Archive of SID

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۲، سال ۱۳۹۸، صفحات ۲۹۷ تا ۳۱۳
DOI : 10.22060/ceej.2018.13434.5408

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

یوسف رشیدی[۱]، محسن رحیمیان ، عبداله رشیدی مهرآبادی[۲]

[۱]پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
[۲]دانشکده 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 شبیه‌سازی توزیع غلظت آلاینده‌های هوای NOX خروجی از دودکش‌های نیروگاه منتظری اصفهان در دو بازه ۲۰ روزه از فصل‌های سرد و گرم سال ۲۰۱۴ پرداخته‌شده و سپس با استفاده از آنالیز آماری توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌ها، مورد ارزیابی قرارگرفته است. نتایج شاخص‌های آماری به‌کاررفته در این پژوهش بر اساس معیارهای ارائه‌شده برای آن‌ها، حاکی از توانایی بالای مدل CALMET در شبیه‌سازی میدان سه بعدی هواشناسی مورد نیاز مدل CALPUFF دارد. همچنین با توجه به معیارهای ارائه‌شده برای شاخص‌های آماری، نتایج این شاخص‌ها نشان از توافق قابل‌قبول بین داده‌های غلظت شبیه‌سازی‌شده توسط مدل CALPUFF و داده‌های غلظت مشاهده‌ای ایستگاه‌های پایش آلودگی داشته‌اند؛ به‌طوری‌که مقدار شاخص همبستگی پیرسون که ارتباط بین نتایج خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری میدانی را نشان می‌دهد، برای آلاینده NO۲ 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 NO۲ به ترتیب در محدوده ۰/۱۶۵-۰/۰۶۳ و ۰/۰۸۲-۰/۰۲۲ قرار دارد. نتایج شاخص FB نشان‌دهنده آن است که درمجموع مدل نتایج به‌دست‌آمده برای غلظت آلاینده NO۲ را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است که با توجه به در نظر نگرفتن غلظت پس‌زمینه این آلاینده در مجاورت نیروگاه، می‌توان به عملکرد منطقی مدل در پیش‌بینی غلظت آلاینده NO۲ اشاره کرد. به‌طورکلی نتایج ارزیابی‌های آماری انجام‌گرفته در این پژوهش، نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول مدل CALPUFF در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های موردنظر 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:**
مدل‌سازی 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 سوخت‌های فسیلی، آلودگی هوا به یکی از پیچیده‌ترین مشکل‌ها و معضلات، خصوصاً در شهرهای بزرگ جهان تبدیل شده‌است و به‌تبع آن مسئله آلودگی هوا و کنترل آن بیش‌ازپیش اهمیت یافته‌است [۱]. سوزاندن سوخت‌های فسیلی به‌منظور تولید انرژی الکتریسیته در نیروگاه‌های حرارتی یکی از علل عمده مشکل‌های زیست‌محیطی مؤثر بر هر دو سطح محلی و جهانی است؛ بااین‌حال، مهم‌ترین منابع انرژی در جهان و به‌خصوص در کشورهای درحال‌توسعه نیروگاه‌های تولید برق هستند که روزانه حجم عظیمی از آلاینده‌های گوناگون غیرسازگار با مکانیسم‌های طبیعی محیط‌زیست را وارد جو می‌کنند [۲]. مصرف برق در ایران در سال‌های اخیر به دلیل توسعه اقتصادی، صنعتی شدن و افزایش جمعیت رشد قابل‌توجهی را تجربه کرده‌است. به‌طوری‌که سرانه تولید انرژی الکتریکی از ۳۰۰ کیلووات ساعت در سال ۱۹۷۳ به ۳۵۰۵ کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۴ افزایش یافته‌است. با توجه به شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی ایران و هم‌چنین کاهش بارندگی در چند سال گذشته و افت سطح آب پشت سدها، تولید برق توسط نیروگاه‌های سوخت فسیلی شدت یافته‌است تا جایی که در سال ۲۰۱۴، ۹۳/۲ درصد از کل برق تولیدی کشور توسط این نیروگاه‌ها تولید شده‌است [۳ و ۴].

قرار گرفتن در معرض برخی از آلاینده‌های انتشاریافته از نیروگاه‌های تولید برق که در نزدیکی مناطق مسکونی واقع شده‌اند باعث ایجاد اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان می‌شود. در میان آلاینده‌های هوای ناشی از نیروگاه‌های حرارتی، گاز دی‌اکسید گوگرد ($SO_2$)، اکسیدهای نیترون (NOX) و ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون (PM10) اهمیت ویژه‌ای دارند [۵ و ۶]. اکسیدهای نیتروژن NOX شامل خانواده‌ای از هفت نوع ترکیب مختلف است که از آن میان، اکسید نیتریک (NO) و دی‌اکسید نیتروژن ($NO_2$) از آلوده‌کننده‌های مهم هوا به شمار می‌روند. بااین‌وجود، آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده (EPA) فقط دی‌اکسید نیتروژن ($NO_2$) را به‌عنوان آلاینده هوای اصلی برای این خانواده در نظر

نویسنده عهده‌دار مکاتبات : y_rashidi@sbu.ac.ir



www.SID.ir

Archive of SID



گرفته‌است؛ زیرا این ترکیب متداول‌ترین شکل NOx در جو است که از طریق فعالیت‌های انسانی تولید می‌شود. $NO_2$ طی فرآیندهای پیچیده اتمسفربه ذرات معلق نیترات ($NO_3$) تبدیل می‌شود و در ترکیب با هوای مرطوب تولید اسید نیتریک ($HNO_3$) می‌کند که موجب پوسیدگی شدید فلزات می‌شود. هم‌چنین در غلظت‌های بالا باعث ایجاد مه‌دود شده و میدان دید را به‌شدت 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، زغال‌سنگ و نفت، به‌خصوص در نیروگاه‌های تولید برق است. $NO_2$ به‌خودی خود نه‌تنها 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 ($O_3$) و باران اسیدی می‌شود [۷].

