



ارزیابی عملکرد مدل یکپارچه WRF/CALMET در توسعه میدان باد ورودی به مدل های کیفیت هوا

محسن رحیمیان^{۱*}، یوسف رشیدی^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران
^۲ گروه پژوهشی فناوری های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۱۶

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۳-۰۳

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۰۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۴-۲۳

کلمات کلیدی:

شبیه سازی میدان باد

مدل فرایابی هواشناسی CAL-

MET

مدل عددی هواشناسی WRF

درستی سنجی

شاخص های آماری

خلاصه: لزوم داشتن اطلاعات جامعی از میدان باد یک منطقه خاص به دلایل مختلفی قابل توجه است که از مهم ترین آن ها می توان به نحوه پخش و پراکنش آلاینده های هوا اشاره کرد. در این مطالعه به بررسی کارایی و سودمندی یک پارچه سازی مدل عددی میان مقیاس WRF با مدل فرایابی هواشناسی (CALMET) برای تولید میدان بادی با دقت بالا در ناحیه ای به مرکزیت شهر تهران و در بازه زمانی ۵ روزه، از پنجم تا دهم ژانویه سال ۲۰۱۴ پرداخته شده است. در حالت اول، میدان باد سه بعدی منطقه با استفاده از مدل WRF پردازش شده و به عنوان حدس اولیه در اختیار مدل CALMET قرار گرفت. در مرحله دوم، مدل WRF کنار گذاشته شد و داده های هواشناسی سطحی و جو بالای ایستگاه هواشناسی مهرآباد به ترتیب با استفاده از مدل های SMERGE و READ۶۲ پردازش شده و به طور مستقیم در مدل CALMET به کار گرفته شد؛ و در نهایت مدل CALMET با استفاده از ترکیب داده های مدل WRF و داده های مشاهده ای اجرا گردید. سپس با استفاده از آنالیزهای آماری و مقایسه پروفیل های دما و سرعت باد داده های شبیه سازی شده با داده های مشاهده ای ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام خمینی در بازه مورد نظر، کارایی روش های گفته شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شاخص های آماری به کار رفته در این مطالعه شامل شاخص توافق (IOA)، میانگین خطای انحراف (MBE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق میانگین (MAE)، حاکی از توانایی بالای مدل یک پارچه WRF/CALMET در شبیه سازی میدان باد منطقه دارد؛ به طوری که مقدار شاخص توافق برای سرعت باد در حالت اول در محدوده ۰/۷۰-۰/۸۵، در حالت دوم در محدوده ۰/۵۹-۰/۸۳ و در حالت سوم در محدوده ۰/۷۶-۰/۹۰ قرار دارد. به طور کلی نتایج این مطالعه نشان می دهد که استفاده و ترکیب خروجی های مدل WRF با داده های مشاهده ای به عنوان ورودی مدل CALMET، گزینه ای کارآمد در تولید داده های دقیق هواشناسی برای مطالعات مدل سازی کیفیت هوا، به خصوص در کشورهایی مانند ایران است که داده های جو بالا به ندرت در آن اندازه گیری می شود.

۱- مقدمه

این آلاینده های خطرناک در یک منطقه متمرکز شده و باعث ایجاد شرایط اضطراری می شوند. مدل سازی پخش و پراکنش اتمسفری این مواد، ضروری ترین ابزار برای پاسخ گویی به این شرایط اضطراری است [۱]. محاسبه دقیق پخش و پراکنش آلاینده های جوی به نوبه خود بستگی به ورودی شرایط هواشناسی و میدان باد دارد. اگرچه عوامل بسیاری بر پدیده پخش و پراکنش آلاینده ها در جو تأثیر می گذارند

انتشار مواد شیمیایی، بیولوژیکی، یا مواد خطرناک و به طور کلی تمام آلاینده های هوا که از منابع مختلف نقطه ای و سطحی به طور تصادفی یا عمداً منتشر می شوند، توسط شرایط جوی حاکم انتقال یافته و در برخی موارد تحت شرایط توپوگرافی خاص و پایداری جوی،

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mohsen.rahimian@outlook.com



ولی در این میان، فاکتورهای هواشناسی مهم‌ترین نقش را در انتقال و پخش مواد آلاینده ایفا می‌کنند [۱۲]. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در مدل‌های پخش شامل: سرعت و جهت باد، دمای محیط، ارتفاع لایه مخلوط هوا و انواع پارامترهای پایداری است. هواشناسی به‌طور نزدیکی با کیفیت هوا، تعیین غلظت آلاینده‌ها، شکل‌گیری آلاینده‌های ثانویه، انتقال آن‌ها به مناطق دیگر و حذف نهایی آن‌ها از اتمسفر رابطه دارد [۱۳]. به همین جهت هرگونه استفاده از مدل‌های کیفیت هوا نیازمند داده‌های پردازش‌شده هواشناسی می‌باشد.

رایج‌ترین روش در توصیف میدان باد در یک منطقه خاص استفاده از اندازه‌گیری‌های داخل محوطه برای تعیین مشخصات هواشناسی منطقه است که معمولاً به اندازه موردنظر در دسترس نیستند [۱۴]. این اندازه‌گیری‌ها شامل داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک اصلی (دسته‌ای از ایستگاه‌های سطحی هواشناسی که بر اساس نیاز بین‌المللی و منطقه‌ای به دیدبانی ساعت‌به‌ساعت پارامترهای هواشناسی مانند دما، فشار، رطوبت، سمت و سرعت باد، دید افقی، پدیده‌های جوی و دیگر موارد می‌پردازند) و داده‌های ایستگاه‌های جو بالا (آن دسته از ایستگاه‌هایی که پارامترهای فشار، دما، رطوبت و جهت و سرعت باد را در لایه‌های مختلف سطوح فوقانی جو به میزان دو بار در شبانه‌روز و در ساعات (۰۰-۱۲) UTC توسط دستگاه رادیوسوند و بالن هواشناسی اندازه‌گیری و گزارش می‌نمایند)، است. متداول‌ترین روش برای تعیین میدان باد سه‌بعدی در یک منطقه، استفاده از روش‌های درون‌یابی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی که در نقطه‌ای خاص قرار گرفته‌اند بر روی کل منطقه موردنظر است. با این حال، این روش دارای محدودیت‌های فراوانی است؛ زیرا در بسیاری از موارد، درون‌یابی تنها زمانی ممکن است که منطقه دارای ویژگی‌های توپوگرافی یکنواخت بوده و توزیع متراکمی از ایستگاه‌های هواشناسی وجود داشته باشد [۱۵]. از این رو در کشورهای در حال توسعه با توجه به نبود شبکه‌ای متراکم از ایستگاه‌های هواشناسی، تولید میدان باد سه‌بعدی از طریق گفته شده با محدودیت همراه است [۱۶]؛ بنابراین یک راه‌حل ممکن برای تعیین اندازه و جهت میدان باد، استفاده از انواع مختلف مدل‌های شبیه‌سازی جوی است.

دو رویکرد اساسی برای تولید میدان سه‌بعدی باد معمولاً استفاده از مدل‌های فرایابی هواشناسی^۱ یا مدل‌های پیش‌بینی وضع هوا^۲

