

حساسیت مدل WRF در شبیه‌سازی مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در شهر تهران

ناصر ایزدی^۱، علی‌اکبر شمسی‌پور^{۲*} و قاسم عزیزی^۳

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۱۵)

چکیده

باد از عوامل اصلی در تعیین وضعیت آب‌وهوا است و کیفیت هوای روزانه فضاهای شهری به باد بستگی دارد. از این رو برای دست‌یابی به الگوهای غالب جهت و شدت باد، از مدل‌های شبیه‌ساز مختلفی استفاده می‌شود که در این مطالعه مدل پیش‌بینی و پژوهش وضعیت جو (WRF) مورد توجه است. برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد، نقش داده‌های شرایط مرزی ECMWF(ERA5) و NCEP(FNL) همراه با هفت طرحواره فیزیکی (Exp 1 تا Exp 7) در دو اجرای (۱) با داده‌های استاتیکی پیش‌فرض و (۲) با داده‌های استاتیکی تفکیک افقی بالا (DEM) استر با تفکیک مکانی ۳۰ متر به جای داده‌های پیش‌فرض با تفکیک افقی تقریبی ۱ کیلومتر، کاربری اراضی کوپرنیکوس با وضوح ۱۰۰ متر به جای داده‌های مودیس با تفکیک افقی تقریبی ۵۰۰ متر تا ۱ کیلومتر) مورد ارزیابی قرار گرفته است. پیکربندی مناسب طرحواره‌ها، انتخاب شرایط مرزی ایده‌آل، تفکیک افقی مناسب و جایگزینی داده‌های استاتیکی تفکیک افقی بالا به جای داده‌های پیش‌فرض می‌تواند شبیه‌سازی مدل را تا حدود زیادی به داده‌های مشاهدات نزدیک نماید. خروجی‌ها برای ۴ ماه ژانویه، می، جولای و اکتبر ۲۰۱۸ به عنوان نماینده فصول نشان می‌دهد که شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد در اکثر طرحواره‌ها نسبت به مؤلفه نصف‌النهاری از نظر آماره‌های همبستگی و اریبی به‌استثنای ماه جولای (همبستگی) دارای عملکرد بهتری است به طوری که در ماه‌های ژانویه، می و اکتبر برای شرایط مرزی ERA5 حداکثر همبستگی به ترتیب برابر ۰/۴۰، ۰/۴۶، ۰/۴۳ و در FNL برابر ۰/۴۰، ۰/۳۹، ۰/۴۵ گردید؛ اما در ماه جولای علی‌رغم افزایش میزان همبستگی مؤلفه مداری به میزان ۰/۵۳ (ERA5) و ۰/۴۹ (FNL) نسبت به مؤلفه نصف‌النهاری با مقادیر همبستگی ۰/۶۳ و ۰/۷۱ درصد، در مقایسه با سایر ماه‌ها دارای عملکرد ضعیفتر است. همچنین حداقل اریبی در ماه‌های منتخب برای شرایط مرزی ERA5 به ترتیب برابر ۰/۰۷، ۰/۰۲، ۰/۱۳ و در FNL این مقادیر برابر ۰/۰۷، ۰/۰۴، ۰/۴۲ و ۰/۵۷ به دست آمده است. برابر نتایج حاصله از میانگین خروجی آماره‌های همبستگی، اریبی، میانگین مجذور خطا و میانگین خطای مطلق طرحواره‌ها با در نظر گرفتن ضریب وزنی یکسان هر آماره و داده‌های استاتیکی پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا در ایستگاه‌های مهرآباد، ژئوفیزیک، شمیران و چیتگر برای هر دو مؤلفه باد، شرایط مرزی FNL در ماه ژانویه و ERA5 در ماه جولای به‌عنوان شرایط مرزی برتر انتخاب شدند و در ماه می و اکتبر به‌استثنای مؤلفه مداری باد با داده‌های استاتیکی پیش‌فرض که شرایط مرزی FNL دارای عملکرد قوی‌تری بوده در بقیه موارد ERA5 دارای نزدیک‌ترین شبیه‌سازی به واقعیت بوده است. از بین طرحواره‌های مورد آزمون تحت شرایط مرزی ERA5 و FNL با داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا، برای مؤلفه مداری (YSU) Exp(1)، (ACM2) Exp(6) و (MYJ) Exp(2) و برای مؤلفه نصف‌النهاری (YSU) Exp(1) و (Exp(6) (ACM2) بهترین نتایج را برای شبیه‌سازی باد شهر تهران به‌همراه داشتند.

واژه‌های کلیدی: باد، شرایط مرزی ERA5 و FNL، طرحواره، WRF، تهران

۱ مقدمه

افزون بر داده‌های بازتحلیل معمول، از داده‌های بازتحلیل نهایی NCEP(FNL) استفاده می‌گردد (دووراک و همکاران، ۲۰۱۰). این داده‌ها با داده‌های بازتحلیل مرسوم متفاوت است زیرا بازتحلیل نهایی به دلیل مغایر بودن با زمان واقعی می‌تواند علاوه بر در نظر گرفتن تغییرات عملیاتی پیکربندی در مدل جهانی، داده‌های مشاهداتی بیشتری را تلفیق نماید (کاروالیو همکاران، ۲۰۱۴).

پارامترسازی فیزیکی در یک مدل میان‌مقیاس نقش مهمی در شبیه‌سازی‌های جوی بازی می‌کند، اما پیکربندی پارامترهای لایه‌مرزی سیاره‌ای بسیار ساده‌تر از فرایندهای فیزیکی پیچیده‌ای است که در نزدیک‌ترین لایه‌های سطح زمین رخ می‌دهند. از بین پارامترهای مختلف فیزیکی به‌طور معمول لایه‌مرزی سیاره‌ای و فرایندهای لایه سطحی بیشترین تأثیر را بر روی بادهای لایه‌مرزی و آشکارسازی تأثیر تلاطم بر مؤلفه‌های سرعت باد دارند (سانتوس - آلامیلوس و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، انتخاب یک طرحواره مناسب برای تخمین بهتر میانگین سرعت باد در لایه‌مرزی ضروری است، زیرا هرگونه خطای نسبی کوچک سرعت باد، در اندازه‌گیری چگالی باد در فرایند شبیه‌سازی چندین مرتبه بزرگ‌نمایی می‌شوند. بنابراین برای دستیابی به بهترین عملکرد نیاز به تعیین طرحواره متناسب با هر منطقه است. طرحواره‌های مختلف لایه‌مرزی سیاره‌ای با بهترین عملکرد برای دانمارک (دراکسل و همکاران، ۲۰۱۴)، جنوب اسپانیا (سانتوس - آلامیلوس و همکاران، ۲۰۱۳) و تگزاس (استورم و همکاران، ۲۰۱۰) ارائه شده است.

وانگ و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه خود با عنوان مهارت WRF در شبیه‌سازی سرعت باد ۲۴ ساعت قبل، نشان دادند که سرعت باد پیش‌بینی شده بیشتر از سرعت واقعی است و دقت شبیه‌سازی مدل با تغییر مکان و زمان به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است. ویشنو و همکاران

امروزه در خیلی از زمینه‌های علوم و مهندسی، نیاز روزافزونی به مدل‌سازی دقیق بسیاری از فرایندهای محلی تحت تأثیر گردش‌های بزرگ‌مقیاس لایه‌مرزی جو وجود دارد که با مدل‌های عددی تأمین می‌گردد. این مدل‌ها، جو را به‌عنوان یک سیال متحرک در نظر گرفته و همچنین فرایندهای فیزیکی را در مقیاس‌های شبکه‌ای تعریف‌شده توسط کاربر شبیه‌سازی می‌کنند. افزایش دقت شبیه‌سازی در پیش‌بینی مدل‌های عددی عموماً به چندین پارامتر کلیدی بستگی دارد که در مؤلفه‌های باد می‌توان از شرایط جوی اولیه و مرزی (کاروالیو همکاران، ۲۰۱۴)، زمان تطبیق مدل (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۴) و نقش پارامترسازی تأثیر تلاطم بر مؤلفه‌های سرعت باد (پنچاه و همکاران، ۲۰۱۷؛ کاروالیو همکاران، ۲۰۱۲) نام برد.

تاکنون چندین مؤسسه در سراسر جهان با تلفیق داده‌های اندازه‌گیری شده از منابع موجود و مدل‌های گردش کلی، مجموعه داده شبکه‌ای همگن مکانی و زمانی از شرایط جوی را فراهم آورده‌اند که داده‌های بازتحلیل را تولید می‌کنند (ون و همکاران، ۲۰۱۲). داده‌های بازتحلیل از طریق مدل‌های پیش‌بینی عددی جهانی به دست می‌آیند و مشاهدات هواشناسی را به‌طور بهینه با پیش‌بینی‌های مدل در یک توصیف فیزیکی منسجم از تکامل جو در یک فرایند داده‌گواری ترکیب می‌کنند (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰). در این میان داده‌های بازتحلیل مراکز ملی پیش‌بینی محیطی/مرکز ملی تحقیقات جوی (NCEP/NCAR) و اروپایی میان‌مقیاس پیش‌بینی آب‌وهوا (ECMWF/ ERA-Interim) جزء محبوب‌ترین داده‌ها به‌شمار می‌روند (نونالی و همکاران، ۲۰۱۳). جدیدترین نسل داده‌های بازتحلیل این مرکز ECMWF(ERA5) از توسعه مدل پیش‌بینی و روش داده‌گواری بهره می‌برد (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰). برای پیش‌بینی عددی پتانسیل انرژی باد در مناطق مختلف،

پیکربندی مناسب برای کاربری زمین توانایی مدل را برای پیش‌بینی متغیرهای سطحی بدون توجه به نوع محیط بهبود می‌بخشد و همچنین نشان دادند برای مؤلفه مداری باد در سطح زمین بهترین عملکرد توسط شرایط مرزی GFS با کاربری اراضی کوپرنیکوس و برای مؤلفه نصف‌النهاری، اگرچه شرایط مرزی GFS با کاربری اراضی کوپرنیکوس نتایج خوبی را نشان داد، اما بهترین گزینه، شرایط مرزی ERA-Interim با کاربری اراضی کوپرنیکوس بود. به همین ترتیب سولباکن و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل پیش‌بینی و پژوهش وضعیت جو به ارزیابی اثرات شرایط مرزی ERA5 و ERA-Interim با تفکیک افقی مختلف بروی باد سطحی در سرزمین‌هایی با توپوگرافی پیچیده در نروژ، سوئد و فنلاند پرداختند و نشان دادند که شبیه‌سازی مدل با شرایط مرزی ERA5 به نسبت بهتر از ERA-Interim بوده و همچنین با افزایش تفکیک افقی از ۲۷ کیلومتر تا ۳ کیلومتر با کاهش اریبی، میانگین خطای مطلق، میانگین مجذور خطا و افزایش همبستگی همراه بوده است و همچنین بیان نمودند مدل در شبیه‌سازی با تفکیک افقی بالا، اثرات محلی را به مراتب بهتر از وضوح پایین‌تر در خروجی اعمال می‌نماید. بنابراین یکی از عوامل ضروری برای شبیه‌سازی باد در میان‌مقیاس، تفکیک افقی مدل است. در زمینه پیش‌بینی عددی آب‌وهوا، شبیه‌سازی عددی در زمین‌هایی با توپوگرافی پیچیده چالش‌برانگیز است و نمایش مدل از چنین توپوگرافی‌هایی، برای دست‌یابی به یک شبیه‌سازی نزدیک به جریان باد یک هدف کلیدی مهم محسوب می‌شود (موگل و همکاران، ۲۰۱۷؛ کاروالیو همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات نشان می‌دهد که با تفکیک افقی بیشتر می‌توان به نتایج بهتری برای شبیه‌سازی باد در توپوگرافی پیچیده دست‌یافت (والکون و همکاران، ۲۰۲۰).

نیستانی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی با عنوان کاربست داده‌گذاری در مدل WRF نشان دادند که دقت

(۲۰۱۴) در مقایسه خروجی مدل WRF با داده‌های مشاهداتی بیان کردند مدل دارای مهارت نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی باد نصف‌النهاری سطحی در طول فصل قبل از موسمی است، اما مدل دارای مهارت متوسطی در شبیه‌سازی میدان‌های باد سطحی جنوب غربی و شمال شرقی در طول فصل‌های موسمی است. آنها نشان دادند مدل می‌تواند تغییرپذیری روزانه مؤلفه‌های باد را به دقت شبیه‌سازی کند اما یک اریبی منفی قابل‌توجهی برای هر دو مؤلفه باد در تمام فصول مشاهده می‌شود که این اریبی منفی می‌تواند به دلیل خطای مرتبط با توپوگرافی زمین، شامل نمایش نادرست ارتفاع، ناهنجاری و زبری سطحی باشد.

