

## 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

**تاریخچه داوری:**  
دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵  
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۱۶

**کلمات کلیدی:**  
باد  
پیش‌بینی عددی  
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ  
پتانسیل سنجی باد

**خلاصه:** پتانسیل سنجی انرژی باد در مناطق کوهستانی با استفاده از روش پیش‌بینی هوای عددی مورد توجه محققان قرار گرفته‌است. در این پژوهش به کمک این روش، باد در مارتینی در کشور سوئیس شبیه‌سازی شده‌است. این شبیه‌سازی دارای دقت افقی بسیار بالا (۱۰۰ متر) بوده که امکان استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را فراهم می‌کند. هدف از انجام این پژوهش بررسی میزان موفقیت مدل در شبیه‌سازی باد و اثر افزایش دقت عمودی و استفاده از دو مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه اسماکورینسکی و مدل انرژی جنبشی توربولانسی ۱/۵ بوده‌است. نتایج نشان می‌دهد که مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی باد در مقایسه با داده‌های دریافتی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری بوده و الگوی روزانه باد را به خوبی تولید کرده‌است. در منطقه‌ای که درون دره‌ای عریض و هموار قرار گرفته، دقت نتایج بسیار بالا بوده ولی در قله کوه‌ها خطای اندازه سرعت باد زیاد بوده‌است. در زمان وقوع بیشینه سرعت باد در قله کوه‌ها، با تغییر مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه از اسماکورینسکی سه بعدی به مدل انرژی جنبشی توربولانسی ۵/۱، خطا از ۲۲ به ۱۷ متر بر ثانیه و سپس با کاهش ارتفاع عمودی سلول‌ها از ۴۷ متر به ۳۷ متر، خطا از ۱۷ به ۷ متر بر ثانیه کاهش یافته‌است.

### ۱- مقدمه

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 دقیق‌تر سرعت باد در مناطق ناهموار و پیچیده تلاش می‌کنند. برای شبیه‌سازی عددی باد از دو روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش پیش‌بینی عددی هوا<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> توسط اسماکورینسکی و محققان دیگری اجرا شد [۴-۹]. با توجه به

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 کم‌بودن زمین‌های هموار برای نصب توربین‌های بادی در این مناطق، از علت‌های اصلی اجرای این دسته از پژوهش‌ها بوده‌است [۱]. بررسی پتانسیل انرژی بادی در یک منطقه، در ابتدا به روش داده‌برداری به کمک مراکز ثبت اطلاعات هواشناسی و بادسنج‌ها انجام می‌شده‌است [۲]. این روش به دلیل محدودیت در تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری و چالش در نصب دکل‌های داده‌برداری<sup>۱</sup> 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

1Mast

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: P\_hashemi@sbu.ac.ir

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 شده است [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 شده است.

اشتغل 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 پتانسیل بادی این کشور استفاده شده‌اند. این مدل‌ها میزان پتانسیل 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 سلول‌های شبکه بندی ناحیه محاسباتی (دقت افقی<sup>۱</sup>) را بر عملکرد این مدل‌ها در شبیه‌سازی باد مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش دقت تا ۳۰۰ متر، میزان انرژی باد پیش‌بینی شده در این منطقه بیش از پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته در گذشته بوده است. 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 می‌یابد. زیرا انتظار می‌رود که با اجرای شبیه‌سازی با دقت بالا (در مقیاس صد متر و کمتر از آن) خطا در سرعت باد پیش‌بینی شده کاهش یافته‌شده و پتانسیل‌سنجی انرژی بادی صحیح‌تری برای این منطقه ممکن شود [۱۲].

برای این منظور، مدل ورف<sup>۲</sup> که در اجرای شبیه‌سازی با دقت‌های مختلف بسیار قدرتمند بوده و نیز دارای جامعه کاربری گسترده و پشتیبانی به‌روزی است، برای این پژوهش انتخاب شده است. 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 میانگین‌گیری 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 بیمنز 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<sup>۳</sup> را بر عملکرد ورف مطالعه کردند [۲۰-۲۳]. گروهی از پژوهش‌ها بر بررسی عملکرد ورف در صورت استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در حل کردن اغتشاشات در حالت ایده‌آل و بهبود این روش تمرکز کردند. در حالت ایده‌آل، یک شبیه‌سازی ساده‌سازی شده در ورف انجام می‌شود 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 [۲۴-۲۹]. در مقابل، در حالت واقعی بخشی از اتمسفر با دریافت شرایط مرزی و شرایط اولیه واقعی از شبیه‌سازی‌های دیگر، در مقطع زمانی معینی شبیه‌سازی می‌شود و قابل استفاده برای مطالعه اتمسفر و پیش‌بینی 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 اعتبارسنجی و بررسی عملکرد مدل ورف در دقت بسیار بالا و در حالت واقعی که از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده می‌کند، 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 بدست‌آمده و داده‌های اندازه‌گیری 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 تلسکوپی دقت افقی از ده کیلومتر به ۳۰ متر افزایش یافته است [۳۱]. مرور پژوهش‌های ذکر شده نشان می‌دهد که تاکنون در هیچ

1Horizontal Resolution

2Weather Research and Forecasting Model (WRF)

3Physical parameterizations

بوده که بسیار بیشتر از نسبت پیشنهادی چو و همکاران است و منجر به شکل‌گیری 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<sup>۱۵</sup> 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 چشم‌پوشی می‌شود.

در مجموع می‌توان 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 گرفته خواهد شد، لازم است اثر عوامل تاثیرگذار بر عملکرد ورف در این حالت نیز بررسی شود. به دلیل اینکه در ورف تنها دو مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه اسمانگورینسکی 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 خواهد شد. 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<sup>۶</sup> خواهد شد [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 در نظر گرفته شده (۱۰۰ متر) و اثر کاهش ارتفاع سلول‌ها (یا افزایش دقت عمودی) مطالعه خواهد شد.

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 قرار گرفته‌است. برای اجرای این شبیه‌سازی‌ها یک منطقه با توپوگرافی پیچیده انتخاب شده‌است. این ناحیه دارای یک دره ۷ شکل، با شیب

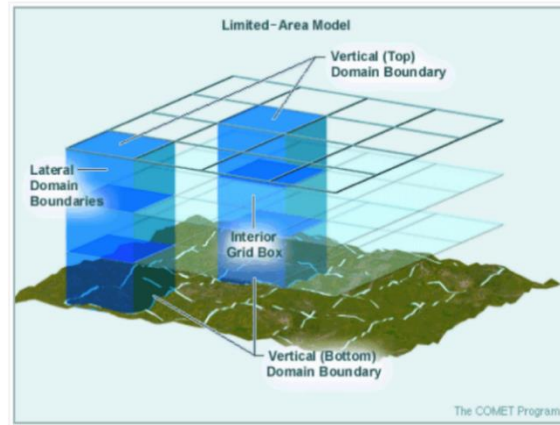
پژوهشی شبیه‌سازی یک منطقه بسیار ناهموار با توپوگرافی پیچیده در حالت واقعی در ورف با دقت افقی بسیار بالا در حالتی که از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده کند، انجام نشده و اعتبارسنجی نشده‌است.

از سویی دیگر با مرور بر پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه، مشاهده می‌شود که تاکنون افزایش دقت افقی در ورف تا صد متر و حتی ده متر انجام شده، ولی در تمامی پژوهش‌ها به جز یکی از آن‌ها، این افزایش با روش تلسکوپی یا تو در تو<sup>۱</sup> بوده‌است [۳۲، ۳۱]. روش تلسکوپی از قابلیت‌های نرم افزار ورف است که برای افزایش دقت افقی استفاده می‌شود. در این روش کاربران یک ناحیه بزرگ را به نام ناحیه والد<sup>۲</sup> در نظر گرفته و به طور مثال با دقت ۱۰ کیلومتر شبیه‌سازی می‌کنند. سپس ناحیه کوچکتری که ناحیه فرزند<sup>۳</sup> خوانده می‌شود و درون ناحیه والد بوده و تنها قسمتی از آن را پوشش می‌دهد، انتخاب شده و ابعاد سلول‌های آن با نسبت یک سوم یا یک پنجم کمتر از ابعاد سلول‌های والد در نظر گرفته می‌شود. از نتایج حاصل از شبیه‌سازی در ناحیه والد به عنوان شرایط مرزی و نیز شرایط اولیه و داده‌های ورودی برای اجرای شبیه‌سازی در ناحیه فرزند استفاده شده و شبیه‌سازی اجرا می‌شود. این روند حل تو در تو ادامه می‌یابد تا در نهایت یک ناحیه با دقت افقی بسیار بالا (به طور مثال ۱۰ متر) شبیه‌سازی شود [۲۹]. اما چو و همکاران در پژوهشی نشان دادند که استفاده از روش تلسکوپی منجر به شکل‌گیری خطا در فرایند حل اغتشاشات درون اتمسفر می‌شود و اگر بدون استفاده از روش تلسکوپی 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].

