

محیط شناسی، سال سی و ششم، شماره ۵۵، پاییز ۸۹، صفحه ۷۹-۹۰

مدلسازی کیفیت هوای موزه‌های تهران با استفاده از مدل IMPACT

مجید شفیعی پور مطلق^۱، خسرو اشرفی^۲، آزاده توکلی^{۳*}

۱-استادیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران shafepour@ut.ac.ir

۲-استادیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران khashrafi@ut.ac.ir

۳-دانشجوی دکتری، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۸/۳/۳۱ تاریخ پذیرش: ۸۹/۳/۱۲

چکیده

رشد روز افزون شهرها در کنار زندگی صنعتی، علاوه بر آسایش و راحتی برای انسان‌ها، باعث بروز مشکلات و معضلات جدیدی شده است. یکی از این مشکلات، معضل آلودگی هواست. اکثر افراد تصور می‌کنند آلودگی هوا صرفاً در محیط‌های باز شهری گسترش یافته است، در حالی که در برخی موارد آلودگی هوای محیط‌های بسته، چندین برابر بیشتر از آلودگی محیط‌های باز اطراف است. با گسترش دسترسی به رایانه‌های شخصی در طی دو دهه اخیر، مدل‌سازی به‌عنوان راهکاری مفید و کارآمد در پیش‌بینی کیفیت هوای محیط‌های بسته مطرح شده است. یکی از مدل‌های مورد استفاده در این ارتباط، مدل IMPACT است که برای بررسی و ارزیابی سطح آلاینده‌ها در ساختمان‌های باارزش میراث‌فرهنگی و موزه‌ها تنظیم شده است. در این مقاله در پی معرفی اختصاری این مدل، کاربرد آن در مدل‌سازی دو مورد از موزه‌های شهر تهران (موزه تنوع زیستی پردیسان و موزه فرش ایران)، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده مقایسه و تطابق خوبی با دقت بین ۷۷٪ الی ۹۴٪ نسبت به مقادیر واقعی مشاهده می‌شود. در گام بعدی با در نظر گرفتن راهکارهای اصلاحی، تلاش شده است تا میزان کاهش آلودگی ناشی از استفاده راهکارهای مختلف ارزیابی، و به عنوان راه حلی برای بهبود کیفیت هوای محیط‌های بسته مورد مطالعه و به تفکیک اثرگذاری بر هر یک از آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. نتیجه این بررسی مبین دستیابی به بهترین وضعیت ممکن، در صورت استفاده همزمان از فرایند پالایش آلاینده و کاهش نرخ تعویض و تبادل هوا در محیط است.

کلید واژه

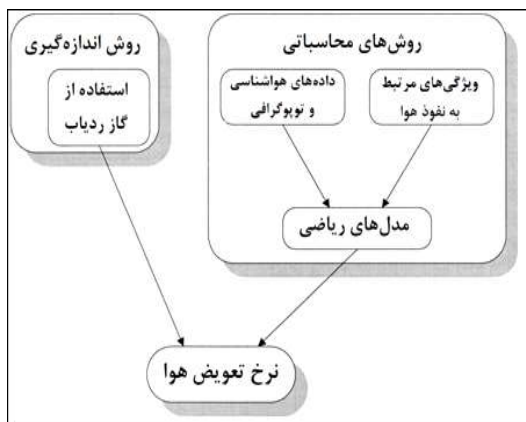
آلودگی هوا، محیط‌های بسته، مدل‌سازی، IMPACT، موزه

سر آغاز

نشان می‌دهد که اکثر افراد بیش از ۸۰٪ وقت خود را در محیط‌های بسته سپری می‌کنند. بنابراین برای این گروه احتمال به خطر افتادن سلامتی، ناشی از حضور در محیط‌های بسته بیش از خطر مواجهه در محیط‌های باز شهری خواهد بود. برای فراهم کردن کیفیت هوای مطلوب در محیط بسته، و یا محاسبه بار لازم برای تهویه فضای ساختمان، لازم است که الگوی جریان هوا درون ساختمان به‌دقت مورد شناسایی قرار گیرد. این اطلاعات برای تعیین سائز دقیق سیستم‌های تهویه محیط نیز کاربرد دارد (Feustel, Almeida, et al., 1992). دو روش اصلی در تعیین نرخ جریان هوا در ساختمان‌ها شامل اندازه‌گیری در محل و مدل‌سازی ریاضی است (Liddament, 1986). شکل شماره (۱)، نشان‌دهنده ساده‌ترین و صریح‌ترین روشهای مورد استفاده است. همان‌گونه که اشاره شد، یکی از این روشها، استفاده از تکنیک‌های اندازه‌گیری در محل

تعریف آلودگی هوای محیط‌های بسته به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هوا در داخل ساختمان یا محیط داخل، باز می‌گردد که ممکن است تحت تأثیر یک، یا چند آلاینده، برای سلامتی افراد حاضر در محیط ایجاد خطر کند. آلودگی هوا در هر ساختمان نتیجه وضعیت محل، عملکرد و وسایل نصب شده وضعیت جوئی، سیستم‌های مورد استفاده در ساختمان، تکنیک‌های ساخت‌وساز، منابع تولید آلاینده، فعالیت ساکنان و در نهایت کیفیت هوای محیط بیرون است. در ذهن اکثر افراد آلودگی هوا فقط از صنایع و اتگروز خودروها سرچشمه می‌گیرد، اما به‌طورکلی می‌توان چهار منبع عمده در تولید آلودگی هوا در محیط‌های بسته را بدین‌گونه برشمرد: ۱- احتراق، ۲- مصالح ساختمانی، ۳- خاک زیر ساختمان و ۴- ذرات معلق زیستی (Saiyed, 2001). تحقیقات

برای پیش‌بینی تغییرات غلظت برحسب زمان، در هر گام زمانی تعادل جرمی در بخش، یا ناحیه محاسبه می‌شود. تأثیر آلودگی هوا در محیط‌های بسته از یک سو سلامتی افراد و ساکنان حاضر محیط را مورد تهدید قرار می‌دهد و از سوی دیگر ممکن است باعث ایجاد تغییرات در سطح و شکل ظاهری اشیای موجود در محیط شود. برای مثال تحقیقات صورت گرفته در این زمینه مبین تأثیر منفی گازهایی چون دی‌اکسیدنیترژن، دی‌اکسیدگوگرد و ازن به‌عنوان عاملی مشخص در تخریب و ایجاد لطمه در مجموعه‌های فرهنگی و اشیای نفیس موجود در موزه‌ها شناخته شده است. این آلاینده‌ها بیشتر از آلودگی هوای محیط‌های بیرون سرچشمه می‌گیرند (Brimblecombe, 1990).



شکل شماره (۱): روش‌های جایگزین برای ارزیابی نرخ تعویض و تبادل هوا

با در نظر گرفتن اهمیت نگهداری و حفظ اقلام ارزشمند موجود در موزه‌ها و ساختمان‌های باارزش میراث فرهنگی، استفاده از روشی که بتواند غلظت آلاینده‌های مضر داخل محیط مجموعه‌ها و نیز میزان مواجهه و اثر ناشی از این آلاینده‌ها را بر روی مجموعه‌ها نشان دهد، لازم و ضروری است. به همین دلیل در این تحقیق تلاش شده است تا غلظت این آلاینده‌ها در محیط چند موزه بررسی و سپس با کمک مدل‌سازی ریاضی مقادیر به‌دست آمده از مدل با داده‌های واقعی به‌دست آمده از اندازه‌گیری مقایسه شود.