درزمینه اندازه‌گیری‌های محیط‌زیستی نیاز به شاخص و استاندارد برای اظهارنظر در مورد مقادیر اندازه‌گیری شده‌است. سازمان‌ها و انجمن‌های بسیاری درزمینه محیط‌زیست اقدام به وضع استاندارد نموده‌اند. از مهم‌ترین این سازمان‌ها می‌توان به سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده اشاره کرد. در ایران استانداردهای محیط‌زیستی توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست تدوین و بر اجرای آن نظارت می‌شود. استانداردهای کنونی سازمان محیط‌زیست ایران برای $NO_2$ شامل استاندار میانگین ۱ ساعته و سالیانه است که مقدار آن به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۱۰۰ $g/m^3$ است. $NO_2$ 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 کرده‌است. 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 شده‌است [۹]. مدل‌های کیفیت هوا ابزار ارزشمندی در ارائه مفاهیم فرآیندهای درگیر در انتقال، پراکنش و تبدیل شیمیایی 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 درزمینه مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های هوا توسط این مدل انجام شده‌است. ینگ و همکاران[1] (۲۰۰۶)، برای تخمین غلظت هیدروژن سولفید ($H_2S$) ناشی از فوران تصادفی در استخراج از چاه‌های نفت از مدل ترکیبی CALPUFF و MM۵ استفاده کردند. نتیجه این مطالعه تطابق خوب داده‌های خروجی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده هیدروژن سولفید را نشان می‌داد [۱۴]. مکینتاش و همکاران[2] (۲۰۱۰)، برای ارزیابی اثرات مواجهه آلایندگی 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]. قانم و الفادل[3] (۲۰۱۳) و تیان و همکاران[4] (۲۰۱۳)، در مطالعه‌هایی از نرم‌افزار CALPUFF برای مطالعه غلظت آلودگی‌های چندگانه ناشی از مناطق صنعتی استفاده کردند [۱۷ و ۱۶]. صباح عبدالوهاب و همکاران[5] (۲۰۱۴)، به مطالعه بررسی تأثیر شرایط ژئوفیزیکی و هواشناسی منطقه بر پراکندگی $NO_2$ خروجی یک پالایشگاه پیشنهادی واقع در کانادا پرداختند [۱۸]. پروکساکورن و همکاران[6] (۲۰۱۴)، در پژوهشی کاربرد روش‌های مدل‌سازی سیستم ترکیبی WRF-CALPUFF را به‌منظور بررسی اثر تغییرات فصلی پراکندگی بو در شهر چانگوون کره جنوبی موردبررسی قراردادند [۱۹]. هولنسکی و همکاران[7] (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 موردمطالعه بود؛ ولی برای دوره‌های زمانی کوتاه‌تر مانند یک ساعت و به‌خصوص برای شرایط باد آرام، نتایج قابل‌قبول نبودند [۲۰]. صباح عبدالوهاب و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی به

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



www.SID.ir

Archive of SID



شبیه‌سازی گاز گلخانه‌ای $CO_2$ ناشی از صنایع تولید سیمان با استفاده از سیستم مدل‌سازی 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 NOX خروجی از دودکش‌های نیروگاه محمد منتظری اصفهان در محدوده موردمطالعه انجام گرفته‌است. سپس نتایج غلظت میانگین ۱ ساعته داده‌های پیش‌بینی‌شده آلاینده $NO_2$ با مقدار غلظت استاندارد ملی آن مقایسه شده‌است و درنهایت با استفاده از تکنیک‌های آماری به صحت‌سنجی داده‌های میانگین هواشناسی و غلظت آلاینده‌های NOX در ایستگاه‌های هواشناسی و پایش آلودگی هوا پرداخته شده‌است. بازه زمانی مورداستفاده در این پژوهش سال ۲۰۱۴ است که برای فصل‌های گرم و سرد سال به‌صورت جداگانه مدل‌سازی پراکنش آلودگی هوا انجام گرفته‌است.

## ۲ـ مواد و روش‌ها

### ۲ـ۱ـ شرح سیستم مدل‌سازی WRF-CALPUFF

CALPUFF یک مدل چندلایه حالت ناپایدار برای پراکنش توده آلاینده است که به‌منظور شبیه‌سازی پراکنش گازها و ذرات با استفاده از داده‌های هواشناسی متغیر (ازلحاظ زمانی و مکانی) بر مبنای معادله‌های تشابه، تلاطم، قدرت انتشار و تبدیل و حذف طراحی گردیده‌است [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[1] در سال ۱۹۹۰ منتشر شده‌است. 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 ازجمله حالت‌هایی که عوارض پیچیده زمین وجود دارد و هم‌چنین در مکان‌هایی که جریان ساکن و جریان بازگشتی اهمیت دارد، مورد تائید قرار گرفته‌است [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 داده‌های توپوگرافی، نوع کاربری زمین، داده‌های هواشناسی مشاهده‌ای و داده‌های هواشناسی شبیه‌سازی‌شده به تعیین میدان دما و باد، بر اساس معادله بقای جرم بپردازد. علاوه بر میدان دما و باد، CALMET میدان‌های دوبعدی متغیرهای خرد هواشناسی موردنیاز برای انجام شبیه‌سازی‌های پراکنش آلاینده‌ها (ارتفاع اختلاط، طول مونین ابوخوف، 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 پیش یابنده (مدل پیش‌بینی عددی وضع هوای WRF و MM۵)، گرفته و با استفاده از داده‌های عوارض و کاربری زمین در شبکه‌بندی دقیق‌تر، مقادیر و میدان متغیرهای هواشناسی را برای مقیاس‌های ریزتر محاسبه کند. درواقع 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 مورداستفاده در مدل پخش و پراکنش آلودگی هوا می‌شود [۲۵].

CALPUFF، درواقع یک مدل چندلایه غیریکنواخت حرکت سیال است که براساس مدل پاف گاوسی - لاگرانژی[2]، طراحی شده‌است. 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 رو به پایین توده آلاینده به جهت وجود ساختمان‌ها، صعود توده آلاینده براثر نیروی شناورسازی و مؤمنتم، 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 شبیه‌سازی‌شده استفاده می‌شود [۲۲ و ۲۶].

### ۲ـ۲ـ محدوده موردمطالعه

منطقه موردمطالعه 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 ناحیه‌ی نسبتاً کوهستانی در قسمت مرکزی فلات ایران قرارگرفته 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

1 California Air Resources Board (ARB)

2 Lagrangian Gaussian puff model

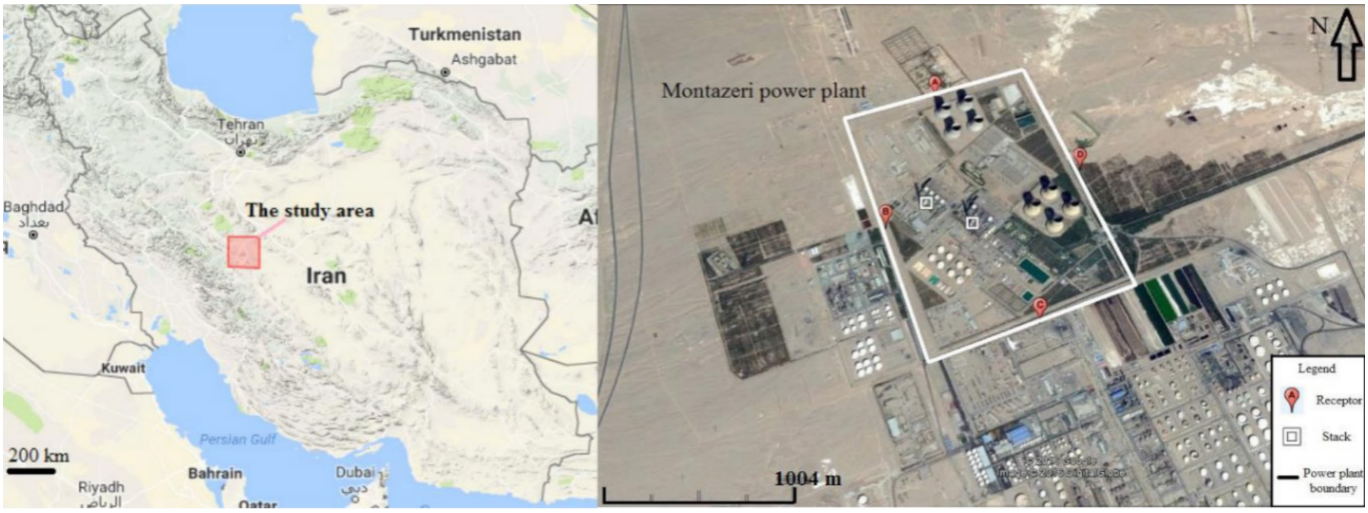


www.SID.ir

Archive of SID



است. آب‌وهوای این منطقه به‌طورکلی 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 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 موردمطالعه و نیروگاه شهید محمد منتظری اصفهان نشان داده شده‌است.




**شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه موردمطالعه 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**

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، هریک از واحدهای این نیروگاه دارای یک دودکش مستقل است که درمجموع دود نیروگاه از طریق هشت دودکش بزرگ با ارتفاع ۲۰۳ متر از سطح زمین (ارتفاع پایه دودکش‌ها از سطح دریا 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 مماس با یکدیگر واقع شده‌اند. با توجه به اینکه دودکش‌ها به یکدیگر چسبیده‌اند، خیزش دود خروجی ناشی از سرعت و حرارت دود به‌صورت 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**

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 افزایش‌یافته‌است، به‌طوری‌که مصرف سوخت نیروگاه از ۷۰ درصد گاز و ۳۰ درصد مازوت درگذشته، به ۲۰ درصد گاز و ۸۰ درصد مازوت در سال‌های اخیر رسیده‌است [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 لایه‌مرزی و رطوبت نسبی در یک منطقه در فصول مختلف، مدل‌سازی در دو بازه زمانی فصل گرم و فصل سرد انجام شده‌است. به علت حجم زیاد داده‌ها و فرآیند طولانی مدل‌سازی، برای هرکدام از فصول گرم و سرد سال، بازه زمانی ۲۰ روزه‌ای را به‌صورت پیوسته در نظر گرفته و مدل‌سازی در این بازه زمانی انجام گرفته‌است. در جدول ۱ بازه‌های زمانی مورداستفاده در این پژوهش آورده شده‌است.



www.SID.ir

Archive of SID



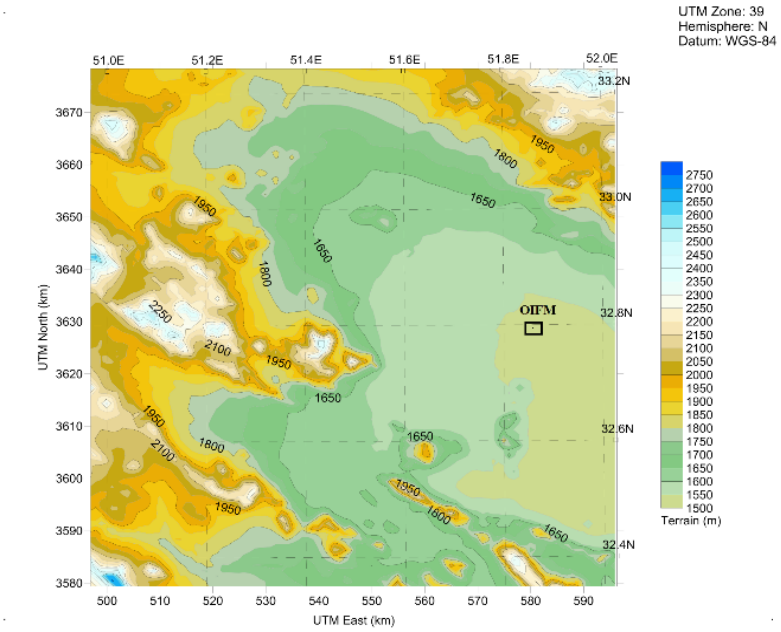
**جدول ۱. بازه زمانی مورداستفاده برای مدل‌سازی آلودگی هوا**

**Table 1. The time interval used for air pollution modeling**

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

## 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 ژئوفیزیکال از دو بخش اصلی و مهم داده‌های عوارض و کاربری زمین تشکیل شده‌است. در این پژوهش برای داده‌های عوارض زمین از فایل‌های توپوگرافی SRTM[1] (نسخه ۴/۱) که توسط گروه مشاورین تحقیقات بین‌المللی کشاورزی[2] و کنسرسیوم اطلاعات فضایی[3] جهت تولید سطوح توپوگرافی مورد پردازش قرار گرفته، استفاده شده‌است. این داده‌ها با فرمت Geotiff و با دقت مکانی ۹۰ متر در سیستم مختصات جغرافیایی با سطح‌مبنای مسطحاتی WGS-۱۹۸۴ و سطح‌مبنای ارتفاعی EGM-۹۶ تشکیل شده‌است. SRTM یک پروژه بین‌المللی به رهبری آژانس ملی اطلاعات ژئوفیزیکی[4] و سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات‌متحده[5] است که دارای یکی از کامل‌ترین پایگاه داده‌های توپوگرافی زمین به‌صورت دیجیتال و با وضوح بالا است [۲۸]. برای داده‌های کاربری زمین از فایل‌های UMDGLC با فرمت Geotiff و دقت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده شده‌است. UMDGLC داده‌های کاربری زمین با وضوح بالایی هستند که توسط سازمان فضایی ایالات‌متحده و به‌وسیله سنجنده‌های ماهواره‌ای پیشرفته MODIS (اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط) تهیه و توسط دانشگاه ایالتی مریلند ایالات‌متحده توسعه داده می‌شوند. در شکل ۳، نقشه توپوگرافی منطقه موردمطالعه آورده شده‌است.




**شکل ۳. نقشه توپوگرافی منطقه موردمطالعه و موقعیت ایستگاه هواشناسی اصفهان (OIFM)**

**Fig. 3. The CALPUFF model domain with terrain elevations and the pos tion of the meteorolo gical station of Isfahan (OIFM)**

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 به‌صورت فایل Geo.dat است را می‌توان به‌صورت مستقیم به‌عنوان یکی از ورودی‌های مدل CALMET استفاده کرد. فایل Geo.dat حاوی اطلاعات ژئوفیزیکی منطقه موردمطالعه (مانند ارتفاع نقاط شبکه، نوع کاربری زمین، زبری سطح، نسبت بوآن، آلبیدو سطح، شار حرارتی خاک و دیگر موارد) و هم‌چنین نوع شبکه‌بندی است. جدول ۲ نشان‌دهنده مشخصات پارامترهای تعریف‌شده در مدل CALMET برای شبیه‌سازی ژئوفیزیکی شبکه محاسباتی موردنظر است.

