



بررسی توزیع غلظت آلاینده NOX خروجی از دودکش های نیروگاه منتظری اصفهان با استفاده از مدل ترکیبی WRF-CALPUFF

یوسف رشیدی^۱، محسن رحیمیان، عبدالله رشیدی مهرآبادی^۲

^۱پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲دانشکده عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده:

در این پژوهش با استفاده از همبسته سازی مدل عددی هواشناسی WRF با مدل پراکنش آلودگی هوای CALPUFF به شبیه سازی توزیع غلظت آلاینده های هوای NOX خروجی از دودکش های نیروگاه منتظری اصفهان در دو بازه ۲۰ روزه از فصل های سرد و گرم سال ۲۰۱۴ پرداخته شده و سپس با استفاده از آنالیز آماری توانایی مدل در شبیه سازی داده ها، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شاخص های آماری به کاررفته در این پژوهش بر اساس معیارهای ارائه شده برای آن ها، حاکی از توانایی بالای مدل CALMET در شبیه سازی میدان سه بعدی هواشناسی مورد نیاز مدل CALPUFF دارد. همچنین با توجه به معیارهای ارائه شده برای شاخص های آماری، نتایج این شاخص ها نشان از توافق قابل قبول بین داده های غلظت شبیه سازی شده توسط مدل CALPUFF و داده های غلظت مشاهده ای ایستگاه های پایش آلودگی داشته اند؛ به طوری که مقدار شاخص همبستگی پیرسون که ارتباط بین نتایج خروجی مدل و داده های اندازه گیری میدانی را نشان می دهد، برای آلاینده NO₂ در بازه سرد سال در محدوده ۰/۸۹۲-۰/۷۰۶ و در بازه گرم سال در محدوده ۰/۹۳۴-۰/۷۶۷ قرار دارد. همچنین مقدار شاخص FB در بازه سرد و گرم سال برای آلاینده NO₂ به ترتیب در محدوده ۰/۱۶۵-۰/۰۶۳ و ۰/۰۸۲-۰/۰۲۲ قرار دارد. نتایج شاخص FB نشان دهنده آن است که در مجموع مدل نتایج به دست آمده برای غلظت آلاینده NO₂ را کمتر از مقدار واقعی پیش بینی کرده است که با توجه به در نظر نگرفتن غلظت پس زمینه این آلاینده در مجاورت نیروگاه، می توان به عملکرد منطقی مدل در پیش بینی غلظت آلاینده NO₂ اشاره کرد. به طور کلی نتایج ارزیابی های آماری انجام گرفته در این پژوهش، نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل CALPUFF در پیش بینی غلظت آلاینده های مورد نظر است.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ شهریورماه ۱۳۹۶
بازنگری: ۲۲ دی ماه ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۸ بهمن ماه ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۳ اسفند ماه ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

مدل سازی کیفیت هوا
مدل پخش و پراکنش CALPUFF
مدل عددی هواشناسی WRF
آلاینده NOX
آنالیز آماری

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر به دلیل افزایش سریع جمعیت، گسترش شهرنشینی، توسعه روزافزون واحدهای صنعتی و افزایش مصرف سوخت های فسیلی، آلودگی هوا به یکی از پیچیده ترین مشکل ها و معضلات، خصوصاً در شهرهای بزرگ جهان تبدیل شده است و به تبع آن مسئله آلودگی هوا و کنترل آن بیش از پیش اهمیت یافته است [۱]. سوزاندن سوخت های فسیلی به منظور تولید انرژی الکتریسیته در نیروگاه های حرارتی یکی از علل عمده مشکل های زیست محیطی مؤثر بر هر دو سطح محلی و جهانی است؛ با این حال، مهم ترین منابع انرژی در جهان و به خصوص در کشورهای در حال توسعه نیروگاه های تولید برق هستند که روزانه حجم عظیمی از آلاینده های گوناگون غیرسازگار با مکانیسم های طبیعی محیط زیست را وارد جو می کنند [۲]. مصرف برق در ایران در سال های اخیر به دلیل توسعه اقتصادی، صنعتی شدن و افزایش جمعیت رشد قابل توجهی را تجربه کرده است. به طوری که سرانه تولید انرژی الکتریکی از ۳۰۰ کیلووات ساعت در سال

۱۹۷۳ به ۳۵۰۵ کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۴ افزایش یافته است. با توجه به شرایط اقلیمی و آب و هوایی ایران و هم چنین کاهش بارندگی در چند سال گذشته و افت سطح آب پشت سدها، تولید برق توسط نیروگاه های سوخت فسیلی شدت یافته است تا جایی که در سال ۲۰۱۴، ۹۳/۲ درصد از کل برق تولیدی کشور توسط این نیروگاه ها تولید شده است [۳ و ۴].

قرار گرفتن در معرض برخی از آلاینده های انتشار یافته از نیروگاه های تولید برق که در نزدیکی مناطق مسکونی واقع شده اند باعث ایجاد اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان می شود. در میان آلاینده های هوای ناشی از نیروگاه های حرارتی، گاز دی اکسید گوگرد (SO₂)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x) و ذرات معلق کوچک تر از ۱۰ میکرون (PM10) اهمیت ویژه ای دارند [۵ و ۶]. اکسیدهای نیتروژن NO_x شامل خانواده ای از هفت نوع ترکیب مختلف است که از آن میان، اکسید نیتریک (NO) و دی اکسید نیتروژن (NO₂) از آلوده کننده های مهم هوا به شمار می روند. با این وجود، آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA) فقط دی اکسید نیتروژن (NO₂) را به عنوان آلاینده هوای اصلی برای این خانواده در نظر

آلاینده‌ها در اتمسفر هستند [۱۰]. این مدل‌ها با استفاده از معادله‌های ریاضی و روش‌های عددی به شرح این مفاهیم در جو می‌پردازند [۱۱]. در سال‌های اخیر، مدل پخش و پراکنش جوی CALPUFF عملکرد خوبی در شبیه‌سازی انواع بسیاری از آلاینده‌ها تحت توپوگرافی پیچیده، به‌ویژه در ناحیه بزرگ‌تر از ۵۰ کیلومتر داشته است [۱۲]؛ هم‌چنین این مدل قابلیت اجرا برای هر مکان خاص در سراسر جهان و برای هر نوع دوره مدل‌سازی انتخاب‌شده توسط کاربر را دارا هست که نشان از انعطاف‌پذیری بالای این مدل است [۱۳].

با توجه به انعطاف‌پذیری خوب مدل CALPUFF، در طول سالیان گذشته مطالعه‌های متعددی در زمینه مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های هوا توسط این مدل انجام شده است. ینگ و همکاران^۱ (۲۰۰۶)، برای تخمین غلظت هیدروژن سولفید (H₂S) ناشی از فوران تصادفی در استخراج از چاه‌های نفت از مدل ترکیبی CALPUFF و MM5 استفاده کردند. نتیجه این مطالعه تطابق خوب داده‌های خروجی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده هیدروژن سولفید را نشان می‌داد [۱۴]. مکینتاش و همکاران^۲ (۲۰۱۰)، برای ارزیابی اثرات مواجهه آلاینده‌ها در مجاورت یک واحد صنعتی از مدل CALPUFF استفاده کردند. آن‌ها در بررسی خود علاوه بر ذکر دقت مدل، بر استفاده از این مدل در شرایطی که با ویژگی‌های مدل هم‌خوانی دارد، تأکید کردند [۱۵]. قائم و الفادل^۳ (۲۰۱۳) و تیان و همکاران^۴ (۲۰۱۳)، در مطالعه‌هایی از نرم‌افزار CALPUFF برای مطالعه غلظت آلودگی‌های چندگانه ناشی از مناطق صنعتی استفاده کردند [۱۶ و ۱۷]. صباح عبدالوهاب و همکاران^۵ (۲۰۱۴)، به مطالعه بررسی تأثیر شرایط ژئوفیزیکی و هواشناسی منطقه بر پراکندگی NO₂ خروجی یک پالایشگاه پیشنهادی واقع در کانادا پرداختند [۱۸]. پروکساکورن و همکاران^۶ (۲۰۱۴)، در پژوهشی کاربرد روش‌های مدل‌سازی سیستم ترکیبی WRF-CALPUFF را به منظور بررسی اثر تغییرات فصلی پراکندگی بو در شهر چانگون کره جنوبی مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. هولنسکی و همکاران^۷ (۲۰۱۶)، به بررسی عملکرد و ارزیابی مدل CALPUFF در مقیاس شهری ورشو پرداختند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در پیش‌بینی سالانه غلظت آلاینده‌های مورد مطالعه بود؛ ولی برای دوره‌های زمانی کوتاه‌تر مانند یک ساعت و به‌خصوص برای شرایط باد آرام، نتایج قابل قبول نبودند [۲۰]. صباح عبدالوهاب و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی به

گرفته‌است؛ زیرا این ترکیب متداول‌ترین شکل NO_x در جو است که از طریق فعالیت‌های انسانی تولید می‌شود. NO₂ طی فرآیندهای پیچیده اتمسفر به ذرات معلق نیترات (NO₃) تبدیل می‌شود و در ترکیب با هوای مرطوب تولید اسید نیتریک (HNO₃) می‌کند که موجب پوسیدگی شدید فلزات می‌شود. هم‌چنین در غلظت‌های بالا باعث ایجاد مه‌دود شده و میدان دید را به شدت کاهش می‌دهد و بر رشد گیاهان اثر منفی شدید دارد. این گاز از اثر گلخانه‌ای نیز برخوردار است. منابع تولید این آلاینده سوختن بنزین، گاز طبیعی، زغال سنگ و نفت، به‌خصوص در نیروگاه‌های تولید برق است. NO₂ به‌خودی‌خود نه تنها یک آلاینده مهم هوا است که اثرات مخربی بر سلامتی انسان و محیط‌زیست دارد، بلکه با واکنش‌هایی که در اتمسفر انجام می‌دهد باعث ایجاد اوزون تروپوسفری (O₃) و باران اسیدی می‌شود [۷].

در زمینه اندازه‌گیری‌های محیط‌زیستی نیاز به شاخص و استاندارد برای اظهار نظر در مورد مقادیر اندازه‌گیری شده است. سازمان‌ها و انجمن‌های بسیاری در زمینه محیط‌زیست اقدام به وضع استاندارد نموده‌اند. از مهم‌ترین این سازمان‌ها می‌توان به سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده اشاره کرد. در ایران استانداردهای محیط‌زیستی توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست تدوین و بر اجرای آن نظارت می‌شود. استانداردهای کنونی سازمان محیط‌زیست ایران برای NO₂ شامل استاندارد میانگین ۱ ساعته و سالیانه است که مقدار آن به ترتیب برابر ۲۰۰ g/m³ و ۱۰۰ g/m³ است. NO₂ در فعالیت‌های تحقیقاتی در حوزه آلودگی هوا و بهداشت محیط از اولویت بالایی برخوردار می‌باشد، به‌خصوص در سطح آلودگی هوای شهری که این آلاینده دارای تغییرات بسیار گسترده زمانی و مکانی است [۸]؛ بنابراین، ضروری است که به تعیین دقیق غلظت‌های محیطی این آلاینده‌ها در نزدیکی نواحی منابع انتشار آن‌ها پرداخت که این امر مستلزم اندازه‌گیری مقدار زیادی از داده‌های این آلاینده‌های هوا در شرایط مختلف زمین‌شناسی و آب‌وهوایی است.