از نتایج به‌دست آمده می‌توان دقت و صحت پیش‌بینی‌های مدل را تخمین زد و از نتایج مدل برای پیش‌بینی وضعیت آینده و ارائه راهکارهای اصلاحی استفاده کرد. مدل مورد استفاده در این تحقیق، مدل IMPACT^۲ است که به‌وسیله مرکز حفاظت از میراث فرهنگی دانشگاه لندن تدوین شده است و برای ارزیابی و

است. برای نمونه، گازهای ردیاب چندگانه جهت ردیابی جریان‌های هوا بین محیط بیرون و داخل ساختمان و به همین ترتیب بین فضاها و نواحی داخلی، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sherman, Fuestel, et al., 1991). شایان ذکر است که الگوی جریان هوای در داخل محیط می‌تواند تعیین‌کننده تأثیر میزان نفوذ و تهویه طبیعی و مکانیکی بر کیفیت هوای محیط بسته باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده با گاز ردیاب صرفاً برای جریان‌های هوای تحت نفوذ غالب و نیز وضعیت جوی حاضر صادق است. از دیگر اشکالات این روش می‌توان به صرف هزینه گزاف برای انجام اندازه‌گیری‌ها و عدم اعتبار مقادیر اندازه‌گیری شده در بخش‌های دیگر اشاره کرد. علاوه بر این عواملی از قبیل تغییرات دما، رطوبت و حتی گذشت زمان اعتبار و ارزش اندازه‌گیری‌ها را از بین می‌برد. در این روش امکان پیش‌بینی وضعیت غلظت در زمان آینده وجود ندارد و بدین ترتیب فرصت ارزیابی و بهبود وضعیت‌های احتمالی از دست خواهد رفت. روش دیگر استفاده از مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در محیط و ارزیابی وضعیت کیفی هوا در آینده می‌باشد. در طی دو دهه اخیر با دسترسی گسترده به رایانه‌های شخصی، مدل‌سازی ریاضی در فهم و درک رفتار آلودگی هوا و تأثیرات آن، روند رو به رشدی داشته است (Nazaroff & Cass, 1986). مدل‌های ریاضی قادرند میزان نفوذ را به ازای انواع ترکیبات نفوذ و وضعیت‌های جوی تعیین کنند. مدل‌های مورد استفاده در بررسی کیفیت هوا به دو گروه اصلی مدل‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی طبقه‌بندی می‌شوند. مدل‌های ماکروسکوپی به زیرگروه‌های مدل‌های تک‌ناحیه‌ای^۱ و چندناحیه‌ای^۲ تقسیم می‌شود. در مدل‌های تک‌ناحیه‌ای، کل فضای مورد نظر به عنوان یک ناحیه منفرد و خوب اختلاط یافته فرض می‌شود. این مدل‌ها اغلب برای ساختمان‌های یک طبقه، تک‌واحدی و فاقد پارتیشن و دیوار داخلی (تمام درهای داخلی باز هستند) مورد استفاده قرار می‌گیرد. متأسفانه مدل‌های تک‌ناحیه‌ای برای محاسبه جریان‌های هوا در سازه‌های چندناحیه‌ای نیز استفاده می‌شوند که ناشی از محدودیت مدل‌هاست. در موارد تحقیقاتی و دقیق توصیه می‌شود از مدل‌هایی استفاده شود که در آنها بیش از یک ناحیه به‌صورت خوب اختلاط یافته قابل فرض و مدل‌سازی باشد.

در مدل‌های چند ناحیه‌ای ارتباط بین فضاها و محیط‌های مجاور تعریف و سپس نرخ جریان مابین فضاها با مجموعه‌ای از معادلات جریان که همزمان با هم حل خواهند شد، تعیین می‌شود.

ساختمان موزه فرش ایران دارای معماری زیبا و چشمگیری است به نحوی که آذین‌های نمای بیرونی آن شبیه به دارقالی است.

سطح نمایشی موزه مساحتی برابر ۳۴۰۰ مترمربع را در بر می‌گیرد و شامل دو تالار است که برای نمایش انواع قالی‌های دست‌بافت و گلیم از آن استفاده می‌شود. تالار طبقه همکف به نمایشگاه دائمی اختصاص دارد و تالار فوقانی برای برگزاری نمایشگاه‌های موقت گلیم و قالی طراحی شده است. دو تالار از طریق یک بازشو بسیار بزرگ در وسط تالار با یکدیگر مرتبط می‌شود. مجموعه موزه فرش ایران شامل با ارزش‌ترین نمونه‌های قالی ایران، از قرن نهم هجری تا دوره معاصر است.

قرارگیری این موزه در محل پرتردد شهر منجر به تأثیرپذیری هوای داخل موزه از آلودگی هوای بیرون شده است. بخش داخلی موزه با موکت و دیوارهای موزه نیز با فرش‌های نمایشی، و یا رنگ پوشش داده شده است. در بخش کوچکی از موزه نیز دیوارهایی از جنس سنگ وجود دارد.

روش اندازه‌گیری

آلاینده‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن است. علت انتخاب این آلاینده‌ها این است که مهم‌ترین گازهایی که در محیط بیرون وجود دارد و می‌تواند باعث ایجاد صدمه در مجموعه‌ها شود، شامل دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و ازن است.

دی‌اکسید نیتروژن به‌طور معمول از احتراق سوخت‌های فسیلی موتور خودروها در هوا منتشر می‌شود. عامل به‌وجود آورنده گاز دی‌اکسید گوگرد نیز بیشتر احتراق سوخت، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی است. واکنش‌های فتوشیمیایی ناشی از این انتشارها می‌تواند منجر به تولید گاز ازن شود. ابزارها و تجهیزاتی از قبیل وسایل گرمایشی، تجهیزات الکترونیکی مثل پرینترهای لیزری و دستگاه‌های فتوکپی و غیره ممکن است باعث تولید این آلاینده‌ها در داخل محیط‌های بسته شود.

ولی به‌طور معمول و ویژه این تجهیزات در خارج از فضای مجموعه‌ها نگهداری می‌شود. در برخی موارد مصالح ساختمانی استفاده شده در محیط، یا استعمال دخانیات نیز می‌تواند آلاینده‌های دیگری را در داخل موزه منتشر کند. این مسئله در زمان نمونه‌گیری از هوای موزه پردیسان مورد توجه قرار گرفت و به همین دلیل مدت زمانی بعد از زمان رنگ‌آمیزی تصاویر دیوارها نمونه‌گیری انجام شد تا آلاینده‌های ناشی از رنگ در کار نمونه‌گیری تأثیرگذار نباشند. کار

تخمین غلظت آلاینده‌های موجود در هوای داخل ساختمان‌های میراث فرهنگی، موزه‌ها، گالری‌ها، آرشیوها، کتابخانه‌ها و بناهای تاریخی قابل استفاده می‌باشد. در این مقاله دو موزه در شهر تهران، شامل موزه تنوع زیستی پردیسان و موزه فرش ایران بررسی شده است. در بخش‌های بعدی به معرفی این موزه‌ها و نتایج به‌دست آمده می‌پردازیم.