1 Shuttle Radar Topography Mission
2 Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR)
3 Consortium for Spatial Information (CSI)
4 National Geospatial-Intelligence Agency
5 National Aeronautics and Space Administration (NASA)



www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۲. پارامترهای ژئوفیزیکی تعریف‌شده 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 بین‌المللی ۸۴ WGS |
| تعداد گره‌ها در جهت افقی و قائم | ۱۰ × ۲۰ × ۲۰۰ |
| ارتفاع وجه بالای هر گره در جهت قائم | ۰، ۲۰، ۶۰، ۱۰۰، ۱۶۰، ۳۰۰، ۶۴۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۲۰۰، ۳۰۰۰ متر |
| طول هر گره بر روی زمین | ۰/۵ کیلومتر |

برای اجرای مدل CALMET، علاوه بر فایل Geo.dat به فایل دیگری با فرمت 3D.dat نیز احتیاج است که فایل دوم، داده‌های هواشناسی با فرمت مناسب مدل CALMET است. برای تعیین مشخصات هواشناسی منطقه و ایجاد فایل 3D.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 سه‌بعدی هواشناسی منطقه موردمطالعه استفاده شده‌است. سامانه مدل‌سازی 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) به‌صورت سه‌بعدی در تمام ترازهای ارتفاعی، پارامترهای هواشناسی موردنیاز مدل CALMET را تعیین می‌کند. شرح مدل WRF ازجمله طرح‌واره فرآیندهای فیزیکی موجود در مدل (مواردي همچون میکروفیزیک، تابش موج بلند، تابش موج کوتاه، لایه سطحی، سطح زمین، لایه‌مرزی سیاره‌اي و کومولوس)، در جدول ۳ آورده شده‌است. 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 گرفته‌است. هم‌چنین مدل سطح زمین Noah برای محاسبه گرما و رطوبت در لایه‌های زیرین خاک استفاده‌شده و برای نشان دادن لایه‌مرزی سیاره‌ای بر روی دامنه از طرح‌واره MYJ استفاده گردیده‌است. داده‌های شرایط اولیه و شرایط مرزي هواشناسی موردنیاز برای مدل WRF از داده‌هاي جهانی FNL موجود در پایگاه داده‌های NCEP / NCAR وابسته به سازمان ملی جو و اقیانوس‌شناسی ایالات‌متحده و با گام زمانی ۶ ساعته و تفکیک مکانی ۱ درجه استخراج شده‌است. در این 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 سه‌بعدی هواشناسی 3D.dat استفاده شده‌است.

**جدول ۳. گزینه‌های شبیه‌سازی مدل WRF**

**Table 3. The WRF simulation option**

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

به‌منظور صحت‌سنجی و ارزیابی مدل CALMET در شبیه‌سازی پروفیل‌های عمودی دما و باد از داده‌های ایستگاه سطحی هواشناسی فرودگاه اصفهان استفاده شده‌است. موقعیت مکانی این ایستگاه در شکل ۳ و مشخصات آن در جدول ۴ آورده شده‌است. داده‌های این ایستگاه از مرکز داده‌های ملی آب‌وهوایی ایالات‌متحده[1] با فرمت ISH / ISD استخراج گردیده و با استفاده از مدل SURFGEN به فرمت مناسب (سری زمانی)، برای استفاده در مدل‌های ارزیابی تبدیل شده‌است.

**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 |

1 National Climatic Data Center (NCDC)



www.SID.ir

Archive of SID



برای اجرای مدل CALPUFF علاوه بر اطلاعات خروجی مدل CALMET، داده‌های انتشار و مشخصات فیزیکی منبع آلودگی نیز موردنیاز است. اطلاعات مربوط به سنجش گازهای خروجی از دودکش‌های نیروگاه به‌وسیله دستگاه سنجش Testo مدل XL350 انجام گرفته‌است. مقادیر به‌دست آمده برای غلظت گازها در این روش به‌صورت غلظت حجمی (ppm) است که پس از استانداردسازی فشار و دما بر اساس قانون گازهای ایدئال به غلظت جرمی ($mg/m_3$) تبدیل‌شده، سپس میزان انتشار جرمی (g/s) گازها با توجه به‌اندازه 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 شده‌است.

**جدول ۵. نرخ انتشار آلاینده‌های خروجی از دودکش‌های نیروگاه منتظری**

**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 |

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 شده‌است (شکل ۱). نمونه‌برداری 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 و ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین (ارتفاع تنفسی) انجام گرفته‌است. به دلیل اینکه ترکیب آلودگی در زمان‌های مختلف یکسان نیست و بر اساس استانداردهای محیط‌زیست ایران و ایالات‌متحده نمونه‌برداری به‌صورت پیوسته انجام می‌شود و مدت‌زمان اندازه‌گیری ثابت و معین است؛ هم‌چنین تعیین ایستگاه‌های نمونه‌برداری با توجه استاندارد محیط‌زیست بر اساس محاسبات خیزش ستون دود، سرعت باد، جهت وزش باد غالب و اطلاعات هواشناسی انجام‌گرفته‌است. موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در جدول ۶ آورده شده‌است.

**جدول ۶. موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های پایش آلودگی در مختصات کارتزین**

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

| نام ایستگاه | موقعیت ایستگاه | X (m) | Y (m) | ارتفاع از سطح زمین z (m) |
|---|---|---|---|---|
| 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 |

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 شده‌است. پارامترهای مورداستفاده برای ته‌نشست خشک عبارت‌اند از مقاومت پوسته و مقاومت سطح مرجع که به ترتیب برابر ۳۰ s/cm و ۱۰ s/cm در نظر گرفته‌شده‌است. هم‌چنین ثابت شستشو در حالت بارش باران برای ترکیبات ثانویه NO3 و HNO3 به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۰۰۶ قرار گرفته‌است. برای مکانیسم تغییرات شیمیایی آلاینده‌ها در جو، از طرح‌واره (MESOPUFF II) در مدل CALPUFF استفاده شده‌است که تبدیل دی‌اکسید گوگرد به سولفات



www.SID.ir

Archive of SID



و اکسید نیتروژن به آئروسل نیترات را در شرایط فاز گازی و واکنش‌های فتوشیمیایی با آلاینده‌های پس‌زمینه (به‌عنوان‌مثال هیدروکربن‌ها، H2O2 و NH3) را به صورت داخلی محاسبه می‌کند [۳۷]؛ اما در این مطالعه گزینه واکنش شیمیایی به علت نبود غلظت‌های پس‌زمینه آلاینده‌های گفته‌شده، موردتوجه قرار نگرفته و تمام منابع انتشار به‌عنوان منبع نقطه‌ای در محدوده موردمطالعه در نظر گرفته شده‌است. مقدار پارامترهای مؤثر در پراکنش و ته‌نشست آلاینده‌های گازی مورداستفاده در مدل CALPUFF در جدول ۷ آمده است.

