

مدل سازی تأثیر ارتفاع دالان خیابانی بر انتشار NO_x در یک زیرگذر شهری

الهام اسراری^{۱*} و مسعود فرجی^۲

۱- دانشیار گروه آموزشی عمران دانشگاه پیام نور شیراز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه پیام نور

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۱/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۶)

چکیده

گاز NO_x در زیرگذرهای شهری که عمدتاً محیط‌های بسته‌ای هستند، جزو آلاینده‌های مهم به شمار می‌رود. در این تحقیق، انتشار آلاینده NO_x در زیرگذر زند شهر شیراز بوسیله نرم‌افزار AERMOD مدل‌سازی شد. همچنین تأثیر ارتفاع خیابان بر غلظت آلاینده در زیرگذر زند و دالان خیابانی بالای آن بوسیله نرم‌افزار COMSOL مدل‌سازی شده است. نتایج مطالعه نشان داد که با افزایش ارتفاع خیابان غلظت آلاینده در خیابان افزایش می‌یابد. تغییرات غلظت آلاینده در تونل زیرگذر با افزایش ارتفاع خیابان محسوس نیست. بررسی ارتباط انتشار آلاینده NO_x با سرعت و سمت باد صورت گرفت. سیستم تهویه مکانیکی زیرگذر زند قادر به کنترل سطح آلاینده NO_x در محدوده قابل قبول نیست. حداکثر غلظت آلاینده NO_x در هوای تونل در حدود 9.1 تا 5 mg/m^3 متناسب با سمت باد عرضی و طولی برآورد شد. بنابراین فضای تونل زیرگذر در شرایط اوج ترافیک با در نظر گرفتن استاندارد هوای پاک برای NO_x به میزان 0.2 mg/m^3 ، سالم نیست. بیشینه غلظت آلاینده NO_x در خیابان بالای زیرگذر به میزان 0.017 و 0.153 mg/m^3 متناسب با سمت باد عرضی و طولی برآورد شد.

کلمات کلیدی: دالان خیابانی، زیرگذر شهری، انتشار NO_x ، مدل AERMOD.

مقدمه

وجود دارد (Vardoulakis, 2003). مطالعه ساختار جریان و انتشار نزدیک در ردیف‌های ساختمانی (شبه موانع) نشان داده است که پروفایل غلظت در نزدیکی دیوارها بسیار متغیر و میانگین آن به شدت غیر گوسی خواهد بود (Coceal, 2014). به خاطر وجود ساختمان‌ها در مجاورت خیابان، تهویه کاهش یافته و باعث تجمع آلودگی در خیابان می‌شود، لذا بیشترین غلظت آلاینده در دالان‌های خیابانی اتفاق می‌افتد (Kwa, 2015). در مجاورت ساختمان‌های بلند، آلودگی در سمت باد و خلاف آن در سطح خیابان انتشار یافته و میزان آلاینده در ارتفاع بالاتر کمتر از سطح بوده و با افزایش بار ترافیکی تغییر زیادی نخواهد کرد (Zhang, 2015). تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در بلند مدت آلاینده‌های ترافیکی منجر به تأثیرات ناگوار بر سلامتی خواهد شد (Kwa, 2015).

اغلب تونل‌های شهری فضاهای بسته یا نیمه بسته هستند (Change, 1981) و در صورتی که آلاینده‌های خروجی خودروهای در حال حرکت به خوبی رقیق نشوند، کیفیت هوای داخل تونل افت خواهد کرد (Marsault, 1982). بنابراین طراحی مناسب سیستم تهویه تونل به منظور حفظ هوای پاک در تونل ضروری است.

کیفیت هوای دالان‌های خیابانی بیشتر تحت تأثیر هندسه محیط‌های شهری است تا نیروهایی که لایه‌های مرزی را کنترل می‌کنند (Hunter, 1992). عموماً غلظت آلاینده مونوکسید کربن (CO) به عنوان بخشی از طراحی و عملکرد سیستم تهویه تونل‌های ترافیکی به کار برده می‌شود. اگرچه اکسید نیتروژن (NO_x) نیز آلاینده مهمی است که باید به دقت در نظر گرفته شود (Chung, 2001). تفاوت واضحی بین کیفیت هوای بالای سقف ساختمان‌ها در خیابان و جریان باد در دالان خیابانی

مواد و روش‌ها

زیرگذر زند در شهر شیراز، در مسیر خیابان کریم‌خان زند و در حد فاصل میدان شهدا و دروازه‌ی سعدی واقع شده است. مجموعه‌ی ارگ کریم‌خانی در شمال زیرگذر زند و بازار قدیمی شیراز در طرفین آن قرار دارد که نمای منطقه آن در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- نمای خیابان زند و زیرگذر زند، شهر شیراز