مطالعه موردی موزه‌های تهران

معرفی موزه پردیسان

موزه تنوع‌زیستی پردیسان، در پارک طبیعت پردیسان و در فضایی با مساحت داخلی ۱۳۱۷ متر مربع واقع شده است. این موزه در فروردین ماه سال ۱۳۸۳ افتتاح شد. پارک طبیعت پردیسان در شمال غربی تهران بین بزرگراه‌های شیخ فضل‌الله نوری، همت و حکیم قرار گرفته است. بزرگراه یادگار امام نیز در راستای شمالی- جنوبی این پارک را به دو بخش تقسیم می‌کند. درون این موزه نمونه‌هایی جانوری به‌صورت تاکسیدرمی وجود دارد.

بخشی از این نمونه‌ها درون ویتترین‌های شیشه‌ای و بخش دیگر بدون حفاظ در قسمت‌های فوقانی به دیوار نصب شده است. وجود چهار بزرگراه پرتردد در اطراف این موزه باعث انتقال بخش چشمگیری از آلاینده‌های هوا ناشی از حمل و نقل خودروها به داخل این موزه می‌شود که احتمال بروز صدمه و لطمه به نمونه‌های ارزشمند داخل موزه را در پی خواهد داشت.

در ورودی این مجموعه در ضلع شمالی غربی ساختمان واقع شده است. در داخل موزه برخی نمونه‌ها درون ویتترین‌های شیشه‌ای واقع شده‌اند و در اطراف ویتترین‌ها از پروفیل‌های فولادی به‌عنوان چارچوب استفاده شده است. کف موزه و نیز تا ارتفاع مشخصی از سطح دیوارها با سنگ و باقی سطح دیوار با رنگ مات پوشش داده شده است. جنس مورد استفاده در سقف موزه از نوع پانل‌های سقفی است و در بعضی موارد نیز از رنگ به عنوان پوشش سقف استفاده شده است. در پشت کلیه نمونه‌ها تابلوهای رنگ و روغن تحت عنوان دیوارما^۴ برای نشان دادن چشم‌انداز و محیط طبیعی زیستگاه نمونه‌ها قرار گرفته است.

معرفی موزه فرش ایران

موزه فرش ایران در ضلع شمالی پارک لاله و در مجاورت خیابان‌های کارگر شمالی و فاطمی واقع شده است. این موزه در بهمن ماه سال ۱۳۵۶ افتتاح و مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

چهار وجه داخلی و خارجی و در یک دوره زمانی، به صورت متناوب در هر نقطه انجام شد تا تأثیر احتمالی فاصله از بزرگراههای اطراف و امکان عدم اختلاط مناسب نیز در نتایج تأثیرگذار نباشد.

موزه پردیسان دارای سیستم گرمایش و سرمایش داخلی نیز است ولی از آنجایی که این سیستم به طور محدودی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در کاهش غلظت آلاینده‌های محیطی نقشی ندارد، بنابراین فرض شده است که تعویض هوای موزه به صورت تهویه طبیعی صورت می‌گیرد.

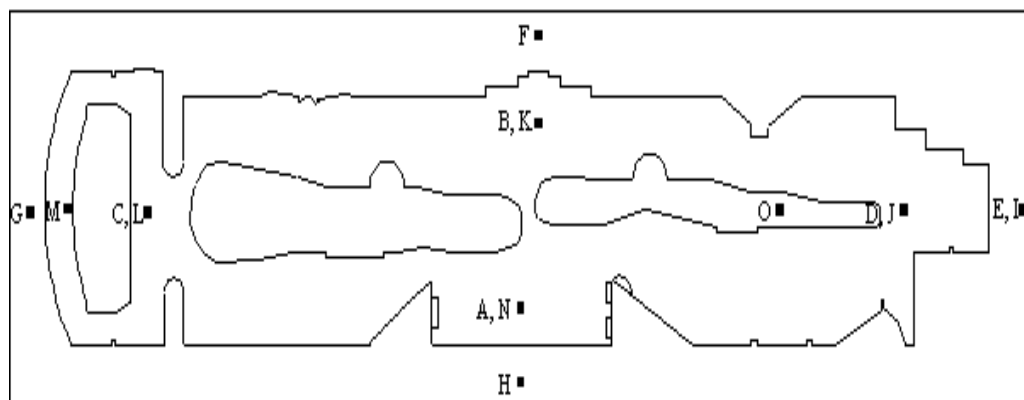
در موزه فرش نیز نمونه‌گیری در بخشهای مختلف موزه شامل قسمت‌های مرکزی، میانی، کناره‌ها، نزدیک در ورودی تالار و نیز محیط بیرون موزه صورت گرفت. در شکل‌های شماره (۲ و ۳) پلان موزه‌ها و نقاط اندازه‌گیری و در جداول شماره (۱ و ۲) مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها نشان داده شده است.

شایان ذکر است که مقادیر استفاده شده در مدل، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است تا نشان دهنده دوره زمانی و بعد مکانی محیط باشد.

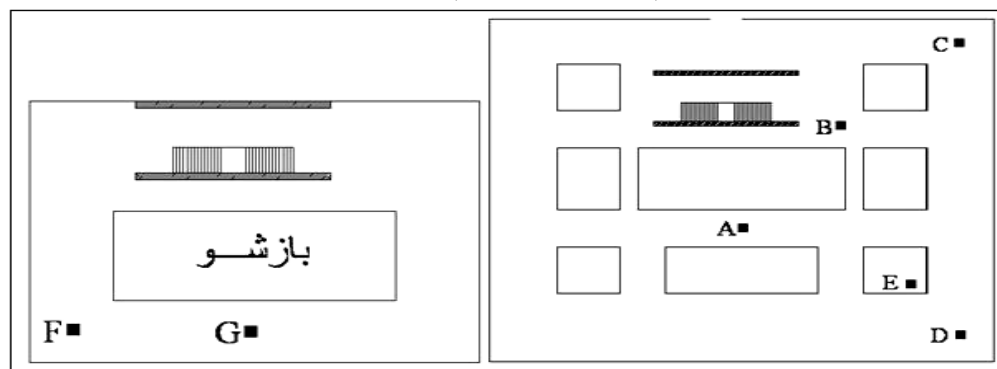
نمونه‌گیری از هوای موزه‌ها در هفته‌های پایانی سال ۱۳۸۷ و در ساعات اوج ترافیک بزرگراهها و خیابان‌های اطراف، بین ساعات ۱۰ تا ۱۲ قبل از ظهر برای موزه پردیسان و ۳ تا ۴:۳۰ بعد از ظهر در موزه فرش ایران صورت گرفت. نمونه‌برداری از گازها با استفاده از روش کیسه‌های نمونه‌برداری^۵ انجام شد.

در نمونه‌برداری از گازها با این روش، برای کاهش اثر منفی مکش پمپ در نمونه‌برداری، کیسه نمونه‌برداری در جعبه درزبندی شده مخصوص قرار داده شد و نمونه‌گیری تحت اثر خلاء ایجاد شده در جعبه ناشی از مکش پمپ، صورت گرفت. ارتفاع نمونه‌برداری در فاصله ۶۰ سانتیمتری از سطح زمین و در فاصله مناسبی از دیوارها صورت گرفته است.