در مطالعات پتانسیل‌یابی باد در مناطق گوناگون، بازتحلیل‌های مختلفی به‌عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی‌های میان‌مقیاس ارزیابی شدند و در بین این شبیه‌سازها ERA-Interim نمایش بهتری از میدان باد ارائه نمود (موگل و همکاران، ۲۰۱۷؛ کاروالیو همکاران، ۲۰۱۴؛ فرناندز-گونزالس و همکاران، ۲۰۱۸؛ منندز و همکاران، ۲۰۱۱). طبق مطالعات انجام‌شده در مورد میدان باد سطحی، داده‌های بازتحلیل ERA5 از داده‌های ERA-Interim و چندین بازتحلیل دیگر در سطح زمین (اولاو پسر، ۲۰۱۸؛ رامون و همکاران، ۲۰۱۹) و سطوح اقیانوس‌ها (بلموته‌ریواس و استوفلن، ۲۰۱۹) عملکرد بهتری داشته است؛ به‌ویژه در رابطه با مطالعه گراهام و همکاران (۲۰۱۹) داده‌های باد پنج‌گروه از بازتحلیل‌های جهانی از جمله ERA-Interim و ERA5 با داده‌های مشاهداتی سرعت باد در قطب شمال ارزیابی شدند که در این بین ERA5 بهترین نتایج را با بیشترین همبستگی و کمترین اریبی و میانگین مجذور خطا به‌همراه داشته است. پولیافیتو همکاران (۲۰۱۵) طی پژوهشی در ارزیابی پیکربندی مدل پیش‌بینی و پژوهش وضعیت جو برای باد زوندا با توپوگرافی پیچیده بیان نمودند استفاده از یک

۲ روش پژوهش

۲-۱ محدوده مورد مطالعه

شهر تهران در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز مرکزی و بر روی رسوبات آبرفتی بنا شده و قسمت جنوبی آن کم‌وبیش در شمال غرب کویر مرکزی ایران قرار دارد و دارای باد غالب غربی است. البته امتداد کوه‌های البرز بین تهران و کرج باعث انحراف این باد به سمت دشت شهریار می‌شود. باد غالب در فصل تابستان از سمت جنوب جریان داشته که موجب انتقال گرمای کویر و حمل گردوغبار به سمت شهر می‌شود. در کنار این جریانات در روز نسیم دشت به کوه به طرف ارتفاعات شمال تهران و بالعکس در شب‌ها این نسیم کوه به سمت دشت، از شمال به جنوب سرازیر می‌شوند. شکل ۱، موقعیت ایستگاه‌های انتخابی و توپوگرافی شهر را نشان می‌دهد. داده‌های مشاهداتی سمت و تندی باد با گام زمانی ۳ ساعته از سال ۲۰۱۸ برای ۴ ایستگاه همدید مهرآباد، چیتگر، ژئوفیزیک و شمال تهران (شمیران) از سازمان هواشناسی اخذ شده است (جدول ۱).

۲-۲ داده‌ها و روش‌ها

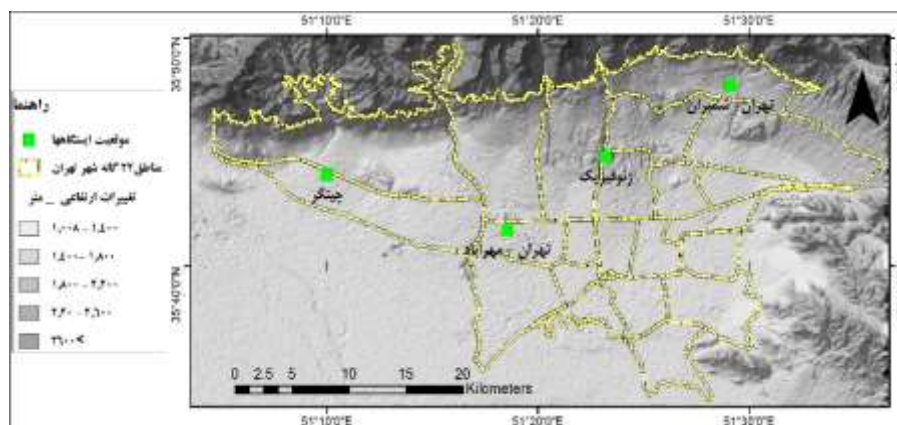
در این مطالعه از مدل WRF نسخه ۴٫۱٫۲ استفاده شده که برای نشان دادن فرایند تعاملات جوی در مقیاس‌های مختلف، از پارامترهایی در محاسبات استفاده می‌کند. انتخاب مقادیر و گزینه‌های مختلف این پارامترها همانند خردفیزیک، تابش موج کوتاه، تابش موج بلند، کومولوس، سطح، لایه مرزی و طرحواره فیزیکی مدل می‌تواند

پیش‌بینی بسته به نوع داده‌های به‌کاررفته در شرایط اولیه مدل و طرحواره‌های فیزیکی انتخابی دارای تفاوت‌های اساسی است. بهمن زاده و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی موردی عملکرد مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد تراز ۱۰ متری بیان نمودند که میانگین سنج‌های آماری محاسبه‌شده و مقایسه کیفی بادهای مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، تطابق خوبی را نشان می‌دهد و نتایج مدل که در مناطق دور از ساحل انجام شده بسیار رضایت‌بخش است و می‌توان این نتیجه را ناشی از یکنواخت بودن سطح زیرین دانست. همچنین بیان نمودند که میزان تفکیک افقی نیز می‌تواند در به دست آمدن این نتایج مؤثر باشد و احتمال می‌رود با بهبود تفکیک افقی نتایج برای مناطق نزدیک ساحل نیز بهبود پیدا کند.

طبق بررسی به‌عمل‌آمده تاکنون مطالعات منسجمی برای ارزیابی قابلیت مدل WRF در شبیه‌سازی مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد بر روی شهر تهران صورت نگرفته است و از سوی دیگر دقت پیش‌بینی‌های یک مدل عددی به‌ویژه در ترازهای پایین جو به شدت به پارامترسازی‌های فیزیکی لایه مرزی سیاره‌ای، لایه سطحی و شرایط مرزی وابسته است (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸). از این رو در این تحقیق حساسیت و عملکرد مدل WRF را در شبیه‌سازی مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد به‌عنوان متغیرهای شاخص هواشناسی نسبت به شرایط مرزی، طرحواره‌های مختلف لایه مرزی سیاره‌ای در دو حالت داده‌های استاتیکی پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا بررسی می‌شود.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک انتخابی.

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



شکل ۱. مشخصات دامنه مدل (تصویر بالا)، موقعیت ایستگاه‌های مشاهداتی و توپوگرافی محدوده مورد مطالعه (شهر تهران-تصویر پایین).

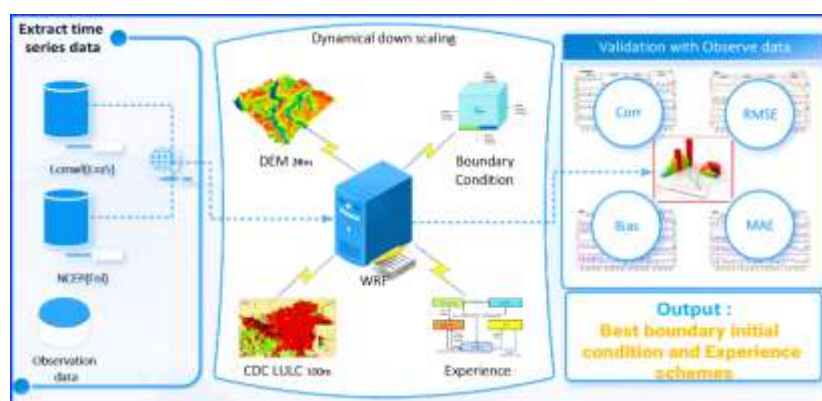
شهر تهران هم مورد آزمون قرار بگیرند و در نهایت با توجه به گستردگی زمانی دوره انتخابی مطالعه در شبیه‌سازی و محدودیت‌های موجود هفت طرحواره مطابق جدول ۲ انتخاب شد که شامل طرحواره دانشگاه یونسی YSU (هنگ و همکاران، ۲۰۰۶)، طرحواره MYJ (جانیک، ۱۹۹۴)، حذف مقیاس نرمال گواسین QNSE (سوکوریانسکی و همکاران، ۲۰۰۵)، مدل آشفته‌گی مرتبه دوم و سوم MYNN (ناکانیشی و نینو، ۲۰۰۹)، طرحواره دوم مدل همرفت نامتقارن ACM2 (پلیم، ۲۰۰۷) و مدل پیش‌بینی محدوده متوسط MRF (هنگ و همکاران، ۱۹۹۶) هستند. تفاوت بین طرحواره‌های منتخب لایه‌مرزی به آشفته‌گی (Eddy)، پارامتریزه‌شدن بخش بالای لایه‌مرزی (PBL top) و رفتار

متناسب با زمان و مکان، نتایج شبیه‌سازی را بهبود بخشد. اصلی‌ترین پارامترهای فیزیکی که در پژوهش به‌کاررفته‌اند شامل تابش موج‌بلند (ملاور و همکاران، ۱۹۹۷) RRTM، تابش موج‌کوتاه (چو همکاران، ۱۹۹۸) Goddard، مدل سطح زمین Noah (تواری و همکاران، ۲۰۰۴)، طرحواره خردفیزیک WSM6 (هنگ و همکاران، ۲۰۰۶)، طرحواره دوبعدی کومولوس BMJ (جانیک، ۱۹۹۴) و سه‌بعدی Grell-Freitas (گرل و همکاران، ۲۰۱۴) هستند.

در مطالعه حاضر برای آزمون حساسیت عملکرد طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای، از بین طرحواره‌های مختلف بر طبق مطالعات داخلی و خارجی انجام‌شده سعی گردید طرحواره‌هایی که روی محیط‌های شهری با توپوگرافی پیچیده دارای عملکرد قابل‌قبولی بودند، در

جدول ۲. مشخصات پیکربندی طرحواره‌های فیزیکی مورد مطالعه.

طرحواره‌ها	لایه‌مرزی	خردفیزیک	تابش طول موج‌بلند	تابش طول موج‌کوتاه	لایه سطحی	سطح	همرفت کومه‌ای
Exp(1)	YSU (1)				MM5 (1)		Grell-Devenyi (3)
Exp(2)	MYJ (2)				Eta (2)		BMJ (2)
Exp(3)	QNSE (4)				QNSE (4)		BMJ (2)
Exp(4)	MYNN2 (5)				MYNN (5)	Noah (2)	BMJ (2)
Exp(5)	MYNN3 (6)				MYNN (5)		BMJ (2)
Exp(6)	ACM2 (7)				Pleim-Xiu (7)		BMJ (2)
Exp(7)	MRF (99)				MM5 (1)		BMJ (2)



شکل ۲. شماتیک کلی روش پژوهش (داده‌ها، ریز مقیاس نمایی و اعتبارسنجی با آماره‌ها).

سری زمانی داده‌های بازتحلیل از دو پایگاه داده، مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP-FNL) و مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا ERA5 مطابق جدول ۳ به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی استفاده شد. این داده‌ها در شبکه‌های $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ درجه در دسترس هستند که برای این مطالعه نیاز به تفکیک افقی بالاتر است، بنابراین مقیاس‌هایی این داده‌ها با طرحواره‌های منتخب لایه‌مرزی سیاره‌ای با استفاده از داده‌های استاتیکی پیش‌فرض انجام گردید. سپس برای بررسی اثر داده‌های استاتیکی با تفکیک افقی بالا از داده‌های DEM استر استخراج‌شده از سایت ناسا با وضوح ۳۰ متر به‌جای داده‌های پیش‌فرض با وضوح ۳۰ ثانیه در دو دامنه تعیین‌شده (تقریباً معادل ۱ کیلومتر) و همچنین از داده‌های کاربری اراضی و پوشش زمین کوپرنیکوس با وضوح ۱۰۰ متر به‌جای داده‌های مودیس با وضوح ۱۵ تا ۳۰ ثانیه در دامنه داخلی استفاده گردید و مجدداً با این داده‌ها تمام مراحل همانند پیش‌فرض اجرا شد که در تصویر گرافیکی شماره ۲، به‌صورت شماتیک، داده‌ها و روش‌ها بیان گردیده است.

منطقه جذب در شرایط پایدار، خشی و همرفت مربوط می‌شود. گام زمانی مدل با مضرب ۴ گام مکانی برابر با ۸۴ ثانیه و طول زمان شبیه‌سازی (ماهانه) ۷۳۸ ساعت در نظر گرفته شده است و مدل در دو دامنه تودرتو به‌ترتیب با تفکیک مکانی ۲۱ و ۷ کیلومتر با نسبت ۱ به ۳ در شبکه‌های 72×72 و 76×76 به مرکزیت $51/35$ درجه طول شرقی و $35/71$ درجه عرض شمالی (شکل ۱) تنظیم شده است. برای بررسی شبیه‌سازی مدل تحقیقات و پیش‌بینی هوا، داده‌های سمت و تندی باد در ۴ ماه ژانویه، می، جولای و اکتبر با گام زمانی ۳ ساعته از ساعت صفر اولین روز تا ساعت ۱۸ آخرین روز ماه برای ۴ ایستگاه منتخب در سال ۲۰۱۸ که دارای کمترین فقدان داده باشند، از سازمان هواشناسی اخذ شد و با اعمال ۱۸۰ درجه به جهت هواشناسی، جهت برداری به دست آمد؛ سپس با استفاده از افزونه Rwind در نرم‌افزار توسعه‌یافته R، مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد مشاهداتی محاسبه شد. در ادامه برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در ماه‌های ژانویه، می، جولای و اکتبر

جدول ۳. ویژگی داده‌های شرایط اولیه و مرزی مورد مطالعه

پوشش زمانی	ابعاد	تراز فشاری	گام زمانی	تفکیک افقی	نوع	شرایط اولیه و مرزی
۱۹۷۹ حاضر	۴D-Var	۳۸	۴ بار در روز	0.25°	بازتحلیل	ERA5
۲۰۲۰-۲۰۱۵	۳D-Var	۲۸	۴ بار در روز	0.25°	تحلیل	FNL

جدول ۴. کدهای معادل کاربری اراضی در دو مدل داده کوپرنیکوس و مودیس.