**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/cm۲) | واکنش‌پذیری | ثابت قانون هنری | ثابت جداسازی فاز آب | مقاومت مزوفیل (s/cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| $NO_2$ | ۰/۱۶۵۶ | ۸ | ۳/۵ | ۱ | ۵ |
| NO | ۰/۱۳۴۵ | ۲ | ۱۸ | ۱ | ۲۵ |

## ۴ـ۲ـ تجزیه‌وتحلیل داده‌های آماری

در این پژوهش با استفاده از پارامترهای آماری پیشنهادی سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده و بر اساس ارزیابی کارگروه مدل‌سازی کیفیت هوا[1]، از پنج پارامتر آماری اُریبی 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 شبیه‌سازی‌شده مدل‌های کیفیت هوا استفاده شده‌است [۳۸ و ۳۹]. فرمول‌های مورداستفاده برای استخراج این پنج شاخص توسط معادله‌های ۱ تا ۵ آورده شده‌است.

$$FB = \frac{\left(\overline{O_i} - \overline{P_i}\right)}{0.5\left(\overline{O_i} + \overline{P_i}\right)} \quad (۱)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - O_i\right)^2\right]^{1/2} \quad (۲)$$

$$NMSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(O_i - P_i\right)^2}{\overline{O_i}\,\overline{P_i}} \quad (۳)$$

$$IOA = 1 - \left[\frac{N.RMSE^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\left|P_i - \overline{O_i}\right| + \left|O_i - \overline{O_i}\right|\right)}\right] \quad (۴)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(O_i - \overline{O_i}\right)\left(P_i - \overline{P_i}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{N}\left(O_i - \overline{O_i}\right)^2\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - \overline{P_i}\right)^2\right)^{1/2}} \quad (۵)$$

که در آن Pi داده‌های خروجی مدل، Oi داده‌های میدانی (پایش)، $P_i$ میانگین داده‌های خروجی مدل، $O_i$ میانگین داده‌های میدانی و N تعداد کل داده‌های اندازه‌گیری شده‌است.

بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته توسط کارگروه مدل‌سازی کیفیت هوا و هم‌چنین پژوهش آقایان چنگ و هانا[2] (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 شده‌است [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 ارزیابی‌شده سنجیده می‌شود. مقدار شاخص توافق بین دو عدد صفر (حداقل مقدار نظری برای پیش‌بینی نادرست) و یک (دقت کامل بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده) متغیر است. به‌طورکلی مقدار بالاتر از نیم آن نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول 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 پیش‌بینی‌شده کمتر از مقدار مشاهده شده‌است و مقدار منفی آن نشان‌دهنده این است که مقدار پیش‌بینی‌شده بیشتر از مقدار مشاهده شده‌است 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 هرچقدر 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 پراکندگی در کل مجموعه داده‌ها را نشان

1 Interagency Workgroup on Air Quality Modeling

2 Joseph C. Chang & Steven Hanna



www.SID.ir

Archive of SID



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

## ۳ـ بحث و نتایج

### ۱ـ۳ـ ارزیابی شبیه‌سازی‌های هواشناسی

در این پژوهش به‌منظور بررسی قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی هواشناسی از چهار شاخص اعتبار سنجی (IOA، FB، NMSE و RMSE) استفاده شده‌است. 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 شده‌است. 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 FB، NMSE و RMSE در فصل سرد به ترتیب برابر ۰/۵۳۹۰ و ۰/۰۱۸۰ 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 به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مقدار میانگین آن در مدل WRF است، به‌طوری‌که در بازه سرد سال ۰/۰۰۲۵ برای دما و ۰/۰۵۹۶ برای سرعت باد است و در بازه گرم سال ۰/۰۰۱۴- 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 ۱/۰۲۵۱ 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. به‌طور کلی مشخص است که مدل CALMET داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل WRF را با استفاده از تطبیق داده‌های WRF با داده‌های توپوگرافی و کاربری زمین به‌طور قابل‌قبولی بهبود بخشیده است. هم‌چنین با بررسی دو جدول ایستگاه اصفهان می‌توان دریافت که نتایج به‌دست آمده در بازه گرم سال بهتر از نتایج به‌دست 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. درنهایت می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از داده‌های مدل WRF به‌عنوان فرض اولیه مدل CALMET برای تولید میدان هواشناسی سه‌بعدی منطقه منجر به‌دقت قابل‌قبولی در تجزیه‌وتحلیل 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 شده‌است، می‌توان تطابق و تشابه بین روند تغییرات دمایی و هم‌چنین روند تغییرات سرعت مشاهده‌شده با دما و سرعت‌های پیش‌بینی‌شده را مشاهده کرد که گویای نتایج قابل‌قبول مدل‌سازی است.

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

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

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



www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۹. نتایج ارزیابی مدل‌های 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)**

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




**شکل ۴. مقایسه روند تغییرات دما و سرعت باد در دو بازه مدل‌سازی**

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

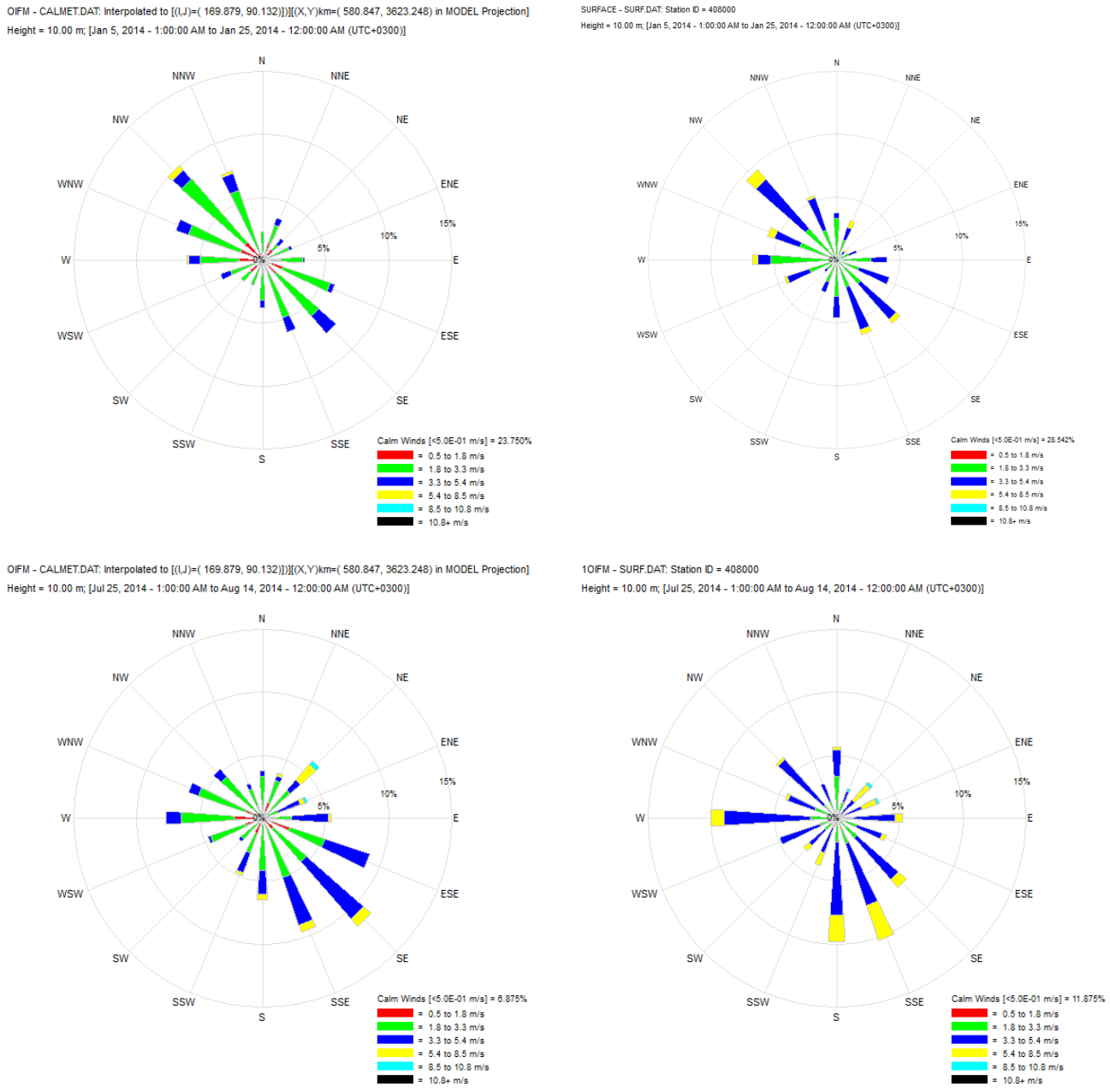
در شکل ۵ گلباد منطقه بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی اصفهان و داده‌های مدل‌سازی‌شده برای دو بازه موردنظر ترسیم شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه سرد سال جهت باد در طول روز و شب عوض‌شده و در روز به سمت شمال غربی (جهت جریان باد از سمت دشت اصفهان به سمت کوهستان) و در شب به سمت جنوب شرقی (جهت 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 هواشناسی فرودگاه اصفهان در جدول ۹ آورده شده‌است. با توجه گلباد منطقه و اثر شرایط هواشناسی بر پخش و پراکنش آلاینده‌های هوا، می‌توان گفت که آلاینده‌های منتشرشده از نیروگاه شهید منتظری که در شمال غربی اصفهان واقع شده‌است در بازه سرد سال به سمت شهر اصفهان منتقل‌شده که این امر باعث افزایش آلاینده‌ها در سطح شهر اصفهان و بروز خطرات بسیاری برای سلامتی مردم این شهر می‌شود. هم‌چنین در بازه گرم سال که جهت جریان باد از سمت دشت اصفهان به سمت کوهستان است، انتظار می‌رود در این بازه شهر اصفهان کمتر در معرض آلاینده‌های انتشاریافته از نیروگاه منتظری قرار بگیرد.