علت اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها در داخل موزه، بررسی و صحت‌سنجی مقادیر به دست آمده از مدل و امکان مقایسه آن با داده‌های واقعی است یکی دیگر از مواردی که در هنگام نمونه‌برداری از هوای موزه پردیسان به آن توجه شد، بعد مکانی و شکل کشیده ساختمان و احتمال تغییر غلظت در وجوه مختلف ساختمان بود. برای در نظر گرفتن این نکته، نمونه‌برداری در هر



شکل شماره (۲): پلان موزه نوع زیستی پردیسان و مکان‌های اندازه‌گیری



شکل شماره (۳): پلان دو طبقه موزه فرش ایران و مکان‌های اندازه‌گیری

مدلسازی

پس از اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها، نوبت استفاده از مدل ریاضی برای تخمین و ارزیابی غلظت آلاینده‌ها در داخل محیط و پیش‌بینی وضعیت آینده است. برای این کار مدل IMPACT انتخاب شده است. مدل IMPACT در آغاز پروژه اروپایی نوع RTD^6 بود که برای ارزیابی و تخمین غلظت آلاینده‌های موجود در هوای داخل ساختمان‌های خاص برنامه‌ریزی شد. این ساختمان‌های خاص شامل مواردی از قبیل ساختمان‌های میراث‌فرهنگی، موزه‌ها، گالری‌ها، آرشیوها، کتابخانه‌ها و بناهای تاریخی می‌شود. آلاینده‌های مورد توجه در مدل IMPACT شامل دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و ازن است.

این مدل جزء مدل‌های تک‌ناحیه‌ای به‌شمار می‌آید و به همین دلیل در هنگام استفاده از این مدل باید به وضعیت قرارگیری نواحی داخلی و ارتباط بین آنها توجه شود. مدل IMPACT تحت برنامه جاوا^۷ عمل می‌کند و از دو بخش نرم‌افزاری تشکیل شده است. بخش اول با استفاده از معادله نشست و ته‌نشینی، به پیش‌بینی رفتار آلاینده‌ها در ساختمان‌هایی که به‌صورت طبیعی تهویه می‌شوند، می‌پردازد. بخش دوم از ترکیب بخش اول با یک مدل تهویه مکانیکی و فیلتراسیون تشکیل شده است تا رفتار آلاینده در ساختمان‌های با سیستم تهویه را بررسی کند.

این مدل غلظت آلاینده‌های گازی در محیط بیرون را به غلظت داخل ساختمان مرتبط می‌کند. در این مدل کل ناحیه و فضای مورد بررسی که می‌تواند تمام ساختمان، اتاق، گالری، یا بخش مورد نظر باشد به‌عنوان ناحیه خوب اختلاط یافته در نظر گرفته می‌شود. این مدل وضعیت تعادل نهایی را پیش‌بینی می‌کند و از بررسی دینامیکی محیط چشم‌پوشی می‌کند.

معادله استفاده شده در این مدل، معادله وشر^۸ است که نسبت آلاینده‌های داخل محیط به بیرون (C_i/C_o) را به طور مستقیم به مشخصه‌های ساختمان پیوند می‌دهد.

$$\frac{C_i}{C_o} = \frac{\lambda}{\lambda + \frac{V_d A}{V}} \quad (1)$$

در این معادله، مشخصه λ نرخ تعویض و تبادل هوا، V حجم داخل محیط، A مساحت سطوح موجود در داخل محیط و V_d مبین میل ترکیبی آلاینده‌های هوا برای واکنش با سطوح است که با عنوان سرعت ته‌نشینی برای مدل تعریف می‌شود (Grontoft, Raychaudhuri, 2004; Weschler, Shields, et al., 1989).

جدول شماره (۱): مقدار غلظت آلاینده‌ها در موزه پردیسان

شماره	محل	زمان	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)
۱	A	۱۰:۰۰	۶/۲۴	۲۲/۹۶
۲	B	۱۰:۱۰	۶/۷۱	۲۷/۳۱
۳	C	۱۰:۲۰	۶/۵۱	۲۷/۴۱
۴	D	۱۰:۳۵	۵/۹۳	۲۳/۹۶
۵	E	۱۰:۴۱	۶/۷۹	۲۴/۱۵
۶	F	۱۰:۵۰	۷/۱۴	۲۳/۷۳
۷	G	۱۱:۰۰	۶/۹۷	۲۳/۳۳
۸	H	۱۱:۰۸	۶/۵۶	۲۴/۳۴
۹	I	۱۱:۱۵	۶/۳۶	۲۷/۰۵
۱۰	J	۱۱:۲۵	۶/۳۱	۲۴/۳۸
۱۱	K	۱۱:۳۰	۶/۲۴	۲۷/۲۵
۱۲	L	۱۱:۴۰	۶/۳۷	۲۶/۹۶
۱۳	M	۱۱:۵۰	۶/۱۸	۲۳/۹۷
۱۴	N	۱۲:۰۰	۵/۶۸	۲۲/۴۰
۱۵	O	۱۲:۳۰	۶/۴۴	۲۶/۷۲
میانگین			SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)
بیرون			۶/۷۶۴	۲۴/۵۲
داخل			۶/۲۵	۲۵/۲۰۱

جدول شماره (۲): مقدار غلظت آلاینده‌ها در موزه فرش ایران

شماره	محل	زمان	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)
۱	A	۱۵:۲۰	۶/۲۸	۲۴/۴۰
۲	B	۱۵:۳۰	۶/۲۴	۲۳/۸۲
۳	C	۱۵:۴۵	۵/۹۸	۳۱/۱۳
۴	D	۱۵:۵۰	۵/۶۵	۲۸/۶۰
۵	E	۱۶:۰۵	۵/۹۴	۳۰/۹۴
۶	F	۱۶:۱۵	۶/۴۳	۲۷/۵۱
۷	G	۱۶:۲۰	۵/۵۹	۲۸/۲۹
۸	H	۱۶:۳۷	۵/۸۹	۲۳/۴۹
میانگین			SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)
بیرون			۵/۸۹	۲۳/۴۹
داخل			۶/۰۳	۲۷/۸۱

با این توضیح ورودی‌های مدل IMPACT شامل انتخاب آلاینده مورد نظر، دما در داخل و بیرون محیط، رطوبت نسبی، سرعت باد، حجم داخلی و در نهایت مساحت و جنس سطوح استفاده شده در محیط است.

خروجی‌های مدل نیز شامل موارد زیر است:

- ۱- نسبت آلاینده‌های داخل محیط به بیرون ساختمان (I/O) برای گاز مورد نظر، بدین معنا که با دانستن غلظت آلاینده‌ها در محیط بیرون می‌توان غلظت مربوط به داخل را محاسبه کرد.
- ۲- یک نمودار دایره‌ای که میزان ته‌نشینی و نشست ناشی از سطوح مختلف داخلی را نشان می‌دهد. در این مدل فرض می‌شود که تمام سطوح داده شده احتمالاً به‌صورت یکسان و مشابه در تماس با هوای آلوده‌اند و محل و موقعیت راهبردی مواد، یا مسیرهای نفوذ مثل در و پنجره مد نظر قرار نمی‌گیرد. نمودار دایره‌ای شاخص مفیدی از مهم‌ترین و مؤثرترین سطوح در حذف، یا برطرف‌سازی آلاینده است.
- ۳- مقدار سرعت ته‌نشینی سطوح را بر اساس میل ترکیبی آلاینده جهت واکنش با سطح بیان می‌شود.