کد کوپرنیکوس	نوع کوپرنیکوس	کد مودیس	نوع مودیس
1	No input data available	0	No data
2	Closed forest, evergreen needle leaf	1	Evergreen Needleleaf Forest
3	Closed forest, evergreen, broad leaf	2	Evergreen Broadleaf Forests
4	Closed forest, deciduous needle leaf	3	Deciduous Needleleaf Forests
5	Closed forest, deciduous broad leaf	4	Deciduous Broadleaf Forest
6	Closed forest, mixed	5	Mixed Forests
7	Closed forest, unknown	5	Mixed Copernicus Forests
8	Open forest, evergreen needle leaf	1	Evergreen Needleleaf Forest
9	Open forest, evergreen broad leaf	2	Evergreen Broadleaf Forests
10	Open forest, deciduous needle leaf	3	Deciduous Needleleaf Forests
11	Open forest, deciduous broad leaf	4	Deciduous Broadleaf Forest
12	Open forest, mixed	5	Mixed Forests
13	Open forest, unknown	5	Mixed Forests
14	Shrubs	7	Open Shrublands
15	Herbaceous vegetation	10	Grasslands
16	Cultivated and managed vegetation/agriculture (cropland)	12	Croplands
17	Urban / built up	13	Urban and Built-Up
18	Bare / sparse vegetation	16	Barren or Sparsely Vegetated
19	Snow and ice	15	Snow or Ice
20	Permanent water bodies	21	Lakes
21	Herbaceous wetland	11	Permanent Wetlands
22	Moss and lichen	11	Permanent Wetlands
23	Open sea	17	Water
24	missing value	255	missing value

به‌ذکر است در محاسبات آماری ۶ ساعت اول به‌عنوان زمان تطبیق کنار گذاشته و از ساعت ۰۶:۰۰ به بعد مورد تحلیل قرار گرفته است. در این بخش خطاهای خروجی مدل برای طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای در قالب Exp(1) تا Exp(7) در چهار دوره (در هر فصل یک دوره) با دو حالت داده‌های استاتیکی پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا مورد ارزیابی قرار گرفته است. این بررسی در قالب سنجش دو سری مقادیر شرایط اولیه و مرزی برگرفته از داده‌های ERA5 و FNL صورت گرفته است. شکل ۳ سری‌زمانی و شکل‌های ۴ تا ۷ مقادیر

برای استفاده از داده‌های کوپرنیکوس، باید کدهای کاربری اراضی طبق جدول ۴ به کد مودیس قابل‌استفاده برای مدل تبدیل کردند. سپس با افزونه GIS4WRF در نرم‌افزار QGIS 2.23 داده‌های استاتیکی استخراج‌شده، به فایل‌های قابل‌دسترس برای مدل تبدیل گردید.

۳ اعتبارسنجی برون‌داد مدل

در این مطالعه از آماره‌های میانگین اریبی مدل، ضریب همبستگی، میانگین مجذور خطا و میانگین خطای مطلق مطابق جدول ۵ برای اعتبارسنجی برون‌داد مدل در تولید مشخصه‌های مداری و نصف‌النهاری باد استفاده شد. لازم

جدول ۵. آماره‌های مورد استفاده به‌همراه روابط ریاضی.

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

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

آماري همبستگي، میانگین مجذور خطا، میانگین خطای مطلق و اریبی طرحواره‌ها را برای مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در دو حالت داده‌های استاتیکی پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا نشان می‌دهد. و علاوه بر آن نتایج حساسیت هریک از معیارهای ارزیابی به طرحواره ۷گانه برای مؤلفه‌ها در جداول ۶ تا ۹ ارائه شده است.

۴ بحث

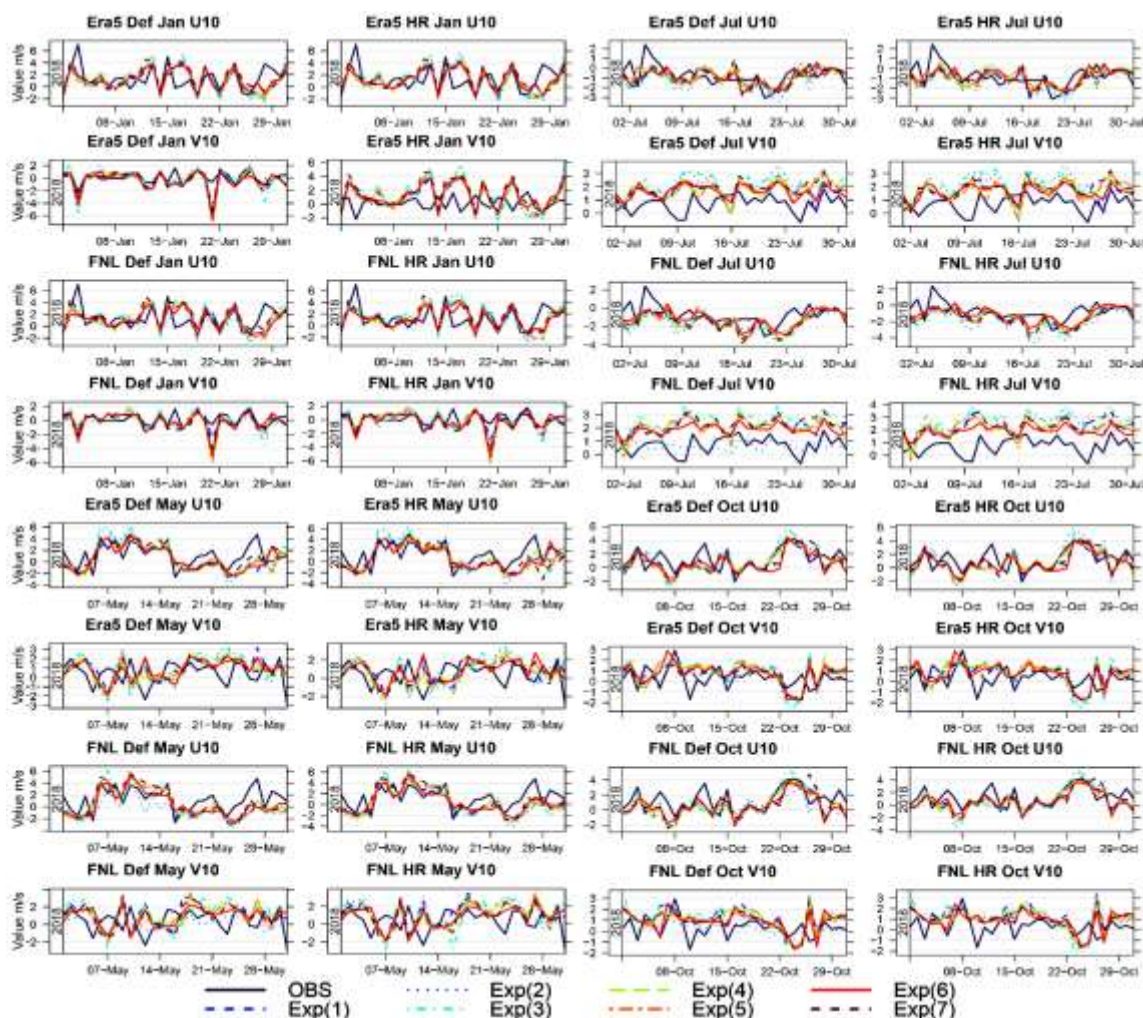
۴-۱ سری زمانی مؤلفه مداری و نصف‌النهاری باد

در شکل ۲، سری زمانی مؤلفه‌های باد مداری (U10)، نصف‌النهاری (V10) و مشاهداتی (OBS) را در کنار شبیه‌سازی‌های طرحواره‌ها Exp(1) تا Exp(7) برای ۴ ماه با دو حالت پیش‌فرض (Def) تفکیک افقی بالا (HR) نشان می‌دهد. به طوری که ستون اول مقادیر باد مداری و نصف‌النهاری مشاهداتی را به همراه خروجی‌های مدل در دو شرایط مرزی ERA5 و FNL با داده‌های استاتیکی پیش‌فرض برای دو ماه ژانویه و می و در ستون دوم نیز همان داده‌ها را با داده‌های استاتیکی تفکیک افقی بالا نمایش می‌دهد. ستون سوم و چهارم نیز همانند دو ستون اول و دوم خروجی‌های دو ماه جولای و اکتبر را برای دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا نشان می‌دهد. برای ماه ژانویه در حالت پیش‌فرض، باد نصف‌النهاری برای هر دو مدل شرایط مرزی بهتر از باد مداری شبیه‌سازی شده اما در حالت تفکیک افقی بالا باد نصف‌النهاری در شرایط مرزی FNL به مراتب بهتر از مدل ERA5 شبیه‌سازی نمود و در این شرایط خروجی‌های مدل ERA5 عموماً دارای بیش برآورد نسبت به مشاهدات هست. برای باد مداری در این ماه خروجی‌های مدل در هر دو وضعیت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا با شرایط مرزی ERA5 و FNL دارای شرایط مشابه بوده و شبیه‌سازی مدل‌ها برآورد خوبی از باد مداری ارائه نداد. در ماه می باد مداری در شرایط مرزی مدل‌ها برای هر دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا

به مراتب دارای برآورد نزدیک‌تری نسبت به باد نصف‌النهاری است ولی شبیه‌سازی‌های مدل در مؤلفه نصف‌النهاری برخلاف ماه ژانویه در هر دو شرایط پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا نتوانسته به خوبی مؤلفه مداری، داده‌های مشاهداتی را شبیه‌سازی نماید. در ماه جولای همانند ماه می مؤلفه باد مداری در هر دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا برای شرایط مرزی دوگانه به نسبت دارای شبیه‌سازی قابل قبول‌تری از مؤلفه نصف‌النهاری است اما خروجی‌های مدل برای باد نصف‌النهاری در شرایط مرزی هر دو مدل در حالت‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا دارای بیش برآورد قابل ملاحظه‌ای نسبت به داده‌های مشاهداتی است. در ماه اکتبر همانند جولای و می شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد نسبت به مؤلفه نصف‌النهاری برای شرایط مرزی جفت مدل‌ها در هر دو حالت داده‌های استاتیکی پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا قابل قبول‌تر است و همچنین شبیه‌سازی مؤلفه نصف‌النهاری باد برای شرایط مرزی ERA5 و FNL برای حالت‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا به نسبت ماه جولای به مراتب بهتر است.

۴-۲ همبستگی مؤلفه‌ها

مؤلفه مداری: در ماه ژانویه توزیع مقادیر همبستگی در Exp‌های آزمایشی با شرایط مرزی ERA5 و داده‌های استاتیکی پیش‌فرض، Exp(1) با همبستگی ۰/۴۰ دارای برترین شبیه‌سازی بین سایر طرحواره‌ها برای مؤلفه مداری است. در صورتی که با شرایط مرزی FNL طرحواره Exp(4&5) با همبستگی ۰/۴۰ عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به سایر Exp‌های آزمایشی داشته‌اند. با در نظر گرفتن میانگین همبستگی بدون آماره‌های دیگر شرایط مرزی ERA5 در ماه ژانویه منجر به نتایج بهتر شده است اما با داده‌های تفکیک افقی بالا طرحواره آزمایشی Exp(1) با همبستگی ۰/۴۱ و Exp(4&5) با همبستگی



شکل ۳. سری‌زمانی خروجی طرحواره‌ها با شرایط مرزی ERA5، FNL همراه با داده‌های مشاهداتی در ماه‌های منتخب (ستون اول از سمت چپ شرایط داده‌های استاتیکی پیش‌فرض برای دو ماه ژانویه و می، ستون دوم شرایط داده‌های استاتیکی تفکیک افقی بالا برای دو ماه ژانویه و می، ستون سوم شرایط داده‌های استاتیکی پیش‌فرض برای دو ماه جولای و اکتبر و ستون چهارم داده‌های تفکیک افقی بالا برای دو ماه جولای و اکتبر).

شبیه‌سازی انجام‌شده نشان می‌دهد که هر دو مدل شرایط مرزی در حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا نسبت به ماه ژانویه با عملکرد ضعیف‌تری همراه بوده است و از لحاظ میانگین، شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد با داده‌های تفکیک افقی بالا در شرایط مرزی ERA5 عملکرد بهتری را به نمایش گذاشته است. حداکثر همبستگی بین Exp(7) آزمایشی در این ماه در وضعیت پیش‌فرض ۰/۴۶ برای مدل ERA5 و ۰/۳۹ در مدل FNL به ترتیب برای طرحواره‌های آزمایشی Exp(6) و Exp(7) به دست آمده است. برای حالت تفکیک افقی بالا به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۳۸

به ترتیب برای شرایط مرزی ERA5 و FNL نسبت به سایر Expها از عملکرد بهتری در شبیه‌سازی مؤلفه مداری برخوردار بوده‌اند و به نظر می‌رسد همانند حالت پیش‌فرض مدل ERA5 نسبتاً در شبیه‌سازی با عملکرد قوی‌تری همراه بوده و بدون در نظر گرفتن آماره‌های دیگر این مدل در ماه ژانویه منجر به نتایج بهتر شده است. با در نظر گرفتن میزان همبستگی داده‌های تفکیک افقی بالای استاتیکی هر دو مدل شرایط مرزی در شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد با عملکرد بهتری نسبت به حالت پیش‌فرض همراه هستند. در ماه می نتایج میانگین همبستگی

بوده و در بقیه ماه‌ها ERA5 در شبیه‌سازی بهتر عمل نموده است.