تخمین میزان آلاینده‌های هوا جهت ارزیابی کیفیت هوا موضوعی بسیار پیچیده است؛ زیرا تولید و انتشار انواع آلاینده‌های گازی و جامد از منابع گوناگون ثابت و متحرک، توپوگرافی و عوارض زمین، اثرات پیچیده وضعیت هواشناسی بر پخش، انتقال و ته‌نشست آلاینده‌ها، واکنش‌های شیمیایی جوی و اثر متقابل این عوامل بر هم فهم این پدیده را بسیار دشوار کرده است. این پیچیدگی ارزیابی کیفیت هوا، باعث توسعه مدل‌های کیفیت هوا برای تخمین توزیع فضایی و زمانی آلاینده‌های منتشر شده از منابع مختلف و هم‌چنین کمک به نظارت و ارزیابی شده است [۹]. مدل‌های کیفیت هوا ابزار ارزشمندی در ارائه مفاهیم فرآیندهای درگیر در انتقال، پراکنش و تبدیل شیمیایی

1 Yang et al

2 Macintosh et al

3 K Ghannam, M El-Fadel

4 Tian et al

5 Sabah Abdul-Wahab et al

6 Prueksakorn et al

7 Holnicki et al

داده‌های توپوگرافی، نوع کاربری زمین، داده‌های هواشناسی مشاهده‌ای و داده‌های هواشناسی شبیه‌سازی شده به تعیین میدان دما و باد، بر اساس معادله بقای جرم پردازد. علاوه بر میدان دما و باد، CALMET میدان‌های دوبعدی متغیرهای خرد هواشناسی موردنیاز برای انجام شبیه‌سازی‌های پراکنش آلاینده‌ها (ارتفاع اختلاط، طول مومین ابخوف، سرعت اصطکاکی، سرعت همرفتی و دیگر موارد) را تعیین می‌کند. سپس این میدان‌های هواشناسی به مدل CALPUFF داده می‌شود تا برای انتقال مواد انتشاریافته مورد استفاده قرار گیرد [۲۴]. این مدل می‌تواند داده‌های هواشناسی در مقیاس میانی را از مدل‌های هواشناسی پیش‌یابنده (مدل پیش‌بینی عددی وضع هوای WRF و MM5)، گرفته و با استفاده از داده‌های عوارض و کاربری زمین در شبکه‌بندی دقیق‌تر، مقادیر و میدان متغیرهای هواشناسی را برای مقیاس‌های ریزتر محاسبه کند. در واقع نقش این قسمت از مدل‌سازی به‌عنوان یک پیش‌پردازش، اصلاح کردن و وفق دادن داده‌های پهنه‌بندی هواشناسی به‌دست آمده از مدل پیش‌یابی 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 مدل پخش و پراکنش آلودگی هوا می‌شود [۲۵].

CALPUFF، در واقع یک مدل چندلایه غیریکنواخت حرکت سیال است که بر اساس مدل پاف گاوسی - لاگرانژی^۲، طراحی شده است. این مدل اثرات زمانی و فضایی وضعیت آب‌وهوایی بر روی انتقال، تبدیل و حذف آلاینده‌های جوی را در نظر می‌گیرد. هم‌چنین این مدل دارای الگوریتم‌هایی برای پیش‌بینی اثرات آلاینده‌ها بر منابع نزدیک به سطح زمین مانند حرکت روبه پایین توده آلاینده به جهت وجود ساختمان‌ها، صعود توده آلاینده بر اثر نیروی شناورسازی و مؤنتم، تغییرات شیمیایی آلاینده‌ها، نفوذ نسبی توده آلاینده و اثر عوارض پیچیده سطح زمین بر انتقال و پخش آلاینده‌ها است. از قسمت CALPOST نیز برای پردازش فایل‌های شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود [۲۲ و ۲۶].

۲-۲- محدود مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش ناحیه‌ای به مساحت ۱۰۰۰۰ کیلومترمربع به مرکزیت نیروگاه شهید محمد منتظری اصفهان با طول جغرافیایی ۵۱/۴۹۶۶ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲/۸۹۷۲ شمالی است. این ناحیه نسبتاً کوهستانی در قسمت مرکزی فلات ایران قرار گرفته که شامل کوهستان‌های پوشیده از برف زاگرس در غرب به سمت کویر مرکزی در شرق آن است. به دلیل وجود مناطق با ارتفاع مختلف از سطح دریا، شرایط اقلیمی متنوعی در این ناحیه موجود

شبیه‌سازی گاز گلخانه‌ای CO₂ ناشی از صنایع تولید سیمان با استفاده از سیستم مدل سازی WRF-CALPUFF پرداختند [۲۱].

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از همبسته‌سازی مدل پیش‌بینی عددی وضع هوای WRF و مدل هواشناسی فرایابی CALMET به تعیین میدان سه‌بعدی هواشناسی در منطقه پرداخته و سپس با استفاده از این میدان سه‌بعدی هواشناسی و ترکیب آن با داده‌ها و خصوصیات منبع انتشار در مدل پخش و پراکنش آلودگی هوای CALPUFF، شبیه‌سازی پراکنش و توزیع غلظت آلاینده NO_x خروجی از دودکش‌های نیروگاه محمد منتظری اصفهان در محدوده مورد مطالعه انجام گرفته است. سپس نتایج غلظت میانگین ۱ ساعته داده‌های پیش‌بینی شده آلاینده NO₂ با مقدار غلظت استاندارد ملی آن مقایسه شده است و در نهایت با استفاده از تکنیک‌های آماری به صحت‌سنجی داده‌های میانگین هواشناسی و غلظت آلاینده‌های NO_x در ایستگاه‌های هواشناسی و پیش‌آلودگی هوا پرداخته شده است. بازه زمانی مورد استفاده در این پژوهش سال ۲۰۱۴ است که برای فصل‌های گرم و سرد سال به صورت جداگانه مدل‌سازی پراکنش آلودگی هوا انجام گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شرح سیستم مدل سازی WRF-CALPUFF

CALPUFF یک مدل چندلایه حالت ناپایدار برای پراکنش توده آلاینده است که به منظور شبیه‌سازی پراکنش گازها و ذرات با استفاده از داده‌های هواشناسی متغیر (الفاظ زمانی و مکانی) بر مبنای معادله‌های تشابه، تلاطم، قدرت انتشار و تبدیل و حذف طراحی گردیده است [۲۲]. این مدل در اواخر دهه ۸۰ میلادی توسط گروه تحقیقاتی سیگما توسعه یافته و برای اولین بار تحت حمایت مالی انجمن منابع هوایی کالیفرنیا^۱ در سال ۱۹۹۰ منتشر شده است. مدل CALPUFF یکی مدل‌های ارجح و پیشنهادی سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا برای پراکنش توده آلاینده است و 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 گرفته است [۲۳]. سیستم مدل‌سازی شامل سه جزء اصلی و مجموعه‌ای از برنامه‌های قبل از پردازش و بعد از پردازش است. اجزای اصلی سیستم مدل‌سازی شامل: CALMET (مدل فرایابی سه‌بعدی داده‌های هواشناسی)، CALPUFF (مدل پراکنش آلودگی هوا) و CALPOST (مجموعه پس پردازش) است.

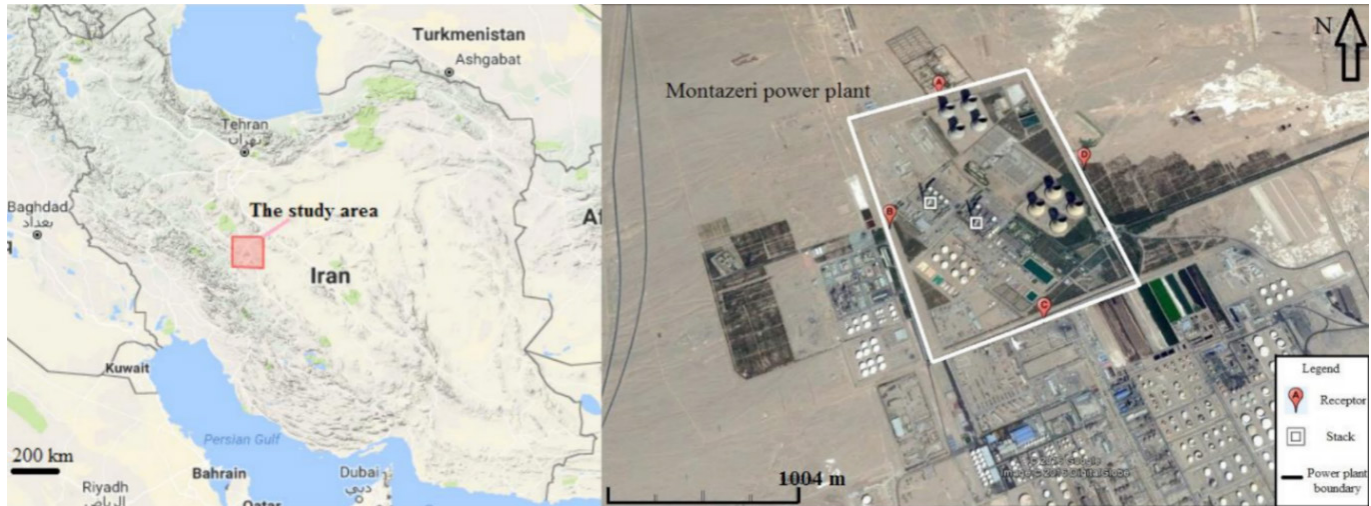
CALMET یک مدل هواشناسی تشخیصی است که می‌تواند با ترکیب

2 Lagrangian Gaussian puff model

1 California Air Resources Board (ARB)

احداث گردیده است. این نیروگاه یکی از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های تولید برق ایران است که دارای هشت واحد ۲۰۰ مگاواتی و ۲ واحد توربین انبساطی ۸ مگاواتی مجموعاً به ظرفیت تولید ۱۶۱۶ مگاوات برق در ساعت است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و نیروگاه شهید محمد منتظری اصفهان نشان داده شده است.

است. آب‌وهوای این منطقه به‌طور کلی معتدل خشک است و از ویژگی‌های برجسته هواشناسی آن می‌توان به کم بودن میزان بارش (کمتر از ۱۲۵ میلی‌متر) اشاره کرد. نیروگاه شهید محمد منتظری در ۱۵ کیلومتری شمال غربی شهر اصفهان و در امتداد بزرگراه اصفهان-تهران، بالاتر از پالایشگاه اصفهان در زمینی به وسعت ۲/۲ میلیون مترمربع



شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه و نمای نیروگاه شهید منتظری به همراه چهار ایستگاه پایش آلاینده‌های هوا در چهار طرف آن
Fig. 1. Study area location and four receptors of the Shahid Montazeri Power Plant

این نیروگاه قابلیت استفاده از سوخت‌های گاز طبیعی و نفت کوره (مازوت) را دارا است؛ اما به علت خشک‌سالی‌های اخیر و کاهش آب پشت سدها و هم‌چنین به علت افزایش نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و پدید آمدن مشکل تأمین گاز این نیروگاه‌ها، مصرف مازوت نیروگاه افزایش یافته است، به طوری که مصرف سوخت نیروگاه از ۷۰ درصد گاز و ۳۰ درصد مازوت در گذشته، به ۲۰ درصد گاز و ۸۰ درصد مازوت در سال‌های اخیر رسیده است [۴]. این نیروگاه به دلیل مجهز نبودن هیچ‌یک از دودکش‌های آن به سیستم‌های کاهش آلاینده‌های خروجی، به‌عنوان یکی از منابع اصلی آلودگی هوای استان اصفهان شناخته می‌شود.

با توجه به اثر تغییرات فصلی بر روی انتقال آلاینده‌ها، به‌ویژه تغییر پارامترهای جوی مانند اندازه و جهت باد، دمای هوا، ارتفاع لایه مرزی و رطوبت نسبی در یک منطقه در فصول مختلف، مدل‌سازی در دو بازه زمانی فصل گرم و فصل سرد انجام شده است. به علت حجم زیاد داده‌ها و فرآیند طولانی مدل‌سازی، برای هرکدام از فصول گرم و سرد سال، بازه زمانی ۲۰ روزه‌ای را به صورت پیوسته در نظر گرفته و مدل‌سازی در این بازه زمانی انجام گرفته است. در جدول ۱ بازه‌های زمانی مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، هریک از واحدهای این نیروگاه دارای یک دودکش مستقل است که در مجموع دود نیروگاه از طریق هشت دودکش بزرگ با ارتفاع ۲۰۳ متر از سطح زمین (ارتفاع پایه دودکش‌ها از سطح دریای ۱۶۷۵ متر است)، به محیط تخلیه می‌شود. این دودکش‌ها در قالب دو ستون عمودی (شفت بتنی) که هر ستون دارای ۴ دودکش مجزا است در یک سازه و ماس با یکدیگر واقع شده‌اند. با توجه به اینکه دودکش‌ها به یکدیگر چسبیده‌اند، خیزش دود خروجی ناشی از سرعت و حرارت دود به صورت یک جبهه درآمده و چهار دودکش قابل معادل‌سازی با یک دودکش براساس سطح مقطع کلی چهار دودکش است [۲۷].



