درنظرگرفتن اثر توربولانس بر جریان استفاده شدهاست که این پارامتریسازیها در مقیاس مناسب عملکرد بسیار خوبی داشته و خطای بسیار کمی دارند. و در نتیجه منجر به نتایج خوبی خواهند شد. اما همانطور که در بخش ۱- اشاره شد، استفاده از این مدلهای آماری در دقت زیر یک کیلومتر مطلوب نبوده و در هر حال یافتن تنظیمات مناسب برای شبیه سازی با ورف برای دقت بسیار بالا در حالت استفاده از شبیهسازی گردابههای بزرگ نیاز اصلی

¹data assimilation



شکل ۱۲. مقایسه سرعت باد در سه شبیهسازی با دادههای اولیه کوسمو۱ و سرعت باد اندازه گیری شده در چهار ایستگاه در روز یکم ژانویه ۲۰۱۸ Fig. 12. Comparison of wind speed in three simulations with COSMO1 data and measured wind speed at 4 stations on January 1, 2018

در پتانسیلسنجی انرژی باد در مناطق کوهستانی و پیچیده بوده و تلاش برای بهبود عملکرد این مدل در این دقت مهم و بسیار کاربردی و مفید خواهد بود.

۳-۲- توزیع سطحی سرعت باد در سه ارتفاع مختلف از سطح زمین

برای بررسی توزیع سطحی باد، سه ارتفاع ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰۰ متر در ساعت ۲۱ که معمولا اتمسفر در شرایط پایدار و آرام قرار دارد، انتخاب شده و بررسی شدهاند. سرعت باد در هر سه شبیهسازی و خطوط هم تراز ارتفاع زمین رسم شدهاند. در ارتفاع ۵۰ متر بالاتر از سطح زمین شکل ۱۳، میتوان همبستگی معناداری بین ارتفاع زمین و الگوی سرعت باد مشاهده کرد. در هر سه مدل، سرعت باد درون دره بین ۰ تا ۱۰ متر بر ثانیه بوده و با افزایش ارتفاع سطح، سرعت باد افزایش مییابد. در ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر، سرعت باد در هر سه شبیهسازی به بیشینه مقدار خود رسیده و بین ۱۵ متر بر ثانیه (اسماگورینسکی– ۳۷ متر) تا ۳۵ متر بر ثانیه (انرژی جنبشی توبولانس مری (اسماگورینسکی– ۳۷ متر) تا ۳۵ متر بر ثانیه (انرژی جنبشی توبولانس بر ثانیه بیشتر از مقدار واقعی برآوردشدهبود، میتوان نتیجه گیری کرد بر ثانیه بیشتر از مقدار واقعی برآوردشدهبود، میتوان نتیجه گیری کرد

بوده و مدل در برآورد سرعت باد دچار خطا می شود. این خطا می تواند ناشی از کجی بیش تر از حد سلول ها در قلهی کوه ها بوده و دقت افقی ۱۰۰ و دقت عمودی ۴۷ متر برای رفع این خطا کافی نباشد [۳۵]. با این حال افزایش دقت عمودی به ۳۷ متر تا حدودی این اثر را تعدیل کرده و خطا در برآورد سرعت بیشینه در کوه ها کاهش یافته است. این الگو در ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح نیز وجود داشته و همچنان جریان تحت تاثیر توپوگرافی بوده و بین افزایش سرعت و افزایش ارتفاع هم بستگی وجود دارد (شکل ۱۴) با این حال با فاصله گرفتن از سطح به اندازه کافی، در ارتفاع ۲۰۰۰ متری جریانی نشان داده شده است که وابستگی به توپوگرافی نداشته و الگوی توزیع سرعت باد، با دو سطح بررسی شده قبلی کاملا متفاوت است (شکل ۱۵).

۴–جمعبندی

در پژوهش حاضر، شبیه سازی پیش بینی هوا برای منطقه ناهموار بادخیز مارتینی (دره رن) واقع در کشور سوییس انجام شده است. برای این شبیه سازی از مدل ورف استفاده شده است. سه شبیه سازی واقعی در ورف انجام شده که در منطقه بسیار ناهموار و پیچیده با شیب بیش از ۷۰ درجه قرار داشته و از داده های اولیه کو سمو ۱ با دقت بالا (۱ کیلومتر) به عنوان ورودی مدل استفاده شده است.



