پژوهش‌های محیط‌زیست، سال ۱۰، شماره ۱۹، بهار و تابستان ۱۳۹۸، از صفحه ۲۵۵ تا ۲۷۰

مدل‌سازی انتشار مونواکسید کربن در شهر تبریز با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم

علیرضا بافنده زنده*[۱]، مینا نصیری[۲]، ناصر دانای نعمت آباد[۳]

۱ دانشیار گروه مدیریت، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲ کارشناس ارشد مهندسی صنایع سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، موسسه آموزش عالی غیر دولتی-غیر انتفاعی الغدیر، تبریز، ایران
۳ کارشناس ارشد مهندسی صنایع سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، پژوهشگر پژوهشکده توسعه و برنامه‌ریزی جهاد دانشگاهی (ACECR)، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۵؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۰۴/۱۰)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، انتشار آلاینده مونوکسید کربن در دوره زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۱ شبیه‌سازی‌شده است. هدف از این مطالعه مدل‌سازی انتشار آلاینده مونوکسید کربن و ارزیابی سناریوهای مختلف جهت کاهش آلودگی هوای شهر تبریز می‌باشد. بر اساس ادبیات تحقیق متغیرهای«مصرف انرژی یا سوخت‌های فسیلی»، «توسعه شهر و شهرنشینی»، «حجم ترافیک»، «جمعیت شهر»، «توسعه صنعتی»، «مهاجرت» و «فضای سبز» به‌عنوان متغیرهای کلیدی مؤثر در تولید مونواکسید کربن در نظر گرفته شده‌اند. تعامل بین متغیرها به عبارت دیگر فرضیه پویا با استفاده از نمودارهای علّی-حلقوی و نقشه‌های حالت-جریان نشان داده شد. سپس با کمک گرفتن از نظریه‌های معتبر در حوزه ادبیات مساله و دیدگاه‌های افراد خبره، روابط علّی در قالب توابع ریاضی تعریف‌شده و در نهایت اقدام به شبیه‌سازی‌شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، حدود ۹۷ درصد مونوکسید کربن موجود در هوا به دلیل مصرف بنزین می‌باشد. همچنین نتایج ارزیابی سناریوها نشان داد که جایگزینی بنزین یورو چهار و کاهش نرخ معمول سفرهای ماهانه، انتشار مونواکسید کربن در شهر را به صورت قابل توجهی کاهش خواهد داد.

کلید واژه ها: آلودگی هوا، مونوکسید کربن، پویایی‌شناسی سیستم، تبریز، شبیه‌سازی، محیط زیست

*نویسنده مسیول: Email: baf&eh@iaut.ac.ir

سرآغاز

شهر تبریز با دارا بودن جمعیت ۱/۶ میلیون نفری (General Census of Population & Housing, 2016) و مراکز صنعتی مهمی نظیر نیروگاه حرارتی، مجتمع پتروشیمی، پالایشگاه، ماشین‌سازی، تراکتورسازی، ده‌ها کوره آجرپزی و ... به عنوان یکی از شهرهای آلوده کشور به شمار می‌رود. از طرفی بیش از ۵۰ درصد شهرک‌های صنعتی و ۶۰ درصد صنایع استان در حومه کلان‌شهر تبریز و در محدوده شعاع ۳۰ کیلومتری این شهر مستقر می‌باشند که سهم آلاینده‌های صنعتی شهر را عهده‌دار هستند. استقرار کوره‌های آجرپزی سنتی و آسفالت‌پزی و شن و ماسه در فواصل ۱۰ تا ۲۵ کیلومتری غرب و جنوب شهر تبریز، از عوامل مهم در انتقال آلاینده‌های هوا به کلان‌شهر تبریز می‌باشند (Gorbani et al., 2012). باید توجه کرد که مساله آلودگی هوای شهرها، مساله‌ای چند وجهی و پیچیده می‌باشد. پیچیدگی مساله، حاصل تعاملات متغیرهای مختلفی مانند متغیرهای اقتصادی و اجتماعی در طول زمان است. میزان انتشار آلاینده‌ها از مولفه‌ها و متغیرهای مختلف و همچنین از بر هم کنش این متغیرها در طول زمان تاثیر می‌گیرد.

اگر چه مطالعاتی در خصوص آلودگی هوا در ایران انجام گرفته است، اما عمدتا این مطالعات بر پایه متدولوژی‌های رایج و تنها به صورت ایستا و بدون در نظر گرفتن عنصر زمان انجام گرفته است. رویکرد پویایی شناسی سیستم این امکان را می‌دهد تا موضوع پیچیده‌ای همچون آلودگی هوا به صورت پویا و با در نظر گرفتن برهم کنش متغیرهای مختلف در طول زمان، مورد مطالعه قرار گیرد. با بررسی ادبیات موضوع مطالعه‌ای با رویکرد پویایی شناسی سیستم در حوزه بررسی آلودگی هوا به صورت عام و آلودگی از طریق مونواکسید کربن در شهرهای ایران یافت نشد. بر این اساس و با توجه به مطالب بیان شده، مساله آلودگی هوا و شناخت و تعیین نحوه تاثیر متغیرهای اقتصادی و اجتماعی بر غلظت آلاینده مونوکسید کربن از اهمیت فراوانی برخوردار است. از این‌رو هدف اصلی این پژوهش شناسایی و تعیین نحوه تاثیر متغیرهای اقتصادی و اجتماعی بر انتشار آلاینده مونوکسید کربن در شهر تبریز و درنهایت ارزیابی سناریوهای کاهش این آلودگی می‌باشد. در این مقاله آلودگی هوای شهر تبریز با مونواکسید کربن، در چارچوب متغیرهای انسان‌ساخت و مصنوعی مطالعه می‌شود. متغیرهای مصنوعی مهمِ آلودگی هوا در کلان‌شهرها را می‌توان به دو گروه اقتصادی و اجتماعی تقسیم کرد. از مهم‌ترین متغیرهای اجتماعی می‌توان به رشد جمعیت، توسعه شهر و شهرنشینی، افزایش فاصله میان محل سکونت و محل کار و افزایش تعداد وسایل نقلیه اشاره کرد. این متغیرها پیامدهایی مانند افزایش ترافیک، ازدیاد مصرف سوخت‌های فسیلی، فرسودگی منابع طبیعی و تراکم زباله‌ها را در پی دارد (Fotros et al., 2011).

از متغیرهای اقتصادی نیز می‌توان به توسعه صنعتی اشاره کرد که تغییر ساختار از فعالیت‌های کشاورزی به فعالیت‌های صنعتی و افزایش استفاده از منابع طبیعی و انرژی به صورت نامناسب را به دنبال دارند و فعالیت آلاینده‌ها را گسترش می‌دهند (Nasrollahi & Ghaffari, 2010). به عبارت دیگر، تغییر الگوی تولید محصولات کشاورزی با مصرف انرژی کمتر، به تولیدات صنعتی و شیمیایی با مصرف انرژی بیشتر، منجر به افزایش تقاضای انرژی می‌شود (Jones, 1991). بدین ترتیب با افزایش مصرف انرژی آلاینده‌های مصنوعی مانند مونوکسید کربن بیشتر می‌شود. توسعه مالی به طور غیر مستقیم از طریق افزایش سرمایه‌گذاری و رشد اقتصادی، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد، همچنین توسعه مالی می‌تواند با فراهم کردن منابع مالی با هزینه ریسک پایین، مصرف‌کنندگان را به خرید محصولات انرژی‌بر مانند خودرو و لوازم خانگی متمایل کند و از این طریق نیز مستقیما بر مصرف انرژی موثر باشد (Sadrsky, 2010; 2011).

از طرف دیگر، «توسعه مالی» می‌تواند با فراهم آوردن منابع مالی با هزینه پایین، تولید کنندگان را تشویق کند تا پروژه‌های محیط‌زیستی (مانند بهبود فرآیند تولید) را اجرا کنند. با بهبود فرآیند تولید و سرمایه‌گذاری به منظور دستیابی به فناوری جدیدتر مصرف انرژی و در نتیجه انتشار آلاینده‌ها کاهش خواهد یافت(Shahbaz et al, 2011; Sadrsky, 2010). رشد سریع جمعیت شهرها و رشد روزافزون استفاده از وسایل نقلیه موتوری در حمل‌ونقل کلان‌شهرها، عامل دیگری در افزایش انتشار آلاینده‌هایی همچون مونواکسید کربن است. بنابراین، هماهنگی بین سیاست‌های حمل‌ونقل شهری و سیاست‌های توسعه شهر، نقش به سزایی در کنترل آلودگی هوا دارد (Shoar, Javadi, 2006). دو دیدگاه متفاوت در رابطه با رشد جمعیت شهرنشین و آلودگی محیط‌زیست مطرح است. دیدگاه نخست بیان می‌کند که افزایش جمعیت شهری بر افزایش آلودگی محیط‌زیست تاثیر دارد. زیرا، با رشد شهرنشینی، استفاده از زیرساخت‌ها، حمل‌ونقل

و مصرف انرژی افزایش می‌یابد. در دیدگاه دوم، فرهنگ شهرنشینی سبب می‌شود که مصرف انرژی در شهرها نسبت به روستاها بهینه‌تر شود و آلودگی کاهش یابد. درنتیجه، رابطه بین رشد جمعیت شهری با آلودگی محیطزیست می‌تواند مثبت یا منفی باشد (Alam et.al., 2007). همچنین می‌توان گفت با افزایش جمعیت، آلودگی از دو بعد مستقیم (مانند مصرف سوخت‌های گرمایشی و بنزین) و غیر مستقیم (مانند مصرف محصولات لوازم‌خانگی و لباس) انتشار می‌یابد.

