پژوهش‌های محیط‌زیست، سال ۹ شماره ۱۷، بهار و تابستان ۱۳۹۷، از صفحه ۱۴۷ تا ۱۵۴

تخمین و شبیه‌سازی کاهش بعضی از آلاینده‌های هوا توسط بام سبز (مطالعه موردی: پل طبیعت تهران)

رامین ابراهیم‌نژاد[۱]، امید نوری*[۲]؛ رضا دیهیم فرد[۲]

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲ استادیار پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۲؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹)

چکیده

بام سبز در چند دهه اخیر به عنوان روشی برای مقابله با جزایر گرمایی شهری، آلودگی هوا، رواناب ناشی از بارش‌های جوی و آلودگی صوتی در بسیاری از شهرهای مدرن در آمریکای شمالی، اروپا و آسیای جنوب شرقی به‌کار گرفته شده است. در این تحقیق با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی؛ برهم‌کنش بین هوا و بام سبز احداث شده بر روی سقف سازه پل طبیعت تهران، برای به دام انداختن آلاینده‌های تولید شده از خودروهای در حال تردد از زیر پل، با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met بررسی شد. بام سبز احداث شده بر روی این پل شامل دو نوع گسترده و فشرده است. حداکثر نشست ذرات معلق، مونوکسید کربن و دی اکسید نیتروژن بر روی گیاهان بام سبز به ترتیب ۰/۰۵$\mu g/m^2$، ۰/۳۱$\mu g/m^2$ و ۲/۳۷ $\mu g/m^2$ بود. در مجموع نتایج نشان داد که نشست آلاینده‌ها بر روی بام سبز گسترده قسمت شمالی پل در مقایسه با بام سبز گسترده قسمت جنوبی، بام سبز فشرده و قسمت‌های عاری از پوشش گیاهی بام پل، به مراتب بیشتر بود.

کلید واژه‌ها: ذرات معلق، مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، مدل‌سازی محیطی، ENVI-met

*نویسنده مسئول: Email: nouri.omid@gmail.com

سرآغاز

زندگی شهری در قرن ۲۱ جدا از مزایا و رفاهی که برای جامعه بشری به ارمغان آورده است مسایل و معضلات جدیدی را به همراه داشته است. یکی از مهم‌ترین پیامدهای زندگی شهری و ماشینی جدایی انسان از طبیعت است که منجر به انواع بیماری‌های جسمی و روحی بشر امروز شده است. به طور خاص در مورد تهران که در دهه‌های گذشته با توجه به مرکزیت اقتصاد و سیاست ایران رشد جمعیت بالایی را تجربه کرده است، پروژه‌های عظیم شهری برای اسکان، رفت وآمد و خدمت‌رسانی به این جمعیت میلیونی عملیاتی شدند؛ این تحولات، چشم‌انداز شهروند تهران امروز را به بتن و آسفالت تبدیل کرده است. انواع افسردگی‌ها و بروز روحیات خشن بخشی از نتایج زندگی در چنین محیطی محسوب می‌شود. بنابراین، برای کاهش آثار این گونه معضلات، در زندگی امروزی ایجاد شهری سبز، پاسخی منطقی و عملی محسوب می‌شود؛ اما در شهری همانند تهران که توسعه عمرانی وسیعی را تجربه کرده است زمینی که هم اکنون کاربری نداشته باشد و شرایط تبدیل به فضای سبز را دارا باشد کمیاب است. بنابراین، احداث و نگهداری فضای سبز به صورت کلاسیک در قالب باغ و بوستان هزینه بسیار بالایی را می‌طلبد. بحث خصوصی‌سازی فضای سبز برای استفاده متداول و آسوده‌تر از آن برای شهروندان و از بین رفتن هزینه‌های احداث و نگهداری برای شهرداری، ایجاد فضای سبز عمودی در قالب بام سبز را از لحاظ اقتصادی توجیه می‌کند.

از آنجایی که پوشش گیاهی در مناطق شهری در مقابله با آثار تغییرات اقلیمی مانند بالا رفتن سطح آب‌های آزاد و گرمایش جهانی، و کاهش آلاینده‌های هوا نقش موثری بازی می‌کنند بسیاری از شهرها گسترش فضای سبز شهری را در برنامه‌های خود گنجانده‌اند (Andersson-Skaold et al., 2015).

امروزه آثار حضور درخت‌ها، درختچه‌ها و دیگر پوشش‌های گیاهی بر کاهش آلاینده‌های هوا در مناطق شهری به اثبات رسیده است و در نتیجه حضور گیاهان در مناطق شهری، کیفیت هوا و کیفیت زندگی شهروندان بهبود یافته است (Nowak, 1998).