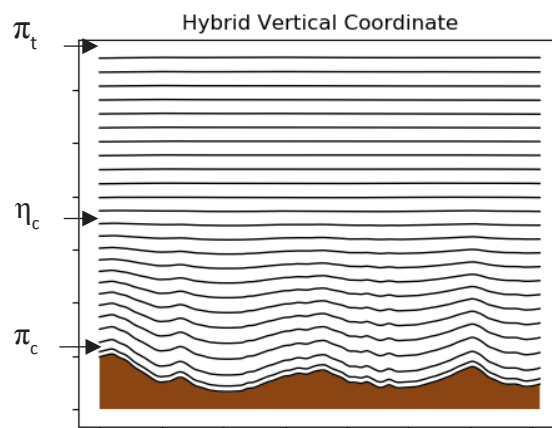
تنها پژوهشی که در آن یک شبیه‌سازی در ورف بدون استفاده از روش تلسکوپی با دقت بسیار بالا (۳۰ متر) و با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اجرا شده‌است، پژوهش هالد و همکاران است [۳۴]. داده‌های اولیه این شبیه‌سازی از پایگاه داده ارا-اینتریم<sup>۴</sup> با دقت ۸۰ کیلومتر گرفته شده‌است. در پژوهش هالد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

1Nesting  
2Parent  
3Child  
4ERA Interim Reanalysis

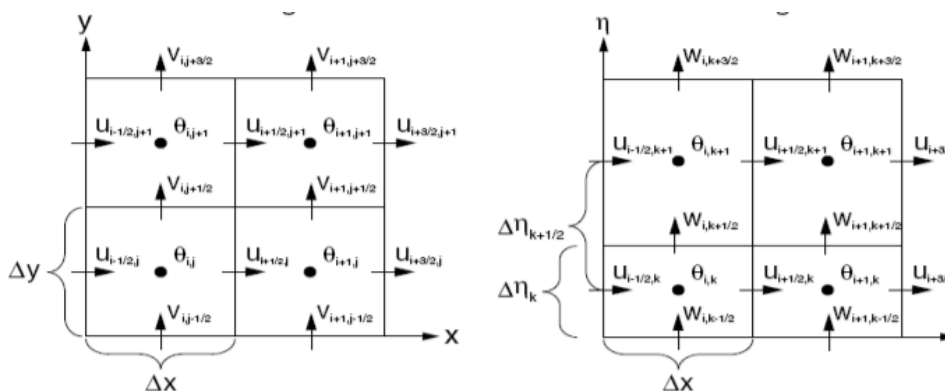
5Consortium for Small-scale Modeling1 (COSMO1)  
6Skewness



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 هیبریدی سیگما- فشار ثابت.  
**Fig. 2. Hybrid Sigma - Constant Pressure Vertical Coordinates**



شکل ۳. شبکه‌بندی شبکه غیرمترکز 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]**

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 1<sup>st</sup> order Advection and 3<sup>rd</sup> order Rung Kutta time integration schemes

درجه حل عددی فضایی (انتقال)				روش حل زمانی
درجه ۶	درجه ۵	درجه ۴	درجه ۳	رانگ کوتا درجه ۳
۱/۰۸	۱/۴۲	۱/۲۶	۱/۶۱	

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 به روز شدن مداوم کد حل گر و اصلاح و بهبود مداوم آن توسط تیم پشتیبانی آن، این حل گر برای اجرای شبیه سازی انتخاب شده است [۳۶].

در این مدل از شبکه بندی سه بعدی و از روش تفاضل محدود استفاده می شود. با توجه به مکعب مستطیلی بودن هندسه سلول های این شبکه بندی سه بعدی، 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 افقی<sup>۶</sup> شناخته می شود (شکل ۱). در این پژوهش این اندازه ۱۰۰ متر است. در حالی که اندازه ارتفاع سلول ها یا دقت عمودی<sup>۷</sup> متغیر است. این ارتفاع در نزدیکی سطح زمین (دیواره) کمتر بوده و با فاصله گرفتن از سطح زمین ارتفاع سلول ها افزایش می یابد. لازم به ذکر است که در این 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 نرم افزار مرسوم شده است و عملکرد بهتری در مقایسه با مختصات سیگما دارد [۲۹]. در این شبیه سازی نیز از مختصات عمودی هیبریدی استفاده شده است که برشی افقی از این مختصات در شکل ۲ نشان داده شده است. در مختصات سیگما تمامی سطوح عمودی از ناهمواری های سطح زمین تبعیت می کنند. در حالی که در مختصات هیبریدی این سطوح تا ارتفاع معینی از ناهمواری های سطح زمین پیروی کرده و بعد از آن به خطوط فشار ثابت تبدیل می شوند. با توجه به اینکه در سطوح

بالای ۷۰ درجه با حداکثر ارتفاع ۳۵۰۰ متر از سطح دریا (منطقه ناهموار بادخیز مارتینی در کشور سوئیس) است. در این شبیه سازی ها از داده های اولیه (خروجی مدل کوسمو ۱) با دقت ۱ کیلومتر استفاده شده است. این پژوهش با همکاری و در گروه کرایوس<sup>۱</sup> دانشگاه پلی تکنیک لوزان<sup>۲</sup> در کشور سوئیس صورت گرفته است. در ادامه ابتدا در بخش ۲- مدل ورف به اختصار معرفی شده و فرایند شبیه سازی 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 خواهد شد.

## ۲- فرآیند شبیه سازی در مدل ورف

### ۲-۱- معرفی مدل ورف

مدل ورف یک مدل عددی برای شبیه سازی عددی اتمسفر و پیش بینی هوا در مقیاس های مختلف (گستره جهانی تا گستره چند کیلومتری) است. در این مدل می توان اتمسفر را در یک ناحیه محاسباتی، در دو حالت ایده آل یا واقعی به روش عددی شبیه سازی کرد. هر مدل پیش بینی عددی آب و هوا دارای دو بخش هسته دینامیک یا حل گر<sup>۳</sup> و بخش فیزیکی است. در مدل ورف نیز دو حل کننده ی ارو<sup>۴</sup> و ان ام ام<sup>۵</sup> طراحی شده اند که کاربری های متفاوتی دارند. برای این شبیه سازی از حل کننده ارو استفاده شده است. هر دو حل گر ارو و ان ام ام حل گرهای غیرهیدرواستاتیکی هستند که برای اجرای شبیه سازی در مدل ورف طراحی شده اند. حل گر ارو با توجه به اینکه توانمندی های بیشتری در مقایسه با حل گر ان ام ام دارد در پژوهش های مرتبط به اتمسفر بیشتری مورد استفاده قرار می گیرد.

1Cryos

2EPFL

3Dynamical Solver - Dynamical Core

4The Advanced Research WRF (ARW)

5Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM)

6Horizontal Resolution

7Vertical Resolution

از عدد به دست آمده از رابطه (۱)، انتخاب می‌شود [۲۹].

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

۲-۱-۲- طرح های توربولانسی مقیاس زیر شبکه در حالت شبیه سازی گردابه های 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 می‌شوند. برای مدل سازی مقیاس زیر شبکه گزینه های مختلفی در ورف وجود دارد [۲۹]. مدل توربولانسی اسماگورینسکی سه بعدی<sup>۸</sup> که یک مدل خطی ضریب لزجت آشفتگی<sup>۹</sup> بوده و از نرخ تنش و یک ثابت  $C_s$  که اغلب ۰/۲۵ انتخاب می‌شود، برای محاسبه ضریب لزجت آشفتگی  $K_{h,v}$  استفاده می‌کند که در آن  $Pr$  عدد پرانتل با مقدار یک سوم،  $N$  فرکانس برانت واسالا و  $D$  تنسور تغییر فرم است (رابطه (۲)).