مؤلفه نصف‌النهاری: برای مؤلفه نصف‌النهاری باد در ژانویه دامنه تغییرات همبستگی بیشینه در شرایط پیش‌فرض از ۰/۳۰ در طرحواره Exp(6) تا ۰/۳۸ در Exp(3) در مدل ERA5 و برای مدل FNL این مقادیر به ترتیب برابر با ۰/۲۰ در طرحواره Exp(3) تا ۰/۳۵ در Exp(6) تغییر کرده و با شرایط داده‌های تفکیک افقی بالا از ۰/۲۹ در Exp(7) تا ۰/۳۷ در Exp(3) در مدل ERA5 و برای مدل FNL این مقادیر به ترتیب برابر با ۰/۲۱ در Exp(3) تا ۰/۳۶ در Exp(6) تغییر کرده است. به نظر می‌رسد در هر دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا شبیه‌سازی‌ها تقریباً با شرایط مشابه همراه است. در ماه می مقادیر همبستگی مؤلفه نصف‌النهاری باد با داده‌های تفکیک افقی بالا و شرایط مرزی FNL نسبت به مدل ERA5 با نتایج قابل‌قبولی همراه است در صورتی با داده‌های پیش‌فرض مدل ERA5 دارای عملکرد بهتری است. مقادیر میانگین بیشینه همبستگی طرحواره‌ها در این ماه با داده‌های پیش‌فرض در مدل‌های ERA5 و FNL به ترتیب برابر ۰/۳۴ و ۰/۳۱ و با داده‌های تفکیک افقی بالا برابر ۰/۲۶ و ۰/۳۴ است و بیانگر این است داده‌های تفکیک افقی بالا در شرایط مرزی ERA5 باعث کاهش و در FNL سبب تقویت همبستگی در شبیه‌سازی‌ها شده است. بررسی مؤلفه‌های شبیه‌سازی‌شده در ماه جولای نشان می‌دهد که نسبت به سایر ماه‌ها با تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای همراه است؛ به طوری که در این ماه مؤلفه نصف‌النهاری به نسبت مؤلفه مداری باد با دقت بیشتری شبیه‌سازی شده است و با جایگزینی داده‌های تفکیک افقی بالا عملکرد مدل در شبیه‌سازی با شرایط مرزی ERA5 ارتقاء یافته اما با داده‌های FNL تغییر قابل‌ملاحظه‌ای مشهود نیست. در این ماه طرحواره انتخابی Exp(6) در هر دو مدل با شرایط پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا بهترین عملکرد را داشته

در Exp(4) و Exp(6) به دست آمده که نشان می‌دهد در حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا شرایط مرزی ERA5 توانسته است در شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد موفق‌تر عمل کند. در ماه جولای علی‌رغم دامنه تغییرات زیاد میزان همبستگی به دست آمده برای مؤلفه مداری باد در هر دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا، شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های ERA5 و FNL به مراتب بهتر از ماه ژانویه و می به دست آمده است و میزان همبستگی ماکزیمم بین طرحواره‌ها از ۰/۴۱ تا ۰/۵۳ برای مدل ERA5 و از ۰/۳۵ تا ۰/۴۹ برای FNL در حالت پیش‌فرض و از ۰/۴۳ تا ۰/۵۳ برای شرایط مرزی ERA5 و از ۰/۳۷ تا ۰/۵۱ برای FNL در حالت تفکیک افقی بالا می‌باشد. و طرحواره Exp(4) برای هر دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا دارای بهترین عملکرد می‌باشند و به نظر می‌رسد طبق مقادیر ماکزیمم در این ماه شبیه‌سازی مدل در حالت تفکیک افقی بالا با شرایط مرزی FNL دارای توانایی بیشتری برای شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد می‌باشد. در ماه اکتبر برخلاف جولای با داده‌های تفکیک افقی بالای شرایط مرزی مدل ERA5 نسبت به حالت پیش‌فرض با شبیه‌سازی قابل‌قبول‌تری همراه بوده است و بهترین طرحواره‌ها در شرایط پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا به ترتیب Exp(1) و Exp(6) برای مدل‌های ERA5 و FNL هستند.

با بررسی موقعیت میانه در آماره‌ها مطابق شکل ۴ و جدول ۶، برای همبستگی مؤلفه مداری باد می‌توان گفت که برای شرایط مرزی هر دو مدل در وضعیت‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا، شبیه‌سازی در ماه می نسبت به سه ماه دیگر با ضعف همراه است. با داده‌های پیش‌فرض شرایط مرزی FNL در دو ماه ژانویه و می دارای برتری بوده و در ماه‌های جولای و اکتبر ERA5 دارای عملکرد قوی‌تر بوده است اما در شرایط داده‌های تفکیک افقی بالا فقط در ژانویه مدل FNL دارای برتری

اریبی و به عبارتی میزان انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهداتی است. طبق فرمول شماره ۱، مثبت بودن مقدار اریبی بیانگر کم برآورد مدل و مقادیر منفی بیانگر بیش برآورد مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی است.

مؤلفه مداری: بررسی‌ها نشان داده است که میزان انحراف مؤلفه مداری باد شبیه‌سازی شده از مشاهدات با داده‌های پیش فرض و مشاهداتی در ۷ طرحواره با عملکرد قابل قبولی همراه بوده است و بیشترین انحراف مثبت و منفی در ماه ژانویه در شرایط پیش فرض با شرایط مرزی ERA5 به ترتیب برابر با $0/31$ در $Exp(1)$ تا $-1/71$ در $Exp(7)$ و با داده‌های تفکیک افقی بالا برابر با $0/24$ در $Exp(1)$ تا $-1/75$ در طرحواره $Exp(7)$ بوده است، اما در شرایط مرزی FNL با داده‌های پیش فرض این مقادیر به $0/63$ در $Exp(2)$ تا $-1/70$ در $Exp(7)$ و با داده‌های تفکیک افقی بالا (HR) برابر با $0/16$ در $Exp(1)$ تا $-1/67$ متر بر ثانیه در $Exp(7)$ متغیر بوده که نشان می‌دهد داده‌های تفکیک افقی بالا در شرایط مرزی FNL عملکرد بهتری را نشان داده است. در ماه می بر مبنای میانگین اریبی تمام طرحواره‌ها در دو حالت پیش فرض و تفکیک افقی بالا با کمترین اریبی همراه بوده و تقریباً مقادیر میانگین اریبی به صفر نزدیک می‌گردد. این مقادیر برای شرایط مرزی ERA5 در دو حالت داده‌های پیش فرض و تفکیک افقی بالا به ترتیب برابر با $-0/04$ و $-0/05$ و برای شرایط مرزی FNL برابر $0/14$ و $0/04$ متر بر ثانیه به دست آمده و به نظر می‌رسد هر دو مدل شرایط مرزی تقریباً مشابه عمل کرده‌اند. در ماه جولای عموماً با داده‌های استاتیکی پیش فرض و تفکیک افقی بالا گرایش مدل به سمت مقادیر مثبت (کم برآورد) در شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد است و به نظر می‌رسد با توجه به میزان اریبی داده‌های تفکیک افقی بالا، تأثیر مثبتی در خروجی

است؛ به طوری که مقادیر همبستگی با شرایط مرزی ERA5 و FNL در حالت پیش فرض به ترتیب برابر $0/63$ و $0/71$ و با داده‌های تفکیک افقی بالا برابر $0/65$ و $0/71$ است. به نظر می‌رسد مدل با شرایط مرزی FNL دارای عملکرد بهتری بوده است. در ماه اکتبر مقادیر بیشینه همبستگی مؤلفه نصف‌النهاری باد در مدل ERA5 در شرایط پیش فرض از $0/22$ برای طرحواره‌های $Exp(3&6)$ تا $0/32$ برای طرحواره $Exp(5)$ تغییر کرده است و در مدل FNL این مقادیر از $0/10$ در $Exp(2)$ تا $0/40$ در $Exp(5)$ تغییر کرده و این مقادیر برای داده‌های تفکیک افقی بالا از $0/23$ در $Exp(6)$ تا $0/35$ در $Exp(5)$ برای شرایط مرزی ERA5 و از $0/24$ در $Exp(1)$ تا $0/37$ درصد برای $Exp(5&6)$ متغیر بوده است. در این ماه با جایگزینی داده‌های تفکیک افقی بالا شبیه‌سازی مدل با شرایط مرزی ERA5 ارتقاء یافته اما مدل FNL ضعیف‌تر گردیده است. با توجه به این نتایج شبیه‌سازی مدل با داده‌های مرزی FNL دارای عملکرد قابل قبول‌تری بوده است.

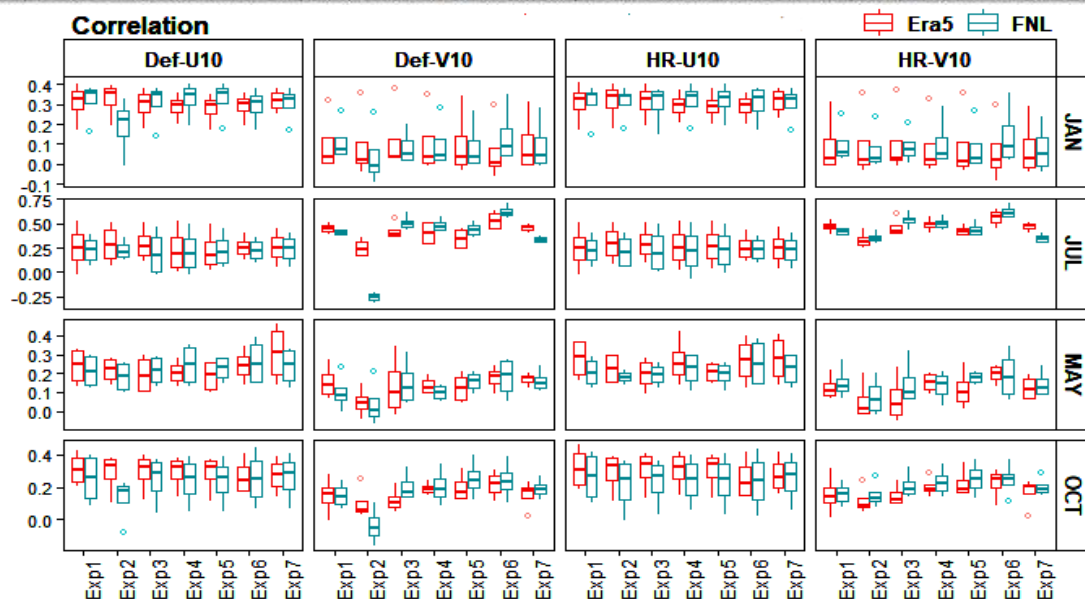
مقایسه آماره همبستگی برحسب میانه در مؤلفه نصف‌النهاری باد برای طرحواره‌های آزمایشی در شکل ۴ نشان می‌دهد شبیه‌سازی این مؤلفه در تابستان در هر دو وضعیت پیش فرض و تفکیک افقی بالا به طور قابل ملاحظه‌ای تقویت گردیده و از طرف دیگر این مؤلفه در ماه ژانویه در وضعیت‌های پیش فرض و تفکیک افقی بالا ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داده است. در ماه جولای و اکتبر طرحواره $Exp(2)$ با داده‌های پیش فرض عملکرد غیر قابل قبول داشته است. در ماه جولای با داده‌های پیش فرض مدل FNL دارای عملکرد بهتری از ERA5 ارائه نموده و در سایر موارد تقریباً عملکرد هر دو مدل شرایط مرزی مشابه است.

۳-۴ اریبی مؤلفه‌ها

از دیگر معیارهای انتخابی برای بررسی دقت شبیه‌سازی،

(سطح معنی داری همبستگی ها 0,05 < p-value) در نظر گرفته شده است.