عموماً گیاهان از طریق روزنه‌های برگ‌های خود کار جذب آلاینده‌های گازی را انجام می‌دهند. بعد از ورود آلاینده به داخل گیاه، این گازها با آب واکنش می‌دهند و اسیدها و دیگر ترکیبات شیمیایی را تشکیل می‌دهند (Baldocchi et al., 1987). سطح چسبنده پوشش گیاهی، ذرات معلقی را که توسط باد حمل می‌شوند را نیز بر روی خود نگه می‌دارد (Bidwell & Fraser, 1972). برخی از این ذرات معلق جذب گیاه می‌شوند ولی در کل پوشش گیاهی مکانی موقتی برای ذرات معلق به حساب می‌آید؛ بیشتر ذرات معلق جذب شده، توسط باد دوباره به اتمسفر برمی‌گردنند و یا توسط بارش‌های جوی شسته شده و در خاک انباشت می‌شوند (Wesely, 2014).

ذرات موجود در هوا و مولکول‌های گاز زمانی که از نزدیک یک سطح می‌گذرند، می‌توانند رسوب شوند. بسیاری از گیاهان با دارا بودن یک سطح بزرگ در واحد حجم، احتمال رسوب ذرات معلق و مولکول‌های گاز را در مقایسه با سطوح صاف و ساخته شده موجود در مناطق شهری، افزایش می‌دهند. به عنوان مثال، رسوب ذرات کوچکتر از یک میلیمتر بر روی چمن مصنوعی در مقایسه با سطوح شیشه‌ای و سیمان، ۳۰-۱۰ برابر سریعتر است (Roupsard et al., 2013).

رسوب بر روی پوشش گیاهی معمولاً به عنوان یک بعد از رسوب عمودی بر روی یک لایه همگن از پوشش گیاهی در قالب یک جنگل یا مزرعه، توصیف می‌شود. برای کاربردهای شهری، پوشش گیاهی اغلب فقط تک درختان یا تک بوته‌ها یا یک ردیف خطی از آنها هستند که خیابان و پرچین‌ها را تشکیل می‌دهند، و فرایند رسوب نیاز به مدل سازی با جزئیات بیشتری دارد. با این حال، بسیاری از قوانین فیزیکی را به راحتی می‌توان با استفاده از وضعیت عبور یک جریان هوا از سطح یک برگ به جای یک گیاه کامل یا جنگل توصیف کرد (Janhall, 2015).

از آنجا که مقدار توده رسوب شده به طور مستقیم با تراکم هوای نزدیک به سطح ارتباط دارد. می‌توان مطمئن بود که تراکم هوا در اطراف گیاهان علفی مختلف بر اساس فاصله تا جاده در هنگام اندازه‌گیری توده رسوب شده، مشابه است. آنها دریافتند که برگ‌های پُرزدار بطور قابل ملاحضه‌ای رسوب ذرات با اندازه ۱۸۰-۳ میلی‌متر را افزایش می‌دهند (Weber et al., 2014). در تحقیقی، رسوب بر روی گونه‌های مختلف پوشش گیاهی در پشت بام، تجزیه و تحلیل شد و متوجه شدند که رسوب بر روی چمن و بر روی گیاهان با برگ‌های پُرزدار بیشتر از دیگر گیاهان است (Speak et al., 2012).

بر اساس تفکر سیستمی، فضای سبزی پایدار است که حداکثر کارایی در درازمدت و حداقل آثار منفی بر محیط خود داشته

