فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۷، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۴، ص. ۵۲۲۱-۵۲۰۷
مقاله علمی-پژوهشی

طراحی مدل مدیریت آلایندگی ناشی از حمل‌ونقل بار درون‌شهری در بستر بازار کربن با رویکرد نظریه بازی‌ها (مطالعه موردی: شهر تهران)

سهیل ابراهیمی، کارشناس‌ارشد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران، ایران
سعید شرافتی‌پور (مسئول مکاتبات)، استادیارگروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران، ایران
E-mail: sherafatipour@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

چکیده

حمل‌ونقل بار شهری در تهران سهم بزرگی در آلودگی هوای این شهر ایفا می‌کند، به‌گونه‌ای که حدود ۳۵ درصد از آلودگی ناشی از حمل‌ونقل به این بخش تعلق دارد. استفاده از ناوگان فرسوده دیزلی، مصرف بالای سوخت و مدیریت ناکارآمد، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وضعیت کنونی هستند که پیامدهای زیان‌آور آن شامل افزایش بیماری‌های تنفسی، هزینه‌های اقتصادی سنگین و تشدید تغییرات اقلیمی می‌شود. سیاست‌های موجود مانند محدودیت‌های تردد و نوسازی ناوگان، به دلیل عدم پاسخگویی به رشد تقاضای لجستیک شهری، اثرات مقطعی دارند. در این راستا، استفاده از سازوکارهای بازارمحور کاهش آلایندگی، همچون تجارت کربن و سیاست‌های سقف- پاداش/ جریمه (Cap- and- P/S)، به معنای تعیین سقف انتشار برای شرکت‌ها و ایجاد امکان خرید و فروش سهمیهٔ انتشار میان آن‌ها، می‌تواند به‌عنوان رویکردی پایدارتر برای کاهش انتشار CO_2 در حمل‌ونقل بار شهری موردتوجه قرار گیرد. این تحقیق از نظریه بازی‌ها به‌ویژه مدل‌های نش برای شبیه‌سازی رفتار شرکت‌های حمل‌ونقل و ارزیابی اثربخشی سیاست‌های کربنی در کاهش انتشار استفاده کرده است. در سناریوی «عدم‌مداخله»، رشد سالانه CO_2 در صورت عدم اعمال سیاست‌ها پیش‌بینی‌شده است و در ادامه با معرفی بازی‌های نش در دو نسخه، یکی بدون حضور بازیکن شرور و دیگری با اضافه شدن یک بازیکن شرور، تأثیر این سیاست‌ها بررسی می‌شود. مطالعه موردی تهران نشان داد که سیاست‌های سقف-پاداش/جریمه قادر به کاهش انتشار CO_2 به میزان ۱۳٫٤ درصد نسبت به سناریوی عدم مداخله هستند، اما حضور بازیکن شرور که به‌طور عمدی به دنبال افزایش پیمایش بدون توجه به کاهش آلایندگی است، می‌تواند این کاهش را به ۲٫۸ درصد محدود کند. این پژوهش نتایج مهمی در خصوص طراحی سیاست‌های کربنی و نیاز به نظارت دقیق‌تر و افزایش جریمه‌ها برای کنترل رفتارهای خودخواهانه رانندگان شرور در حمل‌ونقل بار شهری به‌ویژه در تهران ارائه می‌دهد. از منظر اجرایی، یافته‌ها بیانگر آن است که: افزایش نرخ جریمه کربن به بیش از ٤۹۰ دلار بر تن برای رساندن شرکت‌ها به سقف انتشار ضروری است؛ کاهش کران فعالیت به حدود ۱/۱ برابر سقف مجاز می‌تواند رشد پیمایش را کنترل کند و ترکیب سیاست‌های اقتصادی با پایش مکانی در محدوده‌های طرح کاهش آلودگی هوا و طرح ترافیک، بیشترین اثربخشی را در مهار انتشار و رفتار پرریسک رانندگان دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند موجب بهبود تصمیم‌گیری‌های خرد و کلان برای سیاست‌گذاران شهری و برنامه‌ریزان حمل‌ونقل باشد تا بتوانند به کمک یافته‌های این پژوهش، راهکارهای مؤثرتری برای کاهش آلودگی هوا در تهران اتخاذ کنند.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل بار، تجارت کربن، نظریه بازی، سیاست‌گذاری زیست‌محیطی