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

مدل انرژی جنبشی آشفتگی  $11/5$  نیز یک مدل خطی دیگر برای محاسبه ضریب لزجت آشفتگی است. که انرژی جنبشی آشفتگی مقیاس زیر شبکه  $e$  را به کمک یک معادله اضافه محاسبه می‌کند. روش محاسبه انرژی جنبشی در این روش در فصل چهارم مرجع [۲۹] به تفصیل بیان شده است. ضریب لزجت آشفتگی در این روش از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$K_{h,v} = C_k l_{h,v} \sqrt{e} \quad (3)$$

۲-۲- شرایط مرزی و شرایط اولیه

در ورف امکان دو نوع شبیه سازی واقعی و ایده آل تعبیه شده است. شبیه سازی های ایده آل 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 پیش بینی هوا به طور مستقیم

بالای جریان تاثیر پذیری 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 شبکه بندی ناحیه محاسباتی برای آرایش متغیرهای درون شبکه، می‌توان تمامی متغیرها را در یک نقطه درون سلول تعریف کرد که به این حالت شبکه متمرکز<sup>۱</sup> می‌گویند. حالت دیگر آن است که متغیرها در بیش از یک نقطه از شبکه تعریف شوند. در این حالت شبکه به نام شبکه غیر متمرکز<sup>۲</sup> شناخته می‌شود. شبکه غیرمتمرکز نوع آرکوا-سی<sup>۳</sup> در این شبیه سازی استفاده شده است (شکل ۳).

۲-۱-۱- روش حل عددی در حل گر ارو

معادله های 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 معادله های پایستگی ابتدا به کمک روش انتقال<sup>۴</sup>، هریک از متغیرهای سرعت در زمان  $t$  حل شده و سپس با تبدیل معادله دیفرانسیلی به معادله مشتق معمولی<sup>۵</sup> متغیر برای گام زمانی بعدی، به کمک روش رانگ کوتای درجه سه<sup>۶</sup> محاسبه می‌شود. مدل ورف قابلیت استفاده از روش انتقال درجه ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ را دارد [۱۵]. لازم به ذکر است که گام زمانی رانگ کوتا به عدد کورانت<sup>۷</sup> و روش انتقال انتخاب شده وابسته است. ویکر و اسکاماروک [۱۳] نشان دادند که بیشینه عدد کورانت برای حفظ پایداری، در صورت استفاده از هریک از روش های انتقال خطی یک بعدی و رانگ کوتای درجه سه چه مقداری خواهد بود (جدول ۱) [۱۵].

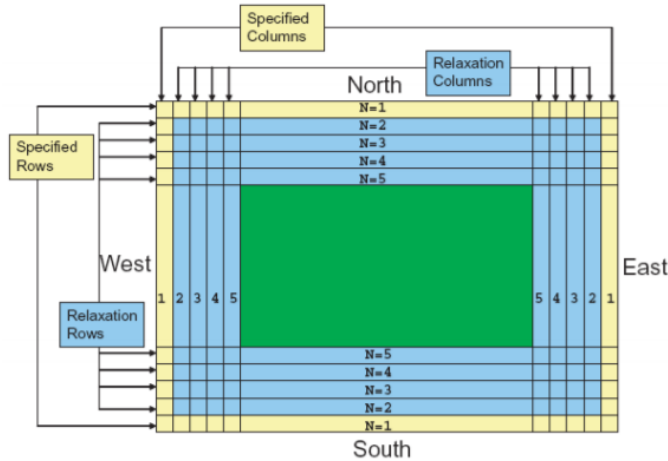
برای حالت انتقال سه بعدی، این عدد باید  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  برابر عدد موجود در جدول ۱ باشد. بنابراین در حل گر ارو گام زمانی لازم برای شبیه سازی سه بعدی به صورت رابطه (۱) خواهد بود.  $Cr_{theory}$  عدد کورانت درون جدول بوده و  $u_{max}$  بیشینه سرعتی است که انتظار می‌رود مدل شبیه سازی کند.  $\Delta x$  نیز اندازه هر سلول است. برای تامین یک محدوده اطمینان، به طور معمول گام زمانی که ۰/۲۵ کمتر

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

---

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





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

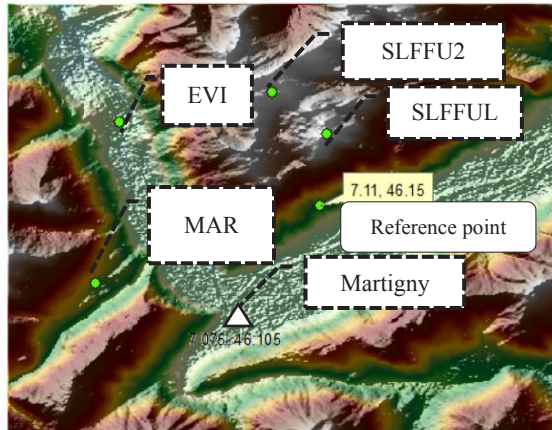
شده‌است. این مشتق‌ها برای به‌دست‌آوردن مقدار متغیر در گام‌های زمانی بعدی در مرزهای جانبی استفاده می‌شوند. برای سرعت عمودی در بخش تعیین‌شده لایه مرزی جانبی، شرط مرزی گرادیان صفر تعریف شده و برای متغیرهای میکروفیزیکی به جز بخار، شرایط مرزی وابسته به جریان تعریف شده‌است به نحوی که اندازه متغیر در ورودی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

#### ۲-۱- هموارسازی توپوگرافی:

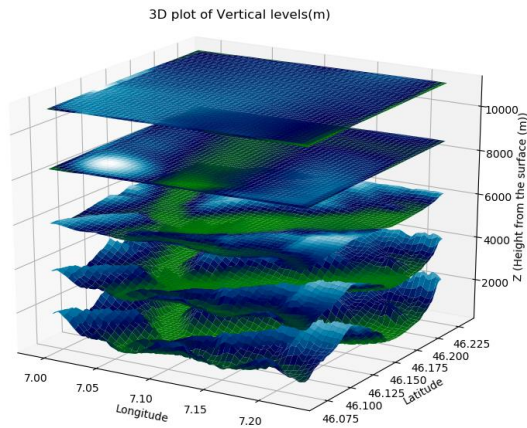
در یک توپوگرافی پیچیده با شیب‌های بسیار تند، اگر از مختصات تعقیب‌کننده زمین استفاده شود، سلول‌های نزدیک سطح زمین مورب شده و اختلاف ارتفاع دو سلول مجاور از اختلاف ارتفاع دو سطح عمودی بیشتر می‌شود. این پدیده احتمال بروز خطا و ناپایداری

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 پرودیک، 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) به‌دست‌آمده‌اند، برای پارامترهای جریان در ورودی حجم کنترل در نظر گرفته شده و برای تعیین شرایط اولیه و شرایط مرزی پیش پردازش می‌شوند. داده‌های استاتیک عبارتند از: ۱- 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 سطح زمین، دمای سطح دریا و یخ‌های شناور بر دریاها [۲۹].