1 Diagnostic meteorological model

2 Prognostic meteorological model

است [۱۷]. مدل‌های فرایابی بر اساس معادله پایستگی جرم به پردازش داده‌های مشاهده‌ای هواشناسی بر روی توپوگرافی منطقه می‌پردازند و با توجه به وابستگی این مدل‌ها به داده‌های مشاهده‌ای، دقت آن‌ها به شدت به کیفیت و درستی این داده‌ها بستگی دارد [۱۸]. به‌رغم وجود این محدودیت‌ها، مدل‌های فرایابی هواشناسی به دلیل محاسبات سریع و سهولت استفاده نسبی آن‌ها توسط سازمان‌های محلی نقش مهمی در مطالعات مدل‌سازی کیفیت هوا ایفا می‌کنند [۱۹]. مدل‌های AERMET [۹] و CALMET [۱۰]، نمونه‌هایی از مدل‌های فرایابی هواشناسی هستند. مدل‌های پیش‌بینی وضع هوا که بر پایه حل معادلات دینامیک حاکم بر جو بنا شده‌اند، به‌طور فزاینده‌ای برای تولید پارامترهای هواشناسی موردنیاز مطالعات مدل‌سازی کیفیت هوا استفاده می‌شوند [۱۱]. با این حال مسائلی مانند عدم قطعیت موجود در شرایط اولیه این مدل‌ها و هم‌چنین فرض‌های ساده‌کننده در فرمولاسیون این مدل‌ها می‌تواند باعث ایجاد پیش‌بینی‌های شود که با مشاهدات واقعی تطابق چندانی ندارد [۸ و ۱۲]. البته این امکان وجود دارد که داده‌های مشاهده‌ای را در مدل‌های پیش‌بینی جوی به‌صورت تحلیلی و کشانش به سمت دیدبانی‌ها^۳ در نظر بگیریم تا پیش‌بینی عددی وضع هوا را تا حد زیادی بهبود بخشیم [۱۲]. هم‌چنین با وجود پیشرفت‌های بسیار در تکنولوژی رایانه‌ای، زمان موردنیاز کامپیوتر برای اجرای مدل‌های پیش‌بینی جوی و هزینه‌های محاسباتی همچنان بالا است و خروجی این مدل‌ها هنوز به‌طور معمول برای پاسخ اضطراری در همه حوزه‌ها قابل دسترس نیست [۱ و ۸]. مدل‌های WRF [۱۳]، MM5 [۱۴]، COSMO [۱۵]، HRM [۱۶] و RAMS [۱۷]، نمونه‌هایی از مدل‌های پیش‌بینی وضع هوا هستند. یک راه‌حل مؤثر برای استفاده از مزیت هر دو نوع مدل هواشناسی، ترکیب آن‌هاست. هزینه‌های محاسباتی اجرای مدل‌های میان‌مقیاس پیش‌بینی وضع هوا با تفکیک افقی کم (وضوح کم) و ترکیب و یک‌پارچه‌سازی آن با مدل‌های فرایابی هواشناسی با وضوح بالا، به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از اجرای یک مدل پیش‌بینی هواشناسی با تفکیک افقی زیاد (وضوح بالا) است [۱۸].

در سال‌های اخیر، مدل فرایابی هواشناسی (CALMET) عملکرد خوبی در شبیه‌سازی میدان باد و مطالعات آلودگی به‌ویژه در ناحیه بزرگ‌تر از ۵۰ کیلومتر داشته‌است [۱۸]؛ هم‌چنین این مدل

3 analysis/observational nudging

آکوستیک و امواج گرانشی استفاده می‌کند. مدل WRF برای تک‌تک نقاط شبکه به صورت سه‌بعدی و در تمام ترازهای ارتفاعی، پارامترهای هواشناسی را تعیین می‌کند [۲۴]. از این‌رو در این پژوهش از داده‌های خروجی مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF (نسخه ۱-۵-۳) برای تعیین میدان سه‌بعدی هواشناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شده‌است.

حوزه انتخاب شده برای مدل WRF دارای تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر و در محدوده عرض جغرافیایی ۲۶ تا ۴۱ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی و زمان اجرا از شروع مدل به مدت ۱۲۶ ساعت بوده است که ۶ ساعت اول جهت پایداری مدل مورد استفاده قرار گرفته‌است. این مدل با طرح میکرو فیزیک لین و همکاران راه‌اندازی شده و طرح‌واره‌های Goddard و RRTM به ترتیب برای تابش با طول موج کوتاه و بلند مورد استفاده قرار گرفته‌است [۲۷-۲۵]. همچنین مدل سطح زمین Noah برای محاسبه گرما و رطوبت در لایه‌های زیرین خاک استفاده شده و برای نشان دادن لایه‌مرزی سیاره‌ای بر روی دامنه از طرح‌واره MYJ استفاده گردیده است [۲۸ و ۲۹]. داده‌های شرایط اولیه و شرایط مرزی هواشناسی مورد نیاز برای مدل WRF از داده‌های تحلیل نهایی FNL موجود در پایگاه داده‌های NCEP/NCAR وابسته به سازمان ملی جو و اقیانوس‌شناسی ایالات متحده و با گام زمانی ۶ ساعته و تفکیک مکانی یک درجه استخراج شده‌است [۲۰].

برای استخراج داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل CALMET از بین ۱۲۰ پارامتر موجود در خروجی WRF از مدل CALWRF (برنامه پردازش داده‌های مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF)، استفاده شده‌است. فرآیند تولید میدان باد مورد نیاز مدل CALMET از طریق مدل WRF در شکل ۱ نمایش داده شده‌است.

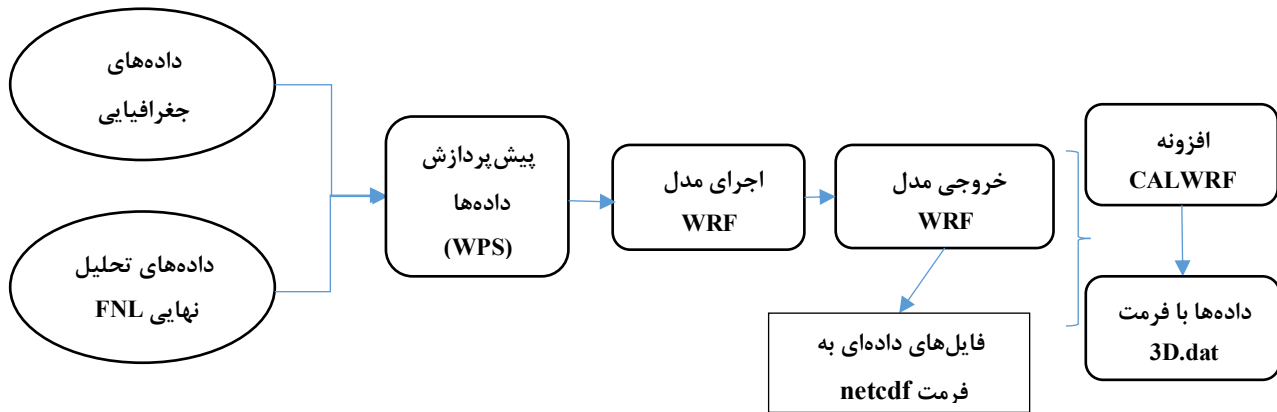
CALMET یک مدل هواشناسی فرایابی است که می‌تواند با ترکیب داده‌های عوارض و نوع کاربری زمین، داده‌های هواشناسی مشاهده‌ای و داده‌های هواشناسی شبیه‌سازی شده به تعیین میدان باد سه‌بعدی، بر اساس معادله پایستگی جرم بپردازد. علاوه بر میدان باد، CALMET پارامترهای خرد هواشناسی مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی‌های پراکنش آلاینده‌های جوی نظیر ارتفاع اختلاط، طول مونین ابوخوف، سرعت اصطکاکی، سرعت همرفتی و دیگر موارد را نیز تعیین می‌کند. سپس این میدان هواشناسی سه‌بعدی به مدل

قابلیت اجرا برای هر مکان خاص در سراسر جهان و برای هر نوع دوره مدل‌سازی انتخاب شده توسط کاربر را دارا هست که نشان از انعطاف‌پذیری بالای این مدل است [۱۹]. با توجه به انعطاف‌پذیری خوب مدل CALMET، در طول سالیان گذشته مطالعه‌های متعددی در زمینه شبیه‌سازی میدان باد توسط این مدل انجام شده‌است [۲۳-۲۰ و ۴، ۱ و ۸]. با این حال، توانایی این مدل برای شبیه‌سازی میدان باد با استفاده از داده‌های مدل پیش‌بینی هواشناسی WRF و در شرایط توپوگرافی پیچیده به‌طور گسترده‌ای مورد ارزیابی قرار نگرفته‌است. از این‌رو در این پژوهش، ابتدا با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF پارامترهای هواشناسی منطقه مورد نظر را شبیه‌سازی کرده و سپس با هم‌بسته‌سازی این مدل و مدل هواشناسی فرایابی CALMET به تعیین میدان باد سه‌بعدی در منطقه پرداخته‌ایم. یافتن پاسخ برای سؤال‌هایی هم‌چون، تفاوت بین نتایج مدل فرایابی CALMET با نتایج مدل میان‌مقیاس WRF و تأثیر مدل CALMET بر بهبود پارامترهای هواشناسی پیش‌بینی شده توسط مدل WRF به چه میزان است؟ استفاده از داده‌های مشاهده‌ای واقعی و ترکیب آن‌ها با داده‌های پیش‌بینی شده در مدل CALMET به چه میزان موجب بهبود نتایج می‌شود؟ تأثیر استفاده از پارامترهای خروجی مدل WRF به‌عنوان داده‌های جو بالا برای مدل‌های کیفیت هوا؟ و اثر تغییر تنظیمات پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی مدل CALMET در منطقه مورد نظر چیست؟ از جمله اهداف شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- رویکرد مدل‌سازی WRF-CALMET