مطالعات متعددی در خصوص عوامل مؤثر بر انتشار آلاینده‌هایی همچون مونواکسید کربن انجام گرفته است. (Giureia et al., 2002) به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش غلظت PM_{10} در کشور پرتغال ناشی از وجود صنایع و ترافیک می‌باشد و غلظت CO و NO_x (اکسیدهای نیتروژن) در مرکز شهرها بیش‌تر است. این غلظت با فعالیت‌هایی که در مراکز شهری وجود دارد، در ارتباط می‌باشد. نتایج مطالعه (Cole & Neumayer, 2004) حاکی از آن است که با افزایش جمعیت، آلودگی محیطزیست افزایش یافته و با افزایش جمعیت شهرنشین و کاهش اندازه خانوار، آلودگی محیطزیست افزایش داشته است؛ یعنی، افزایش سطح تولید سبب افزایش استفاده از انرژی شده و آلودگی را افزایش داده است(Goyal, 2005) . از حمل‌ونقل به‌عنوان عامل اصلی آلودگی شهرها نام برده و معتقد است که ۳۰٪ تا ۸۰٪ از کل آلودگی‌های هوا ناشی از وجود اتومبیل‌ها است (Abdulkareem, 2005) . به این نتیجه رسیده که رشد صنعت نفت در کشور نیجریه موجب افزایش انفجار جمعیت شهرنشین شده و شهرهای این کشور را با چالش‌های محیط زیستی جدیدی از جمله آلودگی هوا مواجه نموده است. (Mangi, 2006) با بررسی رابطه بین صادرات، رشد اقتصادی و کیفیت محیطزیست در ۱۱۵ کشور به این نتیجه رسید که برای کل کشورهای مورد بررسی، صادرات منجر به افزایش آلودگی محیطزیست شده است؛ اما برای کشورهایی با سطح درآمد سرانه بالا، متغیر صادرات تاثیر منفی و معنی‌داری بر آلودگی محیطزیست دارد. نتایج تخمین مدل (Alam et al., 2007) گویای این است که در مدلی که رشد اقتصادی به‌عنوان متغیر وابسته می‌باشد، شدت انرژی و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ضرایب مثبتی دارد (Chen et al., 2008). استدلال کرده‌اند که شهرنشینی و شدت آن، استفاده از زیرساخت‌های عمومی را بهبود می‌بخشد و موجب مصرف انرژی پایین‌تر و آلودگی کمتر می‌شود. (Liu, 2009) در مطالعه‌ای به این نتیجه رسید که شهرنشینی دارای اثر مثبتی روی مصرف انرژی است اما تاثیر آن کاهش یابنده است. وی این کاهش را به بهبود ساختار صنعتی و فناوری و استفاده کاراتر از منابع نسبت می‌دهد (Demuzere, 2010) . در مقاله‌ای به این نتایج دست یافت که M8 و O3 وابسته به تغییرات فصلی می‌باشند. نتایج تخمین مدل (Albansky et al., 2010) نشان می‌دهد رابطه بین درآمد سرانه و آلودگی هوا به شکل N است. (Chakraborty et al., 2008) ضرایب انتشار تعیین شده برای CO_2، CO، SO_2 و NO با ارزش متناظرشان را همان طوری‌که در مطالعات انجام شده توسط گروه‌های دیگر حاصل شده است، مقایسه کرده‌اند. مجموع انتشار CO_2، CO، SO_2 و NO محاسبه شده بر اساس ضرایب انتشار برای سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴، به ترتیب ۴۶۵/۶۶۷، ۱/۵۸۳، ۴/۰۵۸، ۱/۱۲۹ (Tg) پیدا شده است.

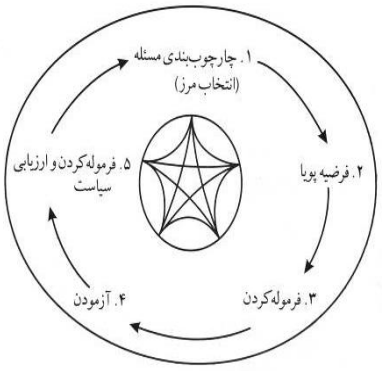
نتایج شبیه‌سازی (Hemmati et al., 2016) نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی (ESSs) به طور قابل توجهی هزینه برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP) را کاهش می‌دهد همان‌طوری که آلودگی محیطزیست کاهش می‌یابد. (Safavi & Alijani, 2006) نشان داده‌اند که به طور معمول غلظت‌های بالایی از آلاینده‌ها با فشار جو مرتبط می‌باشد. (Moharramnejad & Ejtihadi, 2010) با استفاده از نظرسنجی کارشناسان مرتبط با طرح، استراتژی‌های مناسب به‌منظور کنترل آلودگی هوای تهران را حمل‌ونقل عمومی، معاینه فنی، مدیریت ترافیک و پیشنهاد سوخت جایگزین، بیان کرده‌اند. (Zarabi et al., 2010) به این نتایج دست یافتند که از مجموع کل آلاینده‌های وارد شده به شهر اصفهان ۱۳ درصد متعلق به صنایع شهری، ۱۱ درصد مربوط به منابع خانگی و ۷۶ درصد از کل آلاینده‌ها مربوط به منابع آلوده‌کننده ناشی از ترافیک در شهر می‌باشد. نتایج تحقیق (Nasrollahi &Ghaffari, 2010) نشان می‌دهد که آلودگی هوا تابعی مثبت از مصرف انرژی، حجم فعالیت‌های صنعتی و حجم سرمایه فیزیکی است. نتایج به‌دست آمده از نماگرهای توسعه‌ی عملکردی مطالعه (Shokri, 2011) نشان می‌دهند که کاربری‌های مورد مطالعه در مناطق مختلف شهر (تهران) نامتناسب توزیع شده‌اند، به طوری که بیشترین کاربری‌های خدماتی و تجاری که در طول روز جمعیت و وسایل نقلیه زیادی را به‌طرف خود می‌کشاند، در منطقه بافت مرکزی شهر قرار گرفته‌اند. این در حالی است که منطقه فوق در بین

مناطق دیگر از کمترین کاربری‌های ارتباطی و فضای سبز برخوردار می‌باشد که این عوامل منجر به بروز برخی ناپایداری‌های محیط‌زیستی بخصوص افزایش غلظت آلاینده‌های هوا، شده است. (Gorbani et al., 2012) با بررسی وضعیت آلودگی هوای شهر تبریز، نتیجه گرفته‌اند که عوامل اقلیمی (مانند سرعت و جهت باد و دما) و عوامل انسانی (مانند ازدحام جمعیت، کمبود فضای سبز، ترافیک سنگین، معابر نامناسب و ...) تاثیر زیادی در آلودگی هوا دارند. نتایج تحقیق (Sadeghi & Ebrahimi, 2013) نشان می‌دهد که توسعه مالی در کوتاه مدت و بلند مدت، تاثیر مثبتی در انتشار دی‌اکسید کربن دارد. همچنین در بلند مدت، تولید ناخالص داخلی، مصرف انرژی و آزادسازی تجاری تاثیر معنی‌داری در انتشار دی‌اکسید کربن دارند و با حذف متغیر مصرف انرژی از مدل، کشش انتشار دی‌اکسید کربن نسبت به متغیرها افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از برآورد رابطه بلند مدت بین متغیرها در تحقیق نشان می‌دهد، رابطه بین توسعه اقتصادی و آلودگی محیط زیست به صورت مثبت یکنواخت بوده و وجود رابطه به شکل U وارون بین آن دو رد می‌شود (Behboudi et al., 2014).

مواد و روش‌ها

روش مورد استفاده در این مقاله با توجه به پیچیدگی مساله و پویا بودن آن، روش پویایی‌شناسی سیستم است. پویایی‌شناسی سیستم روشی است که تجزیه‌وتحلیل مقادیر کمّی و کیفی را به‌منظور درک تحول یک سیستم پیچیده، با یکدیگر ترکیب می‌کند (Sumari et al., 2013). پویایی شناسی سیستم در موارد مختلفی از جمله توسعه و بهبود سیاست‌گذاری (Ghaffarzadegan et al., 2011) و حفاظت از محیط‌زیست (Mukherjee et al., 2013; Manasakunkit & Chinda, 2013) به‌طور گسترده کاربرد دارد. برای مدل‌سازی انتشار مونواکسید کربن پنج مرحله معرفی شده توسط استرمن که در شکل (۱) نشان داده شده است، به کار گرفته شد (Sterman, 2000).

- اولین مرحله چارچوب‌بندی مساله (انتخاب مرز مدل) است. در این مرحله، تاریخچه و روند گذشته انتشار مونواکسید کربن مورد بررسی قرار گرفته، متغیرهای کلیدی، قلمرو زمانی و مکانی مساله مشخص شده است. در این مرحله روش گردآوری داده به صورت اسنادی می‌باشد. اطلاعات با مراجعه به پایگاه داده سازمان محیط زیست استان آذربایجان شرقی به دست آمد. به عنوان مثال، شکل (۲) که روند انتشار مونوکسید کربن را نشان می‌دهد بر اساس داده‌های سازمان محیط زیست استان آذربایجان شرقی به دست آمده است.



شکل (۱). روش پویایی‌شناسی سیستم (Sterman, 2000)

- در مرحله دوم فرضیه پویای مساله تدوین شد. در این مرحله ساختاری که رفتار مساله زا را به وجود آورده، به صورت فرضیه‌های پویا شناسایی شد. برای این کار نمودار زیرسیستم، نمودارهای علّی–حلقوی و نقشه‌های جریان–انباشت به کار رفته است. فرضیه‌های پویا بر اساس اطلاعات به دست آمده از ادبیات موضوع و همچنین دیدگاه افراد خبره در این حوزه تدوین شده‌اند.
- در مرحله سوم، مدل شبیه‌سازی شده از طریق تخمین پارامترها، بیان روابط ریاضی بین متغیرها و تعیین شرایط اولیه متغیرها تدوین شد. برخی از پارامترها و توابع با مراجعه به ادبیات تحقیق به دست آمد و برخی دیگر بر اساس روابط منطقی موجود بین متغیرها توسط محققین برآورد شدند. در نهایت مدل با استفاده از نرم‌افزار ونسیم (Vensim) شبیه‌سازی شد.
- مرحله چهارم اختصاص به آزمون مدل شبیه‌سازی شده دارد. برای اطمینان از اعتبار مدل از آزمون‌های رفتار مجدد و حالت‌های حدی استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل از طریق آزمون رفتار مجدد، مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار ونسیم پس از اعمال مقادیر متغیرهای برون‌زا به آن، برای سال ۱۳۹۱ اجرا شد. مدل رفتار متغیرهای توسعه شهرنشینی، میزان مونوکسید کربن هوا، سرعت باد و مصرف بنزین را

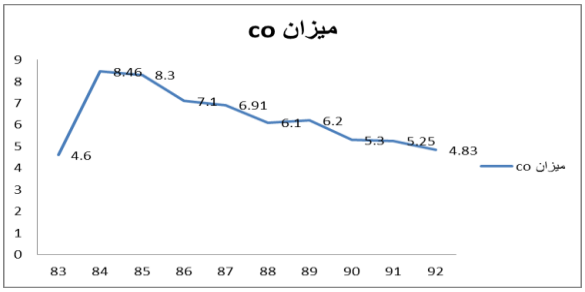
برای سال ۱۳۹۱ شبیه‌سازی کرد. اختلاف رفتارهای شبیه‌سازی شده با رفتارهای واقعی میزان صحت مدل را نشان می‌دهد. این مقایسه در نمودار شکل‌های (۶ تا ۹) نشان داده شده است.