شکل ۱۳. مقایسه توزیع سطحی سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متر از سطح زمین در سه شبیهسازی با توجه به توپوگرافی منطقه (خطوط هم تراز ارتفاع زمین) در ساعت ۲۱ یکم ژانویه ۲۰۱۸

Fig. 13. Comparison of distribution of horizontal wind speed at a height of 50 m above the ground in three simulations according to the topography of the area (lines equal to Contour of elevation) at 21 January 2018



Smagorinsky, 47m







45

- 20 mind speed m/s

5

0



Fig. 14. Comparison of distribution of horizontal wind speed at a height of 100 m above the ground in three simulations according to the topography of the area (lines equal to Contour of elevation) at 21 January 2018



شکل ۱۵. مقایسه توزیع سطحی سرعت باد در ارتفاع ۳۰۰۰ متر از سطح زمین در سه شبیهسازی با توجه به توپوگرافی منطقه (خطوط هم تراز ارتفاع زمین) در ساعت ۲۱ یکم ژانویه ۲۰۱۸

Fig. 15. Comparison of distribution of horizontal wind speed at a height of 3000 m above the ground in three simulations according to the topography of the area (lines equal to Contour of elevation) at 21 January 2018

یکی از ویژگیهای شاخص این پژوهش، اجرای یک شبیهسازی واقعی در ورف با دقت بالا (۱۰۰ متر) و با استفاده از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ تعبیهشده در ورف است. این نوع از پژوهشها در موارد بسیار معدود صورت گرفتهاند. از دیگر شاخصههای این پژوهش انجام این شبیهسازی در منطقهای بسیار ناهموار و پیچیده است که تاکنون در هیچ پژوهشی مطالعه نشدهاست. در این پژوهش به بررسی اثر دو متغیر اندازه ارتفاع سلول (دقت عمودی) و مدل توربولانسی انرژی جنبشی آشفتگی۱/۵ و مدل توربولانسی اسماگورینسکی پرداخته شدهاست. چهار ایستگاه اندازهگیری سرعت باد در این منطقه وجود دارند که توپوگرافیهای متنوعی را پوشش میدهند. نتایج شبیهسازیهای متفاوت در این ایستگاهها نشان داد که بسته به نوع توپوگرافی منطقه، عملکرد شبیهسازیهای مذکور متفاوت است. بهطوری که در منطقهی هموار ایستگاه ای وی آی خطا بسیار پایین بوده و رفتار پیشبینیشده با دادههای اندازه گیری تطابق قابل قبولی دارند. با این حال در دره باریک مونتنیه بنیی ایستگاه امایآر، در زمان جهش سرعت باد در بعدازظهر، بین نتایج شبیهسازیها اختلاف دیده می شود. به نحوی که دو شبیه سازی با اندازه دقت عمودی کمتر، سرعت بیشینه بزرگتری را با خطای بیش از ۶ متر بر ثانیه تخمین زدهاند. در حالی که شبیهسازی با دقت عمودی بیشتر، در برآورد سرعت بیشینه ضعف داشته و آن را کمتر و با خطای ۴- متر بر ثانیه تخمین زدهاست. به نظر میرسد در این ناحیه بیشتر از نوع مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه، دقت عمودی (اندازه ارتفاع سلول) بر بهبود نتایج اثر داشتهاست. در شبیهسازی باد در ارتفاعات فویی، ایستگاههای اسالافافیو۲ و اسالافافیوال، علی رغم وجود خطای بالا (خطای ۱۰ متر بر ثانیه در ایستگاه اسالافافیو۲ و ۲۲ متر بر ثانیه در ایستگاه اسالافافیوال در شبیه سازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ و خطای ۱۷ و ۳/۵ متر بر ثانیه در مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ با دقت ۴۷ متر) و تفاوت زیاد دادههای اندازه گیری و نتایج، هر سه شبیه سازی عملکرد قابل قبولی در پیروی از رفتار سرعت باد داشتهاند. شبیهسازی که در آن مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه اسماگورینسکی استفاده شدهاست در مقایسه با شبیه سازی که مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ در آن بکار رفته، خطای کمتری در شبیهسازی جریان باد در مناطق کوهستانی داشته و نتایج مطلوب تری ارائه می دهد. با این وجود، پیش بینی بیش از حد