سامانه مدل‌سازی پیشرفته WRF نسل جدیدی از سیستم‌های میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی هواشناسی و سامانه‌ای انعطاف‌پذیر با قابلیت‌های فراوان است که می‌توان وضعیت‌های مختلف جو را با استفاده از آن شبیه‌سازی نمود. مدل WRF یک مدل غیرهیدروستاتیک (با گزینه اختیاری هیدروستاتیک در حین اجرا) است که شبکه‌بندی افقی آن C-Grid آرکوا است. در این مدل از طرح‌واره‌های انتگرال‌گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ-کوتا و طرح‌واره‌های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده شده‌است. این مدل از گام‌های زمانی کوچک برای مدهای



شکل ۱. فرآیند مدل‌سازی داده‌های هواشناسی و به‌دست آوردن فایل سه‌بعدی هواشناسی منطقه
 Fig. 1. Process diagram of WRF-CALMET modeling system

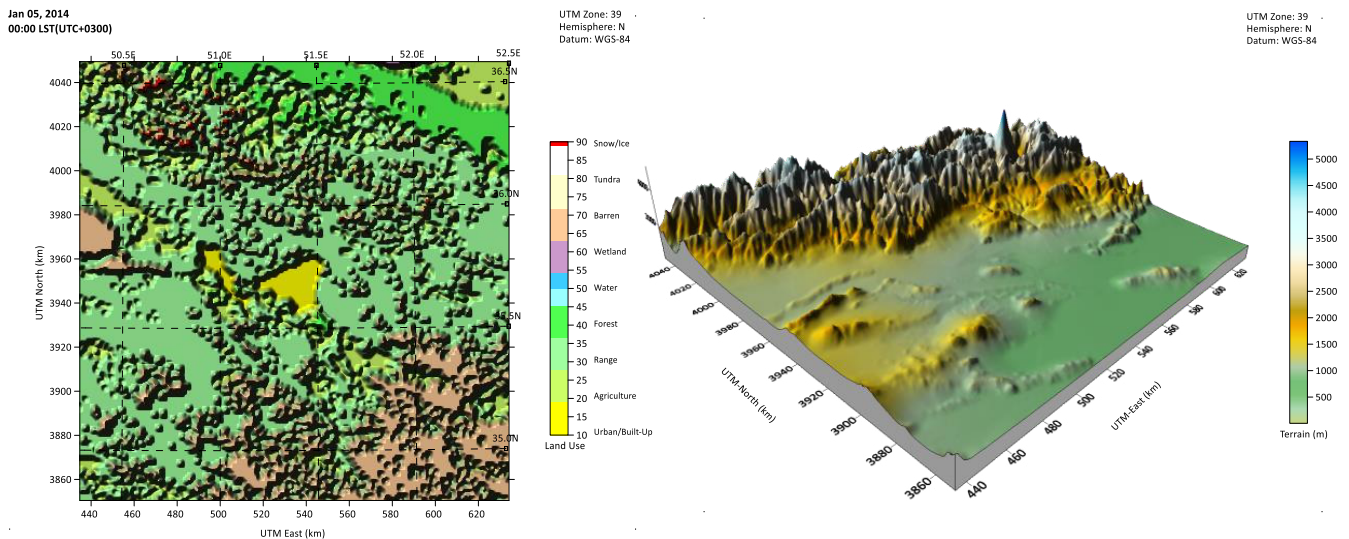
انجام می‌پذیرد. این امر توسط پیش پردازنده‌های جغرافیایی صورت می‌گیرد. منطقه شبیه‌سازی شده توسط مدل CALMET در این پژوهش، ناحیه‌ای به مساحت ۴۰۰۰۰ کیلومترمربع به مرکزیت شهر تهران است که بین عرض جغرافیایی ۳۴° ۴۷' و ۳۶° ۳۵' شمالی و طول جغرافیایی ۵۰° ۱۵' و ۵۲° ۳۰' شرقی قرار گرفته‌است. این ناحیه از سمت شمال به رشته‌کوه‌های پوشیده از برف البرز و در جنوب به سمت کویر مرکزی کشیده شده‌است. به دلیل وجود مناطق با ارتفاع مختلف از سطح دریا، شرایط اقلیمی متنوعی در این ناحیه موجود است. داده‌های جغرافیایی از دو بخش اصلی و مهم داده‌های عوارض و کاربری زمین تشکیل شده‌است. در این پژوهش برای داده‌های نوع زمین از فایل‌های توپوگرافی SRTM (نسخه ۴/۱) که توسط گروه مشاورین تحقیقات بین‌المللی کشاورزی و کنسرسیوم اطلاعات فضایی جهت تولید سطوح توپوگرافی مورد پردازش قرار گرفته، با دقت مکانی ۹۰ متر استفاده شده‌است. SRTM یک پروژه بین‌المللی به رهبری آژانس ملی اطلاعات جغرافیایی و سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده است که دارای یکی از کامل‌ترین پایگاه داده‌های توپوگرافی زمین به‌صورت دیجیتال و با وضوح بالا است [۳۲]. برای داده‌های کاربری زمین نیز از فایل‌های GLC2000 با دقت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر استفاده شده‌است. داده‌های نوع زمین توسط مدل TERREL و داده‌های کاربری زمین توسط مدل CTGPROC پردازش شده‌است و در نهایت با ترکیب داده‌های این دو مدل اطلاعات جغرافیایی موردنیاز مدل CALMET، (مانند ارتفاع نقاط شبکه، نوع

CALPUFF، CALGRID و یا KSP داده می‌شود تا به ترتیب برای انتقال آلاینده‌های انتشار یافته از منابع نقطه‌ای یا سطحی، انتقال آلاینده‌های فتوشیمیایی جوی و شبیه‌سازی انتقال ذرات مورد استفاده قرار گیرد [۱۰]. این مدل می‌تواند داده‌های هواشناسی در مقیاس میانی را از مدل‌های هواشناسی میان‌مقیاس (مدل پیش‌بینی عددی وضع هوای WRF و MM5)، گرفته و با استفاده از داده‌های عوارض و کاربری زمین در شبکه‌بندی با مقیاس‌های بسیار کوچک‌تر نسبت به مدل‌های میان‌مقیاس، مقادیر و میدان متغیرهای هواشناسی را به‌صورت دقیق‌تر محاسبه نماید. در واقع نقش این قسمت از مدل‌سازی به‌عنوان یک پیش‌پردازش، اصلاح کردن و وفق دادن داده‌های پهنه‌بندی هواشناسی به‌دست آمده از مدل‌های پیش‌بینی وضع هوا با شبکه‌بندی جدید در مقیاس ریزتر و با استفاده از داده‌هایی با دقت بالاتر عوارض و کاربری زمین است. این عملیات منجر به افزایش دقت و بهبود شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی مورد استفاده در مدل‌های کیفیت هوا می‌شود [۳۰]. مدل CALMET توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (U.S. EPA) به‌عنوان یک مدل مناسب جهت مدل‌سازی جریان‌های غیریکنواخت و پیچیده از جمله حالت‌هایی که عوارض پیچیده زمین وجود دارد و همچنین در مکان‌هایی که جریان ساکن و جریان بازگشتی اهمیت دارد مورد تأیید قرار گرفته‌است [۳۱].