- در نهایت در مرحله پنجم سیاست‌ها و سناریوهای کاهش میزان مونوکسید کربن در هوای شهر تبریز، طراحی، ارزیابی و پیشنهاد شدند. سیاست‌ها به صورت ورودی به مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار ونسیم وارد شد، نتایج این سیاست‌ها به صورت نمودارهایی که انتشار مونوکسید کربن را تحت تاثیر این سیاست‌ها نشان می‌دهد، به دست آمد. نمودار شکل‌های (۱۰ تا ۱۴) اثرات سیاست‌های مختلف را بر روی انتشار مونوکسید کربن در شهر تبریز نشان می‌دهد.

یافته‌ها

چارچوب‌بندی مساله (انتخاب مرز مدل)

بررسی آمار و نتایج ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای شهر تبریز نشان می‌دهد که در برخی از روزها میزان مونوکسید کربن ۸ ساعته از بالاترین حد مجاز این آلاینده که بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی به طور متوسط ۹ ppm برای تماس ۸ ساعته است، هم بیش‌تر می‌باشد (Department of Environment, 2011). شکل (۲) میزان مونواکسید کربن موجود در هوای شهر تبریز را در ده سال نشان می‌دهد.



شکل (۲). نمودار تغییرات سالانه میانگین ماکزیمم ۸ ساعته غلظت Co (ppm) منبع: محاسبات محقق بر اساس داده‌های سازمان محیطزیست استان آذربایجان شرقی

بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد که تعداد روزهای ناسالم هوا بر اساس آلاینده مونواکسید کربن در فصل‌های پاییز و زمستان و به‌خصوص در پاییز، بیش‌تر است. بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های پایش آلودگی، حدود هفتاد درصد روزهای آلوده بر حسب پارامتر مونواکسید کربن در دو فصل پاییز و زمستان و حدود سی درصد در فصول بهار و تابستان قرار دارد. افزایش مونواکسید کربن در فصل‌های سرد می‌تواند بر اثر افزایش اشتعال سوخت‌های ناشی از منابع حرارتی و وسایل نقلیه در کنار شرایط آب و هوایی از قبیل سرما، افزایش فشار هوا، پایداری هوا و وارونگی دما رخ دهد. چراکه اصولا مدت سرما در تبریز بسیار طولانی است و حدود ۵ ماه (آبان تا اسفند) از سال را در بر می‌گیرد. از طرفی، جهت باد غالب در منطقه، شمال شرقی و شرق می‌باشد. با توجه به‌سرعت بالای باد در فصل بهار و تابستان آلودگی‌های سمت شرقی به طرف شهر کشیده می‌شود و موجب افزایش غلظت آلاینده‌ها می‌شود. وزش باد در فصل زمستان، نسبت به سایر فصول کمتر است و این می‌تواند حاکی از سکون و پایداری هوا به دلیل استقرار فروبارهای حرارتی و دینامیکی در این منطقه باشد. درصد هوای آرام در طول این فصل به حداکثر میزان سالانه خود یعنی ۴۶/۳ درصد رسیده و هم‌زمان با آن وارونگی هوا نیز به‌طور مکرر اتفاق می‌افتد. همچنین استقرار صنایع آلوده‌ساز در غرب تبریز، موجب افزایش آلودگی در فصل سرد سال می‌شود. زیرا، سرعت‌بالای بادهای جنوب غربی و غربی به خصوص در فصل سرد سال، می‌تواند این آلودگی را پراکنده ساخته و آن‌ها را با خودشان به طرف شهر تبریز حمل کنند (Gorbani et al., 2012) در ماه‌های سرد به‌ویژه در ماه‌های آذر و دی، شدت و مدت تابش خورشید به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین گرمای حاصل از تابش خورشید برای غلبه بر وارونگی کفایت نمی‌کند و بنابراین، وارونگی روز قبل در روز بعد تقویت شده و سقف آن به ارتفاع پایین‌تری سقوط می‌کند؛ بنابراین فضای انبارش آلودگی‌ها کمتر می‌شود و هم آلودگی‌های چند روز به روی هم تلنبار می‌گردند و به دلیل حاکم بودن شرایط پایداری در آن شرایط، هیچ وزش بادی به وجود نمی‌آید، آلودگی‌ها از هوا تخلیه نشده و ابرآلودگی را تشکیل می‌دهند.

با توجه به اطلاعات ایستگاه‌های پنج‌گانه مرکز پایش و کنترل آلودگی هوای شهر تبریز و مرکز کامپیوتری کنترل از راه دور اداره کل حفاظت محیطزیست آذربایجان شرقی، ایستگاه میدان نماز (مرکز شهر) و پس از آن ایستگاه حکیم نظامی (مستقر در میدان حکیم نظامی)، آلوده‌ترین ایستگاه‌ها بر اساس آلاینده مونواکسید کربن می‌باشند. گزارش‌ها و داده‌های موجود نشان می‌دهند که سال ۸۴ با ۲۷ روز ناسالم و سال ۸۶ با ۱۲ روز

ناسالم، آلوده‌ترین سال از لحاظ آلاینده مونواکسید کربن در طول دوره زمانی پژوهش یعنی سال ۹۲-۸۳ می‌باشند. تعداد روزهای ناسالم از سال ۸۶ به بعد روند نزولی دارد و یکی از دلایل عمده آن می‌تواند به علت تاثیر سهمیه‌بندی بنزین در سال ۸۷ باشد و آمارهای مأخوذه حکایت از کاهش ۲۰ درصدی مونوکسید کربن در این سال در ایستگاه‌های سنجش دارند. به دلیل وجود بازار بزرگ سرپوشیده تبریز و تمرکز سایر مراکز تجاری در منطقه میدان نماز، در تمام ساعات روز ترافیک سنگینی در این منطقه حاکم است. اگر چه این محدوده ده تا پانزده درصد کل شهر و دو تا پنج درصد شبکه معابر را به خود اختصاص داده است، اما به دلیل موقعیت تجاری خود، پنجاه تا شصت درصد مشکلات ترافیکی کل شهر در این محدوده قرار دارد. اگرچه از کل جمعیت ۱۶۲۳۰۹۶ نفری شهر تبریز حدود ۲۱۱۰۰ نفر یعنی ۱/۳ درصد از کل جمعیت شهر در این منطقه زندگی می‌کنند (General Census of Population & Housing, 2016)؛ ولی به لحاظ واقع‌شدن در مرکز شهر، جمعیت زیادی را در طول ساعات روز به سمت خود جذب می‌کند که بار ترافیکی سنگینی را ایجاد می‌نماید. علاوه بر ترافیک و حجم انبوه خودروها در این منطقه، فقدان فضای سبز کافی نیز عامل دیگری در آلودگی هوای این منطقه می‌تواند باشد. سرانه فضای سبز در این منطقه ۳/۱ متر مربع است. این سرانه با توجه به موقعیت جغرافیایی و جمعیت زیادی که از نقاط دیگر شهر و همچنین استان به آن سرازیر می‌شوند مقداری ناچیز محسوب می‌شود.

افق زمانی این پژوهش که برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده، یک دوره ۲۰ ساله است که از سال ۱۳۸۳ شروع می‌شود و در سال ۱۴۰۳ پایان می‌پذیرد. این افق زمانی به دلیل محدودیتی که در داده‌های آلاینده مونواکسید کربن درگذشته وجود داشته، در نظر گرفته شده است. مرز جغرافیایی این پژوهش، شهر تبریز است. شهر تبریز با ارتفاع ۱۴۰۰ متر در ۱۷°۴۶ طول شرقی وَ ۸ °۳۸ عرض شمالی واقع‌شده است. از نظر توپوگرافی، شهر تبریز از طرف شمال، جنوب و شرق به کوه‌های سرخ‌فام عون بن علی، پیش کوه‌های سهند و کوه‌های ساری داغ و بیلانکوه محصور شده است. از طرف غرب نیز که دشت و هموار بوده به محل استقرار صنایع بزرگ تبدیل‌شده است. در واقع شهر تبریز در داخل دره‌ای قرارگرفته که انتقال و پراکنش آلاینده‌ها به‌طور کامل در آن انجام نمی‌گیرد.

تدوین فرضیه پویا

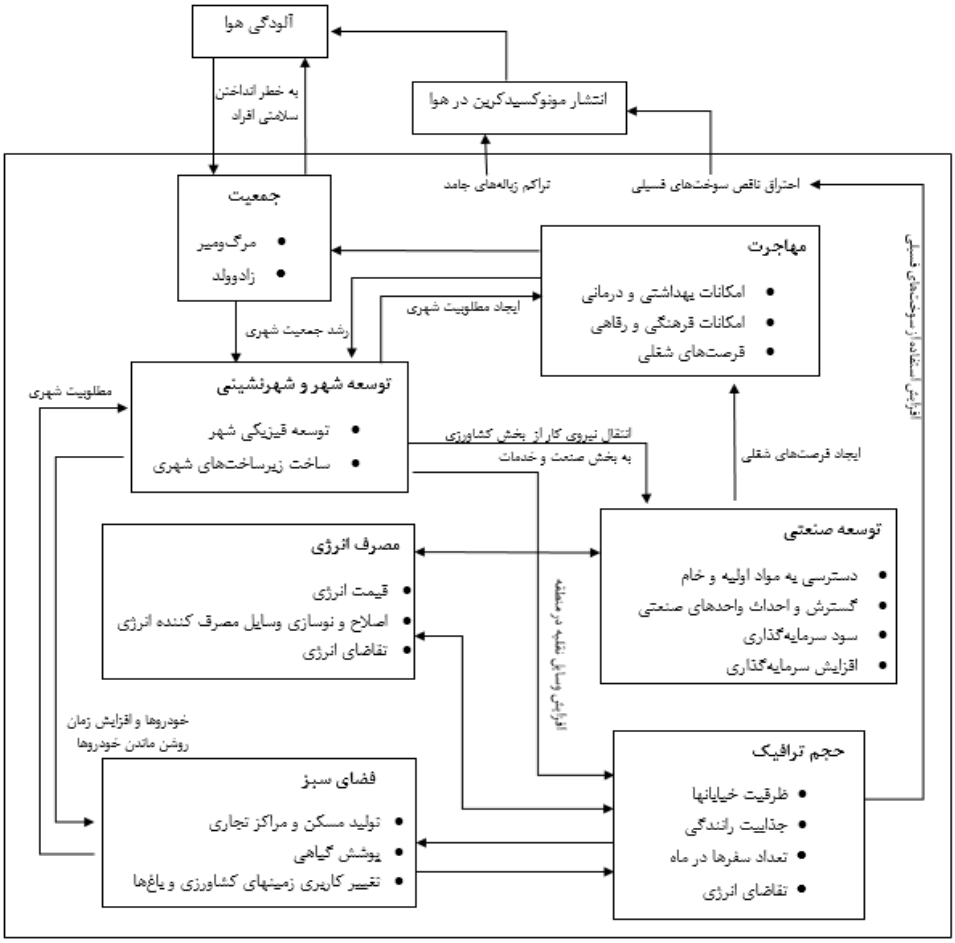
فرضیه پویا، چگونگی بروز مساله و ساختار آن را در قالب یک تیوری توضیح می‌دهد. در این مقاله برای تدوین فرضیه پویا، نمودار زیرسیستم، نمودارهای علّی-حلقوی و نمودارهای حالت و جریان به کار رفته است.