مدل‌سازی جریان هوا در زیر گذر زند و خیابان بالای آن با استفاده از نرم‌افزار COMSOL که یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای انجام مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی است انجام شد. برای مدل‌سازی جریان هوا، مشخصات فیزیکی محدوده مطالعه استخراج و شکل کلی جریان هوا شبیه‌سازی شد. حل عددی بر اساس معادلات پیوستگی، انتقال تکانه و مدل آشفته‌گی کا اسیلون که شامل دو معادله انتقالی اضافی برای محاسبه خواص آشفته‌گی جریان است انجام شد. مدل کا اسیلون برای جریان‌های داخلی و خارجی و جریان‌های با دیواره محدود با گرادیان فشار نسبتاً کوچک، دقت و عملکرد خوبی دارد. فرم کامل معادلات و جزئیات بیشتر در مرجع (Versteeg, 2007) در دسترس است.

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i \varepsilon} \quad \text{انرژی جنبشی جریان آشفته}^2$$

نرخ واپاشی ویسکوز انرژی جنبشی آشفته^۳

$$\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \overline{u'_{i,j} u'_{i,j}}$$

در نرم‌افزار COMSOL بر اساس مشخصات فیزیکی محدوده مطالعه، مدل سه بعدی ترسیم و با شبکه‌بندی مناسب انجام می‌شود. برای تعیین شرایط مرزی معادلات انتقال از

ادیب زاده در سال ۱۳۸۳، انتشار گاز CO در زیرگذر زند را با استفاده دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) بوسیله نرم‌افزار Fluent مدل‌سازی کرده است. در این مطالعه از مدل دو بعدی CFD استفاده شده است. زارعی در سال ۱۳۸۶ بر روی حذف CO با استفاده از جذب سطحی کربن فعال به منظور کنترل آلودگی هوا در زیرگذر زند مطالعه کرده است. عباسلو در سال ۱۳۹۱ به مدل‌سازی سه بعدی CFD انتشار گاز CO در زیرگذر زند پرداخته و با توجه به ناتوانی سیستم تهویه موجود در کنترل سطح CO در محدوده‌ی مجاز، اقدامات اصلاحی پیشنهاد شده بر تغییر الگوی انتشار داخل زیرگذر و با انجام تغییراتی در سیستم تهویه متمرکز شده که شامل ایجاد تغییراتی در دیوارهای زیرگذر و سیستم تهویه آن است (ادیب زاده، ۱۳۸۳، زارعی ۱۳۸۶ و عباسلو، ۱۳۹۱).^۱

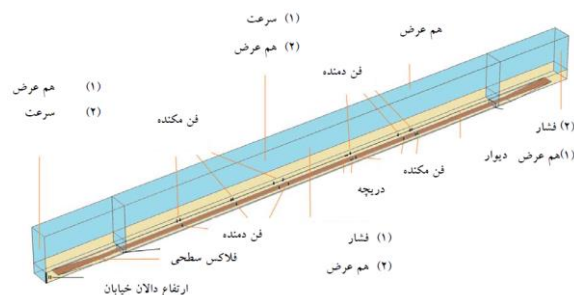
با توجه به تأثیر اکسیدهای نیتروژن بر سلامت و محیط زیست، بررسی الگوی پراکنش این آلاینده ترافیکی در زیر گذر زند ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه تلاش شده است که غلظت زمینه‌ای آلاینده NO_x در خیابان زند برآورد شود. همچنین تأثیر تغییرات ارتفاع ساختمان‌های اطراف خیابان بر انتشار آلاینده NO_x در تونل و خیابان بالای آن در سرعت و سمت‌های مختلف باد مدل‌سازی شده است. با توجه به بار ترافیکی خیابان، انتشار آلاینده‌ها در دالان منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ها در سطح می‌شود که بر عملکرد رقیق‌سازی سیستم‌های تهویه عرضی و طولی اثر گذار است. لذا بررسی تأثیر ساختمان‌های مجاور زیر گذر بر الگوی پراکنش آلاینده‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه انتشار آلاینده در زیرگذر زند و پراکنش آلاینده از خروجی فن‌های تهویه در خیابان در چند سناریو با ارتفاع مختلف دالان خیابانی یا سمت و سرعت متفاوت باد، مدل‌سازی شده است. در پایان برای یکی از سناریوها، نتایج مدل‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت NO_x در زیرگذر زند مقایسه شده است.