اولین قدم در مدل‌سازی میدان باد، تعریف شبکه‌ای است که شبیه‌سازی و تخمین پارامترهای هواشناسی در نقاط درون آن

جدول ۱. نتایج ارزیابی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط مدل CALMET در ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام‌خیمینی
Table 1. Model input information list related to the meteorological domain of study

پارامتر	ورودی مدل
نقشه طرح	سیستم تصویر مرکاتور جانبی جهانی (UTM)
ناحیه موردنظر در نقشه UTM	39
مختصات مبدأ در جهت X	434/25766 کیلومتر
مختصات مبدأ در جهت Y	3849/95986 کیلومتر
نیمکره - ژئوئید - الیپسوئید	شمالی - بیضوی بین‌المللی WGS84
تعداد گره‌ها در جهت افقی و قائم	200 × 200 × 10
ارتفاع وجه بالای هر گره در جهت قائم	0، 20، 40، 80، 160، 300، 600، 1000، 1500، 2200، 3000 متر
طول هر گره بر روی زمین	یک کیلومتر



شکل ۲. نقشه توپوگرافی و کاربری منطقه مورد مطالعه
Fig. 2. Topographic and land use map of the study area

توپوگرافی مؤثر بر پخش و پراکنش آلاینده‌های هوا است. به‌طور کلی میدان باد طی سه مرحله در مدل CALMET تشکیل می‌شود. در مرحله اول داده‌های باد مشاهده‌ای به‌عنوان حدس اولیه بر روی کل نقاط شبکه تخمین زده می‌شود. هنگامی که تنها یک مؤلفه سرعت باد وجود داشته باشد، CALMET می‌تواند از سرعت باد فضایی ثابت ارائه شده برای حدس اولیه استفاده کند. اگر یک سری زمانی از داده‌های جو بالا در ناحیه مدل‌سازی موجود باشد، CALMET

کاربری زمین، زبری سطح، نسبت بوآن، آلبیدو سطح، شار حرارتی خاک و دیگر موارد) به‌دست می‌آید. جدول ۱ نشان‌دهنده ویژگی پارامترهای تعریف‌شده در مدل CALMET برای شبیه‌سازی شبکه محاسباتی منطقه موردنظر است. در شکل ۲ نیز نقشه توپوگرافی و کاربری ناحیه مورد مطالعه آورده شده است.

الگوریتم و تابع اصلی موجود در CALMET منجر به تولید میدان بادی با دقت کافی برای حل‌وفصل ویژگی‌های محلی و

جدول ۲. تنظیمات مورد استفاده در مراحل مختلف شبیه‌سازی میدان باد
Table 2. Settings used in different stages of wind field simulation

تنظیمات مدل	نوع مدل
پیش‌فرض‌های مدل با $R_{\max 1} = 15 \text{ km}$, $R_{\max 2} = 30 \text{ km}$, $R_1 = 1 \text{ km}$, $R_2 = 15 \text{ km}$ و Coriolis parameter = 0.85	CM(1)
مانند CM(1) با BIAS = -1, -0.8, -0.4, 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1, 1, 1	CM(2)
مانند CM(1) با IPROG = 14 (داده‌های WRF به‌عنوان حدس اولیه)	CM(WRF)
مانند CM(WRF) با NOOBS = 1 (استفاده از داده‌های WRF به‌عنوان داده‌های جو بالا)	CM(WRF+OBS)

جدول ۳. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده
Table 3. Description of meteorological station

ارتفاع ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	شناسه ایستگاه (USAF)	نام ایستگاه (ICAO)
1191 متر	35/6857 درجه شمالی	51/3036 درجه شرقی	407540	هواشناسی فرودگاه مهرآباد (OIII)
1008 متر	35/4167 درجه شمالی	51/15 درجه شرقی	407300	هواشناسی فرودگاه امام‌خمینی (OIIE)

مشاهده‌های سطحی و جو بالا ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد و تحت دو فیزیک مختلف اجرا شد. داده‌های سطحی هواشناسی فرودگاه مهرآباد از طریق پایگاه NCDC و از نوع DS3505 و داده‌های جو بالا نیز از پایگاه NOAA/ESRL و با فرمت FSL استخراج گردیدند. برای استخراج فرمت مناسب مدل CALMET از داده‌های دریافتی، به ترتیب از دو مدل SMERGE و READ62 استفاده شده‌است. در مرحله آخر نیز با استفاده از ترکیب داده‌های ایستگاه سطحی فرودگاه مهرآباد با داده‌های جو بالای استخراج شده از مدل WRF، میدان باد سه‌بعدی منطقه توسط مدل CALMET شبیه‌سازی گردید. در این مرحله داده‌های جو بالا از طریق مدل UAMAKE و برای کل دامنه محاسباتی استخراج گردید. نحوه تنظیمات مدل برای بررسی اثرات پارامترهای آن بر روی شبیه‌سازی میدان باد در سه مرحله مدل‌سازی در جدول ۲ به‌طور خلاصه مورد بحث قرار گرفته‌است. هم‌چنین به‌منظور صحت‌سنجی و ارزیابی مدل CALMET در شبیه‌سازی پروفیل‌های عمودی دما و باد از داده‌های ایستگاه سطحی هواشناسی فرودگاه امام‌خمینی استفاده شده‌است. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه در

می‌تواند به‌صورت عمودی میانگین هر اندازه‌گیری را محاسبه نموده و آن را در زمان بین اندازه‌گیری‌ها، درون‌یابی نماید. این گزینه‌ها در مواردی که با عوارض پیچیده زمین یا سرعت متغیر باد روبرو باشیم، از مزایای مدل CALMET نسبت به سایر مدل‌های فرایابی هواشناسی محسوب می‌شود. در مرحله دوم، میدان باد اولیه تخمین زده شده به‌وسیله تنظیمات مبتنی بر فیزیک مسئله اصلاح می‌شود. این تنظیمات فیزیکی شامل: اثر حرکتی (سینماتیکی)، اثرات شیب جریان و اثر عوارض مسدودکننده می‌باشد. مرحله سوم شامل تصحیح‌های ثانویه، متشکل از تنظیمات ریاضی بوده و شامل درون‌یابی، ایجاد پیوستگی، تنظیم اوبراین برای سرعت عمودی باد و حداقل رساندن واگرایی است. این مرحله با اصلاحات مبتنی بر بقای جرم تکمیل می‌شود [۱۰ و ۳۳].

در این پژوهش ابتدا مدل CALMET با استفاده از داده‌های اولیه مدل WRF در بازه زمانی ۵ روزه از پنجم تا دهم ژانویه سال ۲۰۱۴ اجرا گردید. در این مرحله داده‌های مدل WRF به‌عنوان حدس اولیه در مدل CALMET به‌کار گرفته شد. در مرحله دوم مدل WRF کنار گذاشته شد و مدل CALMET با استفاده از داده‌های

جدول ۳ آورده شده است.

هنگامی که داده‌های ایستگاه جو بالا در ناحیه مدل‌سازی موجود باشد، CALMET سرعت باد را در هر سلول شبکه با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌کند.

$$u = \frac{\left(\frac{u_1}{r_1}\right) + \left(\frac{u_2}{r_2}\right) + \dots}{\left(\frac{1}{r_1}\right) + \left(\frac{1}{r_2}\right) + \dots} \quad (1)$$

که در آن u_1 و u_2 سرعت باد در ایستگاه‌های ۱ و ۲ هستند و r_1 و r_2 فاصله از نقطه مورد نظر در درون سلول‌های شبکه تا ایستگاه‌های جو بالا هستند. به این ترتیب تغییرات مکانی در تخمین اولیه میدان باد تعیین می‌شود، اما قدرت تفکیک زمانی در این حالت ضعیف است زیرا داده‌های جو بالا معمولاً فقط دو بار در روز اندازه‌گیری می‌شوند. برای غلبه بر ضعف تفکیک زمانی داده‌های فوقانی جو و برای استفاده از تعداد بیشتری از سرعت‌های باد اندازه‌گیری شده در یک حدس اولیه، CALMET قادر به استفاده از سرعت باد اندازه‌گیری شده در نزدیکی سطح زمین و در فواصل ساعتی و کمتر از آن است. در این روش، مدل CALMET داده‌های ایستگاه‌های سطحی هواشناسی را دریافت کرده و با استفاده از نظریه تشابه مونین ابوخوف به برون‌یابی این داده‌ها به صورت عمودی تا ارتفاع تعریف شده توسط معادله ۲ می‌پردازد.

$$u_2 = \frac{u_1/R^2 + \sum_k u_{obs,k}/r_k^2}{1/R^2 + \sum_k 1/r_k^2} \quad (2)$$