نمودار زیرسیستم

نمودار زیرسیستم معماری کلی مدل را نشان می‌دهد. شکل (۳) نمودار زیرسیستم مربوط به انتشار مونوکسیدکربن را نشان می‌دهد. این نمودار بر اساس داده‌های به دست آمده از اسناد و مدارک، ادبیات موضوع و مصاحبه با خبرگان تدوین شده است.

نمودارهای علّی- حلقوی و حالت- جریان

نمودار زیرسیستم، معماری کلی مدل را نشان می‌دهد؛ اما چگونگی ارتباط بین متغیرها را در سطح عملیاتی توضیح نمی‌دهد. نمودارهای علّی- حلقوی و نقشه‌های جریان- انباشت این نقص را می‌توانند جبران کنند. نمودارهای علّی، ساختار بازخوردی یک سیستم را نشان می‌دهند در صورتی که نقشه‌های جریان— انباشت بر ساختار فیزیکی به وجود آورنده آن بازخوردها تأکید دارند. متغیرهای جریان، نرخ افزایش یا کاهش متغیر انباشت (حالت) را تعیین می‌کنند. متغیرهای انباشت (حالت)، وضعیت سیستم را مشخص کرده و اطلاعاتی را تولید می‌کنند که تصمیم‌ها بر اساس آن‌ها اتخاذ می‌شود. شکل (۴ و ۵) به ترتیب نمودارهای علّی-حلقوی و نقشه جریان-انباشتِ انتشار مونواکسید کربن در شهر تبریز را نشان می‌دهد. نمودارهای علّی-حلقوی انتشار آلاینده Co بر اساس هفت متغیر اصلی جمعیت، مهاجرت، توسعه شهر و شهرنشینی، ترافیک، توسعه صنعتی، مصرف انرژی و فضای سبز به وجود آمده‌اند.

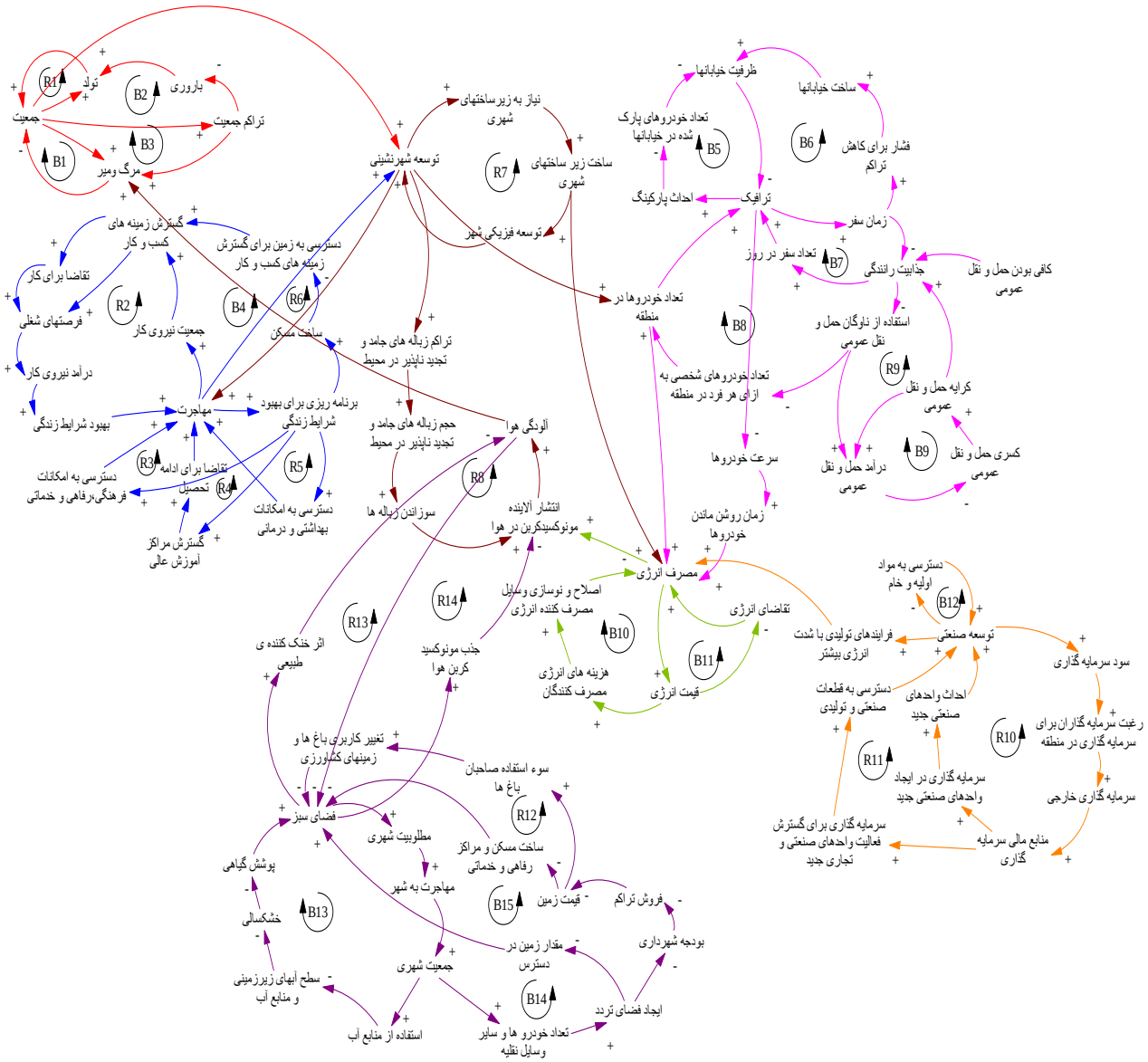


شکل (۳): نمودار زیرسیستم آلودگی هوا

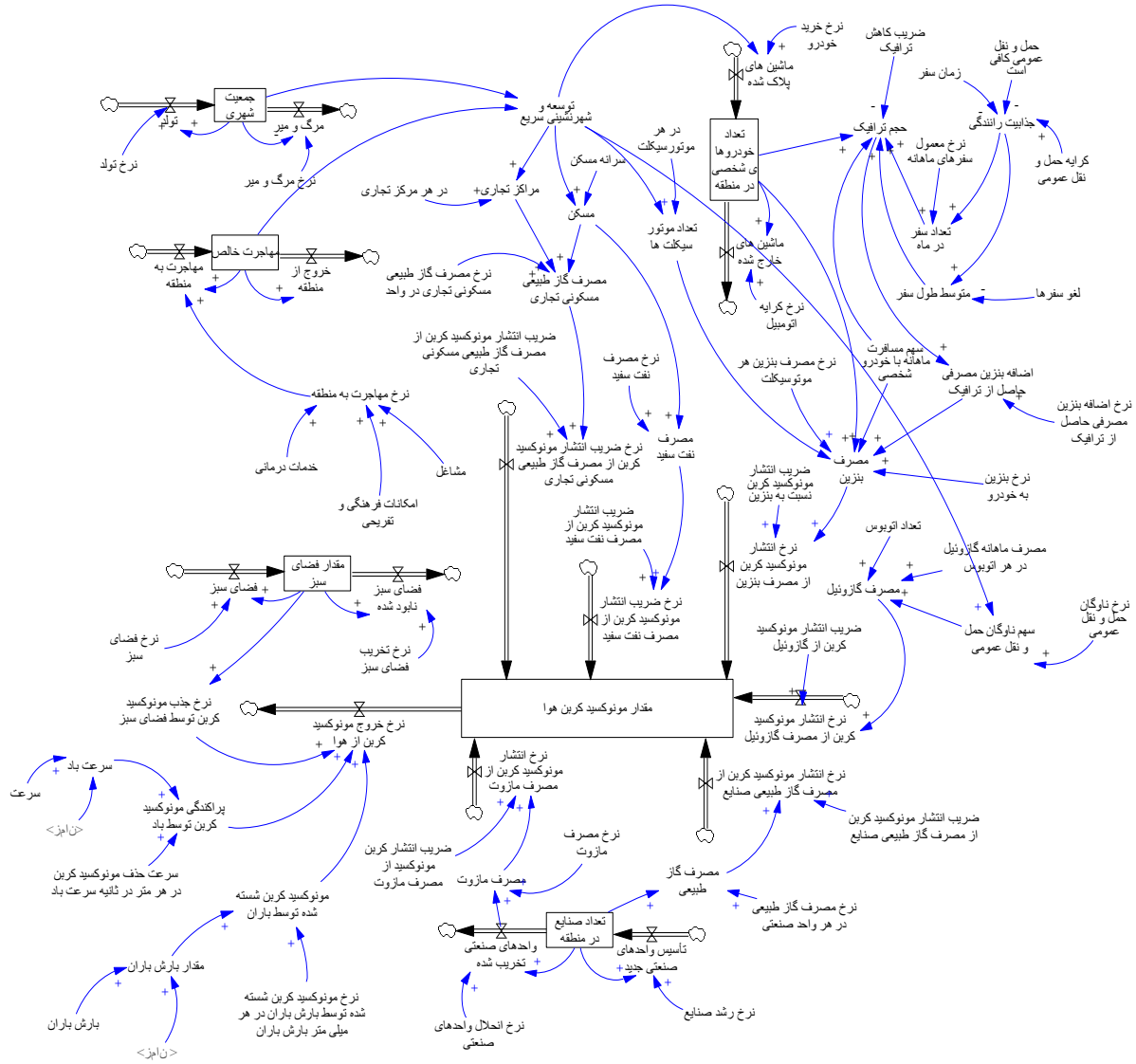
فرموله کردن

در بسیاری از موقعیت‌ها، به‌ویژه در سیستم‌های انسانی، انجام آزمایش‌ها و ارزیابی سیاست‌ها در جهان واقعی مشکل، مخاطره‌آمیز، غیراخلاقی یا کاملا غیرممکن می‌باشد. بنابراین، این آزمایش‌ها اغلب در یک دنیای مجازی انجام می‌گیرند. برای این کار نمودارهای مفهومی به یک مدل شبیه‌سازی شده تبدیل می‌شوند. مدل شبیه‌سازی شده از طریق تخمین پارامترها، مقادیر اولیه و توابع ریاضی شکل می‌گیرد. جدول (۱) پارامترها و توابعی که بر اساس ادبیات موضوع و یا نظرات افراد خبره به دست آمده‌اند را نشان می‌دهد.