۱- وحید ادیب زاده، سمیه زارعی، عبدالله عباسلو

2- Turbulent Kinetic Energy

3- Viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy

انتشار آلاینده در زیرگذر مدل‌سازی شد. هندسه مدل در شکل ۲ نمایش داده شده است. شرایط مرزی با علامت (۱) به مدل‌سازی باد عرضی و با علامت (۲) به مدل‌سازی باد طولی اشاره می‌کند.



شکل ۲- هندسه مدل CFD برای خیابان زند و زیرگذر

مدل‌سازی CFD و شرایط مرزی

شرایط مرزی متناسب با سمت جریان باد در طول و عرض خیابان تعریف شده‌اند. شرایط مرزی باد عرضی (۱): شرایط هم عرض برای ورودی خیابان، خروجی خیابان و سقف مدل با فرض ممتد بودن جریان هوا در نظر گرفته شده است. تابع دیوار برای سطوح تماس هوا با دیوار در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی سرعت برای بالای دیوار خیابان در سمت شمال تعریف شده است و خروجی هوا به صورت فشار ثابت و به میزان صفر برای سطح بالای دیوارهای جنوبی لحاظ شده است.

شرایط مرزی باد طولی (۲): شرایط هم عرض برای فضای بالای دیوارهای شمالی و جنوبی خیابان و سقف مدل با فرض ممتد بودن جریان هوا در نظر گرفته شد. تابع دیوار برای سطوح تماس هوا با دیوارها در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی سرعت برای سطح ورودی خیابان منظور شد و خروجی هوا به صورت فشار ثابت و به میزان صفر برای سطح خروجی خیابان لحاظ شده است.

۸ فن دمنده و ۱۰ فن مکند با سرعت ثابت 13 m/s تعریف شدند. این سرعت متناسب با ظرفیت هوای هر فن به میزان 20 m³/s است که به ازای قطر 1.4 m برای هر فن محاسبه شده و هوای هر فن به تونل دمیده و یا از تونل به خیابان تخلیه می‌کند.

سرعت ثابت یا معادلات تخمین تغییر سرعت استفاده می‌شود و نتایج حاصل از حل معادلات انتقال برای حل عددی معادلات انتشار آلاینده استفاده می‌شود. همچنین لازم است که شرایط مرزی معادله انتشار نیز مشخص شود. برای تعیین شرایط مرزی معادله انتشار، غلظت آلاینده NO_x در مرزها به صورت ثابت یا متغیر قابل تعریف است. در این مطالعه از نرم افزار EPA AERMOD برای تخمین غلظت آلاینده در خیابان و ورودی تونل زیرگذر استفاده شده است. مدل AERMOD یک مدل پراکنشی حالت دائمی است و برای محاسبه غلظت آلاینده‌های هوا در مناطق شهری و روستایی، صاف و ناهموار، انتشار سطحی و در ارتفاع از منابع نقطه‌ای، حجمی و انواع مختلف منابع سطحی قابل استفاده است (نورپور، ۱۳۹۳). پس از تعریف شرایط مرزی، سرعت باد، غلظت آلاینده و شار سطحی آلاینده در هر سناریو، حل عددی کلیه معادلات در نرم‌افزار COMSOL انجام می‌شود که جزئیات آن در ادامه تشریح شده است.

هندسه مدل CFD

چگونگی جریان هوا بر انتشار آلاینده در دالان خیابان و زیرگذر زیر آن تأثیر می‌گذارد. این اثر برای زیرگذر خیابان زند از اهمیت بیشتری برخوردار است چون که باد غالب غربی بوده که با ورودی زیر گذر هم‌راستا است. بنابراین بادهای شدید ممکن است بر تهویه طبیعی تونل زند تأثیر مثبت داشته باشد. غلظت آلاینده دی اکسید نیتروژن در تونل به خاطر تغییر جریان باد در دالان خیابان و تونل متغیر خواهد شد. برای تخمین تأثیر ارتفاع ساختمان‌های اطراف خیابان بر انتشار آلاینده در خیابان و تونل زند، مدل سه بعدی CFD با سه ارتفاع مختلف خیابان (H) تهیه شد. برای تخمین رفتار دینامیکی هوا در تونل و خیابان، از سه سرعت باد و دو سمت باد طولی (غرب به شرق) و باد عرضی (شمال به جنوب) برای شرایط مرزی استفاده شد. سپس انتشار آلاینده NO_x در دالان خیابان و زیر گذر زند با در نظر گرفتن غلظت NO_x در ورودی مدل و منابع