۴- در مدل IMPACT نموداری برای بیان چگونگی تغییر غلظت آلاینده‌های موجود در ساختمان در برابر نرخ تبادل و تعویض هوا ترسیم خواهد شد (Blades, 2003). در بخش دیگری از کار لازم است حجم داخلی موزه، انواع مصالح استفاده شده به عنوان پوشش در ساختمان موزه و مساحت آنها اندازه‌گیری شود. در مدل IMPACT کافی است چند مورد از مصالح و جنس‌های اصلی به عنوان ورودی برای مدل تعریف شود.

علاوه بر این، تعیین مشخصه‌های محیطی از قبیل دما و رطوبت در زمان اندازه‌گیری به عنوان داده‌های ورودی مدل لازم و ضروری است. جداول شماره (۳ و ۴) مشخصه‌های اندازه‌گیری شده و ورودی‌های مدل IMPACT در این مطالعه را به اختصار نشان می‌دهد.

جدول شماره (۳): داده‌های ورودی مدل IMPACT در موزه

پردیسان

مساحت (m ²)	سطوح داخلی	مشخصه‌های محیطی	حجم
۱۱۵۰	رنگ	۴۴۷۸ m ³	دمای بیرون
۵۳۲/۳	شیشه	۱۴ °C	دمای داخل
۱۳۱۳	سنگ	۱۹ °C	رطوبت نسبی
۸۸	پانل سققی	۴۰ %	نرخ تبادل هوا
۱۸۶	فلز	rach	سرعت باد (مهرآباد، ۱۰ متری)
۶۲/۷	خاک	۹m/s	
۱۵	سنگ گرانیت		

این معادله دارای فرضیاتی است که در هنگام استفاده باید مدنظر قرار گیرد. برای مثال سازوکار اصلی حذف آلاینده‌های واکنش‌دهنده در داخل محیط در مواردی که فیلتراسیون وجود نداشته باشد، واکنش‌های نوع ناهمگن است و واکنش‌های همگن و همسان را مدنظر قرار نمی‌دهد. بدین ترتیب در این مدل واکنش میان گاز آلاینده با سطوح داخلی مورد بررسی قرار می‌گیرد ولی از احتمال واکنش، یا تبدیل گاز به گازی دیگر چشم‌پوشی می‌شود. این را می‌توان یکی از معایب این مدل برشمرد. اگرچه می‌توان برای گاز دی‌اکسید گوگرد از احتمال بروز واکنش‌های همگن چشم‌پوشی کرد، اما این قبیل واکنش‌ها در مورد گاز دی‌اکسیدنیترژن و ازن دارای نقش مهمی است (Weschler, et al., 1997).

یکی دیگر از فرضیات این مدل عدم وجود منبع آلاینده در داخل محیط است. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، ابزارها و تجهیزاتی که باعث تولید آلاینده‌های مورد نظر در داخل محیط موزه می‌شود، به‌طور معمول و ویژه در خارج از فضای مجموعه‌ها نگهداری می‌شود و با این روند می‌توان فرض عدم تولید آلاینده در داخل محیط را فرضی صحیح و منطقی به‌شمار آورد. اشیاء و مواد، توانایی تغییر، یا از بین بردن آلودگی را ندارند ولی در درازمدت به‌آرامی با آن واکنش می‌دهند و در نتیجه همه مقادیر آلاینده و همه غلظت‌ها در طول زمان باعث ایجاد لطمه و آسیب در آنها خواهد شد. یکی از ویژگی‌های برجسته این مدل امکان تعریف کردن جنس مصالح و پوشش‌های استفاده شده در محیط است. این مشخصه برای ارزیابی میل ترکیبی هر آلاینده در ته‌نشینی و نشست بر روی سطوح مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مواردی چون واکنش گاز با سطوح یا انتشار مجدد از سطح، در این مدل در نظر گرفته شده است. مقدار سرعت ته‌نشینی در این مدل با در نظر گرفتن وضعیت تعادلی میان نشست و بازپراکنش از سطوح منظور می‌شود. بنابراین زمانی که یک گاز با سطح مورد نظر واکنش نمی‌دهد، امکان بازپراکنش این گاز از سطح زیاد است و ممکن است مدت کوتاهی پس از ته‌نشینی و نشست مجدداً در محیط انتشار یابد.

روند واکنش و بازپراکنش در محیط تحت تأثیر عواملی از قبیل دما و رطوبت هستند، به‌طوری‌که وجود رطوبت بر روی سطوح باعث افزایش واکنش‌دهی گازهای آلاینده خواهد شد. این عامل برای واکنش‌های اسیدی مثل واکنش‌های دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیترژن چشمگیر است و با درصد کمتری برای ازن نیز صادق است.

است. با ضرب کردن غلظت بیرونی در این عدد می‌توان غلظت داخل محیط را به دست آورد. نمودار دایره‌ای نشان داده شده در مدل مبین میزان جذب آلاینده با هر جنس است. همان‌گونه که در شکل‌ها نشان داده شده است بخش عمده آلاینده‌ها با رنگ جذب شده است و مقدار اندکی از آن با جنس‌های سنگ و فلز جذب می‌شود. ماده‌ای مثل شیشه، نقش مؤثری در جذب آلاینده‌ها نداشته است.

یکی دیگر از خروجی‌های این مدل جدولی است که نشان‌دهنده سرعت ته‌نشینی آلاینده برای مصالح مورد استفاده در ساختمان است و در نهایت نموداری که در سمت راست ترسیم می‌شود مبین تغییرات غلظت آلاینده در محیط داخل نسبت به بیرون در برابر نرخ تعویض و تبادل هوا است. آنچه می‌توان از خروجی‌های این مدل استنباط کرد، نقش مؤثر برخی مصالح از قبیل رنگ در جذب و کاهش میزان آلودگی هواست. از این نکته می‌توان جهت بهبود کیفیت هوا در محیط‌های بسته استفاده کرد.

به عنوان مثال با افزایش سطوح مؤثر در جذب آلاینده و انتخاب گزینه‌های بهتر در طراحی قبل از ساخت، از توانایی جذب توسط پوشش‌ها استفاده کرد.

مورد دیگری که از نتایج این مدل قابل استفاده است نمودار تغییرات غلظت در برابر نرخ تعویض و تبادل هوا است. شیب بسیار زیاد این نمودار نشان‌دهنده وابستگی شدید کیفیت هوای محیط به نرخ تعویض هواست. بنابراین یکی دیگر از راهکارهای مؤثر برای کاهش سطح آلاینده‌های موجود در محیط بویژه دی‌اکسیدنیترژن، کاهش دادن نرخ تبادل هوا از طریق درزبندی و هوابند کردن مکان‌هایی است که می‌تواند در نفوذ هوا از محیط بیرون مؤثر باشد. وابستگی بین غلظت آلاینده‌ها با نرخ تبادل هوا از محیط بیرون برای گاز NO_2 بیش از دو آلاینده دیگر مطرح است.