میزان انتشار هر یک از آلاینده‌ها از حاصل‌ضرب میزان مصرف انواع سوخت‌ها در ضرایب انتشار مربوطه به دست آمده است. برای محاسبه ضریب انتشار، ضرایب محاسبه شده توسط شرکت کنترل کیفیت هوا وابسته به شهرداری تهران مورد استفاده قرار گرفته است. این ضرایب توسط (Bayat, 2004) خلاصه شده است.



شکل (۴): نمودار علّت–معلولی آلودگی هوای شهر



شکل (۵): نمودار حالت و جریان مونوکسید کربن

آزمودن

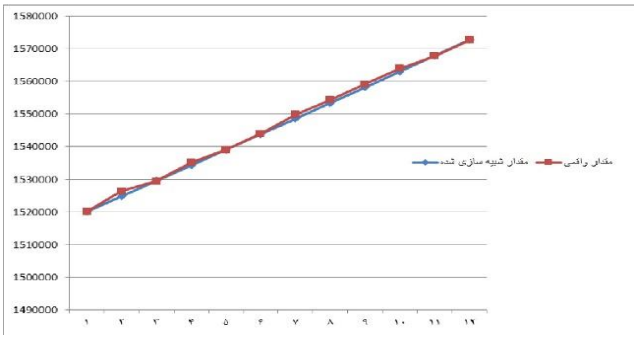
قبل از ارزیابی سیاست‌ها و سناریوها، می‌بایست از صحت مدل اطمینان حاصل شود. برای این کار دو روش «آزمون رفتار مجدد» و «حالت‌های حدی» به کار رفت. ذیلا این دو روش توضیح داده می‌شود.

الف) آزمون رفتار مجدد

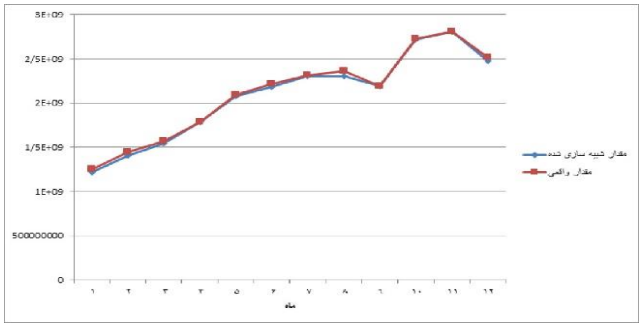
هدف از این آزمون مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های واقعی است. به عبارت دیگر در صورتی که مدل بتواند داده‌های واقعی را بازسازی کند دارای اعتبار می‌باشد. برای ارزیابی رفتار مدل، ابتدا چند متغیر مهم به‌عنوان متغیرهای مرجع انتخاب شد. این متغیرها عبارت‌اند از: توسعه شهرنشینی، میزان مونوکسید کربن هوا، سرعت باد و مصرف بنزین. اطلاعات واقعیِ مربوط به متغیرهای مختلف (به غیر از متغیرهای مرجع) برای سال ۹۱، به مدل شبیه‌سازی شده اعمال شد. مدل، اطلاعاتی را برای متغیرهای مرجع تولید کرد. در صورتی که اطلاعات تولید شده توسط مدل برای متغیرهای مرجع با اطلاعات واقعی این متغیرها در همان سال برهم منطبق باشند یا تفاوت اندکی داشته باشند، می‌توان ادعا کرد که مدل اعتبار نسبی دارد. شکل‌های (۶ تا ۹) نشان می‌دهند که اطلاعات واقعی (خطوط قرمز) و نتایج شبیه‌سازی شده (خطوط آبی)، برای متغیرهای توسعه شهرنشینی، میزان مونوکسید کربن هوا، سرعت باد و مصرف بنزین برای سال ۹۱ تقریبا برهم منطبق هستند. بنابراین، مدل اعتبار نسبی دارد.

جدول (۱): توابع مدل

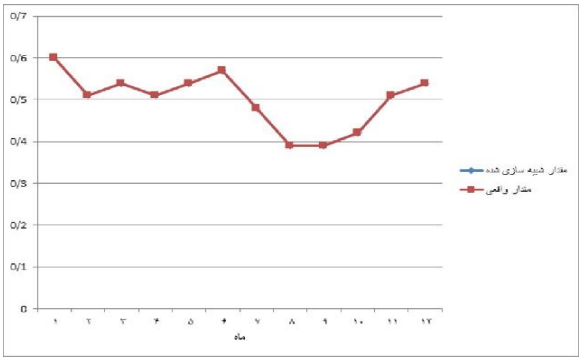
حوزه	تابع			
جمعیت شهری	میزان رشد طبیعی جمعیت= تولد–مرگ و میر	تولد= نرخ زاد و ولد*میزان جمعیت شهری	مرگ‌ومیر=نرخ مرگ‌ومیر* میزان جمعیت شهری (Khoshbin, Rahimi, 2005)	
میزان خالص مهاجرت	میزان خالص مهاجرت= مهاجرت به منطقه– عزیمت از منطقه	عزیمت از منطقه= نرخ عزیمت از منطقه*میزان خالص مهاجرت	مهاجرت به منطقه= نرخ مهاجرت به منطقه*میزان خالص مهاجرت	
	نرخ مهاجرت به منطقه= فرصت‌های شغلی+امکانات بهداشتی و درمانی+امکانات فرهنگی و تفریحی (Khoshbin, Rahimi, 2005)			
توسعه شهر شینی	توسعه شهرنشینی= میزان جمعیت شهری+ میزان خالص مهاجرت مسکن= سرانه مسکن*توسعه شهرنشینی (Khoshbin, Rahimi, 2005) تعداد موتورسیکلت= سرانه موتورسیکلت* توسعه شهرنشینی (Khoshbin, Rahimi, 2005) مراکز تجاری= سرانه مراکز تجاری*توسعه شهرنشینی (Khoshbin, Rahimi, 2005) مصرف گاز طبیعی مسکونی–تجاری=(مسکن+ مراکز تجاری)*نرخ مصرفی گاز طبیعی هر واحد مسکونی–تجاری (National Oil Company Statistics, 2013) مصرف نفت سفید= نرخ مصرفی نفت سفید*مسکن(National Oil Company Statistics, 2013) تعداد خودروهای شخصی در منطقه= خودروهای پلاک گذاری شده– خودروهای اسقاط شده (Statistics of Tabriz Transport & Traffic Organization, 2013) خودروهای پلاک گذاری شده= توسعه شهرنشینی*نرخ خرید خودرو (Statistics of Tabriz Transport & Traffic Organization, 2013) خودروهای اسقاط شده= نرخ اسقاط خودرو*تعداد خودروهای شخصی در منطقه (Statistics of Tabriz Transport & Traffic Organization, 2013)			
حجم ترافیک	حجم ترافیک=(تعداد خودروهای شخصی در منطقه*متوسط طول سفر*تعداد سفر در هرماه*سهم سفرهای ماهانه با خودروهای شخصی)/ ضریب کاهش ترافیک (Statistics of Tabriz Transport & Traffic Organization, 2013) تعداد سفر در ماه= جذابیت رانندگی*نرخ معمول سفرهای ماهانه (Statistics of Tabriz Transport & Traffic Organization, 2013) متوسط طول سفر=جذابیت رانندگی/ انصراف از سفر (Statistics of Tabriz Transport & Traffic Organization, 2013) جذابیت رانندگی= کرایه حمل‌ونقل عمومی– زمان سفر– کافی بودن حمل‌ونقل عمومی. اضافه مصرف بنزین به خاطر ترافیک= حجم ترافیک*نرخ اضافه مصرف بنزین به خاطر ترافیک (Fatihifar,Kahrifooshan, 2012) مصرف بنزین=(نرخ مصرف بنزین هر موتورسیکلت*تعداد موتورسیکلت)+(نرخ بنزین مصرفی هر خودرو*سهم سفرهای ماهانه با خودروهای شخصی* تعداد خودروهای شخصی در منطقه)+ اضافه مصرف بنزین به خاطر ترافیک (Fatihifar,Kahrifooshan, 2012) سهم استفاده از ناوگان حمل‌ونقل عمومی= نرخ استفاده‌کنندگان از حمل‌ونقل عمومی*توسعه شهرنشینی (Fatihifar,Kahrifooshan, 2012) مصرف گازوییل= تعداد اتوبوس*مصرف ماهانه گازوییل هر اتوبوس* سهم استفاده از ناوگان حمل‌ونقل عمومی (Fatihifar,Kahrifooshan, 2012)			
توسعه صنعتی	تعداد صنایع در منطقه= احداث واحدهای صنعتی جدید– واحدهای صنعتی منحل شده.	احداث واحدهای صنعتی جدید= نرخ رشد صنایع * تعداد صنایع در منطقه		
	واحدهای صنعتی منحل شده= نرخ انحلال واحدهای صنعتی*تعداد صنایع در منطقه	مصرف مازوت= ضریب مصرفی مازوت هر واحد صنعتی*تعداد صنایع در منطقه		
	مصرف گاز طبیعی= ضریب مصرفی گاز طبیعی هر واحد صنعتی* تعداد صنایع در منطقه			
فضای سبز	میزان فضای سبز= ایجاد فضای سبز– فضای سبز نابودشده	ایجاد فضای سبز= میزان فضای سبز*نرخ ایجاد فضای سبز	فضای سبز نابودشده= نرخ نابودی فضای سبز*میزان فضای سبز	
مونوکسید کربن	میزان مونوکسید کربن هوا=(نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف گاز طبیعی مسکونی تجاری+ نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف نفت سفید+ نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف بنزین+ نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف گازوییل+ نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف گاز طبیعی صنایع+ نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف مازوت)–(نرخ خروج مونوکسید کربن از هوا) (Bayat, 2004) نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف گاز طبیعی مسکونی تجاری=ضریب انتشار مونوکسید کربن از مصرف گاز طبیعی مسکونی تجاری* مصرف گاز طبیعی مسکونی تجاری (Bayat, 2004) نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف نفت سفید=ضریب انتشار مونوکسید کربن از مصرف نفت سفید* مصرف نفت سفید (Bayat, 2004) نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف بنزین=ضریب انتشار مونوکسید کربن از مصرف بنزین* مصرف بنزین (Bayat, 2004) نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف گازوییل=ضریب انتشار مونوکسید کربن از مصرف گازوییل* مصرف گازوییل (Bayat, 2004) نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف گاز طبیعی صنایع=ضریب انتشار مونوکسید کربن از مصرف گاز طبیعی صنایع* مصرف گاز طبیعی صنایع (Bayat, 2004) نرخ انتشار مونوکسید کربن از مصرف مازوت=ضریب انتشار مونوکسید کربن از مصرف مازوت* مصرف مازوت (Bayat, 2004) نرخ خروج مونوکسید کربن از هوا=نرخ شستشوی مونوکسید کربن توسط بارندگی+نرخ پراکندگی مونوکسید کربن توسط باد+نرخ جذب مونوکسید کربن توسط فضای سبز (Shariepour, 2009) نرخ شستشوی مونوکسید کربن توسط بارندگی=میزان بارندگی*ضریب شستشوی مونوکسید کربن توسط بارندگی به ازای هر میلی‌متر بارندگی(Shariepour, 2009) نرخ پراکندگی مونوکسید کربن توسط باد=سرعت باد*ضریب پراکندگی مونوکسید کربن به ازای هر متر بر ثانیه سرعت باد(Shariepour, 2009) جذب مونوکسید کربن توسط فضای سبز= نرخ جذب مونوکسید کربن توسط فضای سبز*میزان فضای سبز(Shariepour, 2009) (زمان، سرعت)lookup EXTRAPOLATE = سرعت باد (زمان، بارندگی)lookup EXTRAPOLATE = مقدار بارندگی			