www.SID.ir

Archive of SID






**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**

## ۲-۳- توزیع غلظت آلاینده‌های هوا

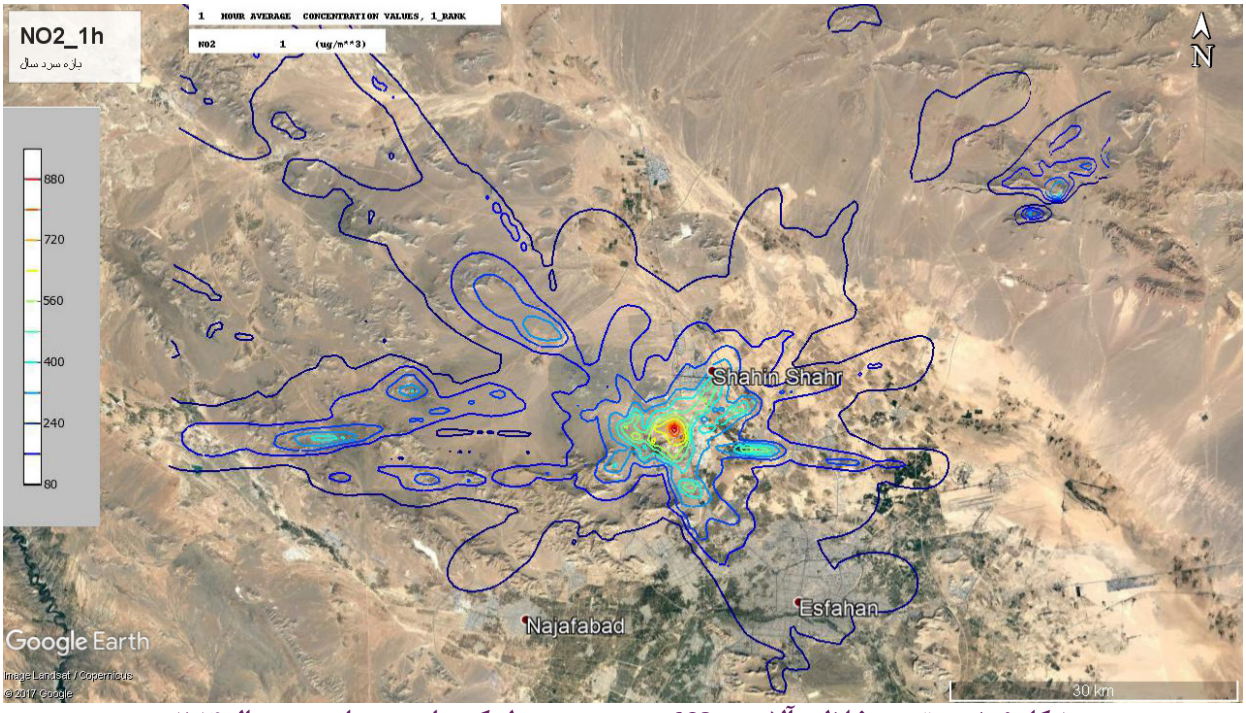
نتایج توزیع غلظت آلاینده $NO_2$ در محدوده مطالعاتی با مرکزیت نیروگاه شهید منتظری در دو بازه سرد و گرم از سال ۲۰۱۴ بر اساس متوسط یک ساعته در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی پراکنش آلاینده‌ها در بازه سرد سال به‌صورت یک محیط چتری شکل به مرکزیت نیروگاه منتظری است که می‌توان آن را به دلیل سرعت کم باد، نحوه توزیع آن و هم‌چنین کاهش ارتفاع لایه مخلوط هوا در این بازه عنوان کرد. از طرف دیگر با بررسی شکل پراکنش آلاینده $NO_2$ 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 به‌سوی مناطق کوهستانی شده، آلاینده‌ها به سمت غرب و شمال غرب نیروگاه انتقال‌یافته و درنتیجه شهر اصفهان در این بازه کمتر در معرض این قرار گرفته‌است.