شکل ۲. نمایی از دودکش‌های نیروگاه شهید منتظری اصفهان
Fig. 2. An upper view of the Montazeri Power Plant

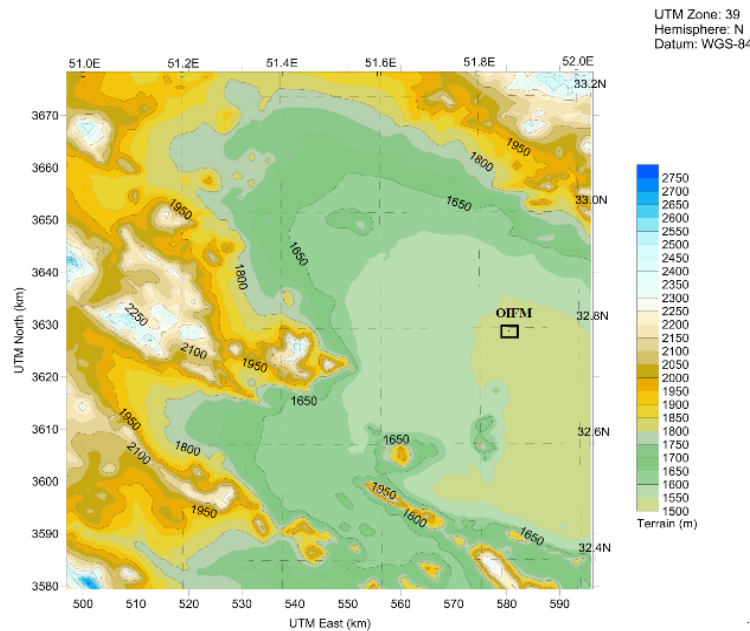
تولید سطوح توپوگرافی مورد پردازش قرار گرفته، استفاده شده است. این داده‌ها با فرمت Geotiff و با دقت مکانی ۹۰ متر در سیستم مختصات جغرافیایی با سطح مبنای مسطحاتی WGS-۱۹۸۴ و سطح مبنای ارتفاعی EGM-۹۶ تشکیل شده است. SRTM یک پروژه بین‌المللی به رهبری آژانس ملی اطلاعات ژئوفیزیکی^۴ و سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده^۵ است که دارای یکی از کامل‌ترین پایگاه داده‌های توپوگرافی زمین به صورت دیجیتال و با وضوح بالا است [۲۸]. برای داده‌های کاربری زمین از فایل‌های UMDGLC با فرمت Geotiff و دقت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده شده است. UMDGLC داده‌های کاربری زمین با وضوح بالایی هستند که توسط سازمان فضایی ایالات متحده و به وسیله سنجنده‌های ماهواره‌ای پیشرفته MODIS (اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط) تهیه و توسط دانشگاه ایالتی مریلند ایالات متحده توسعه داده می‌شوند. در شکل ۳، نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

جدول ۱. بازه زمانی مورد استفاده برای مدل‌سازی آلودگی هوا
Table 1. The time interval used for air pollution modeling

بازه زمانی	سال ۲۰۱۴
۲۰۱۴/۰۱/۲۵ تا ۲۰۱۴/۰۱/۰۵	فصل سرد
۲۰۱۴/۰۸/۱۴ تا ۲۰۱۴/۰۷/۲۵	فصل گرم

۳-۲- رویکرد مدل‌سازی

اولین قدم در مدل‌سازی آلودگی هوا، تعریف شبکه‌ای است که شبیه‌سازی و تخمین آلاینده‌ها در نقاط درون آن انجام می‌پذیرد. این مهم توسط پیش پردازنده‌های ژئوفیزیکی صورت می‌گیرد. داده‌های ژئوفیزیکی از دو بخش اصلی و مهم داده‌های عوارض و کاربری زمین تشکیل شده است. در این پژوهش برای داده‌های عوارض زمین از فایل‌های توپوگرافی SRTM^۱ (نسخه ۴/۱) که توسط گروه مشاورین تحقیقات بین‌المللی کشاورزی^۲ و کنسرسیوم اطلاعات فضایی^۳ جهت



شکل ۳. نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه هواشناسی اصفهان (OIFM)

Fig. 3. The CALPUFF model domain with terrain elevations and the position of the meteorological station of Isfahan (OIFM)

CALMET استفاده کرد. فایل Geo.dat حاوی اطلاعات ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه (مانند ارتفاع نقاط شبکه، نوع کاربری زمین، زبری سطح، نسبت بوآن، آلودگی سطح، شار حرارتی خاک و دیگر موارد) و هم‌چنین نوع شبکه‌بندی است. جدول ۲ نشان‌دهنده مشخصات پارامترهای تعریف شده در مدل CALMET برای شبیه‌سازی ژئوفیزیکی شبکه محاسباتی مورد نظر است.

داده‌های عوارض زمین توسط مدل TERREL و داده‌های کاربری زمین توسط مدل CTGPROC پردازش شده و در نهایت خروجی این دو مدل برای ترکیب کردن پارامترهای آن‌ها در مدل MAKEGEO اجرا می‌شود. خروجی مدل MAKEGEO که به صورت فایل Geo.dat است را می‌توان به صورت مستقیم به عنوان یکی از ورودی‌های مدل

4 National Geospatial-Intelligence Agency

5 National Aeronautics and Space Administration (NASA)

1 Shuttle Radar Topography Mission

2 Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR)

3 Consortium for Spatial Information (CSI)

جدول ۲. پارامترهای ژئوفیزیکی تعریف شده در مدل CALMET بر اساس ناحیه موردنظر
Table 2. 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	۳۹
مختصات مبدأ در جهت x	۴۴۵/۷۵۹۶۴۴ کیلومتر
مختصات مبدأ در جهت y	۳۵۲۹/۱۸۴۵۷ کیلومتر
نیمکره - ژئوئید - الیپسوئید	شمالی - بیضوی بین المللی WGS۸۴
تعداد گره‌ها در جهت افقی و قائم	۲۰۰ × ۰۲۰ × ۱۰
ارتفاع وجه بالای هر گره در جهت قائم	۳۰۰۰، ۲۲۰۰، ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۶۴۰، ۳۰۰، ۱۶۰، ۱۰۰، ۶۰، ۲۰، ۰ متر
طول هر گره بر روی زمین	۰/۵ کیلومتر

پژوهش از مدل CALWRF برای استخراج و پردازش داده‌های هواشناسی موردنیاز مدل CALMET از بین ۱۲۰ پارامتر موجود در خروجی مدل WRF و ایجاد فایل سه بعدی هواشناسی ۳D.dat استفاده شده است.

جدول ۳. گزینه‌های شبیه‌سازی مدل WRF
Table 3. The WRF simulation option

پارامتر	ورودی مدل
میکروفیزیک	[۲۹] Lin et al. scheme
تابش طول موج کوتاه	[۳۰] Goddard Shortwave Scheme
تابش طول موج بلند	[۳۱] RRTM Longwave Scheme
لایه سطحی	[۳۲] Eta Similarity Scheme
سطح زمین	[۳۳] Noah Land Surface Model
لایه مرزی سیاره‌ای	[۳۴] Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)
کومولوس	[۳۵] Kain-Fritsch Scheme

به منظور صحت‌سنجی و ارزیابی مدل CALMET در شبیه‌سازی پروفیل‌های عمودی دما و باد از داده‌های ایستگاه سطحی هواشناسی فرودگاه اصفهان استفاده شده است. موقعیت مکانی این ایستگاه در شکل ۳ و مشخصات آن در جدول ۴ آورده شده است. داده‌های این ایستگاه از مرکز داده‌های ملی آب و هوایی ایالات متحده^۱ با فرمت ISH/ISD استخراج گردیده و با استفاده از مدل SURFGEN به فرمت مناسب (سری زمانی)، برای استفاده در مدل‌های ارزیابی تبدیل شده است.

جدول ۴. مشخصات ایستگاه هواشناسی اصفهان
Table 4. Description of Esfahan meteorological station

نام ایستگاه	شناسه ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع ایستگاه
هواشناسی فرودگاه شهید بهشتی (CIV/AFB)	۴۰۸۰۰۰	۵۱/۸۶۵۸ درجه شرقی	۳۲/۷۵۲۵ درجه شمالی	۱۵۴۲ متر

برای اجرای مدل CALMET، علاوه بر فایل Geo.dat به فایل دیگری با فرمت ۳D.dat نیز احتیاج است که فایل دوم، داده‌های هواشناسی با فرمت مناسب مدل CALMET است. برای تعیین مشخصات هواشناسی منطقه و ایجاد فایل ۳D.dat، نیاز به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک اصلی و داده‌های ایستگاه‌های جو بالا در منطقه مورد مطالعه است که با توجه به نبود داده‌های ایستگاه جو بالا در منطقه و ناقص بودن تعداد زیادی از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی سطحی (مانند داده‌های فشار، ارتفاع ابر و پوشش ابر)، از مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF (نسخه ۱-۵-۳) برای تعیین میدان سه بعدی هواشناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. سامانه مدل سازی پیشرفته WRF یک مدل میان‌مقیاس برای پیش‌بینی عددی وضع هوا است که می‌توان وضعیت‌های مختلف جو را با استفاده از آن شبیه‌سازی نمود. مدل WRF برای تک‌تک نقاط شبکه (سطح زمین، دریا و دیگر موارد) به صورت سه بعدی در تمام ترازهای ارتفاعی، پارامترهای هواشناسی موردنیاز مدل CALMET را تعیین می‌کند. شرح مدل WRF از جمله طرح‌واره فرآیندهای فیزیکی موجود در مدل (مواردی همچون میکروفیزیک، تابش موج بلند، تابش موج کوتاه، لایه سطحی، لایه مرزی سیاره‌ای و کومولوس)، در جدول ۳ آورده شده است. مدل WRF با طرح میکروفیزیک لین و همکاران راه‌اندازی شده و طرح‌واره‌های Goddard و RRTM به ترتیب برای تابش با طول موج کوتاه و بلند مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌چنین مدل سطح زمین Noah برای محاسبه گرما و رطوبت در لایه‌های زیرین خاک استفاده شده و برای نشان دادن لایه مرزی سیاره‌ای بر روی دامنه از طرح‌واره MYJ استفاده گردیده است. داده‌های شرایط اولیه و شرایط مرزی هواشناسی موردنیاز برای مدل WRF از داده‌های جهانی 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 ۱ درجه استخراج شده است. در این

1 National Climatic Data Center (NCDC)

تبدیل شده، سپس میزان انتشار جرمی (g/s) گازها با توجه به اندازه دبی خروجی دودکش محاسبه و در مدل وارد می‌گردد. با توجه به مصرف سوخت گاز طبیعی در نیروگاه در بازه گرم سال و به دلیل ماهیت احتراق سوخت‌های گازی که اصولاً دمای شعله آن‌ها نسبت به سوخت‌های مایع کمتر است، مشاهده می‌شود که میزان انتشار آلاینده NOx در بازه گرم کمتر از بازه سرد سال است. نتایج حاصل از سنجش آلاینده NOx و مشخصات منبع آلودگی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. نرخ انتشار آلاینده‌های خروجی از دودکش‌های نیروگاه منتزری

Table 5. Stack characteristics and emission rates of NOx from Montazeri power plant