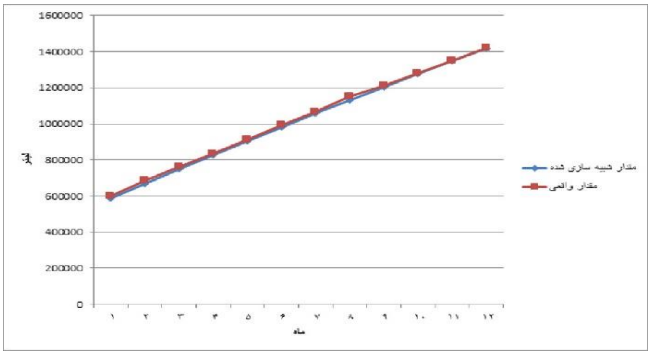
شکل (۶): آزمون رفتار الگو برحسب متغیر توسعه شهرنشینی



شکل (۷): آزمون رفتار الگو برحسب متغیر میزان مونوکسید کربن هوا



شکل (۸): آزمون رفتار الگو برحسب متغیر سرعت باد



شکل (۹): آزمون رفتار الگو برحسب متغیر مصرف بنزین

ب) آزمون حالت‌های حدی

در این آزمون مقادیر اولیه متغیرها در شرایط حدی (کران‌های بالا و یا پایین مقادیر) به مدل شبیه‌سازی شده اعمال می‌شود، در صورتی که نتایج به دست آمده از مدل، با ادبیات تحقیق سازگاری داشته باشد، می‌توان ادعا کرد که مدل از اعتبار نسبی برخوردار است. برای اعتبار سنجی با این روش، نرخ پراکندگی مونوکسید کربن به ازای هر متر بر ثانیه بسیار بالاتر از مقدار واقعی تعیین شد. پس از شبیه‌سازی مدل ملاحظه شد که میزان مونوکسید کربن هوا منفی می‌شود. در صورتی که نرخ پراکندگی مونوکسید کربن به ازای هر متر بر ثانیه بسیار پایین‌تر از مقدار واقعی تعیین شود، پس از شبیه‌سازی، میزان مونوکسید کربن هوا بیش از چهار برابر می‌شود. همچنین نرخ بنزین مصرفی هر خودرو بسیار بالاتر از مقدار مصرفی موجود تعیین شد، پس از شبیه‌سازی میزان مونوکسید کربن هوا تقریبا افزایش چهار برابری داشت در حالی که با کاهش نرخ بنزین مصرفی هر خودرو به مقدار بسیار زیاد، پس از شبیه‌سازی، میزان مونوکسید کربن هوا به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. نرخ شستشوی مونوکسید کربن متغیر دیگری بود که به ازای هر میلی‌متر بارندگی بسیار بالاتر از مقدار واقعی تعیین شد. پس از شبیه‌سازی مدل، ملاحظه شد که میزان مونوکسید کربن هوا منفی می‌شود. در حالی که وقتی نرخ شستشوی مونوکسید کربن به ازای هر میلی‌متر بارندگی بسیار پایین‌تر از مقدار واقعی تعیین شد، پس از شبیه‌سازی مدل ملاحظه شد که میزان مونوکسید کربن هوا به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده برای آزمون حدی با انتظارهای واقعی مبتنی بر ادبیات تحقیق سازگاری دارد. بنابراین می‌توان بر اساس این روش نیز ادعا کرد که مدل اعتبار نسبی دارد.

طراحی و ارزیابی سیاست‌ها (سناریوها)

پس از اطمینان از اعتبار مدل، پنج سناریو برای کاهش انتشار مونواکسید کربن مورد ارزیابی قرار گرفت. ذیلا نتایج هر کدام ارایه می‌شود.

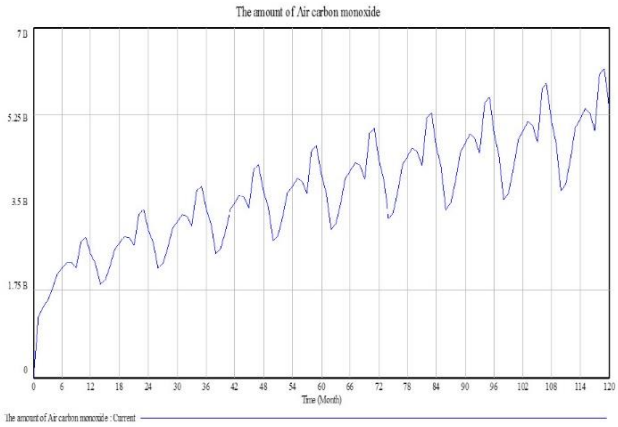
سناریوی اول: ادامه وضع موجود

ادامه وضع موجود به این معنی است که اگر در وضعیت موجود هیچ تغییری ایجاد نشود، مقدار مونواکسید کربن در بازه زمانی شبیه‌سازی چگونه خواهد بود؟ شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در

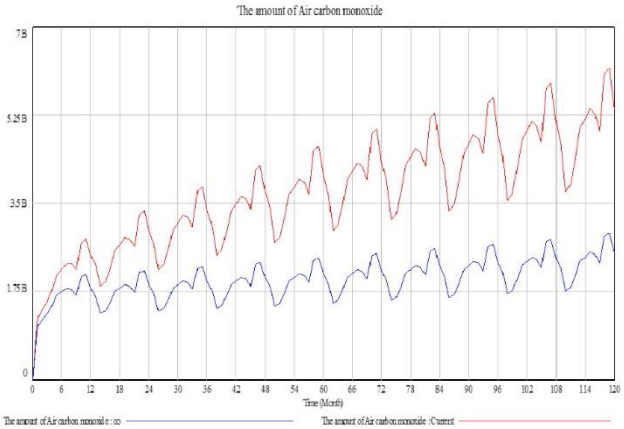
صورت عدم مداخله، میزان مونواکسید کربن با شیب قابل توجهی مطابق شکل (۱۰) افزایش خواهد یافت. بنابراین این سناریو به هیچ وجه قابل توصیه نیست.

سناریوی دوم: استفاده از بنزین یورو چهار

در این سناریو، بنزین مصرفی خودروها در شهر تبریز به بنزین یورو چهار تغییر داده می‌شود. با اجرای این سناریو از آنجایی‌که ضریب انتشار مونوکسید کربن حاصل از مصرف بنزین به ۰/۱ گرم بر لیتر کاهش پیدا می‌کند، مطابق شکل (۱۱)، میزان مونوکسید کربن هوا حدود ۵۰ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. در این نمودار منحنی آبی نشان‌دهنده رفتار متغیر در صورت اجرای این سناریو هست.