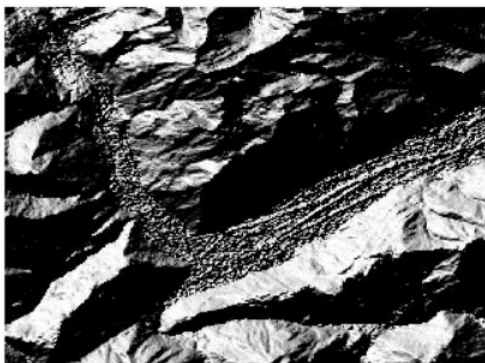
شرایط مرزی عمودی در پایین‌ترین لایه شرط عدم لغزش و در بالاترین لایه شرط فشار ثابت با شار صفر در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای سرعت، دمای پتانسیل، نسبت اختلاط: نسبت جرم بخار آب به جرم هوای خشک، ستون فشار هوای خشک و پتانسیل نسبت به زمین، به عنوان قیود در مرزها (بیرونی‌ترین سلول‌های ناحیه محاسباتی) استفاده می‌شوند. برای هر یک از متغیرها علاوه بر خود متغیر در زمان اولیه، مشتق متغیر نسبت به زمان نیز محاسبه



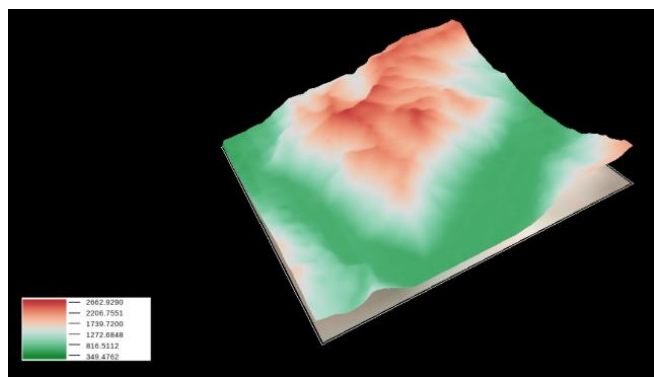
شکل ۵. محل ایستگاه‌های ای وی آی، ام‌ای آر، اس‌ال‌اف‌ای‌یو‌ال، اس‌ال‌اف‌ای‌یو‌ا و شهر مارتینی در ناحیه‌ی شبیه‌سازی شده  
 Fig. 5. Location of stations EVI, MAR, SLFFUL, SLFFU2 and Martigny in domain



شکل ۶. نمای سه بعدی مکان عمودی پنج سطح از ۷۴ سطح عمودی  
 Fig. 6. Three-dimensional view of the vertical location of five levels out of 74 vertical levels



الف



ب

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



جدول ۲. مشخصات شبیه سازی‌های اجرا شده در دقت ۱۰۰ متر

Table 2. Specifications of simulations performed at 100 meters resolution

دقت ۱۰۰ متر	اندازه ناحیه محاسباتی (کیلومتر)	دقت (متر)	کمینه ارتفاع نزدیک‌ترین سطح (متر)	بیشینه ارتفاع دورترین سلول (متر)	فشار تعیین شده برای آخرین لایه (پاسکال)
شبیه‌سازی اول	۱۵×۱۵	۱۰۰	۴۷	۱۷۷	۱۵۰۰۰
شبیه‌سازی دوم	۱۵×۱۵	۱۰۰	۴۷	۱۷۷	۱۵۰۰۰
شبیه‌سازی سوم	۱۵×۱۵	۱۰۰	۳۷	۸۶	۴۰۰۰۰

خروجی مدل کاربردی نخواهند بود؛ 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، آشفستگی 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<sup>۱</sup> استفاده شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش دقت شبیه‌سازی بالا بوده و روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای حل اغتشاشات در نظر گرفته شده است، نیازی به انتخاب مدل پارامتری‌سازی برای آشفستگی نبوده است.

#### ۲-۴- تنظیمات عددی شبیه‌سازی در ورف

شبیه‌سازی با ویرایش چهارم نرم‌افزار ورف در سوپر کامپیوتر پیز دینت<sup>۲</sup> واقع در مرکز ملی ابرمحاسبات سوئیس<sup>۳</sup> صورت گرفته است. ناحیه محاسباتی انتخاب شده برای این پژوهش یک منطقه ۱۵×۱۵ کیلومتر مربعی، واقع شده بین دو طول جغرافیایی ۶/۹۸ تا ۷/۲۱ درجه شرقی و دو عرض ۴۶/۰۶ و ۴۶/۲۳ شمالی است. در این ناحیه چهار ایستگاه اندازه‌گیری متعلق به سازمان هواشناسی سوئیس<sup>۴</sup>، موجود است. دو ایستگاه اسال‌اف‌ایوآل<sup>۵</sup> و اسال‌اف‌ایو<sup>۶</sup> در ارتفاعات کوه‌های فویی-گراند شاوالارد<sup>۷</sup> و فویی-گراند کوغ<sup>۸</sup> قرار گرفته‌اند.

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 می‌توان حداکثر شیب موجود در ناحیه محاسباتی را کاهش داد. این روش یک روش میانگین‌گیری برای هموار کردن ارتفاع در یک ناحیه است. در این روش به ارتفاع سلول آ وزن ۲ و به ارتفاع سلول‌های مجاور، ۱-آ و ۱+آ وزن یک داده شده و با جمع کردن و میانگین‌گیری این سه ارتفاع، مقدار ارتفاع حاصل به سلول اختصاص داده می‌شود. به این ترتیب ارتفاع در هر نقطه متوسط‌گیری شده و اختلاف ارتفاع بین نقاط مجاور کاهش یافته و در کل توپوگرافی ناحیه محاسباتی هموارتر می‌شود. این روش کمک می‌کند که مدل در حین شبیه‌سازی ناپایدار نشود. در ورف امکان تکرار این هموارسازی نیز فراهم شده است تا با تکرار این روند به تعداد دلخواه، شیب مطلوب حاصل شود [۲۹]. در پژوهش حاضر نیز از این روش استفاده شده و فرآیند هموارسازی دو بار تکرار شده است که جزئیات آن در بخش ۲-۴ ارائه شده است.

#### 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 پارامتری‌سازی را می‌توان از این منظر توضیح داد که بدون وجود پارامتری‌سازی درون مدل، نتایج

1RRTMG

2Piz Daint

3The Swiss National Supercomputing Centre

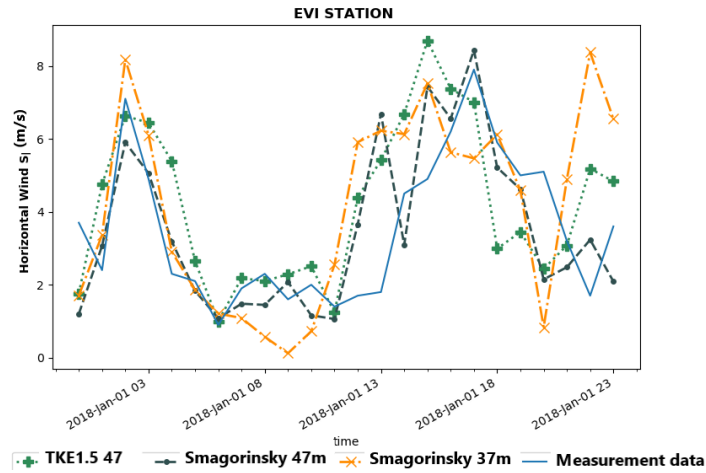
4Meteoswiss (the Federal Office of Meteorology and Climatology)

5SLFFUL

6SLFFU2

7Fully - Grand Chavalard

8Fully - Grand Cor



شکل ۸. مقایسه سرعت باد در سه شبیه‌سازی با سرعت باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه ای وی 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<sup>۵</sup> مناسب در ابعاد سلول، بالاترین فشار که تعیین‌کننده ارتفاع آخرین سطح است، برای دو شبیه‌سازی ۴۰۰ هکتوپاسکال و برای یک شبیه‌سازی ۱۵۰ هکتوپاسکال در نظر گرفته شده است. بنابراین کمترین ارتفاع سلول‌ها در نزدیکی سطح زمین (از این پس به نام دقت عمودی ذکر خواهد شد) به ترتیب ۴۷، ۴۷ و ۳۷ متر بوده و پس از افزایش تدریجی در انتهای لایه‌ها به ۱۷۷، ۱۷۷ و ۸۶ متر رسیده است. در شکل ۶ نمایی سه بعدی از پنج سطح عمودی که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند، ترسیم شده است. در این شکل اولین سطح کاملاً از شکل توپوگرافی تبعیت می‌کند در حالی که به تدریج با افزایش ارتفاع این تبعیت کاهش یافته و آخرین لایه کاملاً مسطح شده است.