بازه زمانی	سوخت مصرفی	دودکش	دمای گاز خروجی (K)	سرعت گاز خروجی (m/s)	قطر داخلی دودکش (m)	نرخ انتشار NOx (g/s)
فصل سرد	مازوت	۱	۴۴۳/۷	۲۰/۱	۴/۶	۳۷۰/۷
		۲	۴۳۷/۲	۲۰/۸	۴/۶	۴۳۸/۴
فصل گرم	گاز طبیعی	۱	۴۲۷/۲	۱۸/۴	۴/۶	۱۸۵
		۲	۴۲۵/۱	۱۸/۶	۴/۶	۲۶۸/۳

و ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین (ارتفاع تنفسی) انجام گرفته است. به دلیل اینکه ترکیب آلودگی در زمان‌های مختلف یکسان نیست و بر اساس استانداردهای محیط‌زیست ایران و ایالات متحده نمونه برداری به صورت پیوسته انجام می‌شود و مدت زمان اندازه‌گیری ثابت و معین است؛ هم‌چنین تعیین ایستگاه‌های نمونه برداری با توجه استاندارد محیط‌زیست بر اساس محاسبات خیزش ستون دود، سرعت باد، جهت وزش باد غالب و اطلاعات هواشناسی انجام گرفته است. موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های پایش آلودگی در مختصات کارترین

Table 6. Location of air quality monitoring stations in study area

نام ایستگاه	موقعیت ایستگاه	(X (m	(Y (m	ارتفاع از سطح زمین (m) (z)
A	ضلع شمالی نیروگاه	۵۴۶/۱۱۷	۳۶۲۹/۷۹۹	۱/۵
B	ضلع غربی نیروگاه	۵۴۵/۸۴۲	۳۶۲۸/۷۰۰	۱/۵
C	ضلع جنوبی نیروگاه	۵۶۴/۹۳۱	۳۶۲۸/۰۷۳	۱/۵
D	ضلع شرقی نیروگاه	۵۴۷/۱۵۰	۳۶۲۹/۲۳۸	۱/۵

عبارت‌اند از مقاومت پوسته و مقاومت سطح مرجع که به ترتیب برابر 30 s/cm و 10 s/cm در نظر گرفته شده است. هم‌چنین ثابت شستشو در حالت بارش باران برای ترکیبات ثانویه NO_3 و HNO_3 به ترتیب برابر $0/000006$ و $0/000006$ قرار گرفته است. برای مکانیسم تغییرات شیمیایی آلاینده‌ها در جو، از طرح‌واره (MESOPUFF II) در مدل CALPUFF استفاده شده است که تبدیل دی‌اکسید گوگرد به سولفات

برای اجرای مدل CALPUFF علاوه بر اطلاعات خروجی مدل CALMET، داده‌های انتشار و مشخصات فیزیکی منبع آلودگی نیز مورد نیاز است. اطلاعات مربوط به سنجش گازهای خروجی از دودکش‌های نیروگاه به وسیله دستگاه سنجش Testo مدل XL350 انجام گرفته است. مقادیر به دست آمده برای غلظت گازها در این روش به صورت غلظت حجمی (ppm) است که پس از استانداردسازی فشار و دما بر اساس قانون گازهای ایدئال به غلظت جرمی (mg/m_3)

در این مطالعه، علاوه بر استفاده از پذیرنده‌های شبکه‌ای برای پوشش تمامی منابع در دامنه مطالعاتی از ۴ پذیرنده مجزا در نزدیکی نیروگاه به جهت در برگرفتن محدوده‌ای که توان بیان ویژگی‌های پدیده‌های جوی در مقیاس میانی و خرد و هم‌چنین اثرات توپوگرافی و کاربری اراضی را نیز دارا باشد [۳۶]، استفاده شده است (شکل ۱). نمونه برداری گاز آلاینده NO_2 در ۴ ایستگاه پایش آلودگی هوا توسط دستگاه Aeroqual که دارای حس‌گرهای الکتروشیمیایی قابل تعویض و ساخت کشور نیوزلند بوده، برای پذیرنده‌های واقع در سطح زمین

مدل CALPUFF علاوه بر مدل‌سازی پراکنش فیزیکی ذرات، واکنش‌های شیمیایی و تبدیلات شیمیایی اتفاق افتاده برای گازها و هم‌چنین ذرات را در حین انتقال و پخش و ته‌نشست شبیه‌سازی می‌کند. در این پژوهش، با فرض رفتار ذره‌ای آلاینده‌ها از گزینه‌های ته‌نشست خشک و تر آن‌ها در تنظیمات پراکنش مدل CALPUFF استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده برای ته‌نشست خشک

آلاینده‌های گفته‌شده، موردتوجه قرار نگرفته و تمام منابع انتشار به‌عنوان منبع نقطه‌ای در محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌است. مقدار پارامترهای مؤثر در پراکنش و ته‌نشست آلاینده‌های گازی مورد استفاده در مدل CALPUFF در جدول ۷ آمده است.

واکسید نیتروژن به آئروسول نیترات را در شرایط فازگازی و واکنش‌های فتوشیمیایی با آلاینده‌های پس‌زمینه (به‌عنوان مثال هیدروکربن‌ها، H₂O₂ و NH₃) را به صورت داخلی محاسبه می‌کند [۳۷]؛ اما در این مطالعه گزینه واکنش شیمیایی به علت نبود غلظت‌های پس‌زمینه

جدول ۷. پارامترهای مؤثر بر پخش و پراکنش آلاینده‌ها در مدل CALPUFF
Table 7. Effective Parameters of Dispersion of Pollutants in the CALPUFF

نوع آلاینده	ضریب پخش (s/cm ^۲)	واکنش‌پذیری	ثابت قانون هنری	ثابت جداسازی فازآب	مقاومت مزوفیل (s/cm)
NO _۲	۰/۱۶۵۶	۸	۳/۵	۱	۵
NO	۰/۱۳۴۵	۲	۱۸	۱	۲۵

کیفیت هوا و هم‌چنین پژوهش آقایان چنگ و هانا^۲ (۲۰۰۴)، معیارهایی برای صحت سنجی مدل‌های کیفیت هوا پیشنهاد گردیده است. هدف از تعیین این معیارها رد کردن یا پذیرفتن کامل یک مدل کیفیت هوا نیست بلکه ایجاد یک چارچوب مناسب برای درک نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی انجام شده است [۳۸] و [۴۰]. 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 مشاهده‌شده) متغیر است. به‌طورکلی مقدار بالاتر از نیم آن نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل است [۴۱]. شاخص FB بیانگر تمایل مدل به پیش‌بینی بیش‌ازحد و یا کمتر از حد واقعی می‌باشد. مقدار مثبت آن نمایانگر این است که مقدار پیش‌بینی شده کمتر از مقدار مشاهده شده است و مقدار منفی آن نشان‌دهنده این است که مقدار پیش‌بینی شده بیشتر از مقدار مشاهده شده است و صفر بودن آن نشان از ایدئال بودن مدل است [۴۰]. شاخص همبستگی پیرسون ارتباط بین نتایج خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری میدانی را نشان می‌دهد و دامنه تغییرات آن از -۱ تا +۱ است که هرچه قدر مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده یک مدل‌سازی موفق است [۳۸]. RMSE یک شاخص مناسب برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی توسط یک مجموعه از داده‌است که هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد نشان از دقت خوب مدل دارد. شاخص NMSE نیز مقدار پراکنندگی در کل مجموعه داده‌ها را نشان

۴-۲- تجزیه و تحلیل داده‌های آماری

در این پژوهش با استفاده از پارامترهای آماری پیشنهادی سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده و بر اساس ارزیابی کارگروه مدل‌سازی کیفیت هوا، از پنج پارامتر آماری آریبی کسری (FB)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، خطای میانگین مربع نرمال شده (NMSE)، شاخص توافق (IOA) و ضریب همبستگی پیرسون (R) جهت ارزیابی عملکرد داده‌های شبیه‌سازی شده مدل‌های کیفیت هوا استفاده شده است [۳۸ و ۳۹]. فرمول‌های مورد استفاده برای استخراج این پنج شاخص توسط معادله‌های ۱ تا ۵ آورده شده است.

$$FB = \frac{(\bar{O}_i - \bar{P}_i)}{0.5(\bar{O}_i + \bar{P}_i)} \quad (1)$$

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

$$NMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - P_i)^2}{O_i P_i} \quad (3)$$

$$IOA = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{P}_i|)}{N \cdot RMSE^2} \right] \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\left(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2 \right)^{1/2}} \quad (5)$$

که در آن P_i داده‌های خروجی مدل، O_i داده‌های میدانی (پایش)، P_i میانگین داده‌های خروجی مدل، O_i میانگین داده‌های میدانی و N تعداد کل داده‌های اندازه‌گیری شده است.

بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته توسط کارگروه مدل‌سازی

2 Joseph C. Chang & Steven Hanna

1 Interagency Workgroup on Air Quality Modeling

می‌دهد و همانند RMSE مقادیر کوچک‌تر آن نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است [۳۸ و ۴۰].

۳- بحث و نتایج

۳-۱- ارزیابی شبیه‌سازی‌های هواشناسی

در این پژوهش به منظور بررسی قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی هواشناسی از چهار شاخص اعتبارسنجی (IOA، FB، NMSE و RMSE) استفاده شده است. نتایج ارزیابی آماری با استفاده از مقایسه داده‌های دما و سرعت باد مدل شده و مشاهده شد در ایستگاه هواشناسی اصفهان برای دو مدل WRF و CALMET در جدول‌های ۸ و ۹ آورده شده است. در ارزیابی هواشناسی مدل WRF، مقادیر شاخص توافق IOA برای دما در بازه سرد و گرم سال به ترتیب ۰/۸۳۲۶ و ۰/۹۱۳۷ است؛ هم‌چنین IOA برای سرعت باد در بازه سرد و گرم به ترتیب برابر ۰/۵۹۲۵ و ۰/۶۳۰۱ است. مقدار میانگین NMSE و FB در فصل سرد به ترتیب برابر ۰/۵۳۹۰ و ۰/۱۸۰ و ۰/۶۳۳۵ و ۲/۶۳۳۵ برای دما و ۰/۲۷۲۸ و ۱/۰۶۸۰ و ۲/۱۱۱۲ برای سرعت باد و در فصل گرم به ترتیب برابر ۰/۲۶۴۰ و ۰/۰۰۱۸ و ۱/۷۲۶۳ برای دما و ۰/۲۵۳۲ و ۰/۴۷۹۰ و ۲/۳۵۴۱ برای سرعت باد است. در ارزیابی هواشناسی مدل CALMET نیز، مقادیر شاخص توافق IOA برای دما در بازه سرد و گرم سال به ترتیب ۰/۹۱۶۲ و ۰/۹۵۲۴ و برای سرعت باد ۰/۷۳۰۵ و ۰/۸۵۰۷ است. مقدار میانگین FB به طور قابل توجهی کمتر از مقدار میانگین آن در مدل WRF است، به طوری که در بازه سرد سال

برای دما و ۰/۰۰۲۵ و برای دما و ۰/۰۵۹۶ برای سرعت باد است و در بازه گرم سال ۰/۰۰۱۴ و ۰/۰۱۵۲ برای دما و ۰/۰۱۵۲ برای سرعت باد است. مقادیر میانگین NMSE و RMSE نیز کم‌تر از نتایج آن در مدل WRF هستند و به ترتیب برابر ۰/۰۰۱۰ و ۰/۰۲۵۱ برای دما و ۰/۰۸۷۵ و ۰/۵۹۷۵ برای سرعت باد در بازه سرد سال و ۰/۰۰۰۱ و ۰/۵۹۰۱ برای دما و ۰/۰۶۲۳ و ۰/۷۴۵۲ برای سرعت در بازه گرم سال است. به طور کلی مشخص است که مدل CALMET داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل WRF را با استفاده از تطبیق داده‌های WRF با داده‌های توپوگرافی و کاربری زمین به طور قابل قبولی بهبود بخشیده است. هم‌چنین با بررسی دو جدول ایستگاه اصفهان می‌توان دریافت که نتایج به دست آمده در بازه گرم سال بهتر از نتایج به دست آمده از بازه سرد سال است؛ که از دلایل آن می‌توان به وجود شرایط باد آرام در بازه سرد سال اشاره کرد که باعث ایجاد محدودیت در مدل‌های هواشناسی می‌شود. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از داده‌های مدل WRF به عنوان فرض اولیه مدل CALMET برای تولید میدان هواشناسی سه بعدی منطقه منجر به دقت قابل قبولی در تجزیه و تحلیل پخش و پراکنش غلظت آلاینده‌ها می‌شود. هم‌چنین با توجه به روند تغییرات میانگین دما و میانگین سرعت باد روزانه برای دو بازه سرد و گرم سال در ایستگاه هواشناسی اصفهان که در شکل ۴ آورده شده است، می‌توان تطابق و تشابه بین روند تغییرات دمایی و هم‌چنین روند تغییرات سرعت مشاهده شده با دما و سرعت‌های پیش‌بینی شده را مشاهده کرد که گویای نتایج قابل قبول مدل سازی است.