شکل (۱۰): نمودار شبیه‌سازی حفظ وضعیت موجود



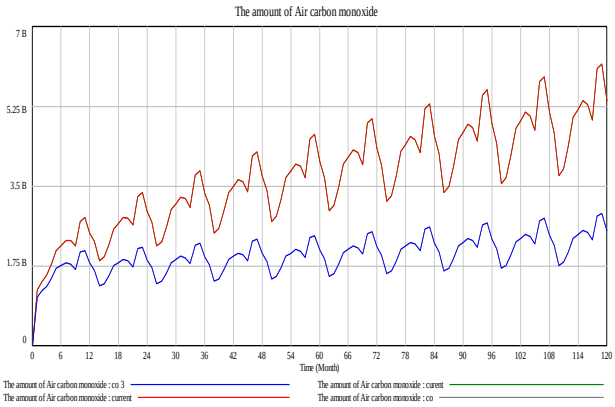
شکل (۱۱): نمودار شبیه‌سازی سناریوی استفاده از بنزین یورو چهار

سناریوی سوم: استفاده از بنزین یورو چهار و هم‌زمان کاهش نرخ معمول سفرهای ماهانه

با اجرای این سناریو، مقدار مونوکسید کربن در هوای شهر تبریز به مقدار بیش از ۵۰ درصد کاهش پیدا کرد. در صورت اجرای این سیاست، میزان مونوکسید کربنِ هوای شهر تبریز مطابق منحنی آبی در شکل (۱۲) خواهد بود. اثر این سناریو اگر چه کاهش انتشار مونواکسید کربن است اما چندان تفاوتی با اثر سناریو دوم یعنی استفاده از بنزین یورو چهار ندارد.

سناریوی چهارم: کاهش میزان گاز مصرفی هر واحد مسکونی-تجاری

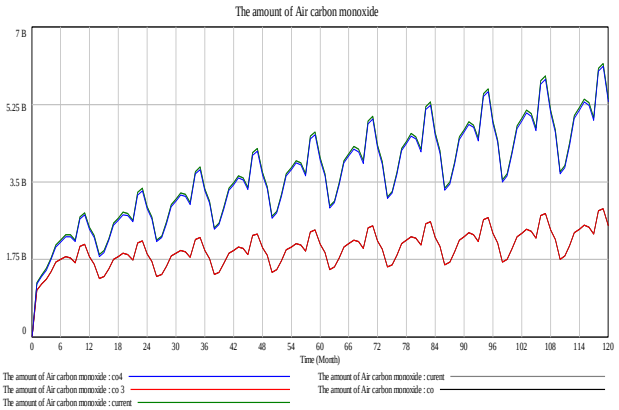
در این سناریو با کاهش نرخ مصرف گاز طبیعی برای هر واحد مسکونی- تجاری میزان انتشار مونوکسید کربن هوای شهر تبریز مطابق منحنی آبی در شکل (۱۳) کاهش پیدا می‌کند. در این نمودار منحنی قرمز اثر سناریو سوم و منحنی سبز اثر سناریو اول بر روی انتشار مونواکسید کربن را نشان می‌دهد. همچنان که شکل (۱۳) نشان می‌دهد، منحنی آبی چندان تفاوتی با منحنی سبز ندارد به طوری که تقریبا این دو منحنی بر هم منطبق هستند. بنابراین می‌توان ادعا کرد که کاهش انتشار مونواکسید کربن در نتیجه سناریویِ کاهش میزان گاز مصرفی هر واحد مسکونی – تجاری چندان قابل توجه نیست.



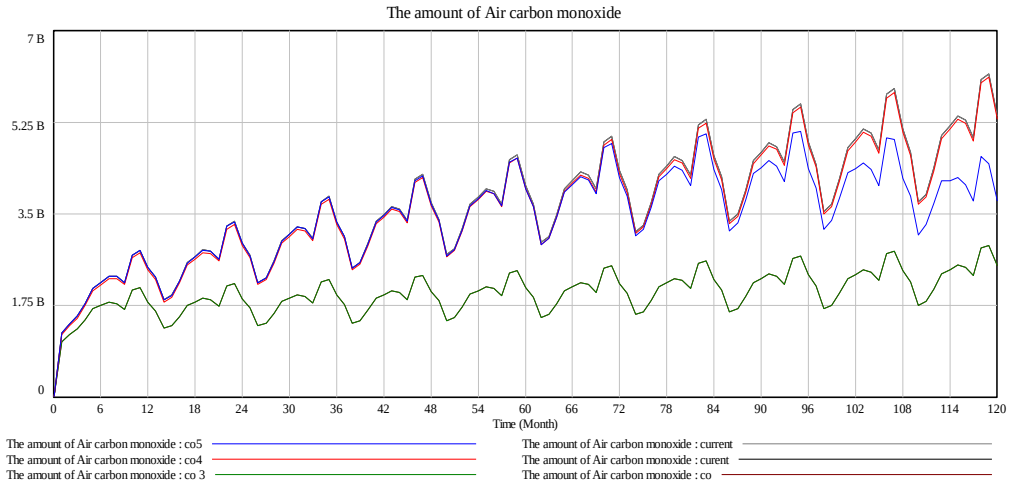
شکل (۱۲). نمودار شبیه‌سازی سناریوی استفاده از بنزین یورو چهار و کاهش نرخ معمول سفرهای ماهانه

سناریوی پنجم: توسعه فضای سبز در شهر تبریز

افزایش فضای سبز سبب افزایش جذب مونوکسید کربن شده، در نتیجه کاهش میزان مونوکسید کربن در هوای شهر تبریز را در پی خواهد داشت. این کاهش به صورت منحنی آبی‌رنگ در شکل (۱۴) نشان داده شده است. روند افزایشی شکاف بین منحنی آبی و منحنی مربوط به وضعیت جاری در طول زمان، نشان می‌دهد که این سناریو در بلند مدت می‌تواند میزان مونواکسید کربن را جذب کرده و کاهش دهد.



شکل (۱۳). نمودار شبیه‌سازی سناریوی کاهش میزان گاز مصرفی هر واحد مسکونی-تجاری



شکل (۱۴). نمودار شبیه‌سازی سناریوی توسعه فضای سبز در شهر تبریز

از بین سناریوهای طراحی‌شده در بالا و با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی رایانه‌ای سناریوی سوم یعنی استفاده از بنزین یورو چهار و کاهش نرخ معمول سفرهای ماهانه برای کاهش میزان مونوکسید کربن موجود در هوا بهترین سیاست می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

ادامه وضع موجود اولین سناریویی بود که مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با فرض عدم مداخله در سیستم و ادامه وضعیت موجود، میزان انتشار آلاینده مونوکسید کربن در هوای شهر تبریز افزایش قابل توجهی خواهد داشت. با ادامه وضعیت موجود، جمعیت شهر تبریز از دو طریق رشد طبیعی جمعیت و مهاجرت، افزایش می‌یابد. با افزایش جمعیت، شهرنشینی توسعه یافته در نتیجه میزان مونواکسید کربن از دو مسیر مستقیم و غیرمستقیم افزایش خواهد یافت. انتشار مستقیم در نتیجه مصرف انرژی‌هایی همچون برق، سوخت‌های گرمایشی، گازوییل و بنزین، به دلیل استفاده از زیرساخت‌ها و حمل‌ونقل خواهد بود. انتشار غیر مستقیم نیز از ناحیه تولیدات صنعتی که خانوارها مصرف‌کننده نهایی آن‌ها هستند مانند لباس، لوازم خانگی و همچنین خدمات و غذاهای مورد استفاده خانوارها، افزایش خواهد یافت. نتایج تحقیقات (Goyal, 2005) نیز مؤید این موضوع است. ایشان در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که ۳۰٪ تا ۸۰٪ از کل آلودگی‌های هوا ناشی تعداد خودروها و حمل نقل درون شهری می‌باشد. همچنین (Moharramnejad & Ejtihadi, 2010) استراتژی‌های مناسب کنترل آلودگی هوا را استفاده از حمل‌ونقل عمومی، معاینه فنی، مدیریت ترافیک و پیشنهاد سوخت جایگزین ارایه نموده‌اند. دومین سناریو، جایگزینی بنزین یورو چهار به جای استفاده از بنزین‌های موجود می‌باشد. با اجرای این سناریو در مدل

شبیه‌سازی شده، میزان مونوکسید کربن هوا حدود ۵۰ درصد کاهش پیدا کرد. نتیجه شبیه‌سازی با یافته‌های پژوهش سازمان محیط زیست استان آذربایجان شرقی در سال ۹۱ (Gorbani et al., 2012) نیز سازگار است. این تحقیق نشان می‌دهد که حدود ۹۷ درصد مونوکسید کربن موجود در هوا از این منبع منتشر می‌شود. همچنین سوخت جایگزین راه حلی است که در تحقیق (Moharramnejad & Ejtihadi, 2010) هم به اهمیت آن اشاره شده است. بنابراین قابل انتظار است که با مدیریت بنزین میزان انتشار مونواکسید کربن کاهش قابل توجهی داشته باشد.

استفاده از بنزین یورو چهار به همراه کاهش نرخ معمول سفرهای ماهانه، سومین سناریویی بود که مورد ارزیابی قرار گرفت. با اجرای این سناریو، مقدار مونوکسید کربن در هوای شهر تبریز به مقدار بیش از ۵۰ درصد کاهش پیدا کرد. سناریوی دیگری که مورد ارزیابی قرار گرفت، کاهش میزان گاز مصرفی هر واحد مسکونی–تجاری بود. کاهش نرخ مصرف گاز طبیعی در هر واحد مسکونی– تجاری اثر معکوسی بر انتشار مونوکسید کربن داشت. مطالعه (Zarabi et al., 2010) نیز این موضوع را تأیید می‌کند. بر اساس مطالعه ایشان حدود ۲۳ درصد آلودگی شهر ناشی از میزان انرژی مصرفی هر واحد مسکونی– تجاری می‌باشد.

در نهایت پنجمین سناریو تحت عنوان توسعه فضای سبز در شهر تبریز، مورد ارزیابی قرار گرفت. اجرای این سناریو در محیط شبیه‌سازی شده در بلند مدت، جذب مونواکسید کربن و کاهش آن در هوای شهر تبریز را نشان داد. همچنین با توجه به جهت باد غالب در منطقه (شمال شرقی و شرق) در فصل‌های بهار و تابستان، پیشنهاد می‌شود توسعه فضای سبز در مناطق شرقی و شمال شرقی مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر آن به دلیل وجود بزرگ‌ترین بازار سرپوشیده دنیا در مرکز شهر تبریز و تمرکز سایر مراکز تجاری در منطقه میدان نماز (مرکز شهر)، در تمام ساعات روز ترافیک سنگینی در این منطقه حاکم است. به دلیل موقعیت تجاری این منطقه، پنجاه تا شصت درصد مشکلات ترافیکی کل شهر در این محدوده قرار دارد. مطالعه (Shokri, 2011 ;Giureia et.al., 2002) نیز نشان می‌دهد که غلظت CO و NO_x با فعالیت‌های مراکز شهری که به صورت نامتناسب توزیع‌شده‌اند در ارتباط می‌باشد. این در حالی است که در مجموع سرانه فضای سبز در منطقه مرکزی شهر ۳/۱ مترمربع (Gorbani et al., 2012) می‌باشد. این سرانه با توجه به موقعیت جغرافیایی و جمعیت زیادی که از نقاط دیگر شهر و همچنین نقاط دیگر استان در این منطقه رفت و آمد دارند، همچنین در مقایسه با استانداردهای بین‌المللی بسیار ناچیز می‌باشد. بنابراین در راستای سناریوی افزایش فضای سبز، مرکز شهر نیز همانند مناطق شرقی و شمال شرقی می‌بایست در اولویت قرار گیرند. از بین پنج سناریو، سناریوی سوم بیشترین تاثیر را در کاهش مونواکسید کربن در هوای شهر تبریز دارد و ادامه وضع موجود بدترین حالت ممکن برای انتشار مونواکسید کربن در هوای شهر تبریز می‌باشد. به نظر می‌رسد بر اساس نتایج تحقیق برنامه‌ریزی برای کاهش انتشار مونواکسید کربن باید به ترتیب بر جایگزینی بنزین یورو چهار، توسعه فضای سبز در مناطق مرکزی، شرقی و شمال شرقی شهر و در نهایت مدیریت مصرف انرژی خانوارها متمرکز باشد.