۱. مقدمه

حمل‌ونقل بار شهری در تهران سهمی چشمگیر در انتشار آلاینده‌ها دارد و حدود ۳۵ درصد از کل آلودگی ناشی از حمل‌ونقل به این بخش مربوط می شود.[*Shahbazi, Reyhanian,* ۲۰۱۶]

ناوگان دیزلی فرسوده، مصرف بالای سوخت و مدیریت ناکارآمد، اصلی‌ترین عوامل این وضعیت هستند.[*Heger, Sarraf,* ۲۰۱۸] پیامدهای آن شامل افزایش بیماری‌های تنفسی، تحمیل هزینه‌های اقتصادی سنگین و تشدید تغییرات اقلیمی است.[*Kakouei, Vatani, Idris,* ۲۰۱۲] سیاست‌های موجود نظیر محدودیت تردد یا جایگزینی ناوگان تنها اثرات مقطعی داشته‌اند و پاسخگوی رشد تقاضای لجستیک شهری نیستند.[*Hosseini, Ariyana, Abroodi,* ۲۰۱۶] در سطح جهانی، تجربه‌هایی مانند اتحادیه اروپا و کالیفرنیا نشان داده‌اند که بازار کربن و سازوکار «سقف- پاداش/ جریمه» می تواند با تعیین سقف انتشار و ایجاد مشوق‌های مالی، مسیر پایدارتری برای کاهش آلایندگی فراهم کند.[*Holman, Harrison,* ۲۰۱۵]

با این‌حال، در تهران، به‌کارگیری این سیاست با چالش‌هایی چون فقدان زیرساخت پایش انتشار و مقاومت اقتصادی بازیگران مواجه است. در چنین بستری، استفاده از نظریه بازی‌ها برای مدل‌سازی رفتار ذی‌نفعان می‌تواند ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی تصمیمات و طراحی سیاست‌های اثربخش باشد.[*California Air Resources Board,* ۲۰۱۳]

تقاضای لجستیک درون‌شهری تهران طی سال‌های اخیر با رشد پایدار مواجه بوده و الگوی توزیع فضایی فعالیت‌ها، سفرهای باری را در محورهای پرتراکم متمرکز کرده است. محدودیت‌های فعلی (نظیر *LEZ/CGZ*) عمدتاً بر کنترل دسترسی تکیه دارد و کمتر بر «انگیزه‌های اقتصادیِ کاهش انتشار» سوار است؛ ازاین‌رو پایداری اثرات آن محدود می‌ماند. نبودِ قیمت‌گذاری منسجم برای کربن در حوزه بار شهری، امکان «برون‌سپاری» هزینه‌های زیست‌محیطی به جامعه را فراهم می‌کند و به انباشت انتشار می انجامد. این وضعیت، نیاز به سازوکاری را برجسته می‌سازد که هم‌زمان «قید کمیِ انتشار» و «سیگنال قیمتی» را وارد تصمیم‌های اپراتورها کند.