EXP	JAN								MAY								JUL								OCT							
	DEF				HR				DEF				HR				DEF				HR				DEF				HR			
	U10		V10		U10		V10		U10		V10		U10		V10		U10		V10		U10		V10		U10		V10					
	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL				
EXP1	0.49	0.38	0.32	0.27	0.41	0.38	0.31	0.25	0.33	0.30	0.27	0.23	0.37	0.29	0.22	0.27	0.52	0.39	0.51	0.43	0.51	0.41	0.54	0.45	0.43	0.40	0.28	0.24	0.46	0.42	0.32	0.24
EXP3	0.38	0.38	0.38	0.20	0.40	0.37	0.37	0.21	0.30	0.29	0.34	0.31	0.28	0.26	0.23	0.32	0.51	0.46	0.55	0.62	0.51	0.49	0.60	0.63	0.40	0.37	0.22	0.33	0.41	0.36	0.24	0.33
EXP4	0.36	0.49	0.36	0.28	0.37	0.40	0.33	0.29	0.28	0.35	0.19	0.14	0.42	0.30	0.20	0.21	0.63	0.49	0.51	0.57	0.63	0.61	0.57	0.69	0.38	0.39	0.24	0.34	0.42	0.40	0.29	0.34
EXP5	0.35	0.40	0.34	0.27	0.38	0.40	0.36	0.27	0.26	0.28	0.21	0.21	0.26	0.26	0.26	0.21	0.50	0.45	0.45	0.52	0.52	0.49	0.50	0.54	0.37	0.39	0.32	0.40	0.40	0.41	0.35	0.37
EXP6	0.36	0.38	0.30	0.35	0.36	0.38	0.30	0.36	0.34	0.39	0.24	0.27	0.40	0.38	0.24	0.34	0.41	0.35	0.63	0.71	0.43	0.37	0.65	0.71	0.41	0.45	0.31	0.39	0.42	0.44	0.31	0.37
EXP7	0.38	0.38	0.31	0.26	0.38	0.38	0.29	0.24	0.46	0.33	0.20	0.24	0.41	0.30	0.19	0.24	0.45	0.41	0.49	0.38	0.46	0.40	0.51	0.41	0.39	0.41	0.23	0.27	0.42	0.41	0.23	0.29



شکل 4. توزیع همبستگی مؤلفه مداری (U10) و نصف‌النهاری (V10) باد در دو مدل ERA5 و FNL

Def: داده‌های استاتیکی پیش‌فرض، HR: داده‌های تفکیک افقی بالا، سطح معنی داری همبستگی ها 0,05 < p-value) در نظر گرفته شده است.

تفکیک افقی بالا می‌توان گفت که هر دو مدل ERA5 و FNL در ماه گرم سال دارای ضعف بیشتری نسبت به سایر ماه‌ها بوده و عموماً به‌غیر از ماه جولای در سایر ماه‌ها شبیه‌سازی مدل دارای کم برآورد نسبت به داده‌های مشاهداتی است و ماه می از لحاظ میزان میان‌ارایی دارای بهترین شبیه‌سازی است. با توجه به شکل 5 به‌ترتیب در ماه‌های می و اکتبر مدل FNL و در ماه جولای مدل ERA5 دارای عملکرد دقیق‌تر بوده و در ژانویه تقریباً هر دو مدل شرایط مرزی تقریباً خروجی مشابهی ارائه نمودند.

مؤلفه نصف‌النهاری: میزان اریبی مدل ERA5 در ماه ژانویه بین 0/98 تا 0/78- در Exp(6) تا 0/78- در Exp(3) در

مدل دیده نمی‌شود اما در بین داده‌های شرایط مرزی، مدل ERA5 با عملکرد قوی‌تری همراه بوده است. شبیه‌سازی مؤلفه مداری در ماه اکتبر بعد از ماه می نسبت به دو ماه جولای و ژانویه عملکرد بهتری را نشان داده است. در این ماه برای شرایط مرزی ERA5 در دو حالت داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا مقادیر میانگین طرحواره‌ها به‌ترتیب برابر با 0/38- و 0/39- و برای شرایط مرزی FNL برابر 0/20- و 0/27- متر بر ثانیه بوده است و به نظر می‌رسد شرایط مرزی FNL شبیه‌سازی بهتری را به نمایش گذاشته است.

در بررسی آماره اریبی، مطابق شکل شماره 5 و جدول شماره 7، برحسب میان‌ارایی هر دو حالت پیش‌فرض و

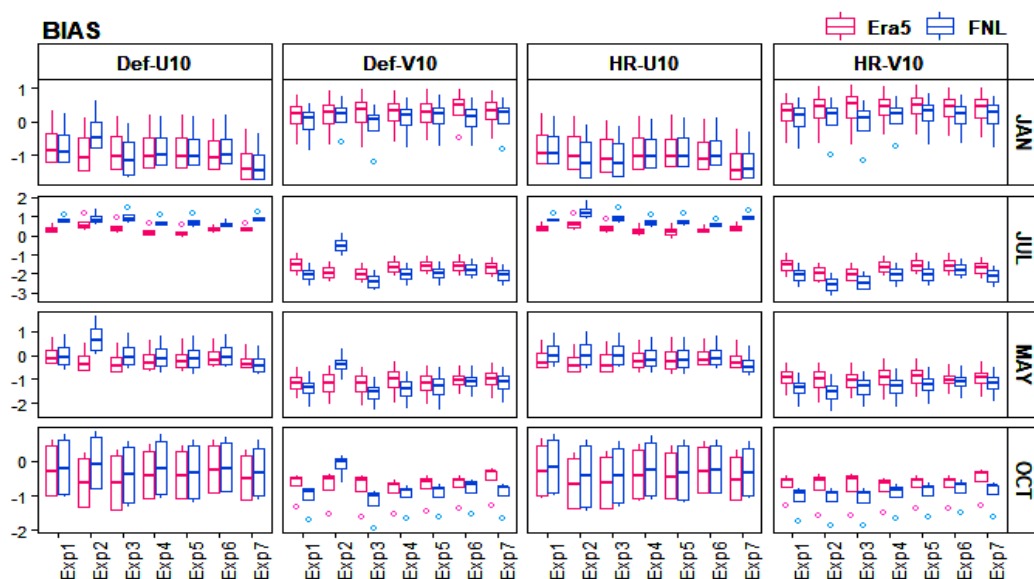
مؤثری نداشته است. مقادیر میانگین اریبی در ماه اکتبر با شرایط مرزی ERA5 با داده‌های پیش‌فرض برابر ۰/۸۶- تفکیک افقی بالا برابر ۰/۸۴- بوده و در مدل FNL با شرایط پیش‌فرض ۱- و با داده‌های تفکیک افقی بالا برابر ۱/۱۳- متر بر ثانیه به‌دست آمده است که نشان می‌دهد داده‌های تفکیک افقی بالا در مدل ERA5 دارای تأثیر مثبت و در مدل FNL با تأثیرگذاری منفی همراه است و شبیه‌سازی این ماه در بین ۴ ماه منتخب از لحاظ کیفیت در رتبه دوم قرار می‌گیرد.

در بررسی آماره اریبی بر مبنای میانه، مطابق شکل ۵ و جدول ۷، شبیه‌سازی خروجی مؤلفه نصف‌النهاری هر دو مدل شرایط مرزی با داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا در ماه ژانویه با عملکرد بهتری نسبت به ماه‌های دیگر همراه بوده است و ضعیف‌ترین عملکرد در ماه جولای مشاهده می‌گردد. عموماً میزان اریبی مؤلفه نصف‌النهاری دارای مقادیر منفی (بیش برآورد) بوده و به‌ندرت دارای مقادیر مثبت (کم برآورد) می‌باشند. با بررسی شکل ۵ می‌توان گفت طرحواره Exp(2) با داده‌های پیش‌فرض و شرایط مرزی FNL در اکثر ماه‌ها دارای عملکرد مناسبی در تخمین مؤلفه نصف‌النهاری باد است. با بررسی بیشتر این شکل بر اساس میانه آماره اریبی می‌توان نتیجه گرفت که به غیر ژانویه در سایر ماه‌ها عملکرد شرایط مرزی ERA5 در هر دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا قوی‌تر بوده است.

شرایط داده‌های پیش‌فرض و از ۱/۱۰ در Exp(5) تا ۰/۷۰ متر بر ثانیه در Exp(3) با داده‌های تفکیک افقی بالا متغیر است و همچنین مدل FNL با شرایط پیش‌فرض از ۰/۷۹ در Exp(5) تا ۱/۲۰- در Exp(3) و در حالت تفکیک افقی بالا این مقادیر از ۰/۸۴ در Exp(5) تا ۱/۱۴- متر بر ثانیه در Exp(3) در نوسان است. برخلاف مؤلفه مداری بررسی میانگین اریبی طرحواره‌ها برای مؤلفه نصف‌النهاری نشان می‌دهد مدل‌ها در ماه ژانویه دارای بهترین عملکرد نسبت به سایر ماه‌ها بوده و در این ماه شبیه‌سازی طرحواره‌ها برخلاف سایر ماه‌ها با کم برآورد همراه بوده است و شبیه‌سازی این ماه با شرایط مرزی FNL از کیفیت بالاتری برخوردار است. بیشترین مقادیر اریبی مثبت و منفی با داده‌های پیش‌فرض در ماه می بین ۰/۲۳- تا ۲/۰۸- و با داده‌های تفکیک افقی بالا از ۰/۱۳- تا ۱/۹۹- متر بر ثانیه در مدل ERA5 و در مدل FNL با شرایط پیش‌فرض بین ۰/۲۶ تا ۲/۳۱- و با داده‌های تفکیک افقی بالا از ۰/۴۶- تا ۲/۳۷- متر بر ثانیه به‌دست آمده است به‌طوری‌که داده‌های تفکیک افقی بالا نقش مثبتی را در کیفیت شبیه‌سازی‌ها بازی نموده است. در ماه جولای با شرایط پیش‌فرض در مدل ERA5 میزان اریبی بین ۰/۹۴- تا ۲/۴۵- و در مدل FNL این مقادیر بین ۰/۰۹ تا ۲/۸۴- و با داده‌های تفکیک افقی بالا بین ۰/۹۳- تا ۲/۴۸- متر بر ثانیه برای مدل ERA5 و ۱/۲۰ تا ۳/۱۷- متر بر ثانیه برای مدل FNL متغیر بوده است. به‌طوری‌که داده‌های تفکیک افقی بالا در خروجی طرحواره‌ها نقش

جدول ۷. نتایج آماره اریبی باد مداری و نصف‌النهاری با شرایط مرزی FNL و ERA5 در دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا.

EXP	JAN				MAY				JUL				OCT			
	DEF		HR		DEF		HR		DEF		HR		DEF		HR	
	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10
	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL
EXP1	-1.10	-1.21	-0.70	-0.85	-1.28	-1.26	-0.63	-0.81	-0.38	-0.59	-1.78	-2.16	-0.57	-0.47	-1.69	-2.15
EXP2	0.13	0.63	0.91	0.75	0.16	-0.10	1.04	0.72	-0.63	0.06	-0.44	0.26	0.45	1.01	-0.31	-0.82
EXP3	0.16	-0.07	0.97	0.48	0.05	-0.15	1.08	0.81	0.49	0.93	-0.52	-0.93	0.58	0.94	-0.33	-0.57
EXP4	0.19	0.14	0.94	0.73	0.17	0.09	1.06	0.77	0.64	0.83	-0.23	-0.66	0.66	0.78	-0.14	-0.58
EXP5	-1.38	-1.27	-0.57	-0.73	-1.35	-1.34	-0.38	-0.67	0.71	0.82	-0.42	-0.52	0.73	0.77	-0.13	-0.50
EXP6	0.07	0.19	0.98	0.72	0.07	0.15	1.02	0.81	0.71	0.89	-0.43	-0.45	-0.44	-0.57	-0.37	-0.46
EXP7	-0.21	-0.35	0.94	0.71	-0.22	-0.32	1.00	0.75	0.44	0.42	-0.34	-0.47	0.63	0.48	-0.27	-0.48
	0.66	1.27	-1.14	-1.55	0.71	1.34	-1.15	-1.60	0.34	0.60	-0.21	-0.68	0.34	0.58	-0.25	-0.63



شکل ۵. توزیع اریبی مؤلفه مداری (U10) و نصف‌النهاری (V10) باد در دو مدل ERA5 و FNL.
 Def: داده‌های استاتیکی پیش فرض، HR: داده‌های تفکیک افقی (بالا).

۴-۴ RMSE مؤلفه‌ها

نتایج RMSE طرحواره‌های آزمایشی به‌عنوان یکی دیگر از معیارهای ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده مدل با مشاهدات برای مؤلفه مداری و نصف‌النهاری باد در جدول پیوستی ۷ و شکل ۶ ارائه شده است.