جدول ۸. نتایج ارزیابی مدل‌های WRF و CALMET در ایستگاه اصفهان (بازه سرد سال)

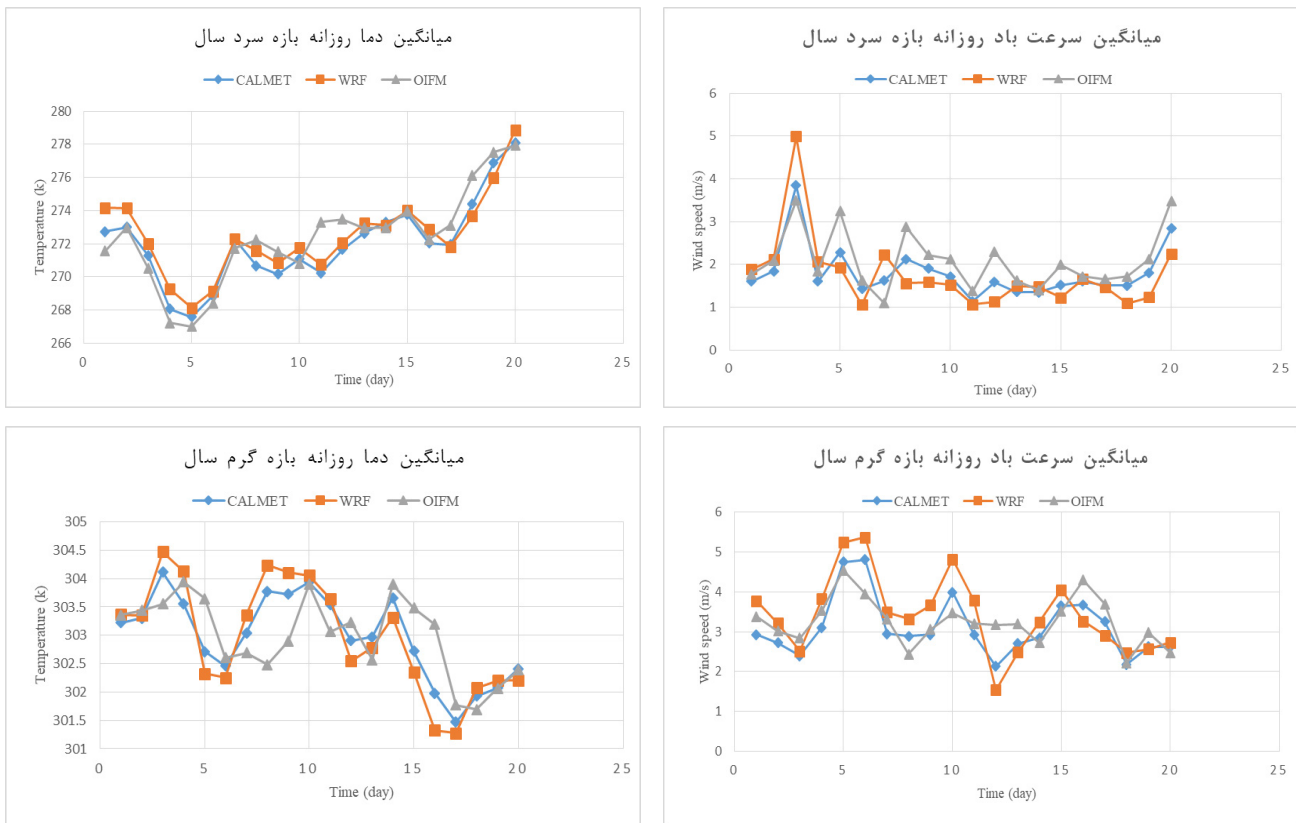
Table 8. Statistical verification for the CALMET and WRF simulation at meteorological monitoring site (Cold period)

WRF		CALMET		پارامتر آماری
سرعت باد	دما	سرعت باد	دما	
۰/۲۷۲۸	۰/۵۳۹۰	۰/۰۵۹۶	۰/۰۰۲۵	FB
۱/۰۶۸۰	۰/۰۱۸۰	۰/۰۸۷۵	۰/۰۰۱۰	NMSE
۲/۱۱۱۲	۲/۶۳۳۵	۰/۵۹۷۵	۱/۰۲۵۱	RMSE
۰/۵۹۲۵	۰/۸۳۲۶	۰/۷۳۰۵	۰/۹۱۶۲	IOA

جدول ۹. نتایج ارزیابی مدل های CALMET و WRF در ایستگاه اصفهان (بازه گرم سال)

Table 9. Statistical verification for the CALMET and WRF simulation at meteorological monitoring site (Warm period)

WRF		CALMET		پارامتر آماری
سرعت باد	دما	سرعت باد	دما	
-۰/۲۵۳۲	-۰/۲۶۴۰	-۰/۰۱۵۲	-۰/۰۰۱۴	FB
۰/۴۷۹۰	-۰/۰۰۱۸	۰/۰۶۲۳	-۰/۰۰۰۱	NMSE
۲/۳۵۴۱	۱/۷۲۶۳	۰/۷۴۵۲	۰/۵۹۰۱	RMSE
۰/۶۳۰۱	۰/۹۱۳۷	۰/۸۵۰۷	۰/۹۵۲۴	IOA



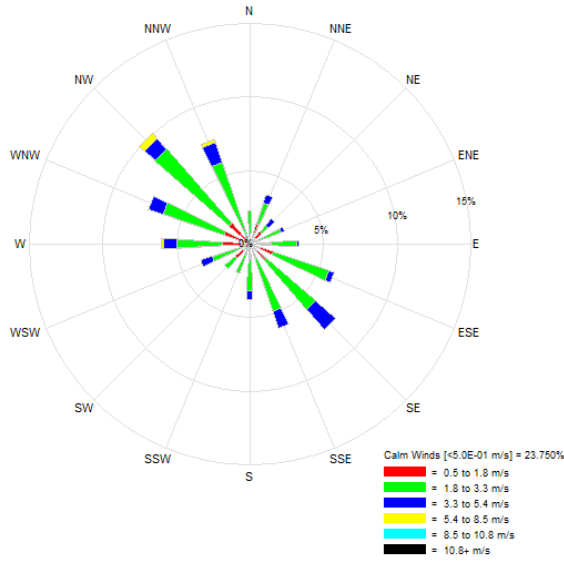
شکل ۴. مقایسه روند تغییرات دما و سرعت باد در دو بازه مدل سازی

Fig. 4. Average daily variations in observed and simulated wind speeds and temperatures

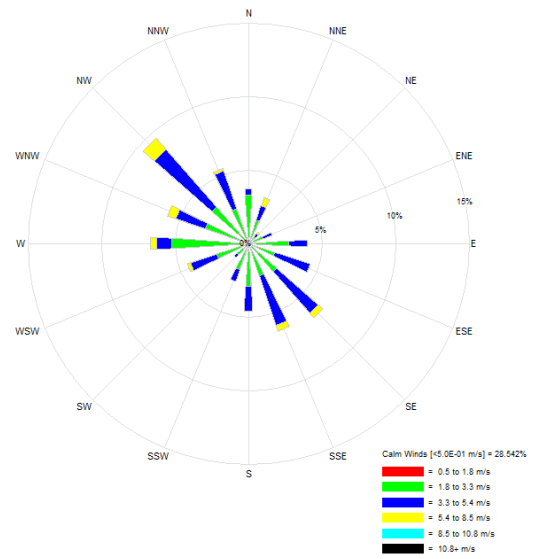
هواشناسی فرودگاه اصفهان در جدول ۹ آورده شده است. با توجه گلباد منطقه و اثر شرایط هواشناسی بر پخش و پراکنش آلاینده های هوا، می توان گفت که آلاینده های منتشر شده از نیروگاه شهید منتظری که در شمال غربی اصفهان واقع شده است در بازه سرد سال به سمت شهر اصفهان منتقل شده که این امر باعث افزایش آلاینده ها در سطح شهر اصفهان و بروز خطرات بسیاری برای سلامتی مردم این شهر می شود. هم چنین در بازه گرم سال که جهت جریان باد از سمت دشت اصفهان به سمت کوهستان است، انتظار می رود در این بازه شهر اصفهان کمتر در معرض آلاینده های انتشار یافته از نیروگاه منتظری قرار بگیرد.

در شکل ۵ گلباد منطقه بر اساس داده های ایستگاه هواشناسی اصفهان و داده های مدل سازی شده برای دو بازه مورد نظر ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می شود در بازه سرد سال جهت باد در طول روز و شب عوض شده و در روز به سمت شمال غربی (جهت جریان باد از سمت دشت اصفهان به سمت کوهستان) و در شب به سمت جنوب شرقی (جهت جریان باد از سمت کوهستان به سمت دشت اصفهان) است. در بازه گرم سال نیز جهت غالب باد از سمت شرق و جنوب شرق به سمت غرب و شمال غرب (جهت جریان باد از سمت دشت اصفهان به سمت کوهستان) است. مشخصات ایستگاه سطحی

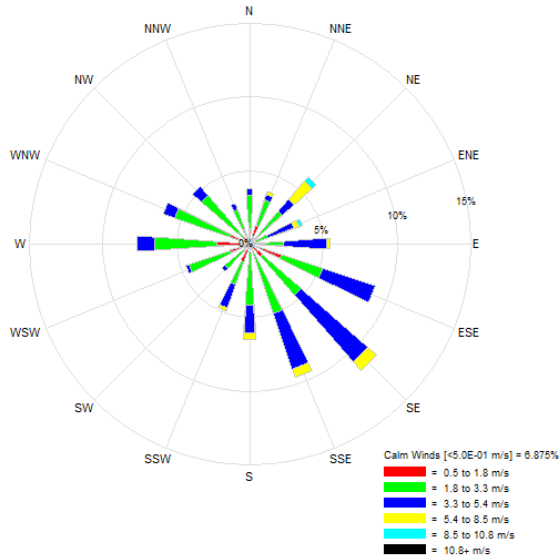
OIFM - CALMET.DAT: Interpolated to [(LJ)=(169.879, 90.132)]((X,Y)km=(580.847, 3623.248) in MODEL Projection]
Height = 10.00 m; [Jan 5, 2014 - 1:00:00 AM to Jan 25, 2014 - 12:00:00 AM (UTC+0300)]