اطلاعات توپوگرافی منطقه از مدل دیجیتالی ارتفاعات زمین استر<sup>۶</sup> با دقت یک آرک ثانیه<sup>۷</sup> که معادل سی متر است، دریافت شده است. در این ناحیه به علت کوهستانی بودن منطقه و وجود شیب بالاتر از ۷۰ درجه، با کمک روش ملایم‌سازی، حداکثر شیب به ۵۰ درجه رسیده است. توپوگرافی ورودی به مدل قبل و پس از هموارسازی به ترتیب در شکل ۷ الف و ب نشان داده شده‌اند. برای داده‌های کاربری زمین<sup>۸</sup> از داده‌های کورین<sup>۹</sup> متعلق به آژانس محیط‌زیست اروپا<sup>۱۰</sup> استفاده شده و به کمک جدول موجود در [۳۶، ۳۸] به

ایستگاه ای‌وی‌ای<sup>۱</sup> در منطقه هموار و پهن درون دره در منطقه اویونا<sup>۲</sup> و ایستگاه ام‌ای‌آر<sup>۳</sup> در دره باریک مونتینی بنی<sup>۴</sup> واقع شده‌اند. نقطه مرجع شبیه‌سازی 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 گرفته شده است. گام زمانی، لازم برای حفظ پایداری مدل، شبیه‌سازی ۰/۰۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این مدل حداکثر گام زمانی قابل استفاده  $0/18 = 0/03 \times 6$  ثانیه (بخش ۲-۱-۱) است. ابتدا شبیه‌سازی را با گام ۰/۱ ثانیه آغاز کرده و با بررسی پایداری مدل، مقدار بهینه ۰/۰۵ ثانیه انتخاب شده است [۲۹]. داده‌های مدل کوسمو<sup>۱</sup> 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 کوسمو<sup>۱</sup> و ورف از روشی که توسط گربر و همکاران [۳۶] در گروه کرایوس پیش از این پژوهش طراحی و بکار گرفته شده، استفاده شده است. دقت افقی انتخاب شده برای شبیه‌سازی (اندازه سلول‌های افقی) ۱۰۰ متر است. مختصات عمودی انتخاب شده برای این شبیه‌سازی، مختصات هیبریدی بوده و تعداد سطوح عمودی ۷۴ عدد است. به منظور رعایت

5 Aspect Ratio  
 6 Aster Global Digital Elevation Model  
 7 Arc second  
 8 Land use  
 9 Corine dataset  
 10 European environmental agency

1 EVI  
 2 Evionnaz  
 3 MAR  
 4 Montagnier Bagnes

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 اندازه‌گیری 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، می‌توان این افزایش سرعت باد را مربوط به الگوی رفتار روزانه باد در مناطق کوهستانی و دره‌ها نسبت داد. در این الگو در طول روز بادهای اناباتیکی از درون دره به سمت قله کوه و در شب بادهای کاتاباتیکی از ارتفاعات سرد شده به سمت دره می‌وزند. در واقع می‌توان گفت به احتمال زیاد این افزایش مرتبط با بادهای اناباتیکی است<sup>۲</sup>. ولی با این حال بررسی این موضوع نیاز به تحقیق در داده‌های اندازه‌گیری داشته و مطالعه عمیق‌تری را می‌طلبد 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. مجدداً با فرض اینکه در این روز هوا در حالت آرام باشد می‌توان 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 اندازه‌گیری (۲ متر بر ثانیه) تولید کنند ولی شبیه‌سازی 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

فرمت یواس‌جی‌اس<sup>۱</sup> تبدیل شده‌اند. در این شبیه‌سازی‌ها به علت بالا بودن دقت شبیه‌سازی (۱۰۰ متر)، اغتشاشات درون لایه مرزی پارامتری‌سازی نشده و به صورت صریح به کمک روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ حل می‌شوند. برای بررسی اثر استفاده از هریک از مدل‌های توربولانسی مقیاس زیرشبه، از هردو مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ و اسماگورینسکی سه‌بعدی برای سه شبیه‌سازی مجزا استفاده شده و اثر آن‌ها را بر نتایج بررسی شده‌است. در جدول ۲ مشخصات این شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده‌است.

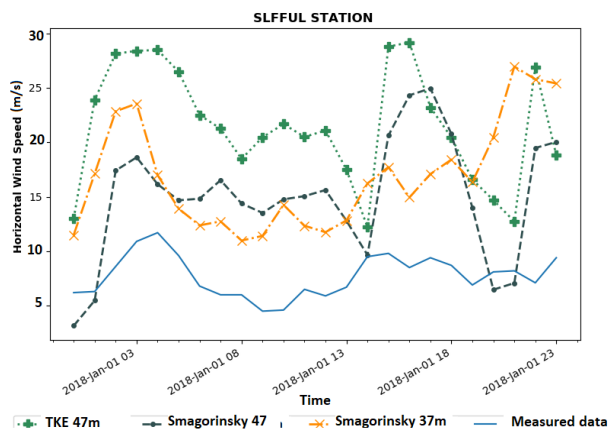
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اعتبارسنجی توزیع زمانی سرعت باد

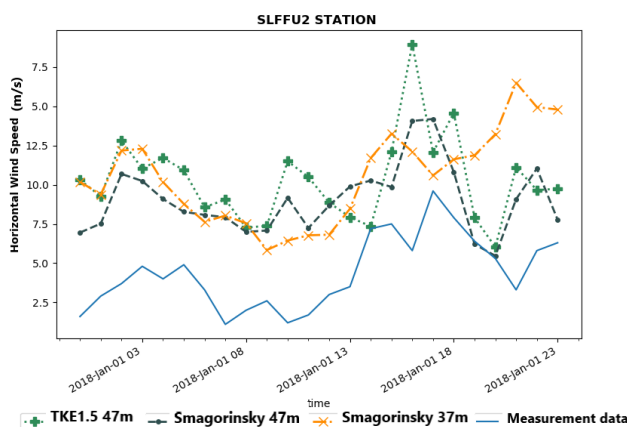
پس از انجام سه شبیه‌سازی با دقت صد متر در ناحیه مارتینی، اندازه سرعت باد در هر ساعت در ارتفاع ده متری از سطح زمین در هر سه شبیه‌سازی، با داده‌های اندازه‌گیری باد در چهار ایستگاه موجود در این ناحیه مقایسه شدند. این نتایج در شکل ۸، شکل ۹، شکل ۱۰ و شکل ۱۱ ارائه شده‌اند.

در ایستگاه ای وی آی واقع شده در شمال غربی ناحیه محاسباتی، به‌طور کلی شبیه‌سازی‌ها 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 اندازه‌گیری بوده‌است. با توجه 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 دقیقاً به سرعت بیشینه ۷ متر بر ثانیه مطابق با داده‌های اندازه‌گیری رسیده‌اند. شبیه‌سازی با مدل توربولانسی اسماگورینسکی با دقت عمودی ۴۷ متر (رنگ سیاه)، مقدار بیشینه سرعت در حدود ۶ متر بر ثانیه و شبیه‌سازی با دقت عمودی ۳۷ متر (رنگ نارنجی)، بیشینه سرعت ۸ متر بر ثانیه را پیش‌بینی کرده‌اند. در ادامه هر سه شبیه‌سازی کاهش

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



شکل ۹. مقایسه سرعت باد در سه شبیه‌سازی با سرعت باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه اس‌ال‌اف‌ایو‌ال 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

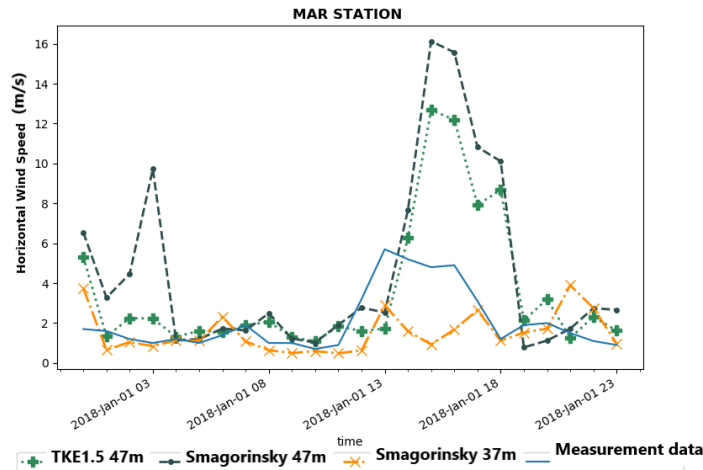


شکل ۱۰. مقایسه سرعت باد در سه شبیه‌سازی با سرعت باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه اس‌ال‌اف‌ایو‌۲ در روز یکم ژانویه ۲۰۱۸  
 Fig. 10. Comparison of wind speed in three simulations with measured wind speed at SLFFU2 station on January 1, 2018