جدول شماره (۴): مقادیر ورودی مدل IMPACT در موزه فرش ایران

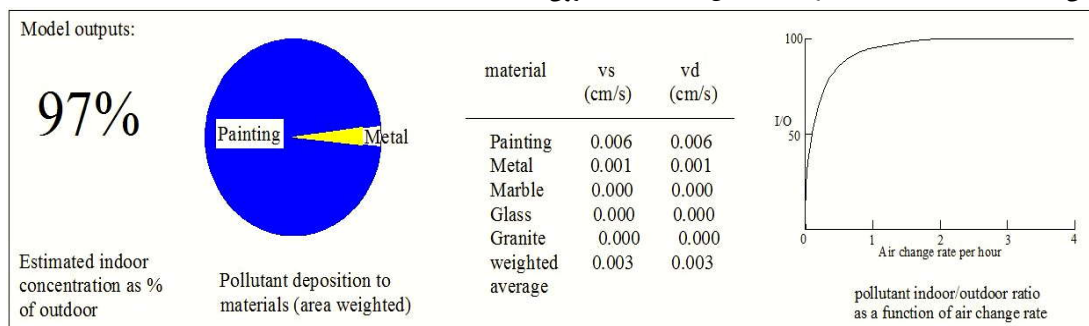
مساحت (m^2)	سطوح داخلی	مشخصه‌های محیطی
۳۵۷۷	فرش و موکت	حجم ۱۰۴۰۸ m^3
۱۵۱	شیشه	دمای بیرون ۱۳°C
۶۵۷/۵	رنگ	دمای داخل ۲۰°C
۳۱۳/۶	سنگ	رطوبت نسبی ۴۰٪
۳۱۴۶	فلز	نرخ تبادل هوا ۲ ach
		سرعت باد ۲ m/s
		(مهرآباد، ۱۰ متری)

نتایج مدل‌سازی

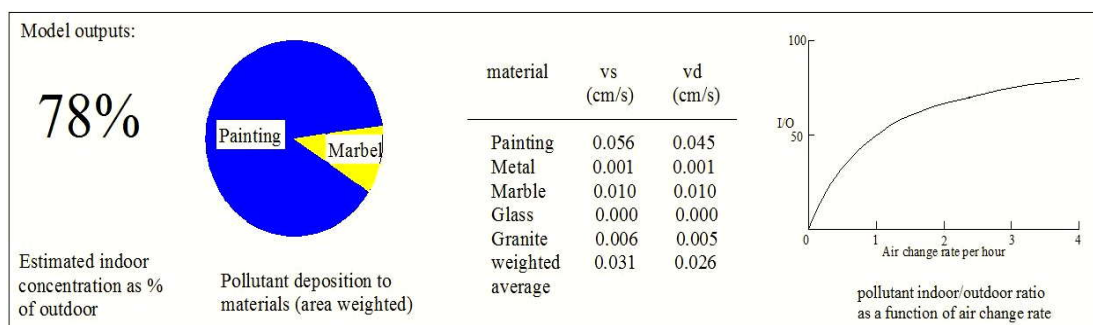
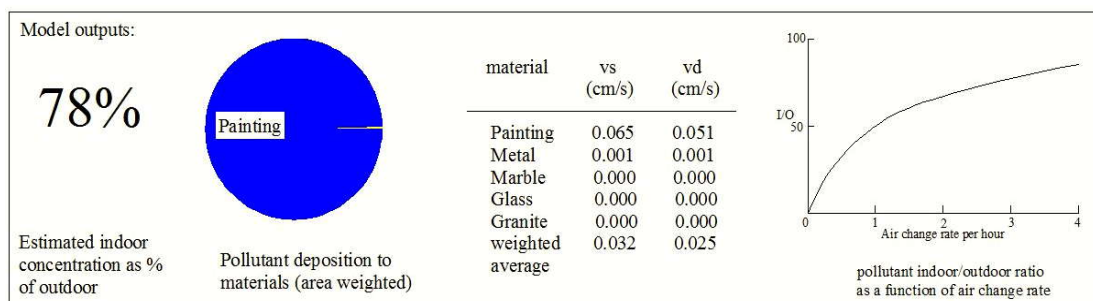
پس از انجام نمونه‌گیری و به‌دست آوردن غلظت آلاینده‌ها در محیط و سپس محاسبه مساحت مصالح و پوشش‌های استفاده شده در ساختمان مدل‌سازی صورت گرفت. مقادیر به‌دست آمده به عنوان ورودی مدل ارائه شد. شایان ذکر است که در مدل IMPACT می‌توان به جای محاسبه نرخ تعویض و تبادل هوا^۱ (ACH)، با وارد کردن مقدار دمای هوا در محیط بیرون بر حسب درجه سانتیگراد و سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، روند محاسبه این مشخصه را به مدل واگذار کرد.

نتایج مدل‌سازی در موزه تنوع‌زیستی پردیسان

در شکل‌های شماره (۳ تا ۵)، نتایج به‌دست آمده از مدل برای آلاینده‌های NO_2 ، SO_2 و O_3 در موزه پردیسان نشان داده شده است. در سمت چپ عددی به‌صورت درصد بیان شده است. این عدد نشان‌دهنده نسبت غلظت آلاینده در محیط داخل به محیط بیرون



شکل شماره (۴): نتایج مدل IMPACT برای غلظت NO_2 در موزه پردیسان

شکل شماره (۵): نتایج مدل IMPACT برای غلظت SO₂ در موزه پردیسانشکل شماره (۶): نتایج مدل IMPACT برای غلظت O₃ در موزه پردیسان

تعویض هوا، استفاده از تهویه مکانیکی و فیلتر، افزایش سطح پوشش‌های جاذب آلاینده و مواردی از این قبیل می‌تواند در کاهش سطح آلودگی محیط‌های بسته و بهبود کیفیت هوای موزه پردیسان مؤثر باشد. در ادامه به بررسی عملکرد این مدل و مقادیر به‌دست آمده در موزه فرش ایران پرداخته می‌شود.

جدول شماره (۵): مقایسه مقادیر به‌دست آمده از مدل با مقادیر

اندازه‌گیری در موزه پردیسان

SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	
۵/۲۸	۲۳/۷۸	نتایج مدل
۶/۲۵	۲۵/۲۰۱	نتایج واقعی اندازه‌گیری
% ۸۴	% ۹۴	درصد تطابق نتایج

جدول شماره (۶): مقایسه مقادیر به‌دست آمده از مدل با

راهکارهای پیشنهادی در موزه پردیسان

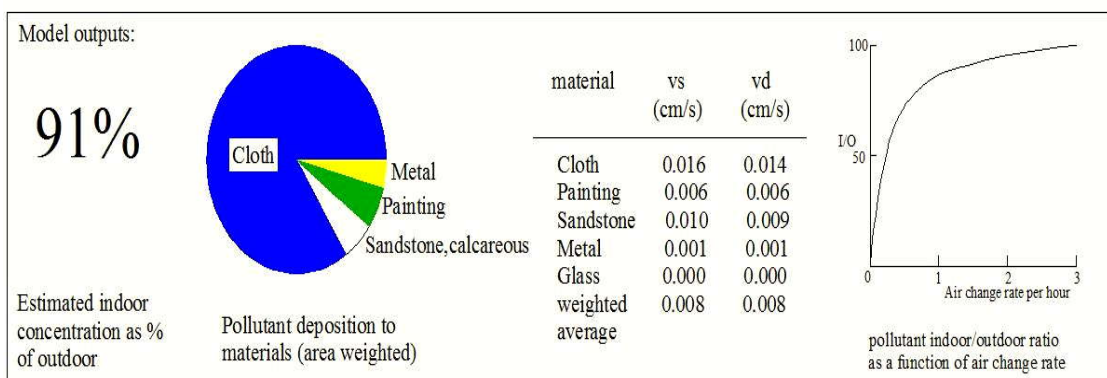
O ₃ (%)	(ppb) SO ₂	(ppb) NO ₂	
۷۸	۵/۲۸	۲۳/۷۸	مقدار به‌دست آمده از مدل
۶۹	۴/۶۰	۲۳/۰۵	کاهش نرخ تعویض و تبادل هوا به ۱/۵
۵۸	۳/۹۲	۱۶/۴۳	استفاده از سیستم تهویه مجهز به فیلتر ویژه (۶۰٪)
۵۲	۳/۵۲	۱۴/۷۱	استفاده از سیستم تهویه مجهز به فیلتر ویژه (۸۰٪)
۵۱	۳/۴۵	۱۶/۱۸	ترکیب هر دو روش (کاهش نرخ تبادل و فیلتر ویژه ۶۰٪)
۴۶	۳/۱۱	۱۴/۴۷	ترکیب هر دو روش (کاهش نرخ تبادل و فیلتر ویژه ۸۰٪)