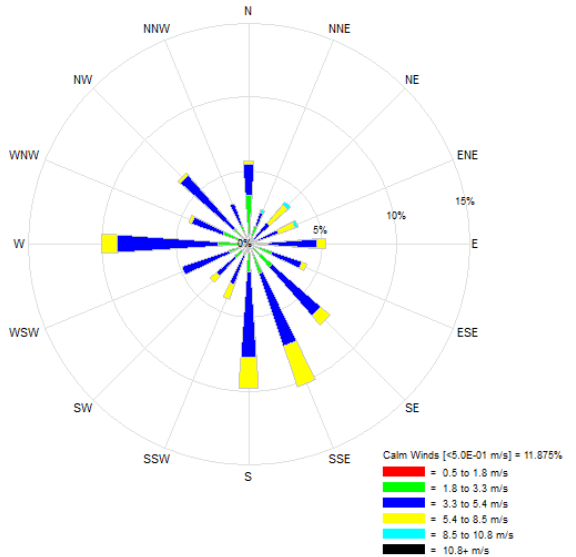
SURFACE - SURF.DAT: Station ID = 408000
Height = 10.00 m; [Jan 5, 2014 - 1:00:00 AM to Jan 25, 2014 - 12:00:00 AM (UTC+0300)]



OIFM - CALMET.DAT: Interpolated to [(LJ)=(169.879, 90.132)]((X,Y)km=(580.847, 3623.248) in MODEL Projection]
Height = 10.00 m; [Jul 25, 2014 - 1:00:00 AM to Aug 14, 2014 - 12:00:00 AM (UTC+0300)]



1OIFM - SURF.DAT: Station ID = 408000
Height = 10.00 m; [Jul 25, 2014 - 1:00:00 AM to Aug 14, 2014 - 12:00:00 AM (UTC+0300)]

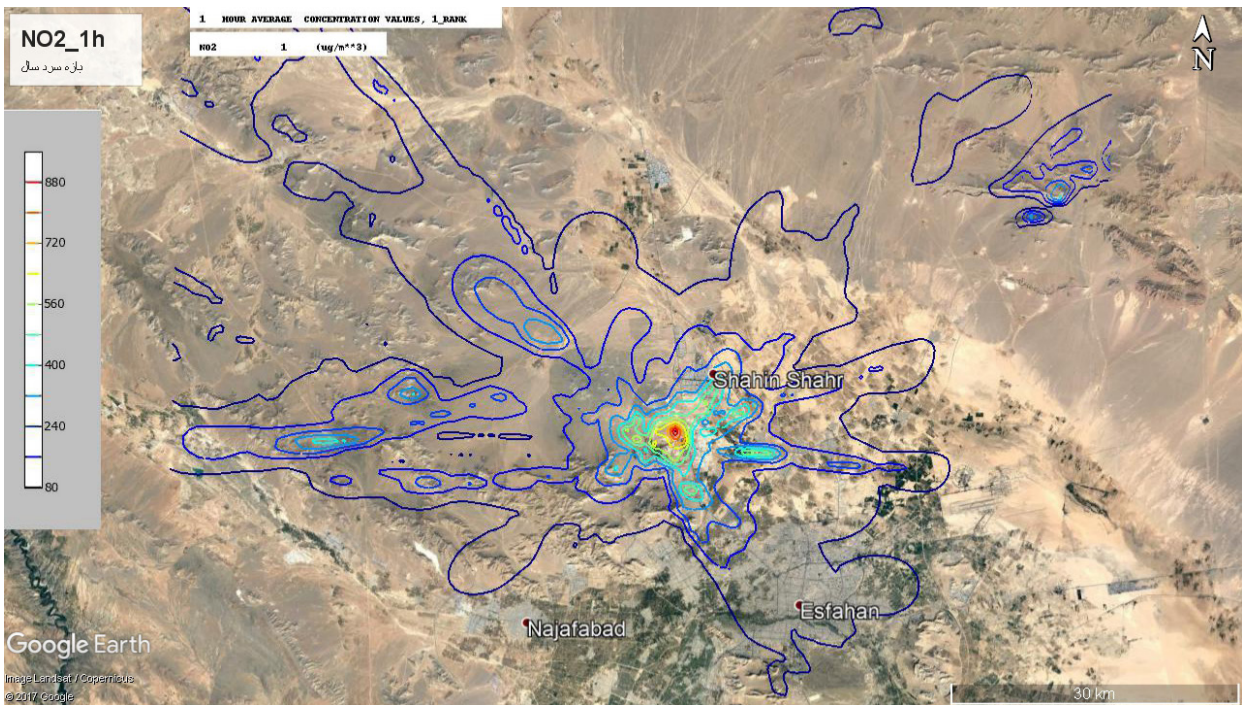


شکل ۵. گلبادهای منطقه براساس داده‌های مشاهده‌ای و مدل شده (گلباد بالا بازه سرد و گلباد پایین بازه گرم سال)
Fig. 5. Wind roses constructed from observed and simulated data from Esfahan surface station. (a) Simulated data in cold period, (b) simulated data in warm period, (c) observed data in cold period, and the (d) observed data in warm period

کاهش ارتفاع لایه مخلوط هوا در این بازه عنوان کرد. از طرف دیگر با بررسی شکل پراکنش آلاینده NO_p در بازه گرم سال کاملاً مشخص است که با توجه به جهت حرکت باد و هم‌چنین به علت افزایش ارتفاع لایه مخلوط هوا که منجر به افزایش دامنه پراکنش آلاینده‌ها به سوی مناطق کوهستانی شده، آلاینده‌ها به سمت غرب و شمال غرب نیروگاه انتقال یافته و در نتیجه شهر اصفهان در این بازه کمتر در معرض این قرار گرفته است.

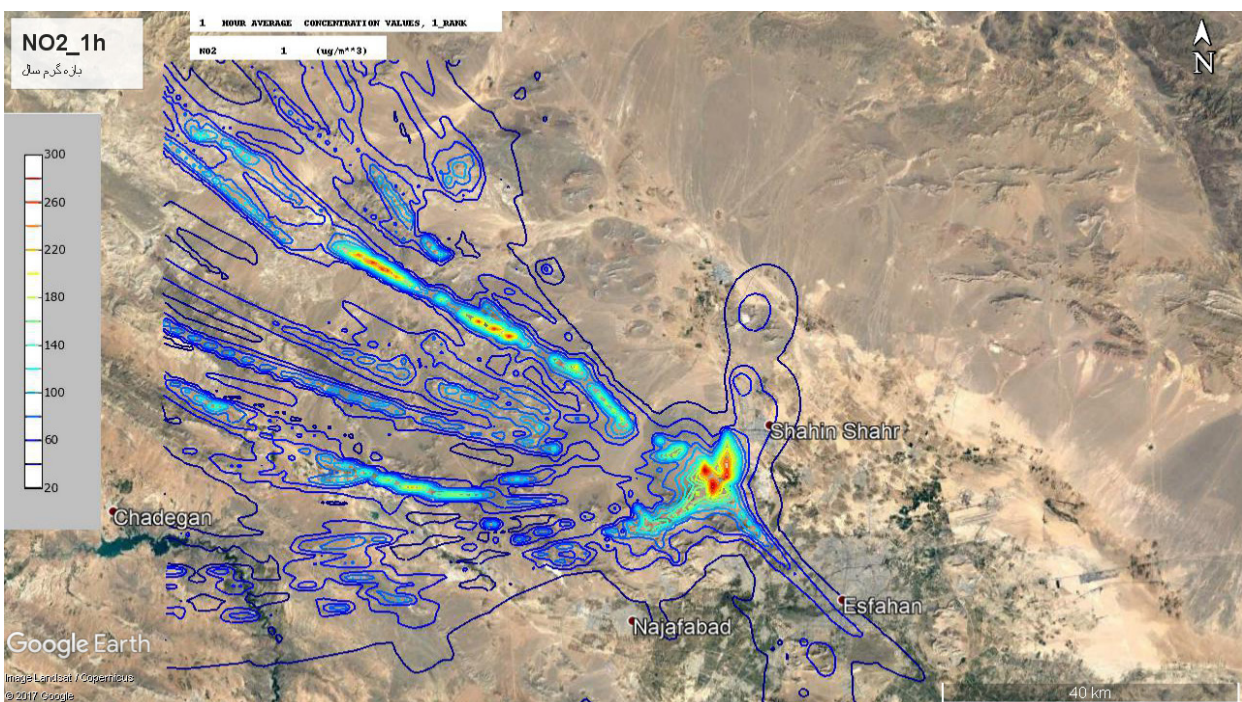
۲-۳- توزیع غلظت آلاینده‌های هوا

نتایج توزیع غلظت آلاینده NO_p در محدوده مطالعاتی با مرکزیت نیروگاه شهید منتظری در دو بازه سرد و گرم از سال ۲۰۱۴ بر اساس متوسط یک ساعته در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی پراکنش آلاینده‌ها در بازه سرد سال به صورت یک محیط چتری شکل به مرکزیت نیروگاه منتظری است که می‌توان آن را به دلیل سرعت کم باد، نحوه توزیع آن و هم‌چنین



شکل ۶. نحوه توزیع غلظت آلاینده NO₂ به صورت متوسط یک ساعته در بازه سرد سال ۲۰۱۴

Fig. 6. Distribution of NO₂ pollutant concentrations as an average of one hour in the cold period of 2014



شکل ۷. نحوه توزیع غلظت آلاینده NO₂ به صورت متوسط یک ساعته در بازه گرم سال ۲۰۱۴

Fig. 7. Distribution of NO₂ pollutant concentrations as an average of one hour in the warm period of 2014

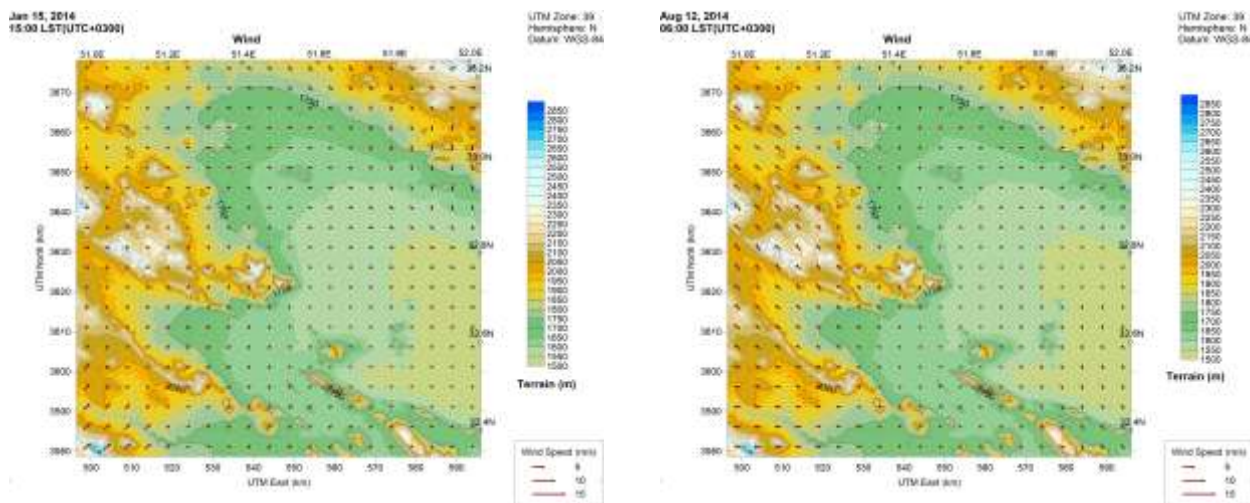
یک ساعته در بازه سرد سال بر روی اکثر مناطق شهر اصفهان کمتر از مقدار استاندارد غلظت متوسط سازمان محیط زیست کشور برای کیفیت هوای آزاد است؛ هم چنین نتایج غلظت متوسط یک ساعته آن در بازه گرم سال بر روی شهر اصفهان نیز نشان از کم تر بودن غلظت NO₂ از مقدار استاندارد سازمان محیط زیست دارد.

مهم ترین نکته درباره نتایج توزیع غلظت آلاینده ها، مقدار بالای غلظت متوسط یک ساعته NO₂ در محدوده مطالعاتی و به خصوص اطراف نیروگاه در بازه سرد سال است، به طوری که مقدار غلظت آن بیشتر از مقادیر غلظت متوسط استاندارد یک ساعته سازمان محیط زیست است (بیش تر از ۲۰۰ میکروگرم بر مترمکعب). با این وجود غلظت متوسط

خود قرار دارد. میزان غلظت بالای آلاینده‌های NO و NO₂ ایجاد شده توسط نیروگاه منتظری و وجود مناطق مسکونی بسیاری در نزدیکی و به‌ویژه شرق نیروگاه ممکن است باعث ایجاد اثرات منفی بسیاری بر سلامتی در این مناطق به‌خصوص در بازه سرد سال شود.