که در آن u_2 سرعت باد تصحیح‌شده در جهت x در نقطه‌ای مشخص از شبکه است. u_1 سرعت باد در جهت x در همان نقطه از شبکه و پس از تکمیل فرمولاسیون مرحله یک تولید میدان باد CALMET است. $u_{obs,k}$ سرعت باد مشاهده‌ای در جهت x و در ایستگاه هواشناسی k است. r_k فاصله نقطه مورد نظر در شبکه از ایستگاه هواشناسی k است و R پارامتر وزندهی تعریف شده توسط کاربر است. مفهوم پارامتر وزندهی بدین صورت است که اگر یک ایستگاه مشاهده‌ای در فاصله R از نقاط شبکه موجود باشد، سرعت باد در این ایستگاه‌ها دارای وزن مشابهی در مرحله اول حدس و تخمین سرعت باد است. در CALMET از دو مقدار وزندهی (شعاع تأثیر R) در محاسبات استفاده می‌شود. R_1 مقدار شعاع تأثیر

اعمالی برای اولین لایه عمودی در شبکه و R_2 مقدار شعاع تأثیر اعمالی به لایه‌های بالاتر شبکه است. همچنین در محاسبه میدان باد تنها ایستگاه‌های مشاهده‌ای موجود در حداکثر فاصله معین از نقاط شبکه در نظر گرفته می‌شوند به طوری که در اولین لایه عمودی شبکه، حداکثر فاصله توسط متغیر R_{max1} و در لایه‌های عمودی بالاتر حداکثر فاصله توسط متغیر R_{max2} تعریف می‌شود.

هنگامی که ترکیبی از مجموعه داده‌های فوقانی جو و مجموعه داده‌های سطحی هواشناسی استفاده می‌شود، ترجیح بر این است که غالباً از داده‌های سطحی هواشناسی در لایه‌های پایین‌تر دامنه و از داده‌های هوای فوقانی در لایه‌های بالاتر استفاده شود. این رویکرد به خصوص در دامنه کوه‌ها و دره‌ها که ممکن است شرایط سطحی هوا با شرایط جوی قسمت بالای لایه مرزی زمینی کاملاً متفاوت باشد، بسیار مطلوب است. برای تحقق و تطبیق این شرایط در CALMET از متغیر BIAS برای وزندهی داده‌های اولیه هواشناسی در هر یک از لایه‌های عمودی شبکه استفاده می‌شود. هنگامی که مقدار BIAS بین ۱- و ۰ قرار گیرد، وزن داده‌های سطحی هواشناسی در عامل معادل آن ضرب می‌شود و هنگامی که BIAS، بین ۰ و ۱ قرار گیرد، وزن داده‌های سطحی هواشناسی در یک ضریب (۱-BIAS) ضرب می‌گردد و درست برعکس همین حالت برای داده‌های جو بالا نیز اعمال می‌شود؛ بنابراین با انتخاب (۱-BIAS)، داده‌های فوقانی جو به طور کامل نادیده گرفته می‌شود و با انتخاب (۱+BIA)، از داده‌های سطحی هواشناسی صرف‌نظر می‌شود. هنگامی که مقدار = ۰ BIAS قرار گیرد، از هر دو داده جو بالا و سطحی هواشناسی به یک شیوه استفاده می‌گردد و به هیچ‌کدام از آن‌ها وزنی تعلق نمی‌گیرد. جزئیات کامل مدل CALMET و پیش‌فرض‌های آن شامل نحوه تعیین ارتفاع اختلاط و پایداری جوی توسط اسکایر و همکاران [۱۰]، ارائه شده است.

۲-۲- تجزیه و تحلیل داده‌های آماری

در این مطالعه با استفاده از پارامترهای آماری پیشنهادی سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده و بر اساس پژوهشی که با حمایت سازمان حفاظت از منابع طبیعی تگزاس (TNRCC)

جدول ۴. معیارهای سازمان محیط‌زیست ایالات متحده برای ارزیابی مدل‌های هواشناسی
Table 4. Criteria of the United States Environmental Organization for evaluating meteorological models

معیار	شاخص	پارامتر
$\leq 2 \text{ m/s}$	RMSE	سرعت باد
$\leq \pm 0/5 \text{ m/s}$	MBE	
$\geq 0/6$	IOA	
$\leq 2 \text{ K}$	MAE	دما
$\leq \pm 0/5 \text{ K}$	MBE	
$\geq 0/8$	IOA	

شده‌است.

IOA شاخصی بی‌بعد است که میزان توافق بین دو سری داده مقایسه‌ای را می‌سنجد. در این شاخص، اندازه‌گیری و سنجش هم‌بستگی موردنظر نیست؛ بلکه میزان عاری بودن از خطا برای مقادیر ارزیابی شده سنجیده می‌شود. مقدار شاخص توافق بین دو عدد صفر (حداقل مقدار نظری برای پیش‌بینی نادرست) و یک (دقت کامل بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده) متغیر است. به‌طور کلی مقدار بالاتر از نیم آن نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول مدل است. شاخص MBE میانگین تفاوت جفت مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهده شده در یک بازه زمانی و شاخص MAE میانگین تفاوت مطلق آن را نشان می‌دهد. RMSE یک شاخص مناسب برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی توسط یک مجموعه از داده است که هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد نشان از دقت بالاتر مدل دارد [۳۶، ۳۷].

۳- بحث و نتایج

نتایج ارزیابی آماری با استفاده از مقایسه داده‌های دما و سرعت باد مدل شده و مشاهده شده در ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام خمینی برای داده‌های مدل WRF و مراحل مختلف مدل‌سازی توسط مدل CALMET در لایه ابتدایی مدل (ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین) در جدول ۵ آورده شده‌است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، در ارزیابی هواشناسی مدل WRF مقادیر شاخص توافق IOA برای دما و سرعت باد به ترتیب در محدوده ۰/۷۲-۰/۷۷ و ۰/۵۱ قرار دارد. با توجه به نتایج شاخص IOA و دیگر شاخص‌های آماری ارائه‌شده در جدول ۵ مشاهده می‌شود که خروجی مدل WRF

توسط امری و همکاران^۱ (۲۰۰۱) و تیچه و همکاران^۲ (۲۰۰۱) بر روی مدل میان‌مقیاس MM5 انجام شد، معیارهایی برای صحت‌سنجی مدل‌های هواشناسی پیشنهاد گردید که مقدار آن‌ها در جدول ۴ برای سرعت باد و دما آورده شده‌است. هدف از تعیین این معیارها رد کردن یا پذیرفتن کامل یک مدل هواشناسی نیست بلکه ایجاد یک چارچوب مناسب برای درک نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی انجام شده‌است [۳۴ و ۳۵]. این معیارها شامل چهار پارامتر آماری میانگین خطای انحراف (MBE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، خطای مطلق میانگین (MAE) و شاخص توافق (IOA) است. فرمول‌های مورد استفاده برای استخراج این چهار شاخص آماری توسط معادله‌های ۳ تا ۶ آورده شده‌است.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$IOA = 1 - \left[\frac{N \cdot RMSE^2}{\sum_{i=1}^N |P_i - M_o| \cdot |O_i - M_o|} \right] \quad (6)$$

که در آن P_i داده‌های خروجی مدل، O_i داده‌های مشاهده‌ای، M_o میانگین داده‌های مشاهده‌ای و N تعداد کل داده‌های اندازه‌گیری

1 Emery et al

2 Tesche et al

جدول ۵. نتایج ارزیابی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط مدل CALMET در ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام خمینی

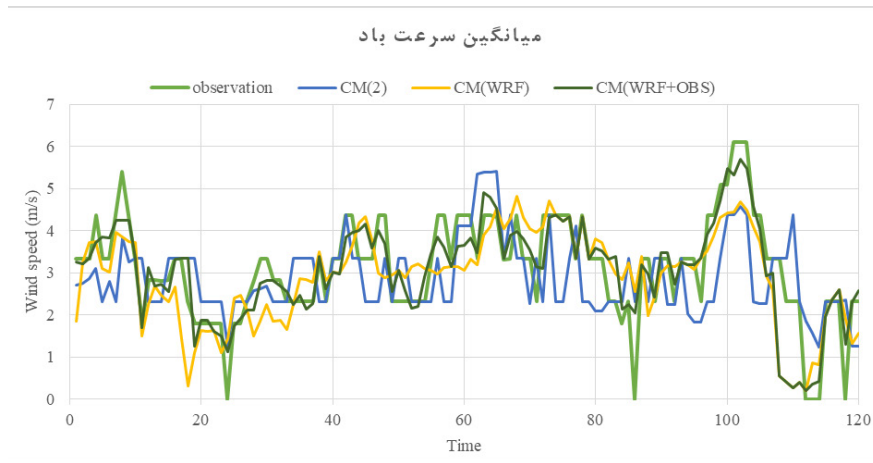
Table 5. Results of evaluation of simulations performed by the model at the meteorological station of Imam Khomeini Airport