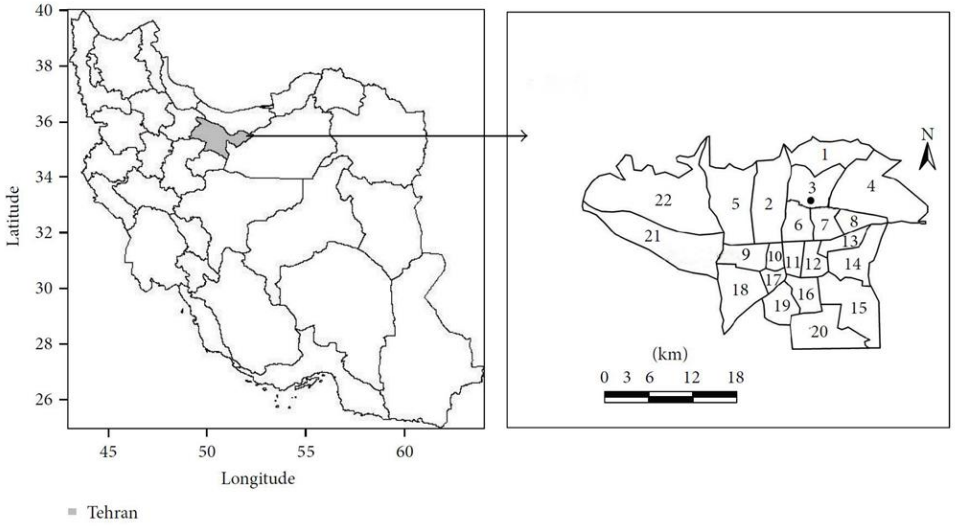
باشد. همان‌طور که پیش از این به اهمیت فضای سبز درزندگی شهری اشاره شد، طراحی آن باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر کارایی بالا کمترین هزینه را به شهر تحمیل کند.
برای رسیدن به طراحی پایدار یکی از نکات مهم شناخت بستر موجود و محیط اطراف و فرهنگ بومی و تطبیق آن با اهداف طرح برای برقراری تعادل بین نیازهای شخصی و عمومی است تا فضای سبز بتواند به بهترین وجه برای ارتقاء عملکرد اجتماعی خود مؤثر باشد. در مورد فضای سبز شهری می‌توان گفت که این فضاها جزئی از یک سیستم بزرگ‌تر به نام شهر هستند بنابراین ارتباط این جزء فضای سبز با سایر اجزاء را باید در چارچوب اهداف آن بررسی کرد. که شامل اهداف اکولوژیکی، روانی و کالبدی است.
با توجه به این که بسیاری از شهرهای ایران و از جمله تهران بر روی کمربند خشک جهان قرار دارند، الزام ایجاد فضای سبزی پایدار، انطباق با شرایط اکولوژیک منطقه است، که نام فضای سبز اکولوژیک را بر آن نهاده‌اند.
ایجاد فضای سبز در محیط‌های شهری با محدودیت‌هایی روبرو است که می‌توان موارد زیر را در مورد آن ذکر کرد؛
محدودیت‌های اقتصادی (مانند هزینه‌های احداث و نگهداری و بهره‌برداری از فضای سبز)،
محدویت‌های فیزیکی (مانند ساخت‌وسازهای پیرامون، نوسازی ساختمان‌ها بدون لحاظ کردن موقعیت فضای سبز وآلاینده‌های محیطی و ۱. تنش ناشی از آن‌ها برای فضای سبز)، ۲. محدودیت‌های اجتماعی (مانند ایمنی، زیباشناسی و ...).
بنابراین فضای سبز اکولوژیک باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر لحاظ کردن تمامی عوامل و محدودیت‌ها در طراحی و ایجاد فضای سبز، از شرایط اقلیمی و زیستی منطقه تبعیت داشته باشد.
بام‌های سبز امروزی پدیده‌ای نو و با قدمتی کمتر از چند دهه هستند اما ایده اولیه پیدایش آن‌ها به زیگورات‌های تمدن بین‌النهرین و باغ‌های معلق بابل برمی‌گردد و این موضوع مبین آن است که بشر در طول تاریخ همیشه به دنبال زیباسازی محیط پیرامون خود با بهره‌گیری از عناصر طبیعی بوده است. در دوره معاصر، کشورهای اروپایی و مخصوصاً کشور آلمان مهد توسعه بام‌های سبز بوده‌اند البته در سال‌های اخیر آمریکای شمالی و آسیای جنوب شرقی نیز شاهد رشد سریع این پدیده بوده‌اند.
درباره تفاوت‌های کاربری انواع بام سبز این نکته قابل ذکر است که در بام سبز فشرده باید به زیبایی دیداری که گیاهان منتخب ایجاد می‌کنند توجه شود زیرا یکی از دلایل احداث این نوع بام سبز استفاده‌های تفریحی است؛ اما در بام‌های گسترده هدف اصلی پوشاندن سطح برهنه بام با گیاهان چمنی است بنابراین در انتخاب گیاه اولویت با میزان تاثیر آن بر میکروکلیما خواهد بود.
تاثیر بام سبز بر روی کاهش مقدار آلاینده‌های هوا در مناطق شهری موضوع جدیدی در تحقیقات حیطه بام سبز به حساب می‌آید. همچنین ارزیابی جامعی درباره خدمات اکوسیستمی بام‌های سبز در مناطق خشک و نیمه خشک همانند شهر تهران که دچار معضل آلودگی هوا نیز است، به انجام نرسیده است. بنابراین ارزیابی تاثیر بام سبز در بهبود کیفیت هوا از طریق کاهش آلاینده‌ها و ذرات معلق، ضروری است، هدف اصلی این تحقیق بود.