نکته مهم در اینجا وجود صنایع پتروشیمی و پالایشگاه اصفهان در نزدیکی نیروگاه منتظری است که با آزاد کردن مقادیر زیادی از ترکیبات آلی فرار شرایط را برای به وجود آمدن مه دود فتوشیمیایی فراهم می‌کنند. مه دود و یا اسماگ معمولاً در نتیجه واکنش‌های پیچیده فتوشیمیایی ایجاد می‌شود. این واکنش‌ها مابین ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن و در حضور نور خورشید صورت می‌گیرند و در نهایت به تولید ازن تروپوسفری (O₃) و پیروکسی استیل نیترات (PAN) می‌انجامند [۴۲]. مشکلات سلامتی همانند مشکل در تنفس، آسم، کاهش مقاومت در برابر عفونت‌های شش و سرماخوردگی و آبریزش چشم را باید از اثرات مه دود و یا اسماگ دانست. این مواد سرطان‌زا علاوه بر ایجاد حساسیت‌های تنفسی سبب افزایش شیوع بیماری‌های قلبی و سرطان ریه در افراد می‌شود. ازن اسماگ و یا مه دود از رشد گیاهان ممانعت می‌کند و می‌تواند سبب آسیب گسترده به محصولات کشاورزی شود و علاوه بر همه این‌ها غباری ایجاد می‌کند که قابلیت رؤیت را کم می‌نماید. مه دود و یا غبار به‌ویژه در هنگام مشاهده کوه‌ها و دیگر مناظر زیبا مورد توجه قرار می‌گیرد [۴۳].

بررسی نتایج خروجی مدل در بازه سرد نشان می‌دهد که حداکثر غلظت متوسط یک‌ساعته NO و NO₂ به ترتیب برابر ۱۰۵۹/۶ μg/m³ و ۹۸۰/۵ μg/m³ است که این پیک غلظت در ساعت ۱۵ بعد ظهر روز ۱۵ ژانویه و در شرق نیروگاه رخ می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۸ پیداست در ساعتی که غلظت ماکزیمم رخ می‌دهد، جریان آرام باد در منطقه حاکم می‌باشد؛ هم‌چنین در این ساعت ارتفاع لایه مخلوط هوا کمی بالاتر از ارتفاع دودکش‌های نیروگاه منتظری قرار دارد که باعث به دام افتادن آلاینده‌ها در زیر این لایه مخلوط می‌شود. شرایط هواسناسی و توپوگرافی پیچیده منطقه مورد مطالعه، نقش مهمی در نحوه پراکنش آلاینده‌ها و به دست آمدن غلظت بالای NO₂ در مجاورت نیروگاه منتظری دارد. همان‌طور که از گلباد بازه سرد سال (شکل ۵) مشخص است، ۲۳/۷۵ درصد سرعت بادهای شبیه‌سازی شده منطقه در گروه بادهای آرام قرار دارد و تقریباً بقیه سرعت‌ها هم در محدوده بین ۰/۵ تا ۳/۳ متر قرار گرفته‌اند که در این شرایط، الگوهای آلاینده هوا تحت تأثیر تعامل گردش جریان آرام باد محلی، توپوگرافی پیچیده و پایداری جوی قرار گرفته و باعث ایجاد بیش‌ترین میزان غلظت آلاینده‌ها در سطح زمین می‌شود. حداکثر غلظت متوسط یک‌ساعته NO و NO₂ به ترتیب با مقدار ۱/۲۹۸ μg/m³ و ۴/۳۱۱ μg/m³ در بازه گرم سال در ساعت ۶ صبح روز ۱۲ آگوست در غرب نیروگاه رخ می‌دهد که با توجه به شکل ۸ شرایط باد آرام در منطقه حاکم است؛ هم‌چنین در این ساعت ارتفاع لایه مخلوط هوا در کمترین مقدار



شکل ۸. بردار باد در دو بازه سرد و گرم سال در شرایط حداکثر غلظت آلاینده‌ها

Fig. 8. Wind field for study area in maximum concentration of pollutants during (a) cold period and (b) warm period

بررسی قرار گرفته‌است. نتایج میانگین غلظت حاصل از مدل‌سازی آلاینده NO₂ در ۴ پذیرنده مورد نظر در دو بازه سرد و گرم سال در جدول ۱۰ آورده شده‌است. همان‌طور که از نتایج پیداست، در بازه سرد و گرم سال بیشترین میانگین غلظت آلاینده‌ها به ترتیب در ایستگاه

۳-۳- ارزیابی عملکرد مدل CALPUFF

در این پژوهش با استفاده از مقایسه داده‌های غلظت خروجی مدل CALPUFF با داده‌های غلظت اندازه‌گیری شده در ۴ ایستگاه پایش آلودگی هوای اطراف نیروگاه، عملکرد مدل CALPUFF مورد

نتایج از پایش‌های محیطی که در بازه زمانی یک‌ساعته انجام شده، استفاده شده است. بررسی غلظت‌های پایش شده آلاینده‌های NO_2 در ۴ پذیرنده نشان‌دهنده آن است که متوسط غلظت NO_2 در بازه سرد سال در محدوده 51/36-59/7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ و متوسط غلظت آن در بازه گرم سال در محدوده 62/21-76/4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ قرار دارد که نشان‌دهنده کاهش غلظت این آلاینده نسبت به بازه سرد سال است. این نتایج به دلیل برخی از محدودیت‌ها نمی‌تواند نماینده کیفیت هوای منطقه باشد زیرا علاوه بر در نظر نگرفتن منابع انتشار از صنایع مجاور و منابع متحرک مانند خودروها، تشکیل آلاینده‌های ثانویه (تشکیل آئروسول آلی ثانویه) نیز در این مطالعه گنجانده نشده است [۴۱]. با این وجود، سازمان محیط‌زیست ایران برای آلاینده NO_2 معیار محیط‌زیستی تعریف کرده است، از این رو مهم است که توزیع غلظت کلی و میزان سهم NO_2 برای کنترل مشکلات کیفیت هوا در منطقه مورد توجه قرار گیرد.

پایش D (ضلع شرقی نیروگاه) و ایستگاه پایش B (ضلع غربی نیروگاه) رخ داده است که می‌توان علت آن را جهت حرکت باد در این دو بازه زمانی دانست. کمتر بودن مقادیر داده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهده‌ای را می‌توان به دلیل در نظر نگرفتن غلظت پس‌زمینه آلاینده‌ها یا انتقال آلاینده‌های ناشی از وجود صنایع آلاینده دیگر در مجاورت نیروگاه دانست. اگرچه به دلیل در نظر نگرفتن غلظت پس‌زمینه آلاینده‌ها و یا انتشار نامشخص آلاینده‌ها روش مدل‌سازی مورد استفاده در اینجا برای پیش‌بینی غلظت‌های کمی به معنای دقیق توصیه نمی‌شود؛ با این وجود، بسیاری از محققان از این نوع روش مدل‌سازی برای ارزیابی کیفیت هوا در مناطق هدف استفاده کرده‌اند. هم‌چنین عموماً فرض می‌شود که انتشارهای نامشخص و غلظت‌های پس‌زمینه در طول دوره تحقیق، عوامل ثابتی هستند [۱۷] و ۴۴ و ۴۵]. بررسی نتایج خروجی مدل نشان می‌دهد که حداکثر غلظت در بازه زمان یک‌ساعته اتفاق افتاده است، از این رو جهت صحت‌سنجی

جدول ۱۰. مقایسه میانگین مقادیر داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای در ۴ ایستگاه پایش اطراف نیروگاه

Table 10. A comparison of the mean values of simulated and observed data at 4 monitoring stations around the power plant

بازه زمانی	ایستگاه پایش	NO_2	
		میانگین غلظت مشاهده شده ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	میانگین غلظت پیش‌بینی شده ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
بازه سرد سال	A	۲۱/۰۰	۱۶/۲۰
	B	۱۱/۰۰	۷/۵۹
	C	۲۸/۰۰	۲۰/۰۰
	D	۴۱/۰۰	۳۶/۵۱
بازه گرم سال	A	۲۵/۰۰	۱۹/۵۰
	B	۳۰/۰۰	۲۱/۶۲
	C	۱۴/۰۰	۱۱/۰۶
	D	۷/۰۰	۴/۷۶

بازه گرم سال در محدوده ۰/۰۲۲-۰/۰۸۲ قرار دارد. با بررسی مقادیر به‌دست آمده برای شاخص آریبی کسری (FB) به این نتیجه می‌رسیم که در مجموع، مدل نتایج به‌دست آمده برای غلظت آلاینده NO_2 را زیر مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است. مقدار شاخص NMSE و RMSE نیز برای آلاینده NO_2 در بازه سرد سال به ترتیب در محدوده ۰/۰۳۵-۰/۰۱۳ و ۴/۱۳۶-۱/۱۴۰ است و در بازه گرم سال به ترتیب در محدوده ۰/۰۸۸-۰/۰۰۵ و ۳/۵۰۱-۱/۰۸۵ قرار دارد. به‌طور کلی با توجه به محدودیت‌های گفته شده در مورد پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که نتایج محاسبه شده برای پارامترهای آماری نشان‌دهنده توافق منطقی و قابل قبولی بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های مشاهده‌ای است.

نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌های خروجی مدل CALPUFF در جدول ۱۱ آورده شده است. مقدار شاخص R که نشان‌دهنده همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است برای آلاینده NO_2 در بازه سرد سال در محدوده ۰/۷۰۶-۰/۸۹۲ و در بازه گرم سال در محدوده ۰/۷۶۷-۰/۹۳۴ قرار دارد. مقدار شاخص IOA نیز در بازه سرد و گرم سال به ترتیب در محدوده ۰/۷۵۶-۰/۵۸۵ و ۰/۸۶۵-۰/۶۷۶ است. با توجه به این نکته که برای عملکرد کامل و بی‌نقص یک مدل مقدار ضریب IOA باید برابر با یک باشد می‌توان گفت که این نتایج گویای عملکرد کامل مدل نیست؛ اما نشان‌دهنده عملکرد منطقی مدل در پیش‌بینی داده‌های غلظت آلاینده‌ها است. مقدار شاخص FB در بازه سرد سال در محدوده ۰/۱۶۵-۰/۰۶۳ و در

جدول ۱۱. نتایج صحت‌سنجی مدل برای آلاینده NO₂ در دو بازه زمانی موردنظر

Table 11. Model validation results for NO₂ in two time intervals

NO ₂					ایستگاه پایش	بازه زمانی
RMSE	NMSE	FB	IOA	R		
۲/۱۴۰	۰/۰۳۱	۰/۰۸۵	۰/۷۱۲	۰/۷۸۱	A	بازه سرد سال
۴/۱۳۶	۰/۰۱۳	۰/۰۷۰	۰/۵۸۵	۰/۷۰۶	B	
۲/۶۵۱	۰/۰۲۸	۰/۰۶۳	۰/۷۱۰	۰/۷۳۰	C	
۱/۱۴۰	۰/۰۳۵	۰/۱۶۵	۰/۷۵۶	۰/۸۹۲	D	
۳/۰۱۰	۰/۰۸۸	۰/۰۸۲	۰/۶۷۶	۰/۸۸۰	A	بازه گرم سال
۱/۳۶۰	۰/۰۰۶	۰/۰۷۶	۰/۷۴۵	۰/۸۲۱	B	
۱/۰۸۵	۰/۰۰۵	۰/۰۵۵	۰/۸۶۵	۰/۹۳۴	C	
۳/۵۰۱	۰/۰۴۸	۰/۰۲۲	۰/۷۱۶	۰/۷۶۷	D	

این فصل و مجهز نبودن هیچ‌یک از دودکش‌های آن به سیستم‌های کاهش این آلاینده خروجی دانست؛ بنابراین مدیران محیط زیست باید اقدامات نظارتی را برای بدترین حالت‌ها در مواقعی که نیروگاه از سوخت مازوت استفاده می‌کند، هدف قرار دهند. نتایج آنالیز آماری به‌کاررفته برای مدل CALPUFF نیز نشان از توافق منطقی و قابل قبول داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و داده‌های مشاهده‌ای در ۴ پذیرنده مجزا در اطراف نیروگاه بوده و در مجموع با توجه به ارزیابی‌های صورت گرفته، می‌توان عملکرد مدل CALPUFF را در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها با دقت بالایی، قابل قبول دانست. به‌منظور مدیریت کیفیت هوا، به‌عنوان مثال توسعه استراتژی کنترل و ارزیابی ظرفیت انتقال آلاینده‌ها در منطقه، میزان و نحوه انتشار آلاینده‌ها در منطقه باید مدنظر قرار گیرد. به همین جهت می‌توان از مدل پراکندگی CALPUFF به‌عنوان یک ابزار علمی مناسب برای تجزیه و تحلیل استراتژی‌های کنترل و سیاست‌گذاری برای کاهش و پیش‌گیری از آلودگی هوا استفاده نمود.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و تقدیر صمیمانه خود را از مدیریت محترم سازمان محیط زیست استان اصفهان به خاطر همکاری در اجرای این تحقیق و هماهنگی در راستای استفاده از منابع اطلاعاتی ابراز نمایند.