باشد و نیاز به مطالعه بیشتر و بررسی عمیق‌تری در آینده دارد. از جهت دقت عمودی، شبیه‌سازی‌های با دقت عمودی کمتر (اندازه اولین سلول تقریباً 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 اس‌ال‌اف‌ایو‌ال و اس‌ال‌اف‌ایو‌۲ که در ارتفاعات فوی قرار گرفته‌اند، شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب، اختلاف اندازه

شبیه‌سازی جریان با دقت کافی بوده‌است. با این وجود، هریک از این شبیه‌سازی‌ها دارای تفاوت‌هایی هستند که می‌توان از دو جنبه دقت عمودی و مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه، آن‌ها را مقایسه کرد. شبیه‌سازی‌هایی که از مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه اسماگورینسکی استفاده کرده‌اند، در مقایسه با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵، از لحاظ زمانی با داده‌های اندازه‌گیری تطابق بیشتری دارند. در حالی که شبیه‌سازی با مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵، افزایش یا کاهش سرعت را یک یا دو ساعت پیش‌تر از واقعیت و دیگر شبیه‌سازی‌ها پیش‌بینی کرده‌است. این موضوع ممکن است ناشی از ضعف عملکرد مدل توربولانسی مقیاس زیرشبکه انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ در مناطق شیب‌دار



شکل ۱۱. مقایسه سرعت باد در سه شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری 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 موفق‌تری داشته و روند صعود و نزول سرعت باد را مشابه با داده‌های اندازه‌گیری شبیه‌سازی کرده‌است. با این حال هر سه مدل در انتهای روز افزایش شدید سرعت باد (افزایش ۱۰ متر بر ثانیه) را پیش‌بینی می‌کنند که با اندازه‌گیری تطابق ندارد. در ایستگاه اس‌ال‌اف‌یو‌ال ۲ نیز این اختلاف بین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری 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 می‌شود. 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 ۱/۵ 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 اسم‌گورینسکی قرار می‌گیرند. هر دو شبیه‌سازی مذکور جهش سرعت باد را به اندازه نزدیکی به داده‌های اندازه‌گیری (حدود ۴ متر بر ثانیه) پیش‌بینی کرده‌اند. در مرحله کاهش سرعت باد بین ساعت ۱۷ تا ۲۱، دو شبیه‌سازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵، و مدل توربولانسی اسم‌گورینسکی و دقت عمودی ۴۷ توانایی بهتری در پیش‌بینی کاهش سرعت باد داشته‌اند. به طور کلی می‌توان بیان داشت که دو شبیه‌سازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ و مدل توربولانسی اسم‌گورینسکی با دقت عمودی ۴۷ متر در مقایسه با مدل توربولانسی اسم‌گورینسکی و دقت عمودی ۳۷ عملکرد ضعیف‌تری از لحاظ

سرعت باد زیادی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و هر سه شبیه‌سازی 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 بیشینه ۱۰ متر بر ثانیه تا کمینه ۴ متر بر ثانیه در ایستگاه اس‌ال‌اف‌یو‌ال اتفاق افتاده‌است. در شبیه‌سازی با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵، کاهش سرعت از سرعت بیشینه 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 پیش‌بینی شده‌است. اختلاف سرعت بیشینه و کمینه شبیه‌سازی با مدل توربولانسی اسم‌گورینسکی و دقت عمودی ۳۷ (نارنجی) حدود ۱۵ متر بر ثانیه بوده و در مدل توربولانسی اسم‌گورینسکی 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 اسم‌گورینسکی 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 اندازه‌گیری حدود ۲ متر بر ثانیه بین ساعت ۱۴ تا ۱۶ بوده‌است. این در حالی است که شبیه‌سازی با مدل توربولانسی اسم‌گورینسکی و دقت عمودی ۳۷ در



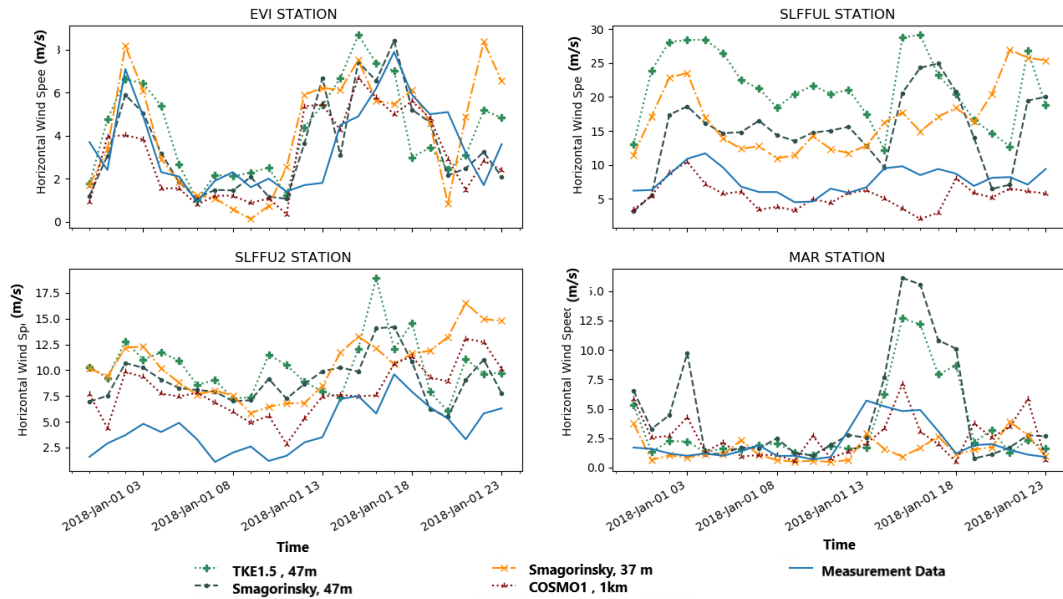
پیش‌بینی بیشینه سرعت باد دارند. این خطا می‌تواند ناشی از وجود شیب زیاد در مناطق کوهستانی و اثر منفی آن بر شبیه‌سازی گردابه‌ها در مدل با ایجاد خطاهای زیاد باشد. از سوی دیگر به نظر می‌رسد در مناطق کوهستانی و پیچیده، مدل توربولانسی اسماگورینسکی عملکرد قابل قبول‌تری در مقایسه با مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ داشته‌است.

در ایستگاه ام‌ای آر همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. در ابتدای روز، شبیه‌سازی مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۴۷ جهش ناگهانی سرعت باد را در ساعت ۲ پیش‌بینی کرده‌است. اما در ادامه روز تا ساعت ۱۲ هر سه شبیه‌سازی از الگوی داده‌های اندازه‌گیری پیروی کرده‌اند. با این وجود، در ساعت ۱۳ دو شبیه‌سازی با دقت عمودی ۴۷ (هر دو مدل توربولانسی اسماگورینسکی و مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵) علیرغم پیروی از الگوی رفتاری داده‌های اندازه‌گیری، جهش بسیار شدیدی در سرعت باد داشته و خطای بالایی دارند. در عین حال شبیه‌سازی با مدل توربولانسی اسماگورینسکی و دقت عمودی ۳۷ با پیروی از الگوی داده‌های اندازه‌گیری، جهش سرعت کمتری از واقعیت را پیش‌بینی کرده‌است. در انتهای روز نیز هر سه مدل به هم همگرا شده و مقدار سرعت باد متوسط ۳ متر بر ثانیه را پیش‌بینی کرده‌اند.