سرعت باد در نزدیکی سطح یک مشکل شناخته شده در ورف است [۴۹-۳۹]. با توجه به مقالات مرورشده، پژوهشگران بیان میکنند که یکی از دلایل وجود خطا در ارتفاعات در ورف، می تواند تحت تاثیر هموارسازی توپوگرافی باشد که در مدل انجام شدهاست. در واقع ویژگیهای توپوگرافی که در اثر هموارسازی از بین میروند و در نتیجه در شبیهسازی دیده نمی شوند، خود عامل ایجاد نیروی پسایی (به طور مثال نیروی پسای تولید شده توسط پوشش گیاهی) هستند که در حین شبیهسازی در نظر گرفته نمی شوند. بنابراین عدم درنظر گرفتن این نیروی پسا منجر به تخمین بیش از حد سرعت باد در ورف شده و خطای پیشبینی زیادی در سرعت باد دیده خواهد شد [۴۱, ۳۹]. می توان بیان کرد که به وجود آمدن این خطا در اثر محدودیتی است که ماهیت مدل ورف ایجاد میکند و نشات گرفته از عدم تنظیمات صحیح برای شبیهسازی نیست. به طور میانگین در تمامی ایستگاههای اندازه گیری، خطا به واسطه تغییر مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه از اسماگورینسکی سه بعدی به انرژی جنبشی توربولانسی ۱/۵، به ترتیب از ۱۰/۳۷ متر بر ثانیه به ۸/۳۷ و سپس به واسطه کاهش ارتفاع عمودی سلولها از ۴۷ متر به ۳۷ متر، خطا به ۱/۱۲۵ متر بر ثانیه تنزل یافتهاست.

با بررسی توزیع سطحی سرعت باد در سه ارتفاع مختلف از سطح زمین، مشاهده شد که در نزدیکی سطح زمین، جریان باد تحت تاثیر توپوگرافی و ارتفاعات بوده و بین سرعت باد و افزایش ارتفاع همبستگی قابل توجهی وجود دارد. به طوری که سرعت باد در درهها در كمترين مقدار بوده و با افزايش ارتفاع افزايش مىيابد. از سويى دیگر سرعت باد در قله کوهها افزایش شدیدی داشته و با توجه به دادههای اندازه گیری سرعت باد در ایستگاههای واقع شده در این مناطق، خطای زیادی دارد. این خطا با افزایش دقت عمودی تا حدی مهار شده ولى با اين وجود، خطا هم چنان وجود داشته و نياز است در پژوهشهای بعدی این موضوع مورد مطالعه بیشتری قراربگیرد. هم چنین با فاصله گیری کافی از سطح زمین مشاهده شد که وابستگی جریان و توپوگرافی به طرز معناداری کاهش یافته و این جریان تحت تاثیر ناهمواریهای سطح زمین نبوده و الگوی متفاوتی (جریان هوا در لایههای بالایی اتمسفر و جریان باد در مقیاس بزرگ) را پیروی میکند. نتایج این پژوهش نشان میدهد که برای نیل به نتایج بهتر در مناطق کوهستانی و از بین بردن خطای ناشی از کجبودن

simulation of wind flow over natural complex terrain: case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 57-43 (2015) 147.

- [5] B. Conan, A. Chaudhari, S. Aubrun, J. van Beeck, J. Hämäläinen, A. Hellsten, Experimental and numerical modelling of flow over complex terrain: the Bolund hill, Boundary-layer meteorology, 208-183 (2016) (2)158.
- [6] L. Li, P. Chan, Numerical simulation study of the effect of buildings and complex terrain on the low-level winds at an airport in typhoon situation, Meteorologische Zeitschrift, 183 (2012) (2)21.
- [7] J. Smargorinsky, General circulation experiment with the primitive equations, Monthly Weather Review, (3)91 164-99 (1963).
- [8] T. Uchida, Y. Ohya, Numerical simulation of atmospheric flow over complex terrain, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 293-283 (1999) (3-1)81.
- [9] T. Uchida, Y. Ohya, Large-eddy simulation of turbulent airflow over complex terrain, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 229-219 (2003) (2-1)91.
- [10] O. Temel, L. Bricteux, J. van Beeck, Coupled WRF-OpenFOAM study of wind flow over complex terrain, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 169-152 (2018) 174.
- [11] I. Staffell, S. Pfenninger, Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output, Energy, 1239-1224 (2016) 114.
- [12] S. Jafari, T. Sommer, N. Chokani, R.S. Abhari, Wind resource assessment using a mesoscale model: the effect of horizontal resolution, in: Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, American Society of Mechanical Engineers, 2012, pp. 995-987.
- [13] B. Kruyt, J. Dujardin, M. Lehning, Improvement of wind power assessment in complex terrain: the case of COSMO1- in the Swiss Alps, Frontiers in Energy Research, 102 (2018) 6.
- [14] B. Pickering, C.M. Grams, S. Pfenninger, Sub-national variability of wind power generation in complex terrain and its correlation with large-scale meteorology,

زیاد سلولها، بهتر است دقت افقی شبیهسازی افزایش دادهشود و شبیهسازی با دقت کمتر از صد متر در پژوهشهای بعدی انجام شود. از سویی دیگر مطالعه اثر متغیرهای دقت عمودی و مدل توربولانسی نیز در دقت کمتر از صد متر مطلوب به نظر میرسد.