مواد و روش‌ها

مکان مطالعه شده

پل طبیعت در منطقه ۳ شهرداری تهران واقع شده است (شکل ۱). طول این پل ۳۰۰ متر بوده و وزن سازه‌اش به ۲۰۰۰ تن می‌رسد. پل طبیعت بزرگ‌ترین پل غیرخودرویی ایران محسوب می‌شود. این پل ۷۰۰۰ متر مربع مساحت داشته و عرض پل در نقاط مختلف بین ۶ متر تا ۱۳ متر متغیر است. بدنه اصلی پل بر روی سه‌پایه بنا شده است و برای ساخت آن ۱۴۰۰۰ قطعه فولادی در ابعاد مختلف در ارتفاع ۴۰ متری زمین برشکاری، سر هم و نصب شده است. در طراحی این پل از معماری پل‌های ایرانی مانند پل خواجو الهام گرفته شده است. این پل یک سازه با طراحی ارگانیک و شبیه به درخت و کاملاً سازگار با محیط زیست و طبیعت است که نمونه مشابه آن در پارک‌های ملی و طبیعی کشورهای فرانسه، کانادا، هلند، بلژیک، مالزی و استرالیا ساخته شده است. فرم درختی ستون‌ها و انتخاب نام «طبیعت» برای پل، هر دو نشان از پیوستگی دو فضای سبز اطراف (بوستان طالقانی در شرق و بوستان آب وآتش در غرب آن) توسط این پل دارند. پل طبیعت ۳ طبقه دارد، طبقه اول ۱۴۵۰، طبقه دوم ۲۸۷۰ و طبقه سوم ۵۷۱ مترمربع است. همچنین در طبقه سوم انواع فضاهای تفریحی از نمایشگاه و کافی‌شاپ گرفته تا گالری و رستوران‌های متنوع به‌عنوان یک مقصد گردشگری جذاب ایجاد شده است. پیش‌بینی فضای سبز در قالب بام سبز و طراحی مبلمان شهری مناسب و هماهنگ با ویژگی‌های این سازه از نکاتی است که در طراحی این پل مدنظر قرار گرفته است. در طول پل فضاهایی با عملکردهای فرهنگی، تفریحی و

گردشگری تدارک دیده شده که به عنوان مثال می‌توان به کافی شاپ، رستوران، کافه گالری و همچنین گیاهان کاشته شده بر روی پل اشاره کرد که در کنار انحنای بدنه مناظر زیبایی را به دست می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی پل طبیعت تهران

نرم افزار ENVI-met

در مطالعات شبیه‌سازی از نرم‌افزاری متناسب با اهداف پروژه استفاده می‌شود، با توجه به وجود سه عامل سازه، هوا و پوشش گیاهی در پروژه موردنظر یکی از بهترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی محیط‌های شهری که این سه عامل را در محاسبه‌های خود لحاظ می‌کند، نرم‌افزار ENVI-met است، که در این بررسی مورد استفاده قرار گرفت.

ENVI-met سامانه مدل‌سازی جامع میکروکلیما است که به صورت سه‌بعدی روابط بین سطح، گیاه و هوا را در مناطق شهری شبیه‌سازی می‌کند. دقت مکانی این مدل ۰/۵ تا ۱۰ متر و دقت زمانی آن ۱ تا ۵ ثانیه است که قادر به مدل‌سازی تا ۴۸ ساعت از میکروکلیمای مورد نظر خواهد بود. این مدل بر اساس قوانین دینامیک سیالات و ترمودینامیک طراحی و ساخته شده است.

قابلیت‌های مدل عبارتند از؛

- محاسبه جریان اشعه‌های طول موج بلند و کوتاه با در نظر گرفتن سایه‌اندازی، انعکاس نور و بازتاب از سطح ساختمان و پوشش گیاهی موجود،
- محاسبه تبخیر، تعرق و جریان گرمای آشکار پوشش گیاهی با شبیه‌سازی تمامی متغیرهای فیزیکی گیاه (به طور مثال میزان فتوسنتز)،
- محاسبه دمای دیوار و بام سازه در هر نقطه دلخواه،
- محاسبه جریان تبادل آب و گرما در سیستم خاک،
- محاسبه متغیرهای زیست هواشناسی مثل MRT میانگین دمای تشعشع و PMV دمای مناسب بر اساس نظر جامعه آماری مورد نظر،
- محاسبه پراکنش گازهای خنثی و ذرات غبار با در نظر گرفتن میزان رسوب آن‌ها بر روی گیاه و سطح سازه.

نرم‌افـزار LEONARDO مکمل ENVI-met است و نتایج به‌دست آمده از این محاسبات را به صورت تصویری رسم می‌کند.

زمان جمع‌آوری داده‌ها

با توجه به میانگین دمای بالای هوای تهران در ماه تیر، زمان انجام شبیه‌سازی ۷ تیر ۱۳۹۴ مصادف با ۲۸ ژوئیه ۲۰۱۵ انتخاب شد.

متغیرهای موردنظر به عنوان ورودی مدل

رطوبت نسبی

علاوه بر رطوبت نسبی هوا که در ارتفاع ۲ متری سطح زمین و توسط دستگاه EM-9000 و در ساعات ۶ بامداد و ۱۶ اندازه‌گیری شد، رطوبت مخصوص در ارتفاع ۲۵۰۰ متری از طریق نرم‌افزار CACTUS2000 و با ورود دمای میانگین روز ۳۲/۳ درجه سانتی‌گراد و فشار هوا ۱۰۰۹ mb (weather.com) ۵/۳۸ g/Kg به‌دست آمد (جدول ۱).