مراجع

[1] M.J. Molina, L.T. Molina, Megacities and atmospheric pollution, Journal of the Air & Waste Management Association, 54(6) (2004) 644-680.
 [2] S. Sakulniyomporn, K. Kubaha, C. Chullabodhi, Estimating the health damage costs of electricity generation in Thailand, in: Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD), 2010 Proceedings of the International Conference on,

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از سیستم مدل‌سازی یکپارچه - WRF CALPUFF به شبیه‌سازی نحوه توزیع پخش و پراکنش آلاینده خروجی از دودکش‌های نیروگاه شهید محمد منتظری اصفهان پرداخته شده است. در ابتدا مطالعات و بررسی‌هایی در ارتباط با نحوه عملکرد، محدودیت‌ها و قابلیت‌های مدل CALPUFF و پیش‌پردازنده‌های آن مانند مدل هواشناسی CALMET صورت گرفته؛ سپس نحوه همبسته‌سازی مدل عددی هواشناسی WRF با مدل فرایابی هواشناسی CALMET برای به‌دست آوردن میدان سه‌بعدی باد در منطقه شرح داده شده است. در مرحله بعد کلیه اطلاعات در رابطه با مقادیر اندازه‌گیری شده آلاینده‌های منتشرشده از دودکش‌های نیروگاه و پارامترهای هواشناسی از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه گردآوری و اطلاعات موردنیاز جهت اجرای مدل CALPUFF تهیه شده است. بعد از اجرای مدل به‌منظور صحت‌سنجی و تعیین عملکرد مدل‌های به‌کاررفته شده، نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های اندازه‌گیری محیطی مقایسه و با استفاده از سری روابط آماری، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج چهار شاخص آماری به‌کاررفته برای آنالیز مدل‌سازی هواشناسی منطقه نمایانگر دقت قابل اطمینان 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 است. نتایج حاصل از توزیع پراکنش آلاینده NO_x نشان از ارتباط تنگاتنگ بین نوسانات توزیع فضایی غلظت این آلاینده با شرایط فصلی هواشناسی مانند سرعت و جهت باد و شرایط جوی محلی (پایداری جوی) دارد. هم‌چنین بررسی توزیع غلظت آلاینده NO_x شبیه‌سازی شده در بازه سرد سال نشان از وضعیت بد کیفیت هوا برای آلاینده NO₂ در نواحی نزدیک به نیروگاه است که می‌توان آن را به دلیل استفاده نیروگاه از سوخت مازوت در

- ing the 12th FYP period in Guiyang city of China, *Atmospheric Environment*, 69 (2013) 273-280.
- [17] K. Ghannam, M. El-Fadel, Emissions characterization and regulatory compliance at an industrial complex: an integrated MM5/CALPUFF approach, *Atmospheric Environment*, 69 (2013) 156-169.
- [18] S.A. Abdul-Wahab, K. Chan, A. Elkamel, L. Ahmadi, Effects of meteorological conditions on the concentration and dispersion of an accidental release of H₂S in Canada, *Atmospheric Environment*, 82 (2014) 316-326.
- [19] K. Prueksakorn, T.-H. Kim, C. Vongmahadlek, Applications of WRF/CALPUFF modeling system and multi-monitoring methods to investigate the effect of seasonal variations on odor dispersion: a case study of Changwon City, South Korea, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 7(1) (2014) 13-27.
- [20] P. Holnicki, A. Kaluszko, W. Trapp, An urban scale application and validation of the CALPUFF model, *Atmospheric Pollution Research*, 7(3) (2016) 393-402.
- [21] S. Abdul-Wahab, G. Al-Rawas, S. Ali, S. Fadlallah, H. Al-Dhamri, Atmospheric dispersion modeling of CO₂ emissions from a cement plant's sources, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(6) (2017) 1621-1638.
- [22] J.S. Scire, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino, A user's guide for the CALPUFF dispersion model, Earth Tech, Inc. Concord, MA, (2000).
- [23] J.S. Scire, D.G. Strimaitis, F.R. Robe, Evaluation of enhancements to the CALPUFF model for offshore and coastal applications, *Federal Register*, (2003).
- [24] 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).
- [25] A.D. Visscher, CALPUFF AND CALMET, in: *Air Dispersion Modeling*, John Wiley & Sons, Inc, 2013, pp. 514-541.
- [26] 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.
- [27] A. Hernández-Garcés, J.A. Souto, Á. Rodríguez, S. Saavedra, J.J. Casares, Validation of CALMET/CALPUFF models simulations around a large power plant stack, *Física de la Tierra*, 27 (2015) 35.
- [28] 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).
- [29] Y.-L. Lin, R.D. Farley, H.D. Orville, Bulk parameterization IEEE, 2010, pp. 1-9.
- [3] S. Nazari, O. Shahhoseini, A. Sohrabi-Kashani, S. Davari, H. Sahabi, A. Rezaeian, SO₂ pollution of heavy oil-fired steam power plants in Iran, *Energy policy*, 43 (2012) 456-465.
- [4] Statistical Report on 49 Years of Activities of Iran Electric Power Industry (1967-2015), Tavanir Holding Company, Iran, 2016.
- [5] M. Lopez, M. Zuk, V. Garibay, G. Tzintzun, R. Iniestra, A. Fernandez, Health impacts from power plant emissions in Mexico, *Atmospheric environment*, 39(7) (2005) 1199-1209.
- [6] J. Hao, L. Wang, M. Shen, L. Li, J. Hu, Air quality impacts of power plant emissions in Beijing, *Environmental Pollution*, 147(2) (2007) 401-408.
- [7] L. Cox, R. Blaszczak, Nitrogen oxides (NO_x) why and how they are controlled, DIANE Publishing, 1999.
- [8] H. Yu, A.L. Stuart, Spatiotemporal distributions of ambient oxides of nitrogen, with implications for exposure inequality and urban design, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(8) (2013) 943-955.
- [9] S. Abdul-Wahab, A. Sappurd, A. Al-Damkhi, Application of California Puff (CALPUFF) model: a case study for Oman, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(1) (2011) 177-189.
- [10] B. Chowdhury, P.K. Karamchandani, R.I. Sykes, D.S. Henn, E. Knipping, Reactive puff model SCICHEM: Model enhancements and performance studies, *Atmospheric Environment*, 117 (2015) 242-258.
- [11] N.S. Holmes, L. Morawska, A review of dispersion modeling and its application to the dispersion of particles: an overview of different dispersion models available, *Atmospheric environment*, 40(30) (2006) 5902-5928.
- [12] S. Li, S. Xie, Spatial distribution and source analysis of SO₂ concentration in Urumqi, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(35) (2016) 15899-15908.
- [13] 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.
- [14] D. Yang, G. Chen, R. Zhang, Estimated Public Health Exposure to H₂S Emissions from a Sour Gas Well Blowout in Kaixian County, China, *Aerosol and Air Quality Research*, 6(4) (2006) 430-443.
- [15] D.L. MacIntosh, J.H. Stewart, T.A. Myatt, J.E. Sabato, G.C. Flowers, K.W. Brown, D.J. Hlinka, D.A. Sullivan, Use of CALPUFF for exposure assessment in a near-field, complex terrain setting, *Atmospheric Environment*, 44(2) (2010) 262-270.
- [16] H. Tian, P. Qiu, K. Cheng, J. Gao, L. Lu, K. Liu, X. Liu, Current status and future trends of SO₂ and NO_x pollution dur-

- [38] J.S. Irwin, Interagency workgroup on air quality modeling (IWAQM) phase 2 summary report and recommendations for modeling longrange transport impacts, DIANE Publishing, 1998.
- [39] A.Q. Branch, Reassessment of the Interagency Workgroup on Air Quality Modeling (IWAQM) Phase 2 Summary Report: Revisions to Phase 2 Recommendations, (2009).
- [40] J. Chang, S. Hanna, Air quality model performance evaluation, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1) (2004) 167-196.
- [41] H.D. Lee, J.W. Yoo, M.K. Kang, J.S. Kang, J.H. Jung, K.J. Oh, Evaluation of concentrations and source contribution of PM10 and SO2 emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF-CALPUFF modeling tools, *Atmospheric Pollution Research*, 5(4) (2014) 664-676.
- [42] K. Seangkiatiyuth, V. Surapipith, K. Tantrakarnapa, A.W. Lothongkum, Application of the AERMOD modeling system for environmental impact assessment of NO2 emissions from a cement complex, *Journal of Environmental Sciences*, 23(6) (2011) 931-940.
- [43] S. Sillman, Tropospheric ozone and photochemical smog, *Treatise on Geochemistry*, 9 (2003) 612.
- [44] J. Ma, H. Yi, X. Tang, Y. Zhang, Y. Xiang, L. Pu, Application of AERMOD on near future air quality simulation under the latest national emission control policy of China: A case study on an industrial city, *Journal of Environmental Sciences*, 25(8) (2013) 1608-1617.
- [45] B. Zou, J.G. Wilson, F.B. Zhan, Y. Zeng, K. Wu, Spatial-temporal variations in regional ambient sulfur dioxide concentration and source-contribution analysis: A dispersion modeling approach, *Atmospheric environment*, 45(28) (2011) 4977-4985.
- of the snow field in a cloud model, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6) (1983) 1065-1092.
- [30] M.-D. Chou, M.J. Suarez, X.-Z. Liang, M.M.-H. Yan, C. Cote, A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies, (2001).
- [31] 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.
- [32] Z. Janjic, The surface layer parameterization in the NCEP Eta Model, *World Meteorological Organization-Publications-WMO TD*, (1996) 4.16-14.17.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] J.S. Kain, The Kain-Fritsch convective parameterization: an update, *Journal of Applied Meteorology*, 43(1) (2004) 170-181.
- [36] F. Jafarigol, F. Atabi, M. Momeni, The Survey of NOX Distribution Using Dispersion Models AERMOD and CALPUFF at a Gas Refinery, *Journal of Environmental Health Engineering*, 3(3) (2016) 193-205.
- [37] J.S. Scire, Z.-X. Wu, D.G. Strimaitis, Implementation and Evaluation of ISORROPIA in CALPUFF, (2013).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Rahimian, Y. Rashidi, A. Rashidi Mehrabadi, The analysis on distribution of NOX pollutant concentration from exhaust flues in shahid montazeri power plant at Isfahan using combined WRF-CALPUFF model *,Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(2)(2019)297-313.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13434.5408