مؤلفه مداری: همان‌طور که انتظار می‌رود با توجه به نتایج دو معیار همبستگی و اریبی، میانگین مجذور خطا نیز برای مؤلفه مداری باد با نتایج قابل توجهی همراه است به‌طوری‌که در ماه ژانویه برای داده‌های پیش فرض حداقل میانگین مجذور خطا از $2/33$ برای Exp(6) تا حداکثر $3/33$ متر بر ثانیه برای Exp(3) و با داده‌های تفکیک افقی بالا از $2/39$ برای Exp(6) تا حداکثر $3/39$ متر بر ثانیه برای Exp(3) در مدل ERA5 حاصل شده و این مقادیر در مدل FNL برای داده‌های پیش فرض برابر با $1/93$ برای Exp(2) و $3/26$ برای Exp(3) و برای داده‌های تفکیک افقی بالا برابر با $2/30$ برای Exp(6) و $3/44$ متر بر ثانیه برای Exp(3) به‌دست آمده است و نشان می‌دهد شرایط مرزی FNL در هر دو حالت پیش فرض و تفکیک افقی بالا

نسبت به شرایط مرزی ERA5 بهتر عمل کرده است و در این ماه داده‌های تفکیک افقی بالا تأثیر مثبتی بر میانگین مجذور خطا نداشته است. با بررسی میزان میانگین RMSE تمام طرحواره‌ها در ماه می شاهد ضعیف‌ترین عملکرد مدل در شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد هستیم؛ به‌طوری‌که مقادیر این آماره در شرایط داده‌های پیش فرض برای شرایط مرزی ERA5 و FNL به ترتیب برابر $3/18$ و $3/12$ متر و برای داده‌های تفکیک افقی بالا برابر $3/30$ و $3/18$ متر بر ثانیه است و نشان می‌دهد که داده‌های تفکیک افقی بالا بازهم نقش مؤثری بر نتایج شبیه‌سازی نداشته است. در ماه جولای برخلاف ماه می میانگین این آماره برای طرحواره‌ها در هر دو حالت پیش فرض و تفکیک افقی بالا بیانگر بهترین عملکرد در بین ماه‌های منتخب بوده و مقادیر این آماره در شرایط داده‌های پیش فرض برای شرایط مرزی ERA5 و FNL به ترتیب برابر $1/92$ و $2/09$ متر و برای شرایط داده‌های تفکیک افقی بالا برابر $1/92$ و $2/19$ متر بر ثانیه است و همانند ماه می نشان می‌دهد که

به‌طوری‌که این آماره در شرایط داده‌های پیش‌فرض برای شرایط مرزی ERA5 و FNL به‌ترتیب برابر ۲/۸۵ و ۲/۸۳ و برای شرایط داده‌های تفکیک افقی بالا برابر ۲/۸۷ و ۲/۹۷ متر بر ثانیه است و نشان می‌دهد که داده‌های تفکیک افقی بالا نقش مؤثری در کاهش مقدار عددی این آماره نداشته است. در ماه جولای مقادیر میانگین RMSE تمام طرحواره‌ها در شرایط داده‌های پیش‌فرض برای شرایط مرزی ERA5 و FNL به‌ترتیب برابر ۲/۵۸ و ۲/۷۳ و برای شرایط داده‌های تفکیک افقی بالا برابر ۲/۵۳ و ۲/۸۹ متر بر ثانیه است و نشان می‌دهد که داده‌های تفکیک افقی بالا با شرایط مرزی ERA5 باعث بهبود شبیه‌سازی شده اما در شرایط مرزی FNL دارای اثر منفی بوده و همچنین می‌توان گفت مدل شرایط مرزی ERA5 در دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا دارای عملکرد قوی‌تری بوده است. در ماه اکتبر برخلاف سایر ماه‌ها این آماره در هر دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا بیانگر بهترین عملکرد در بین ماه‌های منتخب بوده به‌طوری‌که بیشترین میانگین مجذور خطا در مدل ERA5 با شرایط داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا به‌ترتیب برابر ۲/۵۲ و ۲/۵۶ متر بر ثانیه و برای شرایط مرزی FNL برابر ۲/۵۴ و ۲/۴۹ متر بر ثانیه به‌دست آمده و تقریباً هر دو مدل شرایط مرزی در این ماه مشابه هم عمل نموده‌اند.

با بررسی میانه آماره میانگین مجذور خطا مطابق شکل ۶ و جدول ۸ در دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا می‌توان گفت بهترین نتیجه شبیه‌سازی مؤلفه نصف‌النهاری باد در ماه اکتبر و ضعیف‌ترین آن در ماه می به‌دست آمده است به‌طورکلی به‌استثنای ماه ژانویه که شرایط مرزی FNL با عملکرد بهتری همراه بوده است و در سایر ماه‌ها شرایط مرزی ERA5 با شبیه‌سازی قوی‌تری همراه بوده است.

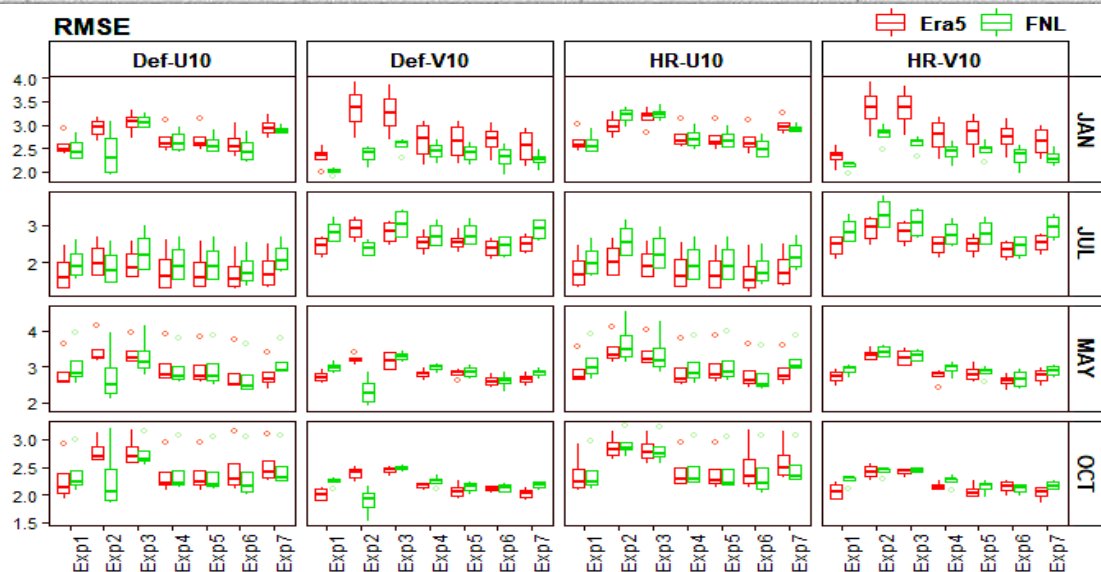
داده‌های تفکیک افقی بالا اثر مثبتی در کاهش این آماره نداشته و با توجه به خروجی مدل می‌توان گفت شرایط مرزی ERA5 دارای عملکرد قوی‌تری نسبت به FNL است. در ماه اکتبر نیز بیشترین میانگین مجذور خطا در مدل ERA5 با شرایط داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا به‌ترتیب برابر ۲/۶۰ و ۲/۶۴ و برای شرایط مرزی FNL برابر ۲/۵۵ و ۲/۶۵ متر بر ثانیه است و از لحاظ توانمندی شبیه‌سازی در رتبه دوم قرار می‌گیرد.

با بررسی میانه آماره میانگین مطابق شکل شماره ۶ و جدول ۸ مجذور خطا در دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا در شکل ۵ می‌توان گفت که بهترین نتیجه شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد در ماه جولای و ضعیف‌ترین آن در ماه می به‌دست آمده است. همچنین می‌توان گفت به‌استثنای ماه جولای که شرایط مرزی ERA5 دارای عملکرد بهتری است، در سایر ماه‌ها هر دو مدل دارای شرایط یکسان هستند.

مؤلفه نصف‌النهاری: در ماه ژانویه برای داده‌های پیش‌فرض حداقل میانگین مجذور خطا از ۲/۰۱ برای Exp(1) تا حداکثر ۳/۹۰ برای Exp(2) و با داده‌های تفکیک افقی بالا از ۲/۰۴ برای Exp(1) تا حداکثر ۳/۹۲ متر بر ثانیه برای Exp(2) در مدل ERA5 حاصل شده و این مقادیر در مدل FNL برای داده‌های پیش‌فرض برابر با ۱/۹۰ برای Exp(1) تا ۲/۷۰ برای Exp(3) و برای داده‌های تفکیک افقی بالا برابر با ۱/۹۷ در Exp(6) تا ۳/۰۳ متر بر ثانیه برای Exp(2) به‌دست آمده است و مدل مرزی FNL در هر دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا بهتر عمل کرده است. در این ماه نیز همانند مؤلفه مداری باد داده‌های تفکیک افقی بالا تأثیر مثبتی در کاهش میانگین مجذور خطا نداشته است. با بررسی میزان میانگین RMSE تمام طرحواره‌ها در ماه می نیز همانند مؤلفه مداری ضعیف‌ترین عملکرد آماره میانگین مجذور خطا برای مؤلفه نصف‌النهاری در این ماه شکل گرفته است

جدول ۸. نتایج آماره RMSE باد مداری و نصف‌النهاری با شرایط مرزی FNL و ERA5 در دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا.

EXP	JAN						MAY						JUL						OCT													
	DEF			HR			DEF			HR			DEF			HR			DEF			HR										
	U10	V10		U10	V10		U10	V10		U10	V10		U10	V10		U10	V10		U10	V10												
	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL										
EXP1	2.38	2.26	2.01	1.99	2.46	2.42	2.04	1.98	2.55	2.56	2.54	2.79	2.60	2.64	2.46	2.68	1.28	1.56	2.12	2.56	1.34	1.64	2.09	2.56	1.83	2.08	1.90	2.11	2.09	2.11	1.89	2.10
EXP2	2.67	1.93	2.71	2.10	2.73	2.96	2.75	2.47	3.15	2.10	3.04	1.99	3.13	3.12	3.16	3.22	1.63	1.46	2.54	2.15	1.67	2.17	2.46	2.94	2.63	1.88	2.24	1.53	2.65	2.70	2.27	2.29
EXP3	2.73	2.94	2.69	2.29	2.84	3.08	2.77	2.34	3.12	2.77	2.93	3.13	3.13	2.83	3.02	3.15	1.58	1.81	2.44	2.64	1.59	1.80	2.43	2.63	2.57	2.55	2.34	2.42	2.57	2.57	2.32	2.40
EXP4	2.46	2.43	2.15	2.17	2.54	2.49	2.28	2.13	2.66	2.57	2.61	2.80	2.51	2.56	2.42	2.66	1.29	1.50	2.19	2.45	1.33	1.53	2.12	2.43	2.08	2.12	2.08	2.30	2.18	2.20	2.07	2.07
EXP5	2.48	2.45	2.18	2.14	2.47	2.50	2.29	2.22	2.58	2.48	2.61	2.66	2.59	2.62	2.57	2.58	1.32	1.54	2.25	2.47	1.30	1.54	2.13	2.45	2.09	2.11	1.93	2.00	2.14	2.18	1.96	1.86
EXP6	2.33	2.22	2.23	1.94	2.39	2.30	2.30	1.97	2.47	2.38	2.43	2.31	2.43	2.39	2.33	2.36	1.38	1.38	2.07	2.11	1.22	1.38	2.04	2.08	2.11	2.00	2.04	2.04	2.14	2.04	1.99	1.99
EXP7	2.71	2.81	2.11	2.02	2.81	2.83	2.27	2.13	2.38	2.86	2.46	2.64	2.51	2.94	2.44	2.67	1.33	1.72	2.22	2.58	1.36	1.79	2.20	2.56	2.26	2.23	1.89	2.07	2.30	2.27	1.85	2.07



شکل ۶. توزیع RMSE مؤلفه مداری (U10) و نصف‌النهاری (V10) باد در دو مدل ERA5 و FNL

(Def: داده‌های استاتیکی پیش‌فرض، HR: داده‌های تفکیک افقی بالا).

۴-۵ MAE مؤلفه‌ها

مؤلفه مداری: برای مؤلفه مداری باد، متوسط میانگین خطای مطلق با داده‌های پیش‌فرض برای ماه ژانویه از ۲,۰۴ در Exp(1) تا ۲,۴۸ در Exp(3) و با داده‌های تفکیک افقی بالا از ۲,۰۸ در Exp(1) تا ۲,۵۸ در Exp(3) با شرایط مرزی ERA5 و به‌طور میانگین برای کلیه طرحواره‌های ۷ گانه به ترتیب مقادیر ۲/۲۵ و ۲/۴۳ متر بر ثانیه به‌دست‌آمده است با شرایط مرزی FNL و داده‌های پیش‌فرض مقادیر ۱/۹۳ در Exp(2) تا ۲/۵۸ در Exp(3) و به‌طور میانگین مقدار ۲/۱۳ و با داده‌های تفکیک افقی بالا مقادیر ۱/۹۸ در Exp(6) تا ۲,۶۳ در Exp(3) و به‌طور میانگین مقدار ۲/۳۴ متر بر ثانیه حاصل گردیده است که

نشان می‌دهد شرایط مرزی FNL در این ماه موفق‌تر بوده است. در ماه می میانگین طرحواره‌ها با داده‌های پیش‌فرض به ترتیب در مدل‌های ERA5 و FNL برابر با مقادیر ۲/۳۹ و ۲/۳۶ متر بر ثانیه و برای داده‌های تفکیک افقی بالا مقادیر ۲/۶۹ و ۲/۸۴ متر بر ثانیه به‌دست‌آمده است که بیانگر ناموفق بودن داده‌های تفکیک افقی بالا در کاهش میانگین خطای مطلق در این دو ماه است. در ماه جولای میانگین طرحواره‌ها در بین Exp‌های آزمایشی با داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا در شرایط مرزی ERA5 به ترتیب ۱/۵۰ و ۱/۷۹ و در شرایط مرزی FNL برابر با ۱/۶۲ و ۱/۹۵ متر بر ثانیه بوده که نشان‌دهنده افزایش دقت شبیه‌سازی در این ماه نسبت به سایر ماه‌ها است اما

پیش‌فرض به‌ترتیب در طرحواره‌های Exp(2) و Exp(6) و با شرایط تفکیک افقی بالا برای هر دو مدل شرایط مرزی در Exp(6) شکل گرفته است. در ماه جولای دامنه بیشترین میانگین خطای مطلق در شرایط پیش‌فرض بین طرحواره‌ها از ۱/۷۶ در Exp(6) تا ۲/۶۵ در Exp(2) برای مدل ERA5 و در مدل FNL با مقدار ۱/۸۰ در Exp(2) تا ۲/۹۸ متر بر ثانیه در Exp(3) به‌دست آمده است و این مقادیر در شرایط تفکیک افقی بالا بین طرحواره‌ها از ۱/۷۳ در Exp(6) تا ۲/۷۰ در Exp(2) برای مدل ERA5 و در مدل FNL با مقدار ۱/۷۹ در Exp(6) تا ۳/۲۸ متر بر ثانیه در Exp(2) حاصل گردیده است. در ماه اکتبر نیز مقادیر MAE در طرحواره‌ها با شرایط پیش‌فرض برای هر دو مدل شرایط مرزی ERA5 و FNL به‌طور متوسط به‌ترتیب برابر ۱/۷۳ و ۱/۷۴ متر بر ثانیه و برای داده‌های با تفکیک افقی بالا برابر ۱/۷۳ و ۱/۷۸ متر بر ثانیه بوده است.