جدول (۱): رطوبت نسبی هوا

ساعت اندازه‌گیری	رطوبت نسبی
۰۶:۰۰	٪۲۲
۱۶:۰۰	٪۱۴

دمای هوا

دمای هوا در ساعت‌های اولیه صبح و بعد از ظهر در ارتفاع ۲ متری سطح زمین توسط دستگاه EM-900 اندازه‌گیری شد که در این مدل به عنوان دمای حداقل و حداکثر برای انجام محاسبات شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرم‌افزار ENVI-met دمای اولیه را میانگین دمای روز درنظر می‌گیرد اما اگر دمای حداکثر و حداقل روز را در اختیار داشته باشد بر اساس آن دمای اولیه نیز محاسبه خواهد شد. دمای اندازه‌گیری شده بعد از تبدیل کردن به دمای مطلق و با واحد کلوین وارد نرم‌افزار شد (جدول ۲).

جدول (۲): دمای هوا

ساعت اندازه‌گیری	دما (سانتی‌گراد)	دما (کلوین)
۰۶:۰۰	۲۶/۷	۳۷/۹
۱۶:۰۰	۲۹۹/۸۵	۳۱۱/۰۵

باد

سرعت و جهت باد در زمان اندازه‌گیری حداکثر و حداقل دما و رطوبت در محل توسط دستگاه EM-9000 اندازه‌گیری شد که ۲/۹ متر بر ثانیه و از جهت جنوب غربی ثبت شد. این داده‌ها با نتایج دریافتی از ایستگاه ژئوفیزیک دانشگاه تهران نزدیک‌ترین مرکز هواشناسی به محل تطبیق داده شد، داده‌های باد ایستگاه جهت جنوب غربی و سرعت ۲ متر بر ثانیه را ثبت کرده بودند که با توجه به وضعیت توپوگرافی محیط و وجود دو منطقه تپه‌ای در اطراف بزرگراه مدرس بالا بودن سرعت باد اندازه‌گیری شده در محل توجیه‌پذیر است و بنابراین در محاسبات مدل نیز این سرعت به‌کار گرفته شد.

تابش نور خورشید

نور خورشید در ظهر روز ۷ تیر ۱۳۹۴ و به وسیله دستگاه EM-9000 بر روی پل ۱۳۰۰۰ لوکس ثبت شد، و با توجه به عدم وجود ابر در تمام طول روز همین داده به عنوان نماینده شدت نور در ساعات آفتابی در ورودی نرم‌افزار لحاظ شد.

دما و رطوبت خاک

نرم‌افزار ENVI-met برای انجام محاسبات اولیه، نیاز به داده‌های دمایی و رطوبتی ساعت شروع شبیه‌سازی مورد نظر دارد؛ بنابراین در ساعت ۶ بامداد دما و رطوبت خاک مربوط به بوستان‌های مجاور پل توسط دستگاه PMS-714 و TFA اندازه‌گیری شد که در نتیجه دمای ۱۹/۸۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۵۰٪ ظرفیت نگهداری ثبت شد. در مورد پوشش گیاهی روی پل مدل به منظور جلوگیری از تاثیر کمبود آب بر عملکرد اکولوژیک به شکل پیش‌فرض وضعیت آبیاری شده را در نظر می‌گیرد و امکان تغییر در دما و رطوبت خاک پوشش گیاهی بر روی سازه تعبیه نشده است.

نرخ انتشار آلاینده‌ها

با استفاده از استانداردهای یورو ۳ که به صورت رسمی در کشور به عنوان استاندارد تولید خودرو تصویب شده است، نرخ انتشار ۳ آلاینده انجام شد. طبق این استانداردها حداکثر انتشار آلاینده‌ها برای خودروهای بنزینی و گازوئیلی در یک کیلومتر حرکت مشخص شد. واحد ورودی مدل برای این نرخ انتشار آلاینده‌ها µg/s در نظر گرفته شد، فرض بر این بود که خودروها با سرعت ۶۰Km/h در حرکت هستند، بنابراین با توجه به استانداردهای یورو ۳ حداکثر انتشار آلاینده‌های مونوکسیدکربن، دی اکسید نیتروژن و ذرات معلق برای ساعات پرتردد و خلوت به صورت زیر وارد مدل شد. از بزرگراه مدرس در روز ۲۰۰ تا ۲۵۰ هزار خودرو عبور می‌کنند، و این به آن معنا است که در فاصله منابع آلاینده در هر ثانیه ۶ خودرو در حالت شلوغ از هر دو مسیر جنوبی و شمالی بزرگراه عبور می‌کنند بنابراین ترافیک ساعات شلوغ نیز به صورت روان در نظر گرفته شد، ساعات شلوغ ۶ تا ۹ صبح، ۱۳ تا ۱۶ و ۲۰ تا ۲۳ تعیین شد (جدول ۳).