برای بررسی روشهای احتمالی و مؤثر در کاهش غلظت آلاینده‌ها و بهبود کیفیت هوای محیط، راهکارهایی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال چنانچه بتوان از طریق درزبندی بهتر ساختمان موزه پردیسان، نرخ تعویض و تبادل هوا را از ۳ بار در ساعت به ۱/۵ بار در ساعت کاهش داد و دیگر مشخصه‌ها ثابت بماند، در این صورت غلظت آلاینده‌ها در داخل محیط تغییر اندکی خواهد داشت. راهکار اصلاحی دیگر استفاده از سیستم تهویه مجهز به فیلتر، با بازده ۶۰٪ یا ۸۰٪، است بازچرخش ۸۰٪ هوای داخل محیط و هوای نفوذی معادل نرخ تعویض و تبادل هوا در نظر گرفته شده است. در جدول شماره (۶) مقادیر به‌دست آمده از وضعیت کنونی با موارد پیشنهادی برای بهبود این وضع، مقایسه شده است. همان‌گونه که در جدول شماره (۶) نشان داده است مواردی از قبیل کاهش نرخ تبادل و

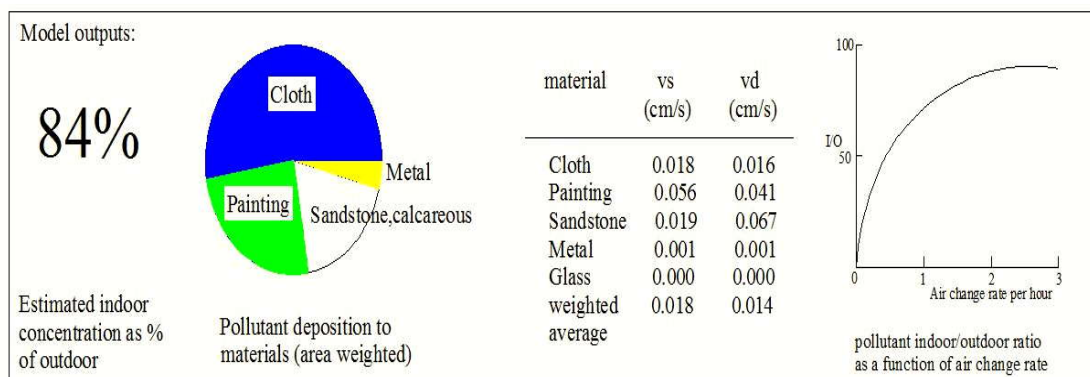
آلاینده‌ها در داخل موزه نسبت به محیط بیرون است. نتایج به‌دست آمده از این مدل در شکل‌های شماره (۷ تا ۹) نشان داده شده است.

نتایج مدل‌سازی در موزه فرش ایران

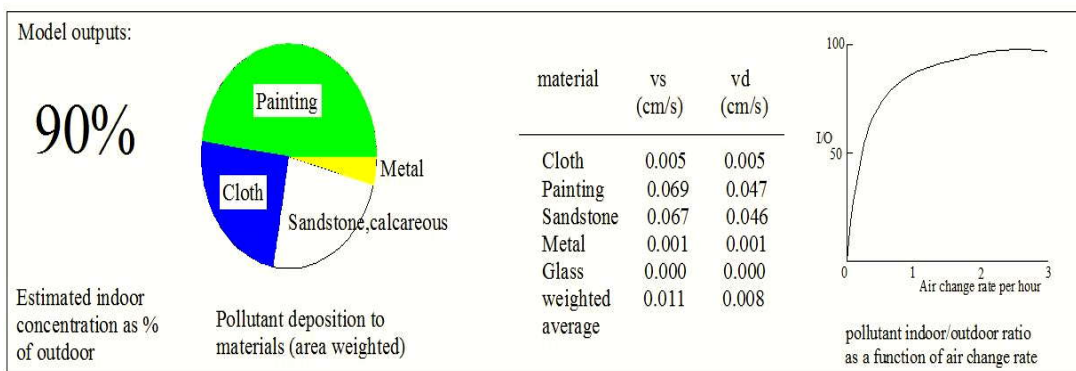
همانند روش مورد استفاده در موزه پردیسان، این‌بار نیز مقادیر به‌دست آمده از نمونه‌گیری، میانگین‌گیری و به عنوان مقادیر ورودی به مدل داده شد. نکته قابل توجه در این موزه بالاتر بودن غلظت



شکل شماره (۷): نتایج مدل IMPACT برای غلظت NO₂ در موزه فرش ایران



شکل شماره (۸): نتایج مدل IMPACT برای غلظت SO₂ در موزه فرش ایران



شکل شماره (۹): نتایج مدل IMPACT برای غلظت O₃ در موزه فرش ایران

فیلتر، افزایش سطح پوشش‌های جاذب آلاینده و مواردی از این قبیل می‌تواند در کاهش سطح آلودگی محیط‌های بسته و بهبود کیفیت هوا موثر باشد. استفاده از ترکیب دو روش یعنی کاهش نرخ تعویض هوا در کنار استفاده کردن سیستم تهویه مجهز به فیلتر با بازده ۸۰٪، بهترین گزینه در بین گزینه‌های موجود است و می‌تواند سطح آلاینده‌های موجود در محیط را تا ۵۰٪ نسبت به وضعیت فعلی، کاهش دهد.

جدول شماره (۸): مقایسه مقادیر به‌دست آمده از مدل با روشهای

کنترل آلودگی در موزه فرش ایران

O ₃ (%)	(ppb) SO ₂	NO ₂ (ppb)	
۹۰	۴/۹۵	۲۱/۳۸	مقدار به‌دست آمده از مدل
۸۴	۴/۵	۱۹/۷	کاهش نرخ تعویض و تبادل هوا به ۱/۰
۷۵	۴/۱۸	۱۷/۸۵	استفاده از سیستم تهویه مجهز به فیلتر ویژه ۶۰٪
۷۱	۴/۰۱	۱۶/۹۱	استفاده از سیستم تهویه مجهز به فیلتر ویژه ۸۰٪
۷۱	۳/۸۳	۱۶/۶۸	ترکیب هر دو روش (کاهش نرخ تبادل و فیلتر ویژه ۶۰٪)
۶۷	۳/۶۵	۱۵/۹۷	ترکیب هر دو روش (کاهش نرخ تبادل و فیلتر ویژه ۸۰٪)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

آنچه به‌عنوان جمع‌بندی نهایی از این مقاله قابل استنباط است، تطابق نسبی بین داده‌های به‌دست آمده از مدل با مقادیر واقعی به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌هاست. به‌طوری‌که برای موزه پردیسان درصد تطابق درحوزه ۸۴٪ تا ۹۴٪ است. این رقم برای موزه فرش بین ۷۷٪ تا ۸۲٪ به‌دست آمده است.