مطابق شکل ۷ و جدول ۹ مقادیر MAE برای مؤلفه نصف‌النهاری باد با شرایط مرزی ERA5 و FNL در ماه‌های ژانویه و اکتبر با عملکرد بهتری نسبت به ماه‌های می و جولای همراه بوده است؛ به‌طوری‌که برای آماره میانگین خطای مطلق در پیش‌بینی مؤلفه نصف‌النهاری باد به‌استثنای ماه ژانویه که مدل FNL عملکرد بهتری نسبت به ERA5 نشان داده در سایر ماه‌ها مدل ERA5 عملکرد قابل‌قبول‌تری داشته است و همچنین می‌توان گفت داده‌های تفکیک افقی بالا برافزایش دقت شبیه‌سازی این مؤلفه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای نداشته است و نتایج به‌حالت پیش‌فرض نزدیک بوده است.

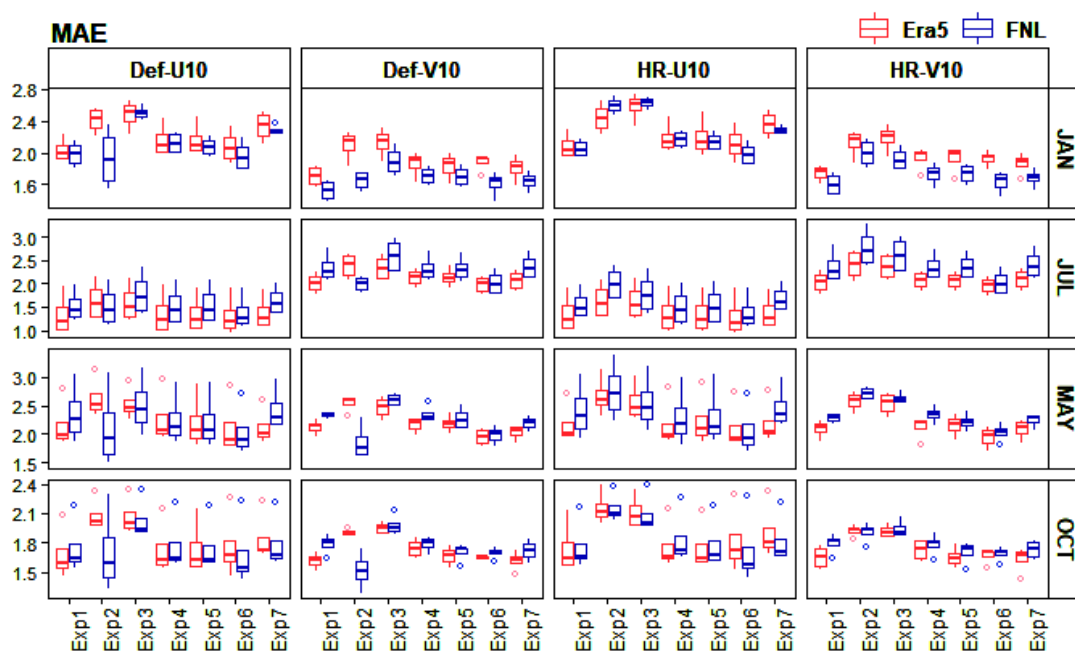
شبیه‌سازی با داده‌های تفکیک افقی بالا همانند ژانویه و می عملکرد مؤثری را در کاهش خطا نداشته است. شبیه‌سازی در ماه اکتبر نسبت به دو ماه ژانویه و می قوی‌تر اما از ماه جولای ضعیف‌تر است به‌طوری‌که میزان میانگین طرحواره‌ها برای داده‌های پیش‌فرض با شرایط مرزی ERA5 و FNL به‌ترتیب برابر ۱,۹۱ و ۱,۸۷ و برای داده‌های تفکیک افقی بالا ۲/۱۳ و ۲/۱۴ متر بر ثانیه است. با بررسی آماره میانگین خطای مطلق مطابق شکل ۷ و جدول ۹، به نظر می‌رسد شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد با داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا در ماه جولای دارای بهترین عملکرد و در ماه می نیز ضعیف‌ترین عملکرد و در دو ماه ژانویه تقریباً عملکرد مشابه داشته‌اند. همچنین می‌توان گفت به‌استثنای ماه جولای که شرایط مرزی ERA5 در شبیه‌سازی بهتر ظاهر شده در سایر موارد دو مدل شرایط مرزی دارای شرایط یکسان می‌باشند.

مؤلفه نصف‌النهاری: در ژانویه بیشترین مقدار MAE

با داده‌های پیش‌فرض در مدل ERA5 و FNL به‌ترتیب ۲/۳۲ و ۲/۱۲ در طرحواره Exp(3) و کمترین مقدار آن ۱/۵۶ و ۱/۳۸ متر بر ثانیه در Exp(1) و برای داده‌های تفکیک افقی بالا این مقادیر برابر ۲/۳۵ و ۲/۱۷ در طرحواره‌های Exp(3) و Exp(2) و کمترین مقدار آن به‌ترتیب ۱/۶۱ و ۱/۴۴ متر بر ثانیه برای Exp(1) و Exp(6) به‌دست آمده است. در ماه می نیز در هر دو مدل شرایط مرزی ERA5 و FNL بیشترین MAE با شرایط پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا به‌ترتیب در Exp(3) و Exp(2) شکل گرفته است اما کمترین مقدار آن برای شرایط

جدول ۹. نتایج آماره MAE باد مداری و نصف‌النهاری با شرایط مرزی ERA5 و FNL در دو حالت پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا

EXP	JAN				MAY				JUL				OCT			
	DEF		HR		DEF		HR		DEF		HR		DEF		HR	
	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10	U10	V10
	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL	ERA5	FNL
EXP1	1.93	1.81	1.56	1.36	2.29	2.18	1.61	1.48	1.87	1.87	1.96	2.27	2.72	3.05	1.88	2.17
EXP2	2.21	1.55	1.83	1.51	2.65	2.72	1.86	1.80	2.35	1.50	2.32	1.82	3.14	3.40	2.36	2.61
EXP3	2.24	2.41	1.88	1.70	2.74	2.69	1.94	1.80	2.27	1.99	2.24	2.48	3.04	3.20	2.29	2.54
EXP4	1.99	1.98	1.63	1.58	2.46	2.28	1.71	1.54	1.56	1.86	1.99	2.27	2.63	2.99	1.80	2.14
EXP5	2.02	1.94	1.60	1.57	2.52	2.27	1.68	1.59	1.82	1.82	2.01	2.11	2.91	3.05	1.90	2.03
EXP6	1.86	1.79	1.70	1.39	2.36	2.15	1.76	1.44	1.79	1.70	1.78	1.78	2.74	2.73	1.70	1.89
EXP7	2.11	2.23	1.56	1.49	2.53	2.35	1.67	1.53	1.87	2.15	1.83	2.04	2.78	2.99	1.85	2.08



شکل ۷. توزیع MAE مؤلفه مداری (U10) و نصف‌النهاری (V10) باد در دو مدل ERA5 و FNL

(Def: داده‌های استاتیکی پیش‌فرض، HR: داده‌های تفکیک افقی بالا).

انتظار ایستگاه شمیران به غیر ژانویه در سایر ماه‌ها به نسبت بقیه ایستگاه‌ها دارای همبستگی خوبی بوده و در دو ماه می و اکتبر دارای بیشترین همبستگی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری داده‌های تفکیک افقی بالا در ماه‌های منتخب تا حدودی باعث افزایش همبستگی مؤلفه مداری گردیده و همچنین همبستگی مؤلفه نصف‌النهاری در دو ماه جولای و اکتبر به میزان قابل ملاحظه‌ای ارتقاء یافته است. بررسی میانگین اریبی مؤلفه مداری باد در طرحواره‌ها برای ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد که در ماه‌های سرد (ژانویه، اکتبر) بیشترین اریبی به مرتفع‌ترین ایستگاه (شمیران) تعلق دارد اما در ماه گرم (جولای) دارای کمترین اریبی بوده و در ماه‌های گذر (می، اکتبر) شبیه‌سازی ایستگاه چیتگر عملکرد خوبی را نشان داده است اما برای مؤلفه نصف‌النهاری میزان اریبی دارای روند منظم‌تری بوده و به‌استثنای ماه ژانویه که ایستگاه چیتگر دارای کمترین اریبی است در سایر ماه‌ها ایستگاه مهرآباد کمترین اریبی و ایستگاه شمیران بیشترین

با بررسی ارتفاع ایستگاه‌های مشاهداتی جدول شماره ۱، به نظر می‌رسد ایستگاه‌ها به‌طور میانگین نسبت به هم دارای ۱۱۰ متر اختلاف ارتفاع بوده و این اختلاف بین پایین‌ترین (مهرآباد) و بالاترین (شمیران) ایستگاه برابر ۳۶۰ متر است. طبیعتاً این مشخصه می‌تواند در دقت شبیه‌سازی‌ها توسط مدل پیش‌بینی و پژوهش وضعیت جو اثرگذار باشد. با بررسی آماره همبستگی مؤلفه مداری ایستگاه‌های منتخب، ایستگاه شمیران در سه ماه ژانویه و می و اکتبر دارای کمترین میزان همبستگی بوده اما در ماه جولای ایستگاه چیتگر که در حاشیه محیط شهری قرار دارد دارای ضعیف‌ترین همبستگی است و ایستگاه شمیران در این ماه با اختلاف چشمگیری قوی‌ترین همبستگی را به خود اختصاص داده است به‌طوری‌که با توجه موقعیت مکانی ایستگاه شمیران عامل اصلی ضعف و قوت شبیه‌سازی‌ها توپوگرافی و ارتفاع این ایستگاه است. مقدار همبستگی مؤلفه نصف‌النهاری نسبت به مؤلفه مداری به‌استثنای ماه جولای دارای عملکرد ضعیف‌تری است؛ اما برخلاف

انتخاب شرایط مرزی برتر، در ابتدا برای طرحواره‌ها، برحسب میانگین آماره‌های هر ایستگاه با در نظر گرفتن وزن یکسان، شرایط مرزی تعیین و سپس شرایط مرزی منتخب از بین ۷ طرحواره با بیشترین امتیاز مشخص و در ستون Final Dataset نمایش داده شده است.

۵ نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان داده است داده‌های شرایط مرزی، پیکربندی مدل (لایه مرزی سیاره‌ای و لایه سطحی و...) و داده‌های استاتیکی، نقش کلیدی در برون‌داد مدل دارند و می‌توان با انتخاب شرایط مرزی مناسب، پیکربندی دقیق مدل و به‌کارگیری داده‌های استاتیکی با تفکیک افقی بالا، میزان خطا را در شبیه‌سازی‌ها کاهش داد. بر همین اساس در این مطالعه نتایج شاخص‌های آماری برای مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد با به‌کارگیری هفت طرحواره در چهار ایستگاه منتخب با استفاده از دو تیپ داده شرایط اولیه و مرزی ERA5 و FNL تحت شرایط داده‌های استاتیکی پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا مورد بررسی قرار گرفت و مناسب‌ترین طرحواره‌ها و داده‌های شرایط مرزی با در نظر گرفتن ضریب وزنی یکسان آماره‌ها مطابق جداول ۱۰ به شرح ذیل استخراج گردید:

- در ماه ژانویه برای مؤلفه مداری باد در شرایط پیش‌فرض Exp(1) ERA5 و Exp(2) FNL و با داده‌های تفکیک افقی بالا Exp(1) و برای مؤلفه نصف‌النهاری با داده‌های پیش‌فرض Exp(1) و در شرایط تفکیک افقی بالا Exp(1) ERA5 و Exp(6) FNL با قوی‌ترین عملکرد به‌عنوان طرحواره‌های برتر در نظر گرفته شده‌اند. همچنین شرایط مرزی FNL در این ماه برای مؤلفه مداری باد دارای بهترین عملکرد است اما در ماه می برای داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا به‌ترتیب مدل‌های FNL و ERA5 به‌عنوان شرایط مرزی برتر انتخاب گردیدند. با بررسی شبیه‌سازی مؤلفه مداری

در ماه جولای به نظر می‌رسد شرایط مرزی ERA5 دارای بیشترین توانمندی است و در نهایت ماه اکتبر، برای داده‌های پیش‌فرض مدل FNL و تفکیک افقی بالا مدل ERA5 به‌عنوان شرایط مرزی برتر در نظر گرفته شده است. اما نتایج شبیه‌سازی مؤلفه نصف‌النهاری نشان می‌دهد به‌استثنای ماه ژانویه که مدل FNL به‌عنوان شرایط مرزی برتر منتخب بوده در سایر ماه‌ها شرایط مرزی ERA5 به‌عنوان مدل برتر انتخاب گردیده است.