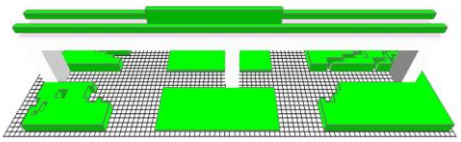
جدول (۳): نرخ انتشار آلاینده‌ها

نرخ انتشار	ساعات پرتردد	ساعات خلوت
ذرات معلق	۸۳۳ µg/s	۴۱۶ µg/s
مونوکسید کربن	۲۴۵۰۰ µg/s	۱۲۲۵۰ µg/s
دی اکسید نیتروژن	۶۰۰۰ µg/s	۳۰۰۰ µg/s

نتایج

طرح سه بعدی شبیه‌سازی شده سازه پل در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل (۳) وضعیت نشست ذرات معلق بر روی بام

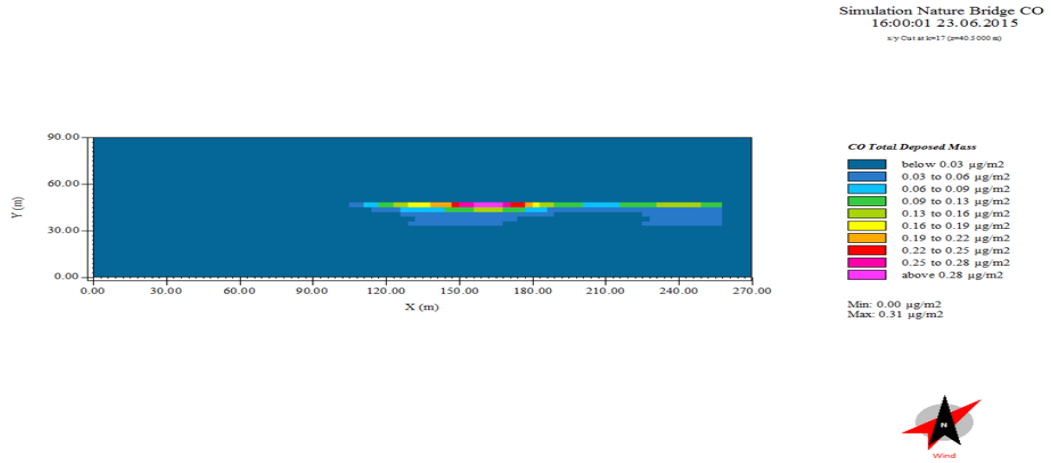
سبز به نمایش درآمده است، با توجه به سنگینی ذرات معلق، مقدار کمتری از این ذرات نسبت به گازهای بررسی شده، تا ارتفاع ۴۰/۵ متر صعود کردند و حداکثر نشست بر روی بام سبز گسترده شمالی، ۰/۰۵$\mu g/m^2$ بود، در قسمت بام سبز فشرده و بام سبز گسترده جنوبی، نشست حداکثر به ۰/۰۱ $\mu g/m^2$ رسید. باد جنوب غربی، در عدم صعود ذرات معلق تا این ارتفاع نقش اساسی داشت.



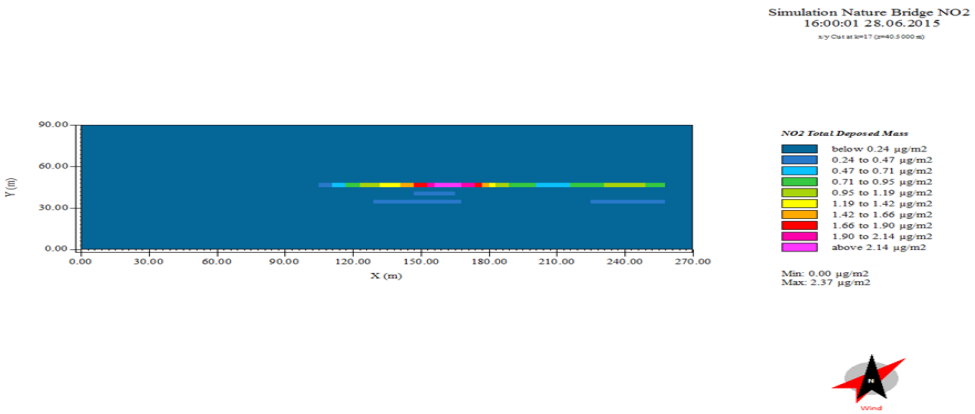
شکل (۲): طراحی سه بعدی محل تحقیق

شکل (۴) وضعیت نشست گاز مونوکسید کربن در ارتفاع ۴۰/۵ متر و بر روی بام سبز را به نمایش درآورده است، حداکثر نشست این گاز در بخش شمالی بام سبز گسترده و ۰/۳۱$\mu g/m^2$ ثبت شد، در بخش بام سبز فشرده و بام سبز گسترده جنوبی این نشست حداکثر به ۰/۰۶ $\mu g/m^2$ رسید. نقش باد در عدم صعود این گاز نیز تا ارتفاع ۴۰/۵ متری مشهود بود.

شکل (۵) وضعیت نشست گاز دی اکسید نیتروژن در ارتفاع ۴۰/۵ متر و بر روی بام سبز را به نمایش درآورده است، حداکثر نشست این گاز در بخش شمالی بام سبز گسترده و ۲/۳۷ $\mu g/m^2$ ثبت شد، ولی در بخش بام سبز گسترده جنوبی و بام سبز فشرده نشست از ۰/۴۷ $\mu g/m^2$ تجاوز نکرد. نقش باد در عدم صعود این گاز نیز مشهود بود.