در نهایت می توان بیان کرد که این پژوهش نشان داد که مدل ورف به خوبی قابلیت شبیهسازی باد مشابه با واقعیت را در مناطق پیچیده و در دقت بالا در صورتی که از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ برای حل جریان توربولانسی استفاده شود، دارد و یافتن بهترین تنظیمات برای اجرای یک شبیهسازی دقیق در این نرمافزار میسر است. این مهم به معنی عدم نیاز به صرف هزینه و زمان بسیار بیشتر برای شبیهسازی اتمسفر در مناطق کوهستانی با روشهای دیگر برای توليد نتايج دقيق و مطابق با واقع است. از سويي ديگر عملكرد موفق ورف، که در این پژوهش نشان دادهشدهاست، دستاورد مهمی برای یژوهشگران انرژیهای تجدیدپذیر و بالاخص انرژی باد است. چراکه از دیرباز شبیهسازی صحیح و کامل باد در یک منطقه با روش های آماری و یا عددی دارای چالشهای فراوانی بوده و دستیافتن به یک روش جامع و یافتن تنظیمات صحیح برای اجرای شبیهسازیهای عددی که منجر به نتایج واقعی گردند، همواره مطلوب و ضروری بودهاست. با این وجود، مطالعه اثر هریک از تنظیمات اعم از پارامتریسازیهای فیزیکی، دادههای تویوگرافی و حتی دادههای اولیه بر عملکرد ورف نیاز به صرف زمان بیشتر و آزمایشهای دقیق تر دیگری در آینده دارد. همچنین نیاز مبرمی به مطالعه عمیقتر پدیده توربولانس در نتایج ورف و بررسی دقیق پدیدههای همرفت، شناوری و دمای یتانسیل در مناطق کوهستانی وجود دارد.

مراجع

- [1] A.C. Kruyt, Potential and uncertainty of wind energy in the Swiss Alps, EPFL, 2019.
- [2] B. Blocken, 50 years of computational wind engineering: past, present and future, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 102-69 (2014) 129.
- [3] K. Murthy, O. Rahi, A comprehensive review of wind resource assessment, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1342-1320 (2017) 72.
- [4] B. Blocken, A. van der Hout, J. Dekker, O. Weiler, CFD

125-107 (2017) 90.

- [23] B. Sandeepan, V.G. Panchang, S. Nayak, K.K. Kumar, J.M. Kaihatu, Performance of the WRF model for surface wind prediction around Qatar, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 592-575 (2018) (3)35.
- [24] G. Kirkil, J. Mirocha, E. Bou-Zeid, F.K. Chow, B. Kosović, Implementation and evaluation of dynamic subfilter-scale stress models for large-eddy simulation using WRF, Monthly Weather Review, -266 (2012) (1)140 284.
- [25] J. Mirocha, J. Lundquist, B. Kosović, Implementation of a nonlinear subfilter turbulence stress model for largeeddy simulation in the Advanced Research WRF model, Monthly Weather Review, 4228-4212 (2010) (11)138.
- [26] C. Moeng, J. Dudhia, J. Klemp, P. Sullivan, Examining two-way grid nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model, Monthly weather review, (6)135 2311-2295 (2007).
- [27] D. Muñoz-Esparza, B. Kosović, J. Mirocha, J. van Beeck, Bridging the transition from mesoscale to microscale turbulence in numerical weather prediction models, Boundary-layer meteorology, 440-409 (2014) (3)153.
- [28] D. Muñoz-Esparza, B. Kosović, J. Van Beeck, J. Mirocha, A stochastic perturbation method to generate inflow turbulence in large-eddy simulation models: Application to neutrally stratified atmospheric boundary layers, Physics of Fluids, 035102 (2015) (3)27.
- [29] W.C. Skamarock, Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu., A Description of the Advanced Research WRF Model Version 2019 4.
- [30] Y. Liu, T. Warner, Y. Liu, C. Vincent, W. Wu, B. Mahoney, S. Swerdlin, K. Parks, J. Boehnert, Simultaneous nested modeling from the synoptic scale to the LES scale for wind energy applications, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 319-308 (2011) (4)99.
- [31] R.K. Rai, L.K. Berg, M. Pekour, W.J. Shaw, B. Kosovic, J.D. Mirocha, B.L. Ennis, Spatiotemporal variability of turbulence kinetic energy budgets in the convective boundary layer over both simple and complex terrain, Journal of Applied Meteorology and Climatology, (12)56

Environmental Research Letters, 044025 (2020) (4)15.