- بهترین طرحواره شبیه‌سازی مؤلفه مداری باد با داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا در ماه می برای شرایط مرزی ERA5 به‌ترتیب Exp(6&7) و Exp(6) و شرایط مرزی FNL نیز Exp(2) و Exp(6) است. در این ماه نزدیک‌ترین شبیه‌سازی مؤلفه نصف‌النهاری باد با داده‌های پیش‌فرض در شرایط مرزی FNL و ERA5 توسط Exp(2) و Exp(6&7) و داده‌های تفکیک افقی بالا با Exp(6) حاصل گردید. در ماه جولای برای مؤلفه مداری باد در شرایط مرزی ERA5 و FNL با داده‌های پیش‌فرض به‌ترتیب Exp(4&6) و Exp(6) و برای داده‌های تفکیک افقی بالا Exp(6) به‌عنوان بهترین طرحواره‌ها انتخاب گردیدند؛ اما برای مؤلفه نصف‌النهاری در شرایط داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا با شرایط مرزی ERA5 طرحواره Exp(6) و مدل FNL طرحواره‌های Exp(6&2) و Exp(6) به‌عنوان بهترین انتخاب شده‌اند. در ماه اکتبر به‌عنوان نماینده فصل پاییز برای شرایط مرزی ERA5 با داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا Exp(1) و برای FNL به‌ترتیب Exp(2) و Exp(6) به‌عنوان بهترین طرحواره جهت تخمین مؤلفه مداری باد انتخاب گردیدند؛ اما برای مؤلفه نصف‌النهاری در شرایط مرزی ERA5 و FNL با داده‌های پیش‌فرض Exp(1) و Exp(2) دارای بهترین عملکرد بوده و با داده‌های تفکیک افقی بالا به‌ترتیب طرحواره‌های Exp(1&7) و Exp(6) به‌عنوان قوی‌ترین پیکربندی در شبیه‌سازی انتخاب شدند.

- the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy: *Environmental Modelling & Software*, 33, 23–34.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., Silva Santos, C., 2014, WRF wind simulation and wind energy production estimates forces by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal: *Applied Energy*, 117, 116–126.
- Chou M.-D., and . Suarez, M.J. 1994, An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models: NASA Technical Memorandum, 104606, 3, 85pp.
- Draxl, C., Hahmann, A.N., Peña, A., Giebel, G. 2014, Evaluating winds and vertical wind shear from weather research and forecasting model forecasts using seven planetary boundary layer schemes: *Wind Energy* 17, 39–56.
- Dvorak, M.J., Archer, C.L., and Jacobson, M.Z. 2010, California offshore wind energy potential. *Renew: Energy* 35, 1244–1255.
- Everitt, B.S., and Skrondal, A., 2010, *The Cambridge Dictionary of Statistics*, the fourth edition, Cambridge University Press. 55.
- Fernandez-González, S., Martín, M.L., García-Ortega, E., Merino, A., Lorenzana, J., Sánchez, J.L., Valero, F., and Rodrigo, J.S., 2018, Sensitivity analysis of the WRF model: wind-resource assessment for complex terrain: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57 (3), 733–753.
- Giannakopoulou, E.-M., and Nhili, R., 2014, WRF model methodology for offshore wind energy applications: *Advances in Meteorology*, 2014, 319819.
- Graham, R.M., Hudson, S.R., and Maturilli, M., 2019, Improved performance of ERA5 in arctic gateway relative to four global atmospheric reanalyses: *Geophysical Research Letters*, 46 (11), 6138–6147.
- Grell, G.A., and Freitas, S.R., 2014, A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 5233–5250.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A.,
- به‌طوری‌که که از نتایج این مطالعات برآمده ممکن است طرحواره انتخابی برای مؤلفه مداری الزاماً برای مؤلفه نصف‌النهاری با نتایج مطلوبی همراه نباشد و حتی ممکن است در فصول سال با طرحواره‌های مختلفی بتوان به بهترین خروجی دست‌یافت اما برابر جدول ۱۰ از بین طرحواره‌های مورد آزمون تحت شرایط مرزی ERA5 و FNL با داده‌های پیش‌فرض و تفکیک افقی بالا، برای مؤلفه مداری (YSU) Exp(1)، (ACM2) Exp(6) و (MYJ) Exp(2) و برای مؤلفه نصف‌النهاری (YSU) و (ACM2) Exp(6) بهترین نتایج را برای شبیه‌سازی باد شهر تهران به همراه داشتند.
- ### پیشنهاد
- از آنجاکه شبیه‌سازی باد نسبت به سایر پارامترهای هواشناسی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است و با توجه به یافته‌های این پژوهش و دامنه تأثیرگذاری داده‌های شرایط اولیه مرزی، طرحواره‌ها و داده‌های استاتیکی در کاهش خطا و افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها، پیشنهاد می‌گردد برای افزایش کارایی داده‌های استاتیکی با تفکیک افقی بالاتر، اجرای مدل با تفکیک افقی بیشتر در دامنه موردبررسی قرار گیرد تا ضعف مدل در شبیه‌سازی توپوگرافی زمین کمتر دیده شود.
- ### منابع
- Bahmanzadeh, F., Qader, S., HaghShenas, S.A., and Yazji, D., 2019, Investigating the performance of the WRF model to predict the field wind at 10 meters level and two meters level location using satellite data and synoptic stations in the region of Oman Sea and Arabian Sea. *Earth and Space Physics*, 45(2), 458–441.
- Belmonte Rivas, M., Stoffelen, A., 2019, Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. *Ocean Sci.* 15 (3), 831–852.
- Carvalho, D.; Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., and Santos, C.A., 2012, Sensitivity study of

- prediction of advecting fog. *Bound. Layer Meteor.* 119, 397–407.
- Nistani, A., and Qader, S., and Mohib al-Hajjah, A., 2017, Application of data mining in WRF model to simulate precipitation caused by a synoptic system in western Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 11, 101-123.
- Nunalee, C.G., and Basu, S., 2013, Mesoscale modeling of coastal low-level jets: Implications for offshore wind resource estimation. *Wind Energy*, 17, 1199–1216.
- Olauson, J., 2018, ERA5: the new champion of wind power modelling? *renewable energy*, 126, 322–331.
- Penchah, M.M., Malakooti, H., and Satkin, M., 2017, Evaluation of planetary boundary layer simulations for wind resource study in East of Iran: renewable energy, 111, 1–10.
- Pleim, J.E., 2007, A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 1383–1395.
- Puliafito, S.E., Allende, D.G., Mulena, C.G., Cremades, P. and Lakkis, S.G., 2015, Evaluation of the WRF model configuration for Zonda wind events in a complex terrain: *Atmospheric Research*, 166, 24-32.
- Ramon, J., Lledo, L., Torralba, V., Soret, A., and Doblas-Reyes, F.J., 2019, What global reanalysis best represents near-surface winds? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145 (724), 3236–3251.
- Salkind, N.J., 2010, *Encyclopedia of research design* (Vols. 1-0). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, Inc.
- Santos-Alamillos, F. J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Lara-Farego, V., Tovar-Pescador, J., 2013, Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain): *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 1592–1609.
- Solbakken, K., Birkelund, Y. and Samuelsen, E. M., 2021, Evaluation of surface wind using WRF in complex terrain: Atmospheric input data and grid spacing: *Environmental Modelling & Software*, 145, 105182.
- Storm, B., and Basu, S., 2010, The WRF model forecast-derived low-level wind shear climatology over the United States Great Plains: *Energies* 3, 258–276.
- Skamarock, W.C. 2004, Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra: Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R., Holm, E., Janiskova, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020, The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146 (730), 1999–2049.
- Hong, S–Y. and H–L., Pan, 1996, Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322–2339.
- Hong, S.Y., and Lim, J.O., 2006, The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.
- Hong, S.Y., Yign, N., and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an Explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318–2341.
- Janjic, Z.I., 1994, The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
- Kotz, S., 2006, *Encyclopedia of Statistical Sciences*: John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Menéndez, M., Tomás, A., Camus, P., García-Díez, M., Fita, L., Fernández, J., Méndez, F. J., Losada, I. J., 2011, A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources. In: *OCEANS 2011. IEEE, Spain*, pp. 1–8.
- Mlawer, E.J., Steven. J., Taubman, P., Brown, D., Iacono, M.J. and Clough, S.A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave: *Journal of Geophysical Research*, 102, 16663–16682.
- Mughal, M. O., Lynch, M., Yu, F., McGann, B., Jeanneret, F., Sutton, J., 2017, Wind modelling, validation and sensitivity study using Weather Research and Forecasting model in complex terrain. *Environ. Model. Software* 90, 107–125.
- Muñoz-Esparza, D., Lundquist, J. K., Sauer, J. A., Kosović, B. and Linn, R. R., 2017, Coupled mesoscale-LES modeling of a diurnal cycle during the CWEX-13 field campaign: From weather to boundary-layer eddies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(3), 1572-1594.
- Nakanishi, M. and Niino, H., 2006, An improved Mellor–Yamada level 3 model: its numerical stability and application to a regional

- Monthly Weather Review, 132, 3019–3031.
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M.A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J. and Cuenca, R.H., 2004, Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model: 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.
- Valkonen, T., Stoll, P., Batrak, Y., Køltzow, M., Schneider, T.M., Stigter, E. E., Aashamar, O. B., Støylen, E., Jonassen, M.O. 2020, Evaluation of a sub-kilometre NWP system in an Arctic fjord-valley system in winter. *Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr.* 72 (1), 1–21.
- Vishnu, S. and Francis, P. A., 2014, Evaluation of high-resolution WRF model simulations of surface wind over the west coast of India. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(5), 458-463.
- Wen, M., Yang, S., Vintzileos, A., Higgins, W. and Zhang, R., 2012, Impacts of model resolutions and initial conditions on predictions of the Asian summer monsoon by the NCEP Climate Forecast System. *Weather Forecast.* 27, 629–646.
- Wang, J. and Wang, H.J., 2013, Forecasting of wind speed in Rudong, Jiangsu province by the WRF model, *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 18(2), 145–155.

Sensitivity of WRF model in simulating wind zonal and meridional components in Tehran

Naser Izadi¹, Ali Akbar Shamsipour^{2*} and Ghasem Azizi³

¹ Ph.D. Student of Climatology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor of Climatology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Professor of Climatology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 01 January 2022, Accepted: 04 April 2022)

Summary

The wind is one of the main factors in determining the weather condition and the daily air quality of urban spaces depends on the wind. Therefore, to achieve the dominant behavioral patterns of wind direction and intensity, various simulation models are used. This study considers the weather research and forecasting model (WRF). To simulate wind zonal and meridional components, the role of ECMWF (ERA5) and NCEP (FNL) boundary condition data with 7 physical schemas (Exp1 to Exp7) in two modes: 1) with default static data and 2) with high-resolution static data DEM (Aster satellite image with a spatial resolution of 30 m) instead of the default data with a spatial resolution of approximately 1 km, the land use/cover of Copernicus with a resolution of 100 m instead of the modis data with a spatial resolution of approximately 500 m to 1 km) for January, May, July, and October 2018 was evaluated as representative of seasons. Observational data of wind direction and speed with a 3-hour UTC scale in 2018 for 4 synoptic stations of Mehrabad, Chitgar, Geophysics, and Shemiran were obtained from the Meteorological Organization, and by applying 180 degrees to the weather direction, the vector orientation was obtained. Then, using the Rewind plugin in the developed R software, the zonal and meridian components of observational wind were calculated. By examining the correlation coefficient of wind zonal component in 4 selected stations in both default and high-resolution conditions with ERA5 and FNL boundary conditions, Shemiran station had the lowest correlation in January, May, and October, while Chitgar station on the suburban of the city had the weakest correlation in July; However, Shemiran station had the strongest correlation in July by a significant margin. Due to the location of the Shemiran station, the main reason for the weakness and strength of the simulations is the topography and height of this station. The results show that the simulation of the wind zonal component, except July in most schemas with the default static data and high resolution, is much better than the meridional component. Proper configuration of schemas, selection of ideal boundary conditions, determination of appropriate spatial resolution, and replacement of static data with a high resolution instead of default data can bring the model simulation much closer to the observation data. According to the results of the average output of 4 correlations, bias, mean square error, and mean absolute error statistics, considering the same weight coefficient of each statistic in Mehrabad, Geophysics, Shemiran, and Chitgar stations for each schema, FNL boundary conditions with default static data for the component Wind except July, and ERA5 boundary conditions were selected as the best boundary conditions for the meridional wind component except January with the best performance. Among the seven schemas tested for zonal and meridional components under the ERA5 and FNL boundary conditions with default and high-resolution data, Exp (1) (YSU) and Exp (6) (ACM2) generally yielded the best results for Tehran wind simulation.

Keywords: Wind, ERA5 and FNL border conditions, Scheme, WRF, Iran.

*Corresponding author:

shamsipr@ut.ac.ir