شکل (۴): نشست گاز مونوکسید کربن بر روی بام سبز



شکل (۵): نشست گاز دی اکسید نیتروژن بر روی بام سبز

بحث و نتیجه‌گیری

تاثیر بام سبز بر روی کاهش مقدار آلاینده‌های هوا در مناطق شهری موضوع جدیدی در تحقیقات حیطه بام سبز به حساب می‌آید. همچنین ارزیابی جامعی درباره خدمات اکوسیستمی بام‌های سبز در مناطق خشک و نیمه خشک همانند شهر تهران که دچار معضل آلودگی هوا نیز است، به انجام نرسیده است. بنابراین، ارزیابی تاثیر بام سبز در بهبود کیفیت هوا از طریق کاهش آلاینده‌ها و ذرات معلق، ضروری است.

تاثیر بام سبز بر کاهش گازهای آلاینده و ذرات معلق در تحقیقات متعددی به اثبات رسیده است. عواملی چون ارتفاع سازه‌ای که بام سبز بر آن نصب شده است، سرعت باد و نرخ انتشار این آلاینده‌ها، در میزان تاثیر بام سبز بر کاهش گازهای آلاینده و ذرات معلق نقش دارند. اثر باد در عدم صعود آلاینده‌ها به ارتفاع هم‌سطح بام سبز، در تحقیق حاضر اثبات شد.

ثابت شده است که بام سبز دی اکسید کربن را از طریق تثبیت توسط گیاه، کاهش می‌دهد (Getter et al., 2009).

تاثیر پوشش گیاهی بر روی مقدار نشست آلاینده‌ها در محیط‌های شهری وابسته به طراحی فضای سبز و مقدار آلاینده‌های موجود در هوا است. سطح برگ و سرعت باد بالا نیز از دیگر عوامل تاثیرگذار در مقدار نشست آلاینده‌ها بر روی گیاهان هستند (Janhall, 2015).

نتایج تحقیقی در مکزیکو سیتی نشان داد که جذب آلاینده‌ها در ماه‌های مارس و فوریه به دلیل بارش جوی و دمای پایین، نسبت به ماه‌های تابستان تا ۷۵٪ بیشتر است (Collazo-Ortega et al., 2017).

نتایج تحقیق حاضر، با بررسی که در شهر شیکاگو بر روی اثر بام سبز در به دام انداختن آلاینده‌های هوا انجام شده است، مطابقت دارد. ولی بررسی مذکور، با این فرض انجام شد که تمامی بام‌های شهر، سبز باشند، که در اینصورت به مقدار سالیانه ۲۰۴۶/۸۹ تن آلاینده توسط بام‌های سبز به دام می‌افتد (Yang et al., 2008).

تصمیماتی که در زمینه طراحی شهری گرفته می‌شود، به‌طور مستقیم بر روی اکوسیستم‌های شهری تاثیرگذار است (Bruse, 2007b). در نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر، تاثیر پوشش گیاهی در به دام انداختن آلاینده‌های شهری و بهبود شاخص‌های محیط‌زیستی اکوسیستم‌های شهری مشاهده شد.

در این پژوهش، با استفاده از مدل غیرایستایی ENVI-met، به شبیه‌سازی پل طبیعت تهران پرداخته شده و نتایج اثری که گیاهان بر کاهش و پراکنش آلاینده‌ها داشته‌اند، آورده شده است. در انتها مقایسه نتایج حاصله با پژوهش‌های دیگر انجام گرفته سبب دستیابی به بینشی جامع‌تر از تاثیر سبزسازی بام در بهبود شرایط خرد اقلیمی بالاخص در شهرهای فشرده و با مقیاس استفاده گسترده‌تر از گیاهان شده است.

با توجه به وجود سه عامل سازه، هوا و پوشش گیاهی در تحقیق حاضر، ENVI-met یکی از بهترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است که این سه عامل را در محاسبات خود لحاظ می‌کند (Bruse & Fleer, 1998).

در تحقیقی ظرفیت فیلترینگ ذرات معلق PM_{10} از طریق پوشش گیاهی شهری، با روش‌های خرد مقیاس عددی بررسی شد و مشخص شده که با استفاده از یک روش ساده و استفاده از مدل ENVI-met می‌توان اثر خالص گیاهی را در غلظت ذرات محلی به دست آورد (Bruse, 2007a).

در تحقیقی پراکنش گازهای NO_x با استفاده از مدل ENVI-met در بخشی از مرکز شهر کوریتینیای برزیل تخمین زده شد. داده‌های حاصل در رابطه با استانداردهای کیفیت هوا در برزیل، تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که خروجی مدل تا حد زیادی به دنیای واقعی نزدیک هستند (Bemquerer et al., 2010).