www.SID.ir

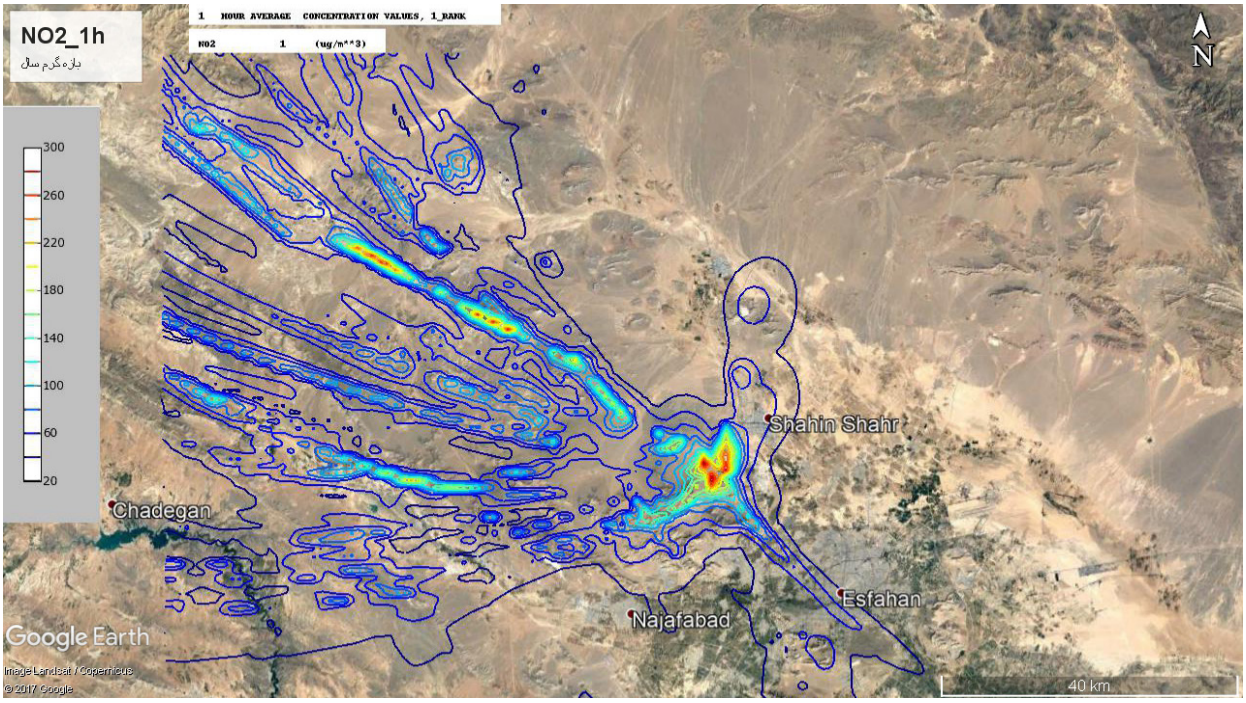
Archive of SID






شکل ۶. نحوه توزیع غلظت آلاینده $NO_2$ به‌صورت متوسط یک‌ساعته 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 $NO_2$ به‌صورت متوسط یک‌ساعته در بازه گرم سال ۲۰۱۴

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

مهم‌ترین نکته درباره نتایج توزیع غلظت آلاینده‌ها، مقدار بالای غلظت متوسط یک‌ساعته $NO_2$ در محدوده مطالعاتی و به‌خصوص اطراف نیروگاه در بازه سرد سال است، به‌طوری‌که مقدار غلظت آن بیشتر از مقادیر غلظت متوسط استاندارد یک‌ساعته سازمان محیط‌زیست است (بیش‌تر از ۲۰۰ میکروگرم بر مترمکعب). بااین‌وجود غلظت متوسط یک‌ساعته $NO_2$ در بازه سرد سال بر روی اکثر مناطق شهر اصفهان کمتر از مقدار استاندارد غلظت متوسط سازمان محیط‌زیست کشور برای کیفیت هوای آزاد است؛ هم‌چنین نتایج غلظت متوسط یک‌ساعته آن در بازه گرم سال بر روی شهر اصفهان نیز نشان از کم‌تر بودن غلظت $NO_2$ از مقدار استاندار سازمان محیط‌زیست دارد.



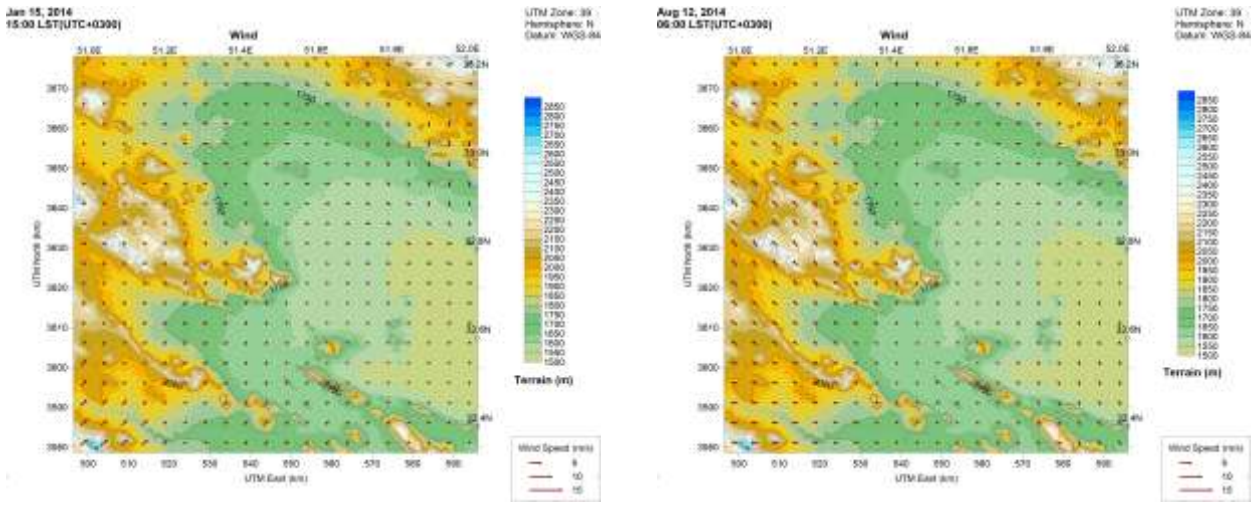
www.SID.ir

Archive of SID



بررسی نتایج خروجی مدل در بازه سرد نشان می‌دهد که حداکثر غلظت متوسط یک‌ساعته NO و $NO_2$ به ترتیب برابر $\mu g/m^3$ ۱۰۵۹/۶ و $\mu g/m^3$ ۹۸۰/۵ 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 هواشناسی و توپوگرافی پیچیده منطقه موردمطالعه، نقش مهمی در نحوه پراکنش آلاینده‌ها و به دست آمدن غلظت بالای $NO_2$ 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 $NO_2$ به ترتیب با مقدار $\mu g/m3$ 1/298 و $\mu g/m3$ 4/311 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 خود قرار دارد. میزان غلظت بالای آلاینده‌های $NO_2$ و NO ایجادشده 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 درنتیجه واکنش‌های پیچیده فتوشیمیایی ایجاد می‌شود. این واکنش‌ها مابین ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن و در حضور نور خورشید صورت می‌گیرند و درنهایت به تولید ازن تروپوسفری ($O_3$) 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 موردتوجه قرار می‌گیرد [۴۳].