ارتفاع ۵,۲۵ متر در زیر دالان خیابان زند در مدل در نظر گرفته شد. سه تابع متفاوت سرعت باد به عنوان شرایط مرزی مدل تعریف شد که توابع $V=1.2619*(z)^{0.2}$ و $V=3.1547*(z)^{0.2}$ و $V=5.0476*(z)^{0.2}$ متناسب با سرعت‌های باد 5 m/s, 2 m/s و 8 m/s در ارتفاع ۱۰ متر از سطح خیابان زند است (Ghiaus, 2003). معادلات سرعت برای توصیف شرایط مرزی ورودی هوا به مدل در شرایط باد طولی و باد عرضی منظور شد. تابع غلظت آلاینده NO_x بصورت $C=0.00002*(z+2)^{-1.513}$ متناسب با شکل ۳ برای تعریف غلظت جریان هوای ورودی به مدل در شرایط باد طولی استفاده شد. غلظت آلاینده NO_x به میزان صفر برای جریان هوای ورودی به مدل در شرایط باد عرضی به کار گرفته شد.

پس از انجام محاسبات CFD و برای مقایسه نتایج تخمین غلظت آلاینده در سناریوهای مختلف، میانگین مقادیر محاسبه شده برای غلظت آلاینده NO_x در یک صفحه افقی فرضی در ارتفاع ۲ متری خیابان و یک صفحه افقی فرضی در ارتفاع ۱,۵ متری تونل در شرایط مرزی مختلف در جدول‌های ۱ تا ۳ آمده است. غلظت آلاینده NO_x در تونل و خیابان با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد و این به خاطر افزایش میزان هوای تمیز ورودی در چنین شرایطی است.

جدول ۱- غلظت میانگین NO_x با فرض تابع سرعت باد 2 m/s

ارتفاع دالان خیابان بالای زیر گذر	غلظت NO _x در تونل (mg/m ³)		غلظت NO _x در خیابان (mg/m ³)	
	سمت باد طولی	سمت باد عرضی	سمت باد طولی	سمت باد عرضی
7.5 m	5.08	8.05	0.153	0.005
15 m	5.02	7.19	0.156	0.124
30 m	4.98	6.70	0.166	0.127

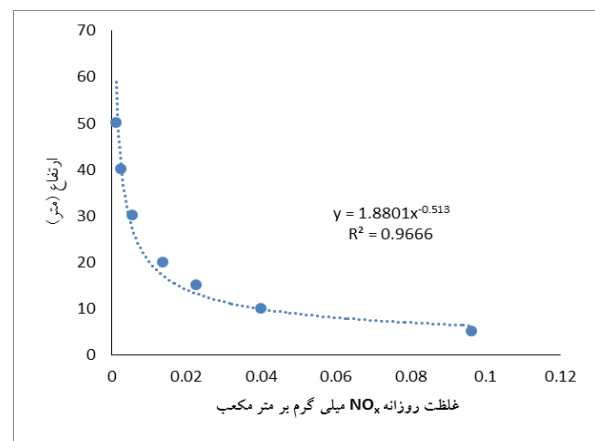
جدول ۲- غلظت میانگین NO_x با فرض تابع سرعت باد 5 m/s

ارتفاع دالان خیابان بالای زیر گذر	غلظت NO _x در تونل (mg/m ³)		غلظت NO _x در خیابان (mg/m ³)	
	سمت باد طولی	سمت باد عرضی	سمت باد طولی	سمت باد عرضی
7.5 m	2.80	9.15	0.067	0.016

سرعت باد و غلظت آلاینده NO_x در ورودی مدل با ارتفاع تغییر می‌کند. برای جریان هوا تابع سرعت متناسب با ارتفاع، $Wind\ speed(z) = Wind\ speed_{10} * (z/10)^{0.2}$ برای باد با سرعت‌های 5 m/s, 2 m/s و 8 m/s در ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین در نظر گرفته شده است (Ghiaus, 2003).

غلظت آلاینده NO_x در ورودی مدل بوسیله نرم‌افزار EPA AERMOD و بر مبنای انتشار آلاینده NO_x در خیابان زند از وسایل نقلیه مدل‌سازی شده است. نتایج مدل‌سازی در ارتفاع‌های مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده و تابع غلظت تطبیق یافته برای تخمین غلظت NO_x در ارتفاع‌های بالای ۲ متر به کار گرفته شده است.