سرعت باد (متر بر ثانیه)			دما (کلوین)			مدل
IOA (min, max) Mean	MBE (min, max) Mean	RMSE (min, max) Mean	IOA (min, max) Mean	MAE (min, max) Mean	MBE (min, max) Mean	
(0/51, 0/77) 0/63	(-1/13, 0/55) -0/33	(1/05, 2/30) 1/56	(0/72, 0/90) 0/81	(0/55, 2/19) 1/56	(-0/37, 0/80) -0/40	WRF
(0/53, 0/80) 0/62	-1/07, -0/05) (-0/28	(0/85, 1/59) 1/34	(0/82, 0/93) 0/88	(0/62, 1/50) 1/13	(-0/67, 0/71) -0/23	CM(1)
(0/59, 0/83) 0/70	(-0/74, 0/21) -0/20	(0/79, 1/50) 1/29	(0/84, 0/93) 0/88	(0/37, 1/56) 0/95	(-0/43, 0/67) -0/19	CM(2)
(0/70, 0/85) 0/77	(-0/61, 0/33) -0/20	(0/72, 2/05) 1/33	(0/85, 0/95) 0/90	(0/43, 1/50) 0/91	(-0/47, 0/51) -0/24	CM(WRF)
(0/76, 0/90) 0/85	(-0/61, 0/26) -0/14	(0/84, 1/31) 0/91	(0/91, 0/98) 0/95	(0/11, 1/07) 0/48	(-0/13, 0/27) -0/08	CM(WRF + OBS)

نتایج شاخص‌های آماری IOA، MBE و MAE برای دما به ترتیب در محدوده (۰/۹۵، ۰/۸۵)، (۰/۵۱، ۰/۴۷) و (۰/۴۳، ۱/۵۰) و نتایج شاخص‌های آماری IOA، MBE و RMSE برای سرعت باد به ترتیب در محدوده (۰/۸۵، ۰/۷۰)، (۰/۳۳، ۰/۶۱) و (۰/۷۲، ۲/۰۵) قرار دارد که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در تولید میدان باد منطقه است؛ هم‌چنین مشخص است که مدل CALMET داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل WRF را با استفاده از تطبیق آن با داده‌های توپوگرافی و کاربری زمین در شبکه‌بندی جدید با مقیاس ریزتر، به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشیده است. دقت بالاتر روش CM(WRF) نسبت به CM(1) را می‌توان در تعیین حدس اولیه داده‌های هواشناسی در مدل CALMET دانست؛ به‌طوری‌که در CM(WRF) حدس اولیه میدان باد از طریق داده‌های خروجی مدل WRF که برای تک‌تک نقاط شبکه به‌صورت سه‌بعدی و در تمام ترازهای ارتفاعی اندازه‌گیری شده‌است درحالی‌که در روش CM(1) حدس اولیه از داده‌های یک نقطه خاص در شبکه که همان ایستگاه هواشناسی منطقه است، تشکیل می‌شود. بهترین نتایج در شبیه‌سازی میدان باد منطقه نیز در روش آخر مدل‌سازی یعنی CM(WRF+OBS)، قابل مشاهده است به‌طوری‌که مقدار

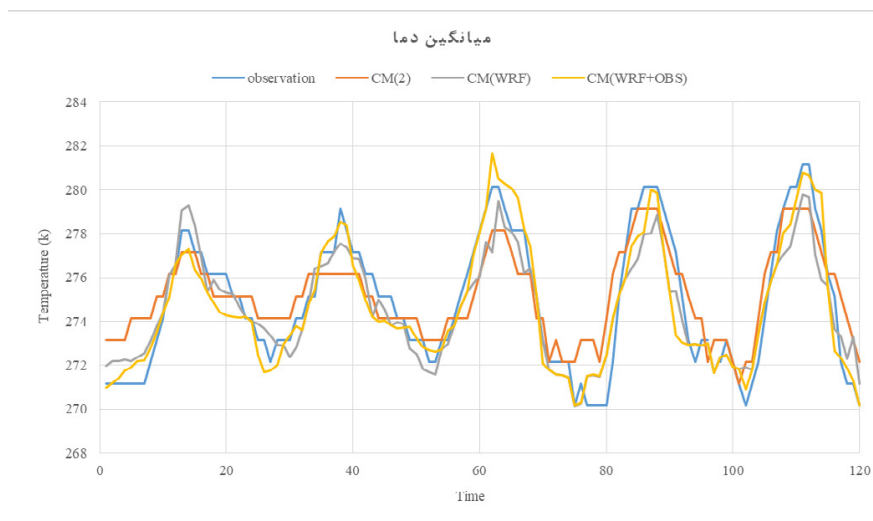
مطابق با معیارهای ارائه‌شده توسط سازمان محیط‌زیست ایالات‌متحده است. با مقایسه روش CM(1) و CM(2) می‌توان دریافت که در نظر نگرفتن داده‌های جو بالا در لایه‌های پایین دامنه برای برون‌یابی داده‌های میدان باد از طریق وزن‌دهی به این داده‌ها باعث بهبود نتایج خروجی میدان باد می‌شود به‌طوری‌که مقدار میانگین شاخص IOA برای سرعت باد در CM(2) نسبت به CM(1) به مقدار ۰/۰۸ افزایش پیدا کرده‌است. هم‌چنین رعایت معیارهای گفته‌شده توسط CM(1) و CM(2) نشان از دقت قابل‌قبول داده‌های خروجی مدل CALMET در تولید میدان باد منطقه موردنظر دارد. لازم به ذکر است که با توجه به تراکم کم ایستگاه‌های سینوپتیک اصلی و جو بالا در منطقه و استفاده از داده‌های یک ایستگاه برای مدل‌سازی و با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی پیچیده منطقه و این نکته که دقت مدل‌های فرایابی به داده‌های ورودی مدل بستگی دارد، مقدار ۰/۰۸ در بهبود شاخص IOA و مقدار کم بهبود پارامترهای MBE، MAE و RMSE در CM(2) نسبت به CM(1) را می‌توان اثر قابل‌توجهی در بهبود شرایط مدل‌سازی با تغییر شرایط فیزیکی مدل CALMET دانست.

همان‌طور که از جدول ۵ برای روش CM(WRF) پیدا است،



شکل ۳. روند تغییرات میانگین سرعت باد ساعتی در بازه زمانی موردنظر

Fig. 3. The trend of changes in the average hourly wind speed in the desired time period