یکی از عللی که در کاهش تطابق نتایج برای موزه فرش ایران قابل پیش‌بینی است، بالاتر بودن غلظت آلاینده‌های درون موزه در مقایسه با غلظت آلاینده‌ها در محیط بیرون است. حداکثر غلظت قابل پیش‌بینی برای مدل IMPACT، مقداری معادل غلظت آلاینده در

بررسی شکل‌های شماره (۷ تا ۹) مبین نقش مؤثر مصالحی از قبیل رنگ، پوشش موکت و نیز سنگ استفاده شده در دیوارهاست. اگرچه استفاده از پوشش‌های پارچه‌ای از قبیل موکت تأثیر زیادی در کاهش آلودگی و جذب آلاینده‌ها در این موزه داشته است اما نظر به این‌که اقلام ارزشمند موجود در موزه یعنی فرش‌ها نیز جزء این گروه به‌شمار می‌آیند و این نمونه‌ها در معرض هوای محیط قرار دارد، لازم است تدابیری در این زمینه اندیشیده شود و از تماس مستقیم فرش‌های در معرض نمایش با هوای محیط جلوگیری شود.

از سوی دیگر با وجود استفاده فراوان از پوشش فلز در این ساختمان، این جنس تأثیر بسیار اندکی در کاهش آلودگی این موزه ایفا می‌کند. پس با توجه به مساحت بسیار زیاد این پوشش، چنانچه استفاده از پوشش دیگری به‌جای فلز در این موزه امکان‌پذیر باشد، می‌توان پیش‌بینی کرد که کیفیت هوای مطلوب‌تری در هوای موزه به وجود آید.

جدول شماره (۷): مقایسه مقادیر به‌دست آمده از مدل با

مقادیر اندازه‌گیری در موزه فرش ایران

SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	
۴/۹۵	۲۱/۳۸	مقدار به‌دست آمده از مدل
۶/۰۳	۲۷/۸۱	مقدار به‌دست آمده از اندازه‌گیری
٪ ۸۲	٪ ۷۷	درصد تطابق نتایج

بار دیگر برای ارزیابی راهکارهای مختلفی که می‌توان برای بهبود کیفیت هوای موزه استفاده کرد از قبیل تغییر نرخ تعویض و تبادل هوا و یا استفاده از سیستم تهویه مجهز به فیلتر بررسی می‌شود. به‌عنوان مثال اگر با تلاش زمینه ایجاد تغییراتی در ورودی تالار فرش، نرخ تعویض هوا در این محیط از ۲ بار در ساعت به مقدار ۱ بار در ساعت کاهش یابد یا از سیستم تهویه با همان مشخصات به‌کار رفته در موزه پردیسان استفاده شود، نتایج تجزیه و تحلیل مدل بدین گونه که در جدول شماره (۸) بیان شده است، خواهد بود.

در جدول شماره (۸) نشان داده است که مواردی از قبیل کاهش نرخ تبادل و تعویض هوا، استفاده از تهویه مکانیکی و

دست علاوه بر این که در کاهش نرخ آلودگی محیط‌های بسته مؤثر است، موجب می‌شود بدون نیاز به استفاده مداوم از سیستم‌های تهویه بتوان به کیفیت مطلوب هوا در محیط بسته دست یافت. بنابراین استفاده از روند مدل‌سازی برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در زمان‌های مورد پیش‌بینی سبب می‌شود با تنظیم زمان‌بندی عملکرد سیستم‌های تهویه، بتوان کنترل مؤثری در زمینه کاهش مصرف انرژی داشت.

یادداشت‌ها

- 1-Single zone
- 2-Multi zone
- 3-Innovative Modelling of Museum Pollutants & Conservation Thresholds
- 4-Diorama
- 5-Tedlar Bag
- 6-Recovery, Treatment & Disposal
- 7-JAVA
- 8-Weschler
- 9-Air Change per Hour

محیط بیرون، و نه بیشتر است و این عامل با فرض عدم وجود منبع تولید آلودگی در داخل محیط سازگار و قابل پیش‌بینی است. علت بالاتر بودن سطح آلاینده‌ها را در موزه فرش در مقایسه با خارج از موزه می‌توان به احتمال تجمع آلودگی در دراز مدت، عدم کفایت نرخ تهویه در این موزه، یا وجود منبع تولید آلاینده در محیط داخل مرتبط دانست.

در مورد موزه تنوع‌زیستی پردیسان، بالا بودن نرخ تعویض و تبادل هوا با محیط بیرون باعث می‌شود غلظت آلاینده‌های داخل موزه بسیار به غلظت آلاینده‌های محیط بیرون نزدیک باشد.

همان‌طور که در جداول شماره (۶ و ۸) نیز مشاهده شد، به کار بردن تدابیر اصلاحی از قبیل استفاده از سیستم تهویه مجهز به فیلتر، تغییر نرخ تبادل هوا با محیط بیرون، یا ترکیب این عوامل، می‌توان به منظور کاهش نرخ آلودگی هوای داخل موزه‌ها گام‌های مؤثری برداشت.

در مواردی که هنوز ساختمان مورد نظر در مرحله طراحی قرار دارد، با بررسی توانایی پوشش‌های مختلف در جذب آلاینده‌ها، انتخاب بهترین گزینه در طراحی امکان‌پذیر است. تدابیری از این

منابع مورد استفاده

- Blades, N. 2003. Application of an air pollution modeling tool to cultural heritage buildings, Centre for Sustainable Heritage, University College London, UK
- Brimblecombe, P. 1990. The Composition of Museum Atmospheres, Atmospheric Environment, 24B, pp. 1-8.
- Feustel, H.E., A., Almeida, C.de, Blumstein. 1992. Alternatives to compressor cooling in residences, Energy and Buildings 18, 3-4.
- Grontoft, T., M., Raychaudhuri. 2004. Compilation of tables of surface deposition velocities for O₃, NO₂ and SO₂ to a range of indoor surfaces, Atmospheric Environment 38, 533-544.
- Liddament, M.W. 1986. Air Infiltration Calculation Techniques_an Applications Guide, Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, UK.
- Saiyed, H.N. 2001. Indoor Air Pollution in – A Major Environment and Public Health Concern, ICMR BULLETIN, Vol.31, No.5.
- Nazaroff, W.W., G.R., Cass. 1986. Mathematical modeling of chemically reactive pollutants in indoor air, Environmental Science and Technology 20, pp. 924-934.

Sherman, M.H., H.E., Feustel, D.J., Dickerhoff. 1991. Description of a System for Measuring Interzonal Air Flows Using Multiple Tracer Gases, In Proceedings, Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structures, Hemisphere Publishing, New York, Washington, Philadelphia, London.

Weschler, C.J., H.C., Shields, D.V., Naik. 1989. Indoor Ozone Exposure, Journal of the Air Pollution Control Association 39, pp. 1562-1568.

Weschler, C.J., H.C., Shields. 1997. Potential reactions among indoor pollutants, Atmospheric Environment, 31, pp. 3487-3495.