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 ۱۲ ملاحظه می‌شود که در دو ایستگاه ام‌ای آر و ای وی آی هر سه شبیه‌سازی نتایج نزدیک به کوسمو ۱ داشته و در پیش‌بینی 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 پیش‌بینی کرده‌است. این در حالی است که آغاز شبیه‌سازی در کوسمو ۱ در ابتدای این روز نبوده و حتی مسئله گرم شدن مدل در شش ساعت ابتدایی شبیه‌سازی وجود نداشته‌است. یا به عنوان مثالی دیگر در ساعت ۱۱ تا ۱۸ در ایستگاه ام‌ای آر این مدل در پیش‌بینی نحوه نوسان سرعت ضعف داشته و کاهش سرعت در ساعت ۱۵ و سپس افزایش مجدد آن را به طور کلی پیش‌بینی نکرده‌است. در ایستگاه اس‌ال‌اف‌ایوآل نیز این افزایش سرعت باد

در این بازه زمانی در مدل کوسمو ۱ به درستی پیش‌بینی نشده و کاهش یکنواختی بدون افزایش سرعت باد نشان داده شده‌است. با این حال در این ایستگاه، مدل کوسمو ۱ اندازه سرعت را با خطای بسیار کمتری پیش‌بینی کرده‌است. برای تبیین این موضوع می‌توان به مسئله همگون‌سازی داده‌ها<sup>۱</sup> اشاره کرد. در مدل‌های پیش‌بینی عددی هوا عموماً این روش برای بهبود عملکرد مدل با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری در ایستگاه‌های هواشناسی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا یک شبیه‌سازی در مدل انجام شده و سپس با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری در ایستگاه‌های هواشناسی در همان زمان، خطای نتایج را کاهش می‌دهند. سپس نتایج اصلاح شده به عنوان شرایط اولیه در گام زمانی بعدی استفاده می‌شوند [۳۷]. در مدل کوسمو ۱ نیز این مکانیزم اجرا شده و بخش اعظمی از تطابق نتایج با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری نشأت گرفته از این روش است. می‌توان ادعا کرد که این مقایسه مقایسه‌ی منصفانه‌ای نبوده و نتایج ورف بدون اصلاح با خروجی کوسمو ۱ اصلاح شده مقایسه شده‌اند.

در ایستگاه اس‌ال‌اف‌ایوآل اندازه اختلاف خروجی کوسمو ۱ با داده‌های اندازه‌گیری مانند خروجی ورف بوده و تقریباً نتایج حاصل از ورف مشابه کوسمو ۱ بوده‌است. با اینکه امکان دسترسی به لیست ایستگاه‌هایی که در اصلاح نتایج کوسمو ۱ استفاده شده‌اند نیست، اما می‌توان گفت شاید علت وجود اختلاف بین نتایج کوسمو ۱ و داده‌های اندازه‌گیری، 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 کوسمو ۱ 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 کوسمو ۱ به علت بزرگی سلول‌ها و کم بودن دقت، روش آماری برای در نظر گرفتن 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 شبیه‌سازی با ورف برای دقت بسیار بالا در حالت استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نیاز اصلی



شکل ۱۲. مقایسه سرعت باد در سه شبیه‌سازی با داده‌های اولیه کوسمو ۱ و سرعت باد اندازه‌گیری 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

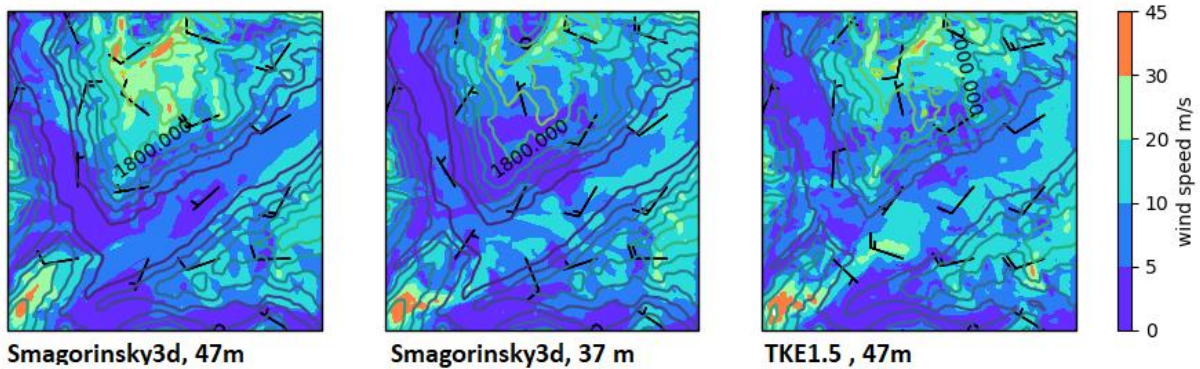
بوده و مدل در برآورد سرعت باد دچار خطا می‌شود. این خطا می‌تواند ناشی از کجی بیش‌تر از حد سلول‌ها در قله‌ی کوه‌ها بوده و دقت افقی ۱۰۰ و دقت عمودی ۴۷ متر برای رفع این خطا کافی نباشد [۳۵]. با این حال افزایش دقت عمودی به ۳۷ متر تا حدودی این اثر را تعدیل کرده و خطا در برآورد سرعت بیشینه در کوه‌ها کاهش یافته‌است. 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 هم‌بستگی وجود دارد (شکل ۱۴) با این حال با فاصله‌گرفتن از سطح به اندازه کافی، در ارتفاع ۳۰۰۰ متری جریانی نشان داده‌شده‌است که وابستگی به توپوگرافی نداشته و الگوی توزیع سرعت باد، با دو سطح بررسی‌شده قبلی کاملاً متفاوت است (شکل ۱۵).

#### ۴- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی پیش‌بینی هوا برای منطقه ناهموار بادخیز مارتینی (دره رن) واقع در کشور سوئیس انجام شده‌است. برای این شبیه‌سازی از مدل ورف استفاده شده‌است. سه شبیه‌سازی واقعی در ورف انجام شده که در منطقه بسیار ناهموار و پیچیده با شیب بیش از ۷۰ درجه قرار داشته و از داده‌های اولیه کوسمو ۱ با دقت بالا (۱ کیلومتر) به عنوان ورودی مدل استفاده شده‌است.

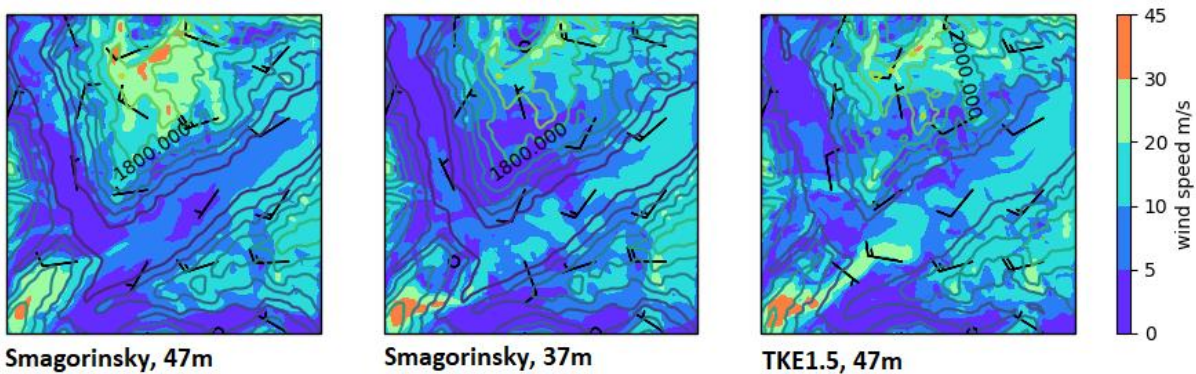
در پتانسیل‌سنجی انرژی باد در مناطق کوهستانی و پیچیده بوده و تلاش برای بهبود عملکرد این مدل در این دقت مهم و بسیار کاربردی و مفید خواهد بود.