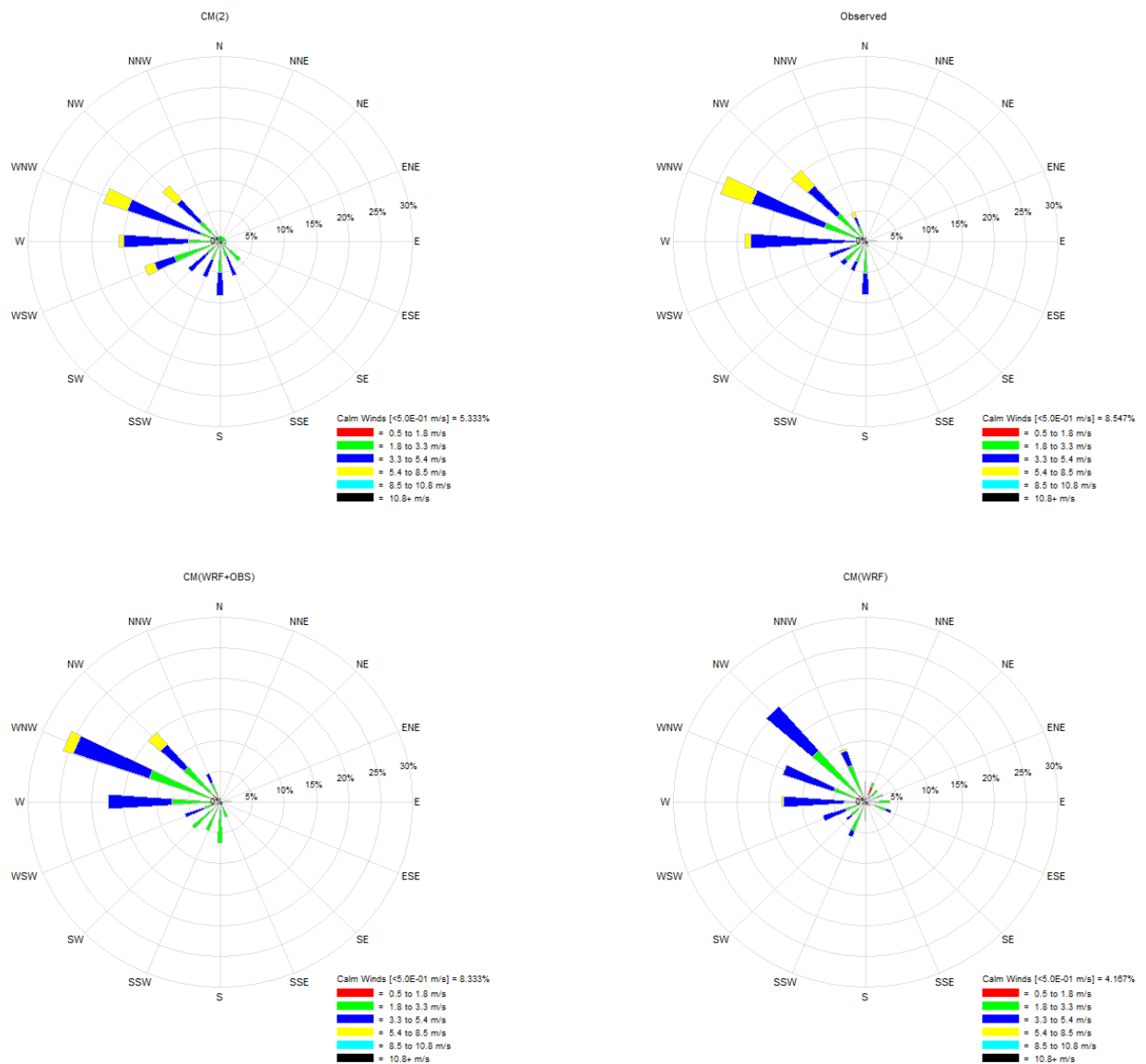


شکل ۴. روند تغییرات میانگین دمای هوا ساعتی در بازه زمانی موردنظر

Fig. 4. The trend of changes in the average hourly air temperature in the desired time period

به دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی میدان باد سه‌بعدی منطقه می‌شود که این میدان باد مهم‌ترین ورودی مدل‌های کیفیت هوا به شمار می‌آید. همچنین با توجه به روند تغییرات میانگین دما و سرعت باد ساعتی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای برای ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام‌خمينی که به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده‌است، می‌توان تطابق و تشابه بین روند تغییرات دمایی و همچنین روند تغییرات سرعت مشاهده شده با دما و سرعت‌های پیش‌بینی شده در ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام‌خمينی را مشاهده نمود که گویای نتایج قابل قبول مدل‌سازی است.

میانگین شاخص IOA برای دما و سرعت باد به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۸۵ است. دقت بالای روش آخر مدل‌سازی حاکی از بهبود شرایط شبیه‌سازی میدان باد در شرایط استفاده از ترکیب داده‌های مشاهده‌ای با داده‌های پیش‌بینی شده مدل WRF است. در نتیجه استفاده از روش‌های CM(WRF) و CM(WRF+OBS) در کشورهایی که شبکه مترامی از ایستگاه‌های سینوپتیک اصلی و جو بالا وجود ندارد را می‌توان به‌عنوان روشی کارآمد و مؤثر در شبیه‌سازی میدان باد در نظر گرفت. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از داده‌های مدل WRF به‌عنوان فرض اولیه مدل CALMET منجر



شکل ۵. گلباد منطقه بر اساس داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام خمینی
Fig. 5. Wind roses constructed from observed and simulated data from Imam Khomeini Airport meteorological station.

در شکل ۵ گلباد منطقه بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام خمینی و داده‌های شبیه‌سازی شده در مراحل مختلف مدل‌سازی، ترسیم شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه مورد بررسی جهت باد غالب برای ایستگاه امام خمینی به صورت غرب و شمال غربی است. از تشابه بین گلبادهای شبیه‌سازی شده با گلباد داده‌های مشاهده‌ای، می‌توان به دقت قابل قبول مدل‌های اجرا شده در تخمین جهت باد منطقه پی برد. همچنین با توجه به گلباد و به خصوص بر روی شهر تهران به کاربرد.

می‌توان دریافت که ترکیب داده‌های مدل WRF با داده‌های مشاهده‌ای در مدل CALMET باعث تولید بهترین تخمین از جهت باد منطقه و به‌طور کلی بهترین تخمین از میدان باد منطقه خواهد شد که این میدان باد را می‌توان در مدل‌های پخش و پراکنش جوی برای تخمین غلظت آلاینده‌ها و نحوه توزیع آن‌ها بعد از انتشار از منابع نقطه‌ای و سطحی در منطقه مورد مطالعه و به خصوص بر روی شهر تهران به کاربرد.

۴- نتیجه‌گیری

داده‌های سطحی هواشناسی با داده‌های مدل WRF در شبیه‌سازی میدان باد از طریق مدل CALMET، منجر به تولید هر چه دقیق‌تر این میدان باد سه‌بعدی می‌شود. به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های هواشناسی سطحی و داده‌های خروجی مدل WRF در شبیه‌سازی میدان باد از طریق مدل CALMET روشی بسیار کارا و مؤثر در تولید میدان بادی سه‌بعدی و دقیق است که از آن می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در مدل‌های کیفیت هوا برای تخمین غلظت آلاینده‌های خروجی از منابع انتشار و نحوه توزیع آن‌ها در جو استفاده کرد.

مراجع

- [1] W. Wang, W.J. Shaw, T.E. Seiple, J.P. Rishel, Y. Xie, An evaluation of a diagnostic wind model (CALMET), *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(6) (2008) 1739-1756.
- [2] Soltanzadeh, P. Zawar-Reza, A. Aliakbari-Bidokhti, A. Jalali, A. Torkzadeh, Study of local winds over Tehran using WRF in ideal conditions, *Iranian Journal of Physics Research*, 11(2) (2011) 199-213.
- [3] M. Milanese, L. Tornese, G. Colangelo, D. Laforgia, A. de Risi, Numerical method for wind energy analysis applied to Apulia Region, Italy, *Energy*, 128 (2017) 1-10.
- [4] W. Wang, W.J. Shaw, Evaluating wind fields from a diagnostic model over complex terrain in the Phoenix region and implications to dispersion calculations for regional emergency response, *Meteorological applications*, 16(4) (2009) 557-567.
- [5] S.H. Yim, J.C. Fung, A.K. Lau, Mesoscale simulation of year-to-year variation of wind power potential over southern China, *Energies*, 2(2) (2009) 340-361.
- [6] A.M. Omer, On the wind energy resources of Sudan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(8) (2008) 2117-2139.
- [7] N. Kumar, A.G. Russell, Comparing prognostic and diagnostic meteorological fields and their impacts on photochemical air quality modeling, *Atmospheric Environment*, 30(12) (1996) 1989-2010.