- [15] L.J. Wicker, W.C. Skamarock, Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes, Monthly weather review, 2097-2088 (2002) (8)130.
- [16] P.A. Jiménez, J. Dudhia, On the ability of the WRF model to reproduce the surface wind direction over complex terrain, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1617-1610 (2013) (7)52.
- [17] P.A. Jiménez, J. Dudhia, J.F. González Rouco, J. Montávez, E. García Bustamante, J. Navarro, J. Vilà Guerau de Arellano, A. Muñoz Roldán, An evaluation of WRF's ability to reproduce the surface wind over complex terrain based on typical circulation patterns, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, (2013) (14)118 7669-7651.
- [18] P.A. Jiménez, J.F. González-Rouco, E. García-Bustamante, J. Navarro, J.P. Montávez, J.V.-G. De Arellano, J. Dudhia, A. Muñoz-Roldan, Surface wind regionalization over complex terrain: Evaluation and analysis of a high-resolution WRF simulation, Journal of Applied Meteorology and Climatology, -268 (2010) (2)49 287.
- [19] P.A. Jiménez, J.F. González-Rouco, J.P. Montávez, E. García-Bustamante, J. Navarro, J. Dudhia, Analysis of the long-term surface wind variability over complex terrain using a high spatial resolution WRF simulation, Climate dynamics, 1656-1643 (2013) (8-7)40.
- [20] E.A. Aligo, W.A. Gallus, M. Segal, On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts, Weather and forecasting, (2009) (2)24 594-575.
- [21] R. Borge, V. Alexandrov, J.J. Del Vas, J. Lumbreras, E. Rodríguez, A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula, Atmospheric Environment, (2008) (37)42 8574-8560.
- [22] M.O. Mughal, M. Lynch, F. Yu, B. McGann, F. Jeanneret, J. Sutton, Wind modelling, validation and sensitivity study using Weather Research and Forecasting model in complex terrain, Environmental Modelling & Software,

V. Sharma, R. Mott, M. Daniels, M. Gabella, A. Berne, U. Germann, and M. Lehning (2018): Spatial variability of snow precipitation and accumulation in COSMO-WRF simulations and radar estimations over complex terrain, The Cryosphere, submitted, (20-1 (2018.

- [37] T.T. Warner, Numerical weather and climate prediction, cambridge university press, 2010.
- [38] N. Pineda, O. Jorba, J. Jorge, J. Baldasano, Using NOAA AVHRR and SPOT VGT data to estimate surface parameters: application to a mesoscale meteorological model, International journal of remote sensing, (1)25 143-129 (2004).
- [39] P.A. Jiménez, J. Dudhia, Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 316-300 (2012) (2)51.
- [40] F. Ngan, H. Kim, P. Lee, K. Al-Wali, B. Dornblaser, A study of nocturnal surface wind speed overprediction by the WRF-ARW model in southeastern Texas, Journal of applied meteorology and climatology, (2013) (12)52 2653-2638.
- [41] L. van Veen, The Perdigão field campaign: evaluation of the Cell Perturbation Method in atmospheric simulations, University of Twente, 2018.

3302-3285 (2017).

- [32] C. Talbot, E. Bou-Zeid, J. Smith, Nested mesoscale largeeddy simulations with WRF: Performance in real test cases, Journal of Hydrometeorology, -1421 (2012) (5)13 1441.
- [33] F.K. Chow, C. Schär, N. Ban, K.A. Lundquist, L. Schlemmer, X. Shi, Crossing multiple gray zones in the transition from mesoscale to microscale simulation over complex terrain, Atmosphere, 274 (2019) (5)10.
- [34] C. Hald, M. Zeeman, P. Laux, M. Mauder, H. Kunstmann, Large-eddy simulations of real-world episodes in complex terrain based on era-reanalysis and validated by groundbased remote sensing data, Monthly Weather Review, 4343-4325 (2019) (12)147.
- [35] M.H. Daniels, K.A. Lundquist, J.D. Mirocha, D.J. Wiersema, F.K. Chow, A new vertical grid nesting capability in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model, Monthly Weather Review, (2016) (10)144 3747-3725.
- [36] F. Gerber, V. Sharma, Running COSMO-WRF on veryhigh resolution over complex terrain (2018), Laboratory of Cryospheric Sciences CRYOS, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Lausanne, Switzerland, doi: 10.16904/envidat. 35, Cite along with: Gerber, F., N. Besic,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم S. Malekmohammadi, P. Hashemi Tari, Wind simulation in a complex terrain by numerical weather prediction method using large eddy simulation, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4221-4240. DOI: 10.22060/mej.2021.18863.6905