ضریب انتشار NO_x برای خودروهای سواری 1.39 gr/mile است (EPA, 2001). تردد همزمان ۱۶۰ خودرو در شرایط حداکثر بار ترافیکی در نظر گرفته شده است. با فرض سرعت حرکت ۳۰ کیلومتر در ساعت برای خودروهایی که در شرایط اوج ترافیک درون زیر گذر زند تردد می‌کنند، آهنگ تولید آلاینده NO_x به میزان 0.000126 gr/m²s از کف تونل و معادل گازهای خروجی از اگزوز ۱۶۰ خودرو درون زیرگذر زند در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

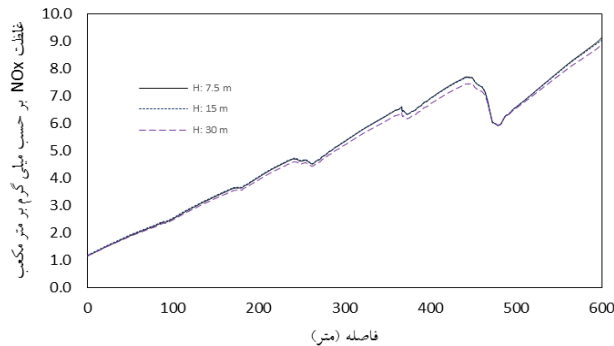


شکل ۳- غلظت روزانه محاسبه شده NO_x در خیابان زند

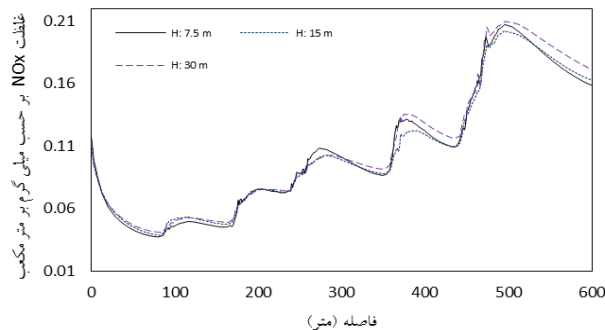
نتایج

دالان خیابان بالای زیرگذر زند به طول ۸۴۸ متر، عرض ۲۸ متر و سه ارتفاع مختلف ۷,۵ متر، ۱۵ متر و ۳۰ متر مدل‌سازی شد و تونل زیرگذر زند با طول واقعی ۶۰۸ متر، عرض ۱۵ متر و

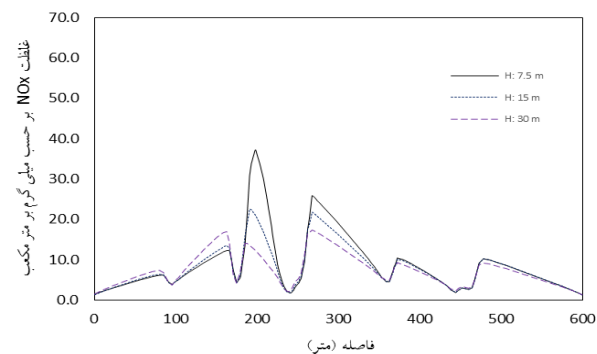
آلاینده NO_x در طول تونل متغیر بوده و متناسب با محل قرارگیری فن‌های دمنده و مکنده است. غلظت آلاینده NO_x در طول تونل افزایش یافته و به حداکثر خود در میانه‌های تونل می‌رسد و به تدریج تا انتهای تونل کاهش می‌یابد. برای دالان خیابان، حداکثر غلظت آلاینده در راستای وزش باد و متناسب با محل فن‌های مکنده خواهد بود.



شکل ۴ الف - نمودار غلظت NO_x در راستای تونل زیرگذر زند (برای ارتفاع‌های مختلف و بر مبنای باد طولی سمت غرب به شرق با سرعت 2 m/s)



شکل ۴ ب - نمودار غلظت NO_x در راستای دالان خیابان بالای زیرگذر زند (برای ارتفاع‌های مختلف و بر مبنای باد طولی سمت غرب به شرق با سرعت باد 2 m/s)