با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده با نرم‌افزار ENVI-met، بر روی بام‌های سبز هنگ‌کنگ، به اهمیت ارتفاع سازه، هماهنگی جهت باد با خیابان و نوع بام سبز، در خدمات اکوسیستمی بام سبز در شهر پی‌برده شد. مطابق آن تحقیق و نتایج تحقیق حاضر، هرچه ارتفاع سازه بیشتر باشد، خدمات اکوسیستمی بام سبز کاهش می‌یابد (Peng & Jim, 2013).

حداکثر مقدار نشست ذرات معلق، مونوکسید کربن و دی اکسید نیتروژن بر روی بام سبز فشرده، در شبیه سازی به ترتیب $0/05\mu g/m^2$، $0/31\mu g/m^2$ و $2/37\ \mu g/m^2$، به‌دست آمد. در مجموع نتایج نشان داد که بام سبز گسترده در قسمت جنوبی پل، بام سبز فشرده و بام عاری از پوشش گیاهی در مقایسه با بام سبز گسترده در قسمت شمالی پل، تاثیر زیادی در به دام انداختن آلاینده‌های هوا نداشتند. دلیل اصلی تاثیر بیشتر بام سبز گسترده شمالی در به دام انداختن آلاینده‌ها، کاهش سرعت باد ناشی از

بام سبز فشرده است که در نهایت به نشست بیشتر منجر شد. با توجه به ارتفاع بلند سازه پل و باد نسبتاً شدید در روز شبیه‌سازی که مانع از صعود آلاینده‌ها تولید شده از خودروهای موجود در محدوده شده بود، مقدار آلاینده‌های به دام افتاده توسط بام سبز فشرده قابل توجه بود. به دلیل محدودیت مساحت منطقه مطالعه شده، خودروهای در حال تردد از جنوب محدوده در این شبیه‌سازی لحاظ نشدند که سبب اُفت مقدار آلاینده‌های به دام افتاده شد.

فهرست منابع

Andersson-Skaold, Y.; Thorsson, S.; Rayner, D.; Lindberg, F.; Janhall, S.; Jonsson, A.; Moback, U.; Bergman, R. & Granberg, M., 2015. An integrated method for assessing climate related risks and adaptation alternatives in urban areas. Clim. Risk Manag". Climate Risk Management, 7, 31–50.

Baldocchi, D.D.; Hicks, B.B. & Camara, P. 1987. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. Atmospheric Environment, 21, 91–101.

Bemquerer, F.; Rasia, C. & Leitekruger, E. 2010. A Method for Simulating NO_x Dispersion in an Urban Area Using ENVI-met. Simulation Multiconference 188, San diego, USA. Digital library, ISBN: 978-1-4503-0069-8.

Bidwell, R. G. S. & Fraser D. E. 1972. Carbon monoxide uptake and metabolism by leaves. Canadian Journal of Botany, 50, 1435–1439.

Bruse, M. & Fleer H., 1998. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software. 13 (3–4), 373–384.

Bruse, M., 2007 (a). Particle Filtering Capacity of Urban Vegetation: a microscale numerical approach. Environmental Modelling group,INST. Geography.university of Mainz, 1-6.

Bruse, M. 2007(b). Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a Multi Agent System. In: Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA, pp 699-706.

Collazo-Ortega, M.; Rosas, U, Reyes-Santiago & Towards, J., 2017. Providing Solutions to the Air Quality Crisis in the Mexico City Metropolitan Area: Carbon Sequestration by Succulent Species in Green Roofs. PLOS Currents Disasters. 2017 Mar 31. Edition 1. doi: 10.1371/

Getter, K. L.; Rowe, D. B.; Robertson, G. P.; Cregg, B. M. & Andresen, J. A., 2009. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. Environmental Science and Technology 43 (19), 7564–7570.

Janhall, S. 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution-Deposition and dispersion. Atmospheric Environment, 105, 130-137.

Nowak, D. J.; McHale, P. J.; Ibarra, M.; Crane, D.; Stevens, J. C. & Luley, C. 1998. Modeling the effects of urban vegetation on air pollution. Air Pollution Modeling and Its Application XII. In: Sven-Erick Gryning, Nadine Chaumerliac (eds). Plenum, New York.

Peng, L. L. H. & Jim, C. Y. 2013. Green-Roof Effects on Neighborhood Microclimate and Human Thermal Sensation. Energies, 6 (2), 598-618.

Roupsard, P.; Amielh, M.; Maro, D.; Coppalle, A. & Branger, H. 2013. Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces. Journal of Aerosol Science, 55, 12-24.

Speak, A. F.; Rothwell, J. J.; Lindley, S. J. & Smith, C. L. 2012. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. Atmospheric Environment, 61, 283-293.

Weber, F.; Kowarik, I. & Saeumel, I. 2014. Herbaceous plants as filters: immobilization of particulates along urban street corridors. Environmental Pollution, 186, 234-240.

Wesely, M. L. 1989. Parameterization for surface resistance to gaseous dry deposition in regional scale numerical models. Atmospheric Environment, 23, 1293–1304.

Yang, J.; Yu, Q. & Gong, P. 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. Atmospheric Environment, 42, 7266–7273.