تحقیق حاضر نیز همانند هر تحقیق دیگر درون محدودیت هایی شکل گرفته است. فقدان اطلاعات در برخی موارد، محدودیتی بود که تخمین توابع را با مشکل مواجه می‌ساخت. همچنین برخی متغیرها بر اساس ترجیحات و امکانات محقق کنار گذاشته شدند. تحقیقات آتی می‌توانند با گسترش مرز مدل این محدودیت را رفع نمایند. همچنین در تحقیق حاضر تأخیرها مدل‌سازی نشده‌اند. بنابراین تحقیقات بعدی می‌توانند این محدودیت را نیز رفع نمایند. اطلاعات مربوط به میزان آلودگی هوا بر اساس آلاینده مونوکسید کربن در شهر تبریز تنها از سال ۸۳ به بعد موجود است. بنابراین نمی‌توان روند انتشار مونواکسید کربن و عوامل مؤثر بر آن را به اندازه کافی در افق زمانی گذشته ردیابی کرد. حال که مقاله تدوین می‌شود تقریبا چهار سال از زمان مدل‌سازی گذشته، بنابراین احتمالا نیاز است فرضیه‌های پویا بازنگری شده، اگر متغیرهای دیگری نقش اساسی در انتشار مونواکسید کربن دارند در مدل وارد شوند. در مدل فعلی رفتار مونوکسید کربن به‌صورت ماهانه بررسی و شبیه‌سازی‌شده است. بررسی رفتار مونوکسید کربن به‌صورت روزانه می‌تواند به نتایج دقیق‌تری منجر شود. با اجرای این پیشنهاد روزها یا هفته هایی که انتشار مونواکسید کربن در آن زیاد است، می‌تواند مورد شناسایی قرار گرفته، برنامه‌ریزی برای آن‌ها امکان‌پذیرتر شود.

فهرست منابع

Abdulkareem, A.S. 2005. Urban Air Pollution Evaluation by Computer Simulation: A Case Study of Petroleum Refining Company Nigeria, Leonardo Journal of Sciences, ISSN 1583-0233, p. 17-28.

Alam, S.; Fatima, A.; Butt. 2007. Sustainable Development in Pakistan in the Context of Energy Consumption Dem& & Environmental Degradation", Journal of Asian Economics, 18, pp. 825 - 837.

Bayat, R. 2004. Contribution of Tehran Air Pollution Production Resources, Master of Science in Environmental Engineering, Environmental Engineering, Guidance by Ayoub Turkian, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology. [in Persian].

Behboudi, D.; Asgharpur, H.; Fallahi, F. & Mohammadi Khaneghahi, R. 2014. Impacts of financial & economic developments on greenhouse gas emission in selected OPEC countries: A panel cointegration & dynamic ordinary least squares approch, Journal of Economic Research (Tahghighat- E- Eghtesadi), 49(2), pp. 315-335. doi: 10.22059/jte.2014.51796. [in Persian].

Chakraborty, N.; Mukherjee, I.; Santra, A.K.; Chowdhury, S.; Chakraborty, S.; Bhattacharya, S.; Mitra, A.P. & Sharma, C., 2008, Measurement of CO2, CO, SO2, & NO emissions from coal-based thermal power plants in India, Atmospheric Environment, 42, 1073–1082.

Chen, Z.H.; Cheng, S.Y.; Li, J. B.; Guo. X.R.; Wang, W.H. & Chen, D. S. 2008. Relationship between atmospheric pollution processes & synoptic pressure patterns in northern China, Atmospheric Environment

Demuzere, M. & Lipzig, N. 2010. A new method to estimate air-quality levels using a synoptic-regression approach. Part I: Present-day O3 & PM10 analysis, Atmospheric Environment 44, pp 1341– 1355.

Fatihifar, E. & Kahrifooshan, D. 2012. Tabriz Contaminant Emissions List Compilation Plan, East Azarbaijan Environmental Administration Publication. [in Persian].

Fotros, M.; Ghaffari, H. & Shahbazi, A. 2011. Relationships between Co2 Emissions & Economic Growth: the Case of OPEC, Quarterly Journal of Economic Growth & Development Research, 1(1), pp. 77-59. [in Persian].

General Census of Population & Housing. 2016. Iran Census Center, Available in August 1396, https://www.amar.org.ir. [in Persian].

Ghaffarzadegan, N.; Lyneis, J. & Richardson, G.P. 2011. How small system dynamics models can help the public policy process. Syst. Dynam. Rev. 27, 22–44.

Gorbani, R.; Hosseinzadeh Delir, K. & Shorkri Firoozjah, P. 2012. The Study Tabriz City Air Pollution Condition on the Basis of Principal Component Analysis (PCA), Geography & Planning, 16(39), pp. 89-108. [in Persian].

Goyal, S.V. 2005. Underst&ing Urban Vehicular Pollution Problem Vis- A –Vis. 42, pp 6078– 6087.

Hemmati, R.; Saboori, H. & Ahmadi Jirdehi, M. 2016. Multistage generation expansion planning incorporating large scale energy storage systems & environmental pollution, Renewable Energy, 97, 636-645.

Jones, D. W. 1991. How Urbanization Affects Energy-use in Developing Countries, Energy Policy, 19(7), pp. 621–630.

Khoshbin, S. & Rahimi, A. D. 2005. Population Guide, Ministry of Health & Medical Education Publications, Winter, pp. 19-20 & 32. [in Persian].

Liu, Y. 2009. Exploring the Relationship between Urbanization & Energy Consumption in China, Using ARDL & FDM, Energy, 34, pp. 1846-1854.

Manasakunkit, C. & Chinda, T. 2013. The development of a basic dynamic model of household waste recycling. In: Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, & Production Management (EPPM).

Moharramnejad, N. & Ejtihadi, M. 2010. Revision of the Greater Tehran Air Pollution Control Plan & the Progress of Plan Axes, Journal of Development & Change, Climate, No. 2. [in Persian].

Mukherjee, J.; Ray, S. & Ghosh, P.B. 2013. A system dynamic modeling of carbon cycle from mangrove litter to the adjacent Hooghly estuary. India. Ecol. Model. 252, 185–195.

Nasrollahi, Z. & Ghaffari Gulak, M. 2010. Air Pollution & its determinants (The Case Study of SPM, & SO2 Emissions in Iran Manufacturing Industries). QJER. 2010; 10 (3) :75-95 [in Persian].

Neumayer, E. & Cole, M. 2004. Examining the Impact of Demographic Factors on Air Pollution", Population & Environment, vol. 26(1), pp.5-21.

Performance Report of Tabriz Metropolitan Air Pollution Reduction Working Group. 2011. East Azerbaijan Province Environmental Protection Agency, p. 3. [in Persian].

Regulation (EC) No 715/2007", The European Parliament & the Council of the European Union. 2007-06-20. pp. 5–9. Retrieved 2015-10-29.

Sadeghi, K. & Ebrahimi, S. 2013. Impact of Coal Consumption on Carbon Dioxide Emissions in Iran, Iranian Energy Economics, 2(7), pp. 43-73. [in Persian].

Sadrsky, P. 2010. The impact of financial development on energy consumption in emerging economies, Energy Policy, 38, 2528-2535.

Sadrsky, P. 2011. Financial development & energy consumption in central & eastern European frontier economies, Energy Policy, 39, 99-100.

Safavi, S.Y. & Alijani, B. 2006. Investigation of Geographical Factors in Tehran Air Pollution,. GEOGRAPHICAL RESEARCH QUARTERLY, 38(6). [in Persian].

Shahbaz, M.; Islam, F., & Sabihuddin, M. 2011. Financial development, energy consumption & CO2 emissions: evidence from ARDL approch for Pakistan. MPRA paper, 30138.

Shariepour, Z. 2009. Seasonal & daily variation of air pollutants & their relation to meteorological parameters, Journal of the Earth & Space Physics, 35(2), pp. 137-119. [in Persian].

Shoar, K. & Javadi, A. 2006. Interaction of Urban Transport Policies & L& Development & Development, 7th Iranian Conference on Transport & Traffic Engineering, Tehran, Tehran Transport & Traffic Organization, Deputy of Transport & Municipal Traffic Tehran. [in Persian].

Shokri, P. 2012. 'aa', Journal of Urban Ecology Researches, 2(3), pp. 75-82. [in Persian].

Statistics of National Oil & Gas Distribution Company of East Azerbaijan Province, 2013. [in Persian].

Statistics of Tabriz Transportation & Traffic Organization. 2013. Website of Scientific Information Center of Transport & Traffic Specialty, www.ttic.ir. [in Persian].

Sterman, John D. 2000. Business dynamics: systems thinking & modeling for a complex world.

Sumari, S.; Ibrahim, R.; Zakaria, N.H. & Hamid, A.H.A. 2013. Comparing three simulation model using taxonomy: system dynamic simulation, discrete event simulation & agent based simulation. Int. J. Manag. Excell. 1, 54–59.

Zarabi, A.; Mahamadi, J. & Abdollahi, A. A. 2010. Investigation & Evaluation of Fixed & Moving Sources in Isfahan Air Pollution, Geography, Geographical Society of Iran, 8 (26), 151- 164.