در این پژوهش، امکان‌سنجی و کارایی استفاده از داده‌های خروجی مدل میان‌مقیاس WRF به‌عنوان ورودی مدل CALMET در به‌دست آوردن میدان بادی دقیق برای استفاده در مطالعات کیفیت هوا مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا مطالعات و بررسی‌هایی در ارتباط با نحوه عملکرد، محدودیت‌ها و قابلیت‌های مدل CALMET انجام گرفت؛ سپس نحوه هم‌بسته‌سازی مدل عددی هواشناسی WRF با مدل فرایابی هواشناسی CALMET برای به‌دست آوردن میدان سه‌بعدی باد در منطقه به چهار شیوه مختلف شرح داده شده است. هر چهار شبیه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه (CM(1)، CM(2)، CM(WRF) و CM(WRF+OBS) با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام‌خمینی و هم‌چنین با یکدیگر در بازه زمانی ۵ روزه از پنجم تا دهم ژانویه ۲۰۱۴ مقایسه شدند. از چهار شاخص آماری پیشنهادی سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده (RMSE، MBE، MAE و IOA)، جهت آنالیز عملکرد شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، استفاده شده است. نتایج چهار شاخص آماری به‌کاررفته برای آنالیز مدل‌سازی هواشناسی منطقه نمایانگر دقت قابل‌اطمینان مدل WRF در پیش‌بینی داده‌های هواشناسی منطقه و هم‌چنین دقت بالای مدل CALMET در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی منطقه از طریق تطبیق داده‌های WRF با داده‌های توپوگرافی و کاربری زمین به‌کاررفته در این مطالعه است. با مقایسه روش‌های CM(1) و CM(2) می‌توان گفت، در شرایطی که منطقه مورد مطالعه از شبکه‌های متراکم هواشناسی سطحی و جو بالا برخوردار باشد با ایجاد تغییر در تنظیمات تولید میدان باد مدل CALMET و با وزن‌دهی منطقی به داده‌های ایستگاه سطحی و جو بالا می‌توان شرایط میدان باد را تا حد قابل‌توجهی بهبود بخشید. ولی در کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران که از شبکه‌های متراکم هواشناسی برخوردار نیست و داده‌های جو بالا هم به‌ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی آن اندازه‌گیری می‌شود استفاده از داده‌های خروجی مدل WRF با مقیاس درشت به‌عنوان حدس اولیه در مدل فرایابی CALMET با مقیاس ریز و تفکیک بالا، روشی جذاب و سودمند در تولید میدان بادی دقیق در آن منطقه است. هم‌چنین با در نظر گرفتن نتایج به‌دست آمده برای روش CM(WRF+OBS)، مشخص است که استفاده از ترکیب

- atmospheric Physics, 49(1-4) (1992) 69-91.
- [18] S. Li, S. Xie, Spatial distribution and source analysis of SO₂ concentration in Urumqi, International Journal of Hydrogen Energy, 41(35) (2016) 15899-15908.
- [19] S.A. Abdul-Wahab, S.O. Fadlallah, A study of the effects of vehicle emissions on the atmosphere of Sultan Qaboos University in Oman, Atmospheric environment, 98 (2014) 158-167.
- [20] Y. Rashidi, M. Rahimian, A. Rashidi Mehrabad, The analysis on distribution of NO_x pollutant concentration from exhaust flues in Shahid Montazeri Power Plant at Isfahan using combined WRF-CALPUFF model, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 51(2) (2019) 297-314. (in persian).
- [21] Hernández, S. Saavedra, A. Rodríguez, J.A. Souto, J.J. Casares, Coupling WRF and CALMET models: Validation during primary pollutants glc episodes in an Atlantic coastal region, in: Air Pollution Modeling and its Application XXII, Springer, 2014, pp. 681-684.
- [22] L. Morales, F. Lang, C. Mattar, Mesoscale wind speed simulation using CALMET model and reanalysis information: An application to wind potential, Renewable Energy, 48 (2012) 57-71.
- [23] S.H. Yim, J.C. Fung, A.K. Lau, S. Kot, Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D5) (2007).
- [24] F.L. Ludwig, D.K. Miller, S.G. Gallaher, Evaluating a Hybrid Prognostic-Diagnostic Model That Improves Wind Forecast Resolution in Complex Coastal Topography, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 45(1) (2006) 155-177.
- [25] J.G. Powers, J.B. Klemp, W.C. Skamarock, C.A. Davis, J. Dudhia, D.O. Gill, J.L. Coen, D.J. Gochis, R. Ahmadov, S.E. Peckham, G.A. Grell, J. Michalakes, S. Trahan, S.G. Benjamin, C.R. Alexander, G.J. Dimego, W. Wang, C.S. Schwartz, G.S. Romine, Z. Liu, C. Snyder, F. Chen, M.J. Barlage, W. Yu, M.G. Duda, The
- [8] Chandrasekar, C.R. Philbrick, R. Clark, B. Doddridge, P. Georgopoulos, Evaluating the performance of a computationally efficient MM5/CALMET system for developing wind field inputs to air quality models, Atmospheric Environment, 37(23) (2003) 3267-3276.
- [9] U. EPA, User's guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET), Research Triangle Park, NC, Office of Air Quality Planning and Standards, (2004).
- [10] J.S. Scire, F.R. Robe, M.E. Fernau, R.J. Yamartino, A user's guide for the CALMET Meteorological Model, Earth Tech, USA, 37 (2000).
- [11] N.L. Seaman, Meteorological modeling for air-quality assessments, Atmospheric environment, 34(12-14) (2000) 2231-2259.
- [12] M. Azadi, M. Soufiyani, G. Vakili, H. Ghaemi, A case study on the impact of synoptic and upper air data assimilation in WRF output for precipitation over Iran, Iranian Journal of Geophysics, 10(2) (2016) 110-119. (in persian).
- [13] W. Wang, D. Barker, J. Bray, C. Bruyere, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, J. Michalakes, User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3, Mesoscale and Microscale Meteorology Division-National Center for Atmospheric Research (MMM-NCAR), (2007).
- [14] G.A. Grell, J. Dudhia, D.R. Stauffer, A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), (1994).
- [15] G. Doms, U. Schättler, A description of the nonhydrostatic regional model LM, Part I: Dynamics and Numerics, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, (2002).
- [16] D. Majewski, Hrm-user's guide, Deutsche Wetter Dienst (DWD). Offenbach, Germany, 124 (2009).
- [17] R.A. Pielke, W. Cotton, R.e.a. Walko, C.J. Tremback, W.A. Lyons, L. Grasso, M. Nicholls, M. Moran, D. Wesley, T. Lee, A comprehensive meteorological modeling system—RAMS, Meteorology and

- [32] Y. Song, M. Zhang, X. Cai, PM10 modeling of Beijing in the winter, *Atmospheric Environment*, 40(22) (2006) 4126-4136.
- [33] T.G. Farr, P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, The shuttle radar topography mission, *Reviews of geophysics*, 45(2) (2007).
- [34] W. Pfender, R. Graw, W. Bradley, M. Carney, L. Maxwell, Use of a complex air pollution model to estimate dispersal and deposition of grass stem rust urediniospores at landscape scale, *Agricultural and forest meteorology*, 139(1-2) (2006) 138-153.
- [35] T. Tesche, D. McNally, C. Emery, E. Tai, Evaluation of the MM5 model over the Midwestern US for three 8-hour oxidant episodes, Prepared for the Kansas City Ozone Technical Workgroup, by Alpine Geophysics, LLC, Ft. Wright, KY, and ENVIRON International Corp., Novato, CA, (2001).
- [36] C. Emery, E. Tai, G. Yarwood, Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes, Prepared for the Texas Natural Resource Conservation Commission, by ENVIRON International Corporation, (2001).
- [37] J. Chang, S. Hanna, Air quality model performance evaluation, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1) (2004) 167-196.
- [38] A.Q. Branch, Reassessment of the Interagency Workgroup on Air Quality Modeling (IWAQM) Phase 2 Summary Report: Revisions to Phase 2 Recommendations.
- Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8) (2017) 1717-1737.
- [26] M.-D. Chou, M.J. Suarez, X.-Z. Liang, M.M.-H. Yan, C. Cote, A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies, (2001).
- [27] E.J. Mlawer, S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, S.A. Clough, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14) (1997) 16663-16682.
- [28] Y.-L. Lin, R.D. Farley, H.D. Orville, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6) (1983) 1065-1092.
- [29] M. Tewari, F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, R. Cuenca, Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model, in: 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, 2004.
- [30] Z.I. Janjić, The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes, *Monthly Weather Review*, 122(5) (1994) 927-945.
- [31] A.D. Visscher, CALPUFF AND CALMET, in: *Air Dispersion Modeling*, John Wiley & Sons, Inc, 2013, pp. 514-541.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Rahimian, Y. Rashidi, Performance evaluation of WRF/CALMET integrated model in expanding inflow wind field to air quality models, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(5) (2019) 979-992.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14278.5610](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14278.5610)