15 m	2.73	7.79	0.067	0.075
30 m	2.79	6.35	0.072	0.085

جدول ۳ - غلظت میانگین NO_x با فرض تابع سرعت باد 8 m/s

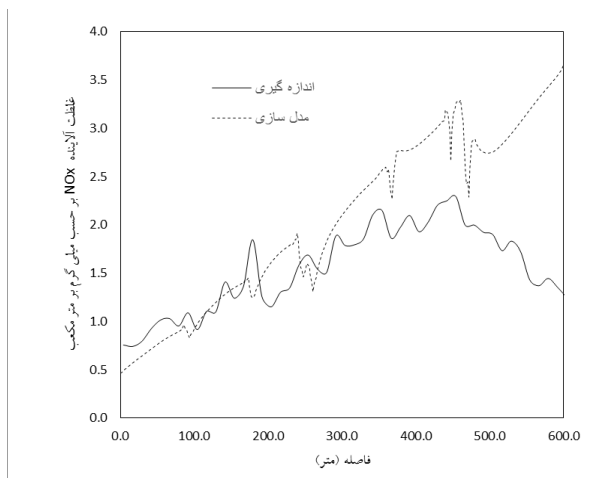
ارتفاع دالان خیابان بالای زیر گذر	غلظت NO_x در تونل زیرگذر (mg/m^3)		غلظت NO_x در خیابان بالای زیرگذر (mg/m^3)	
	سمت باد طولی	سمت باد عرضی	سمت باد طولی	سمت باد عرضی
7.5 m	1.80	8.68	0.044	0.017
15 m	1.76	8.28	0.045	0.060
30 m	1.89	6.42	0.048	0.059

نتایج نشان می‌دهد که برای بادهای طولی، غلظت آلاینده در تونل و دالان خیابان حساسیت زیادی به تغییر ارتفاع ندارد. کاهش اندکی در غلظت آلاینده در تونل با افزایش ارتفاع مشاهده شد و این به خاطر افزایش جریان هوا در تونل است. همچنین افزایش کمی در غلظت آلاینده در خیابان با افزایش ارتفاع مشاهده شد. برای بادهای عرضی، کاهش اندکی در غلظت آلاینده در تونل با افزایش ارتفاع مشاهده شد و این به خاطر افزایش جریان هوای تمیز از ورودی و دریچه‌ها به تونل است. همچنین غلظت آلاینده در خیابان با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد.

به منظور مقایسه نتایج تخمین غلظت آلاینده NO_x در طول خیابان و تونل زیرگذر در سناریوهای مختلف، غلظت‌های به دست آمده در یک خط فرضی در میانه زیرگذر و در ارتفاع ۱٫۵ متر و یک خط فرضی در خیابان و در ارتفاع ۲ متر بر روی نمودار رسم شد. نتایج بدست آمده برای باد با سرعت ۲ m/s و سمت باد طولی در شکل ۴ آورده شده است. بقیه نتایج برای سرعت‌های ۵ m/s و ۸ m/s نیز تغییرات زیادی را نشان نداد. نتایج نشان می‌دهد که چگالی آلاینده NO_x در طول افزایش یافته و به حداکثر میزان خود در انتهای تونل می‌رسد. حداکثر غلظت آلاینده NO_x در دالان خیابان در راستای سمت باد و بعد از فن‌های مکنده خواهد بود.

نتایج نشان داده شده در شکل ۵، برای باد عرضی و با سرعت 2 m/s است. بقیه نتایج برای سرعت‌های ۵ m/s و ۸ m/s نیز تغییرات مهمی را نشان نداد. نتایج نشان می‌دهد که غلظت

بود. شرایط مرزی مدل CFD بر اساس شرایط نمونه‌گیری تعریف شده و تخمین غلظت آلاینده در طول زیرگذر با استفاده از مدل CFD محاسبه شد. نمودار مقایسه نتایج تخمین غلظت آلاینده بر اساس مدل‌سازی CFD و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت آلاینده در زیرگذر زنده در شکل ۶ ارائه شده است. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده 1.55 mg/m^3 و میانگین نتایج مدل‌سازی 2.03 mg/m^3 است. بنابراین میانگین نتایج مدل‌سازی در حدود ۲۴٪ از نتایج واقعی بیشتر است. مقایسه نتایج اندازه‌گیری غلظت آلاینده در طول زیرگذر و نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که تا ۵۰۰ متری از ورودی تونل، نتایج مدل‌سازی با اندازه‌گیری‌های انجام شده تطابق قابل قبولی دارد ولی اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی در ۱۰۰ متر نهایی تا سه برابر اختلاف دارد.