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 معمولاً اتمسفر در شرایط پایدار و آرام قرار دارد، انتخاب شده و بررسی شده‌اند. سرعت باد در هر سه شبیه‌سازی و خطوط هم‌تراز 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 توپولانس ۱/۵- دقت ۴۷ متر) قرار می‌گیرد. البته با توجه به اعتبارسنجی سری زمانی سرعت باد که در بخش قبل صورت گرفت و سرعت باد ۲۵ متر بر ثانیه بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده‌بود، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عملکرد ورف در ارتفاعات بسیار بالا و قله‌ی کوه‌ها، دارای ضعف



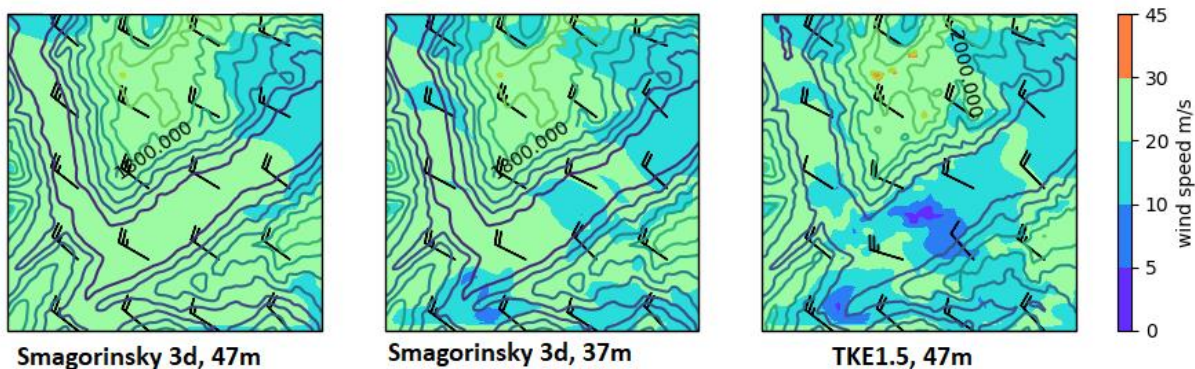
شکل ۱۳. مقایسه توزیع سطحی سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متر از سطح زمین در سه شبیه‌سازی با توجه به توپوگرافی منطقه (خطوط هم تراز ارتفاع زمین) در ساعت ۲۱ یکم ژانویه ۲۰۱۸

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



شکل ۱۴. مقایسه توزیع سطحی سرعت باد در ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح زمین در سه شبیه‌سازی با توجه به توپوگرافی منطقه (خطوط هم تراز ارتفاع زمین) در ساعت ۲۱ یکم ژانویه ۲۰۱۸

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



سرعت باد در نزدیکی سطح یک مشکل شناخته شده در ورف است [۳۹-۴۱]. با توجه به مقالات مرورشده، پژوهشگران بیان می کنند که یکی از دلایل وجود خطا در ارتفاعات در ورف، می تواند تحت تاثیر هموارسازی توپوگرافی باشد که در مدل انجام شده است. در واقع ویژگی های توپوگرافی که در اثر هموارسازی از بین می روند و در نتیجه در شبیه سازی دیده نمی شوند، خود عامل ایجاد نیروی پسایی (به طور مثال نیروی پسای تولید شده توسط پوشش گیاهی) هستند که در حین شبیه سازی در نظر گرفته نمی شوند. بنابراین عدم در نظر گرفتن این نیروی پسا منجر به تخمین بیش از حد سرعت باد در ورف شده و خطای پیش بینی زیادی در سرعت باد دیده خواهد شد [۳۹، ۴۱]. می توان بیان کرد که به وجود آمدن این خطا در اثر محدودیتی است که ماهیت مدل ورف ایجاد می کند و نشأت گرفته از عدم تنظیمات صحیح برای شبیه سازی نیست. به طور میانگین در تمامی ایستگاه های 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 سلول ها از ۴۷ متر به ۳۷ متر، خطا به ۱/۱۲۵ متر بر ثانیه تنزل یافته است.

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 دره ها در کمترین مقدار بوده و با افزایش ارتفاع افزایش می یابد. از سویی دیگر سرعت باد در قله کوه ها افزایش شدیدی داشته و با توجه به داده های اندازه گیری سرعت باد در ایستگاه های واقع شده در این مناطق، خطای زیادی دارد. این خطا با افزایش دقت عمودی تا حدی مهار شده ولی با این وجود، خطا همچنان وجود داشته و نیاز است در پژوهش های بعدی این موضوع مورد مطالعه بیشتری قرار بگیرد. همچنین با فاصله گیری کافی از سطح زمین مشاهده شد که وابستگی جریان و توپوگرافی به طرز معناداری کاهش یافته و این جریان تحت تاثیر ناهمواری های سطح زمین نبوده و الگوی متفاوتی (جریان هوا در لایه های بالایی اتمسفر و جریان باد در مقیاس بزرگ) را پیروی می کند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که برای نیل به نتایج بهتر در مناطق کوهستانی و از بین بردن خطای ناشی از کج بودن

یکی از ویژگی های شاخص این پژوهش، اجرای یک شبیه سازی واقعی در ورف با دقت بالا (۱۰۰ متر) و با استفاده از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ تعبیه شده در ورف است. این نوع از پژوهش ها در موارد بسیار محدود صورت گرفته اند. از دیگر شاخصه های این پژوهش انجام این شبیه سازی در منطقه ای بسیار ناهموار و پیچیده است که تاکنون در هیچ پژوهشی مطالعه نشده است. در این پژوهش به بررسی اثر دو متغیر اندازه ارتفاع سلول (دقت عمودی) و مدل توربولانسی انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ و مدل توربولانسی اسماگورینسکی پرداخته شده است. چهار ایستگاه اندازه گیری سرعت باد در این منطقه وجود دارند که توپوگرافی های متنوعی را پوشش می دهند. نتایج شبیه سازی های متفاوت در این ایستگاه ها نشان داد که بسته به نوع توپوگرافی منطقه، عملکرد شبیه سازی های مذکور متفاوت است. به طوری که در منطقه ای هموار ایستگاه ای وی آی خطا بسیار پایین بوده و رفتار پیش بینی شده با داده های اندازه گیری تطابق قابل قبولی دارند. با این حال در دره باریک مونتینی بنی ایستگاه ام آی آر، در زمان جهش سرعت باد در بعدازظهر، بین نتایج شبیه سازی ها 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 زده اند. در حالی که شبیه سازی با دقت عمودی بیشتر، در برآورد سرعت بیشینه ضعف داشته و آن را کمتر و با خطای ۴- متر بر ثانیه تخمین زده است. به نظر می رسد در این ناحیه بیشتر از نوع مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه، دقت عمودی (اندازه ارتفاع سلول) بر بهبود نتایج اثر داشته است. در شبیه سازی باد در ارتفاعات فوی، ایستگاه های اس ال اف اف یو ۲ و اس ال اف اف یو ال، علی رغم وجود خطای بالا (خطای ۱۰ متر بر ثانیه در ایستگاه اس ال اف اف یو ۲ و ۲۲ متر بر ثانیه در ایستگاه اس ال اف اف یو ال 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 داده های اندازه گیری و نتایج، هر سه شبیه سازی عملکرد قابل قبولی در پیروی از رفتار سرعت باد داشته اند. شبیه سازی که در آن مدل توربولانسی مقیاس زیر شبکه اسماگورینسکی استفاده شده است در مقایسه با شبیه سازی که مدل انرژی جنبشی آشفتگی ۱/۵ در آن بکار رفته، خطای کمتری در شبیه سازی جریان باد در مناطق کوهستانی داشته و نتایج مطلوب تری ارائه می دهد. با این وجود، پیش بینی بیش از حد

- 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. Krut, 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 می‌توان 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 تولید نتایج دقیق و مطابق با واقع است. از سویی دیگر عملکرد موفق ورف، که در این پژوهش نشان داده‌شده‌است، دستاورد مهمی برای پژوهشگران انرژی‌های تجدیدپذیر و بالاخص انرژی باد است. چراکه از دیرباز شبیه‌سازی صحیح و کامل باد در یک منطقه با روش‌های 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 توپوگرافی و حتی داده‌های اولیه بر عملکرد ورف نیاز به صرف زمان بیشتر و آزمایش‌های دقیق‌تر دیگری در آینده دارد. هم‌چنین نیاز مبرمی به مطالعه عمیق‌تر پدیده توربولانس در نتایج ورف و بررسی دقیق پدیده‌های همرفت، شناوری و دمای پتانسیل در مناطق کوهستانی وجود دارد.

## مراجع

- [1] A.C. Krut, 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 large-eddy 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. Lumberras, 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 Perdigeão 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 large-eddy 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 ground-based 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 very-high 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](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18863.6905)