**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**

### 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 بررسی قرار گرفته‌است. نتایج میانگین غلظت حاصل از مدل‌سازی آلاینده $NO_2$ در ۴ پذیرنده موردنظر 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



www.SID.ir

Archive of SID



پایش D (ضلع شرقی نیروگاه) و ایستگاه پایش B (ضلع غربی نیروگاه) رخ‌داده است که می‌توان علت آن را جهت حرکت باد در این دو بازه زمانی دانست. کمتر بودن مقادیر داده‌های شبیه‌سازی‌شده 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 نظرنگرفتن غلظت پس‌زمینه آلاینده‌ها و یا انتشار نامشخص آلاینده‌ها روش مدل‌سازی مورداستفاده در اینجا برای پیش‌بینی غلظت‌های کمی به معنای دقیق توصیه نمی‌شود؛ بااین‌وجود، 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، ازاین‌رو جهت صحت‌سنجی نتایج از پایش‌های محیطی که در بازه زمانی یک‌ساعته انجام شده، استفاده شده‌است. 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 µg/m3 و متوسط غلظت آن در بازه گرم سال در محدوده 62/21-76/4 µg /m3 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 آئروسل آلی ثانویه) نیز در این مطالعه گنجانده نشده‌است [۴۱]. بااین‌وجود، سازمان محیط‌زیست ایران برای آلاینده $NO_2$ معیار محیط‌زیستی تعریف کرده‌است، ازاین‌رو مهم است که توزیع غلظت کلی و میزان سهم $NO_2$ برای کنترل مشکلات کیفیت هوا در منطقه موردتوجه قرار گیرد.

**جدول ۱۰. مقایسه میانگین مقادیر داده‌های شبیه‌سازی‌شده 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 مشاهده‌شده (µg/m3) | میانگین غلظت پیش‌بینی‌شده (µg/m3) | نسبت داده پیش‌بینی به مشاهده‌ای |
|---|---|---|---|---|
| بازه سرد سال | A | ۲۱/۰۰ | ۱۶/۲۰ | ۰/۷۷ |
| | B | ۱۱/۰۰ | ۷/۵۹ | ۰/۶۹ |
| | C | ۲۸/۰۰ | ۲۰/۰۰ | ۰/۷۱ |
| | D | ۴۱/۰۰ | ۳۶/۵۱ | ۰/۸۹ |
| بازه گرم سال | A | ۲۵/۰۰ | ۱۹/۵۰ | ۰/۷۸ |
| | B | ۳۰/۰۰ | ۲۱/۶۲ | ۰/۷۲ |
| | C | ۱۴/۰۰ | ۱۱/۰۶ | ۰/۷۹ |
| | D | ۷/۰۰ | ۴/۷۶ | ۰/۶۸ |

نتایج تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های خروجی مدل CALPUFF در جدول ۱۱ آورده شده‌است. مقدار شاخص R که نشان‌دهنده همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای است برای آلاینده $NO_2$ در بازه سرد سال در محدوده ۰/۸۹۲-۰/۷۰۶ و در بازه گرم سال در محدوده ۰/۹۳۴-۰/۷۶۷ 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 بازه گرم سال در محدوده ۰/۰۸۲-۰/۰۲۲ قرار دارد. با بررسی مقادیر به‌دست آمده برای شاخص اریبی کسری (FB) به این نتیجه می‌رسیم که درمجموع، مدل نتایج به‌دست آمده برای غلظت آلاینده $NO_2$ را زیر مقدار واقعی پیش‌بینی کرده‌است. 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. به‌طورکلی با توجه به محدودیت‌های گفته‌شده در مورد پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که نتایج محاسبه‌شده برای پارامترهای آماری نشان‌دهنده توافق منطقی و قابل‌قبولی بین داده‌های پیش‌بینی‌شده و داده‌های مشاهده‌ای است.



www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۱۱. نتایج صحت‌سنجی مدل برای آلاینده $NO_2$ در دو بازه زمانی موردنظر**

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

| بازه زمانی | ایستگاه پایش | $NO_2$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | R | IOA | FB | NMSE | RMSE |
| بازه سرد سال | A | ۰/۷۸۱ | ۰/۷۱۲ | ۰/۰۸۵ | ۰/۰۳۱ | ۲/۱۴۰ |
| | B | ۰/۷۰۶ | ۰/۵۸۵ | ۰/۰۷۰ | /۰۱۳ | ۴/۱۳۶ |
| | C | ۰/۷۳۰ | ۰/۷۱۰ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۲۸ | ۲/۶۵۱ |
| | D | ۰/۸۹۲ | ۰/۷۵۶ | ۰/۱۶۵ | ۰/۰۳۵ | ۱/۱۴۰ |
| بازه گرم سال | A | ۰/۸۸۰ | ۰/۶۷۶ | ۰/۰۸۲ | ۰/۰۸۸ | ۳/۰۱۰ |
| | B | ۰/۸۲۱ | ۰/۷۴۵ | ۰/۰۷۶ | ۰/۰۰۶ | ۱/۳۶۰ |
| | C | ۰/۹۳۴ | ۰/۸۶۵ | ۰/۰۵۵ | ۰/۰۰۵ | ۱/۰۸۵ |
| | D | ۰/۷۶۷ | ۰/۷۱۶ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۴۸ | ۳/۵۰۱ |

## ۴ـ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از سیستم مدل‌سازی یکپارچه WRF - CALPUFF به شبیه‌سازی نحوه توزیع پخش و پراکنش آلاینده NOX خروجی از دودکش‌های نیروگاه شهید محمد منتظری اصفهان پرداخته شده‌است. در ابتدا مطالعات و بررسی‌هایی در ارتباط با نحوه عملکرد، محدودیت‌ها و قابلیت‌های مدل CALPUFF و پیش پردازنده‌های 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 شده‌است. 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 شده‌است. 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 گرفته‌است.

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 NOX 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 NOX شبیه‌سازی‌شده در بازه سرد سال نشان از وضعیت بد کیفیت هوا برای آلاینده $NO_2$ در نواحی نزدیک به نیروگاه است که می‌توان آن را به دلیل استفاده نیروگاه از سوخت مازوت در این فصل و مجهز نبودن هیچ‌یک از دودکش‌های آن به سیستم‌های کاهش این آلاینده خروجی دانست؛ بنابراین مدیران محیط‌زیست 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 قابل‌قبول داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل و داده‌های مشاهده‌ای در ۴ پذیرنده مجزا در اطراف نیروگاه بوده و درمجموع با توجه به ارزیابی‌های صورت گرفته، می‌توان عملکرد مدل CALPUFF را در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها با دقت بالایی، قابل‌قبول دانست. به‌منظور مدیریت کیفیت هوا، به‌عنوان‌مثال 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 یك ابزار علمی مناسب برای تجزیه‌وتحلیل استراتژی‌های کنترل و سیاست‌گذاری برای کاهش و پیش‌گیری از آلودگی هوا استفاده نمود.

## ۵ـ تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و تقدیر صمیمانه خود را از مدیریت محترم سازمان محیط‌زیست 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,



www.SID.ir

Archive of SID



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. Kałuszko, 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-Garces, 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 (NOx) 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 modelling 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 NOx pollution dur-



www.SID.ir

Archive of SID



[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 NOAH 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



www.SID.ir