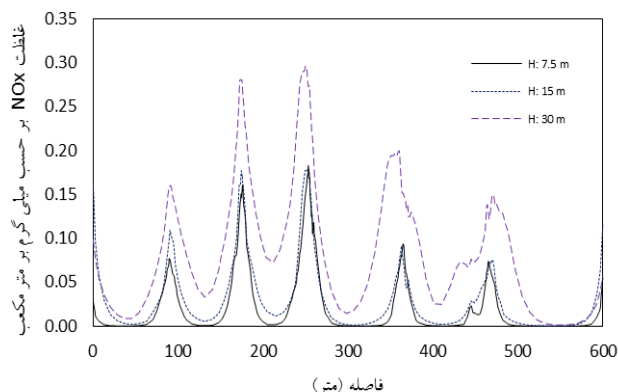


شکل ۶- نمودار مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده غلظت NO_x در زیرگذر زنده

بحث و نتیجه‌گیری

همان‌گونه که در نتایج حاصل از مطالعات قبلی چگالی CO در زیرگذر زنده بیش از حد استاندارد گزارش شده است (ادیب زاده، ۱۳۸۳ و عباسلو، ۱۳۹۱) نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که غلظت آلاینده NO_x نیز بیش از حد استاندارد بوده و سیستم تهویه مکانیکی موجود قادر به کنترل آلاینده‌های ترافیکی در هوای تونل در سطح استاندارد هوای پاک نیست.

شکل ۵ الف- نمودار غلظت NO_x در راستای تونل زیرگذر زنده (برای ارتفاع‌های مختلف و بر مبنای باد عرضی سمت شمال به جنوب با سرعت باد 2 m/s)



شکل ۵ ب- نمودار غلظت NO_x در راستای دالان خیابان بالای زیرگذر زنده (برای ارتفاع‌های مختلف و بر مبنای باد عرضی سمت شمال به جنوب با سرعت باد 2 m/s)

با توجه به نتایج به دست آمده در شکل‌های ۴ و ۵، سیستم تهویه مکانیکی موجود قادر به کنترل آلاینده NO_x در سطح استاندارد هوای پاک در زیرگذر نیست. حداکثر غلظت آلاینده NO_x در زیرگذر به میزان 9.1 mg/m^3 برای باد عرضی و به میزان 5 mg/m^3 برای باد طولی برآورد شد. این میزان چند برابر سطح استاندارد هوای پاک و برابر 0.2 mg/m^3 است. حداکثر غلظت آلاینده NO_x در خیابان بالای زیرگذر، 0.017 mg/m^3 برای جریان باد عرضی و معادل 0.153 mg/m^3 برای وزش باد طولی برآورد شده است. این میزان با سطح استاندارد هوای پاک در تطابق خواهد بود.

به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی CFD انجام شده و تعیین میزان خطا یا انحراف محاسبات تخمین غلظت آلاینده در تونل زیرگذر با مقادیر واقعی، غلظت آلاینده در ۴۹ نقطه با فواصل مساوی 12.5 متر در طول زیرگذر اندازه‌گیری شد. سرعت باد در زمان نمونه‌گیری حدود 2 m/s و سمت باد غربی است که معادل شرایط باد طولی در مدل CFD بود. تردد هم‌زمان ۶۴ خودرو در زیرگذر در زمان نمونه‌گیری (۴۰ درصد حداکثر بار ترافیکی) اندازه‌گیری شد. بر این اساس میزان تولید آلاینده NO_x از این ۶۴ خودرو $0.0000384 \text{ gr/m}^2\text{s}$ خواهد

تهویه مکانیکی و فن‌آوری‌های حذف آلاینده‌های هوا مفیدتر خواهد بود. بنابراین لازم است که فن‌آوری حذف آلاینده‌های هوا در تونل‌های زیر گذر با کمک محققین در آینده بیشتر توسعه یابد.

مراجع

۱- وحید ادیب‌زاده "بررسی وضعیت آلودگی و تهویه زیر گذر زند شیراز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۳، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه شیراز، وزارت علوم تحقیقات و فن‌آوری.

۲- سمیه زارعی "بررسی کنترل آلودگی هوا در زیر گذر زند شهرستان شیراز" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۶، مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، وزارت علوم تحقیقات و فن‌آوری.

۳- عباسلو "شبیه‌سازی توزیع غلظت CO را در زیر گذر زند در شرایط ناپایا با استفاده از دینامیک سیالان محاسباتی" پایان‌نامه دکترا، ۱۳۹۱، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه شیراز، وزارت علوم تحقیقات و فن‌آوری.

۴- نورپور علیرضا ۱۳۹۳ و نیما کاظمی شهبابی "مدل‌سازی پراکنش آلاینده‌های هوا خروجی از دودکش کارخانه سیمان ایلام" نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۴، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳ - یادداشت پژوهشی

5- Chang, T. Y, S. W. Modzelewski, I. M. Norbeck and W. R. Pierson, "Tunnel Air Quality and Vehicles Emissions," J Atmo. Environ., 15 (6), 1011 - 1061 (1981).

6- Chung-Yi Chung, K. S. Chen and Chung-Shin Yuan "Modeling Of Air Pollutant Dispersion In A Longitudinal Ventilated Traffic Tunnel" Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 237-244 (2001).

7- EPA, "Average Annual Emissions and Fuel Consumption for Passenger Cars and Light Trucks", EPA420-F-00-013 April 2000.

به صورت معمول جانمایی فن‌های مکنده یا دمنده سیستم‌های تهویه تونل باید به گونه‌ای باشد که هوای داخل تونل را به صورت یکنواخت تخلیه کند در حالی که جانمایی فن‌های مکنده و دمنده در طراحی موجود منجر به تهویه یکنواخت نشده است. جانمایی موجود که فن‌های دمنده و مکنده، بر روی سقف و در یک راستا قرار دارند منجر به چرخش جریان هوای آلوده بین فن دمنده و فن مکنده شده و این مسئله منجر به کاهش کارایی سیستم تهویه می‌شود. به نظر می‌رسد که در وضعیت موجود، پیش‌بینی کانال‌هایی برای هدایت هوای پاک فن‌های دمنده به تونل از پایین دیواره‌های تونل و تخلیه هوای آلوده از زیر سقف تونل بتواند تا حدودی به بهبود عملکرد سیستم تهویه موجود کمک کند.

مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده بوسیله مدل CFD تا نیمه تونل بسیار به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک بوده و در ادامه مقادیر بزرگتری را برای غلظت آلاینده پیش‌بینی کرد. میانگین مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل CFD در حدود ۲۴٪ از مقادیر واقعی بیشتر بود.

برای کنترل چگالی آلاینده‌های ترافیکی در زیر گذرهای شهری با استفاده از سیستم‌های تهویه مکانیکی، لازم است که کیفیت هوای ورودی به تونل‌ها در طراحی سیستم تهویه در نظر گرفته شود. فضای بالای تونل زیر گذرهای شهری معمولاً دالان‌های دالان‌های آلوده زیر گذر به این دالان‌های خیابانی منجر به افزایش آلودگی در سطح خیابان خواهد شد. فن‌های مکنده هوای آلوده تونل بصورت منبع ثابت انتشار آلاینده در دالان خیابان عمل خواهند کرد و تجمع آلاینده‌های هوا در دالان خیابانی با افزایش ارتفاع خیابان افزایش می‌یابد.

بر اساس نتایج به دست آمده در مطالعه زیر گذر زند، غلظت آلاینده در تونل بستگی بیشتری به جانمایی و ظرفیت سیستم تهویه مکانیکی داشته و نسبت به ارتفاع دالان خیابانی بالای آن از حساسیت کمتری برخوردار است. برای کنترل سطح آلاینده‌های هوا در تونل‌های زیر گذر، ترکیب سیستم‌های

13- Omduth Coceal, "Flow structure and near-field dispersion in arrays of building-like Obstacles, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 125 (2014) 52-68.

14- S. M. Kwa, S. M. Salim "Numerical Simulation of Dispersion in an Urban Street Canyon: Comparison between Steady and Fluctuating Boundary Conditions", Engineering Letters, 23:1, EL_23_1_08, Advance online publication: 17 February 2015.

15- Sotiris Vardoulakis, Bernard E.A. Fisher, Koulis Pericleous, Norbert Gonzalez - Flesca. "Modelling air quality in street canyons: a review". Atmospheric environment, 2003, 37 (2), pp.155-182.

8- H K Versteeg and W Malalasekera," An Introductionto ComputationalFluid Dynamics THE FINITE VOLUME METHOD Second Edition Pearson Education Limited 1995, 2007, ISBN: 978 – 0 – 13 - 127498 – 3.

9- Hao Zhang, Study on the influence of the street side buildings on the pollutant dispersion in the street canyon, Procedia Engineering 121 (2015) 37 – 44.

10- Hunter L.J. Johnson G.T. Watson I. D., 1992. "An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon". Atmospheric Environment 26B (4), 425-432.

11- Ghiaus C, Allard F., 2003. "Natural ventilation in an urban context. In: Santamouris M, editor. Solar thermal technologies for buildings". London: James and James; 2003. p. 116-39.

12- Marsault, J. P., "Measurements of Tunnel Pollution Distribution Related to Ventilation and Traffic,"Int. Sympo. on the Aerodynamic & Ventilation of Vehicle Tunnels, York, England, E3, 197-218, March 23-25 (1982).