در چارچوب سقف و تجارت، سیاست‌گذار سقف کل انتشار را تعیین می‌کند، مجوزها میان بنگاه‌ها تخصیص می‌شود و بازار، قیمت تعادلی را بر اساس کمیابی شکل می‌دهد. بنگاه‌هایی که «کم‌هزینه‌تر» کاهش می‌دهند، از فروش مازادِ مجوز منتفع می شوند و «بنگاه‌های پرهزینه» خرید می‌کنند؛ بدین‌ترتیب کاهش با کمترین هزینه اجتماعی رقم می‌خورد. در حوزه بار شهری، ترجمه این منطق مستلزم سه جزء کلیدی است: (۱) محاسبه انتشار بر مبنای داده واقعی سفر- ناوگان، (۲) تعریف سقف‌های شرکت‌محور متناسب با سهم انتشار پایه و (۳) طراحی جریمه/پاداشی که رفتار را به ناحیه زیرِ سقف هدایت کند.

هدف کلی پژوهش، ارزیابی ظرفیت سیاست‌های بازارمحور کربن در کاهش انتشار CO_2 بخش بار شهری تهران، تحت الگوهای رفتاری متفاوت بازیگران است. پرسش‌های هدایت‌کننده بدین شرح صورت‌بندی می‌شود:

۱- در سناریوی عدم‌مداخله، مسیر انتشار CO_2 چگونه تکامل می‌یابد و خط مبنا چه اندازه فاصله با اهداف کاهشی دارد؟

۲- در تعادل نش میان پنج شرکت حقوقی، سازوکار سقف- پاداش/جریمه تا چه حد انتشار را نسبت به خط مبنا کاهش می‌دهد و شرکت‌ها در چه سطحی از فعالیت به تعادل می رسند؟

۳- ورود یک بازیگر شرور چه اثری بر انتشار سامانه و پایداری تعادل دارد و کدام پارامترهای سیاستی (شدت جریمه، راهروی قیمت، قیود ظرفیت) برای مهار آن مؤثرتر است؟

در این راستا، استفاده از مدل‌های نظریه بازی‌ها به‌عنوان چارچوب تحلیلی این پژوهش انتخاب شده است؛ زیرا تصمیم‌گیری شرکت‌های حمل‌ونقل در قبال سیاست‌های کربنی،

ماهیتی استراتژیک و متقابل دارد و رفتار هر شرکت بر نتایج دیگران اثرگذار است. نظریه بازی‌ها این امکان را فراهم می‌سازد تا تعامل میان بازیگران اقتصادی و نهاد سیاست‌گذار در شرایط محدودیت انتشار و سازوکارهای پاداش/جریمه به‌صورت کمی، منطقی و بر پایه تعادل *Nash* یا *Stackelberg* مدل‌سازی شود. بدین‌ترتیب، سیاست‌های کربنی نه‌فقط در سطح فردی بلکه در قالب پویایی تصمیم‌گیری جمعی در بازار بار شهری تهران مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

پس از این مقدمه، مرور ادبیات، شواهد و چارچوب‌های مرتبط را جمع‌بندی می‌کند؛ مطالعه موردی، بستر فضایی- عملیاتی تهران را تبیین می‌نماید؛ روش‌شناسی، زنجیره داده‌پردازی، نگاشت ناوگان به ضرایب انتشار و سازه‌های رفتاری را معرفی می‌کند؛ سپس سناریوی صفر و دو بازی *Nash* (۵ بازیگر و ۶ بازیگر (*Rogue*) با شرور) تعریف و حل می‌شود؛ در ادامه نتایج کمی و تحلیل ارائه می‌گردد و در پایان دلالت‌های سیاستی و مسیرهای آینده بحث می‌شود.

۲. ادبیات پژوهش

مرور نظام‌مند ادبیات در سه محورِ حمل‌ونقل بار شهری، سیاست‌های بازارمحور کاهش کربن (*Cap-and-Trade*) و مدل‌سازی رفتاری با نظریه بازی‌ها، چارچوب مفهومی و شواهد مقایسه‌ای لازم را برای صورت‌بندی مسئله و طراحی سناریوها فراهم می‌کند. در ادامه، ابتدا وضعیت بار شهری و پیامدهای زیست‌محیطی مرور می‌شود، سپس به تجارت کربن در مقیاس شهری پرداخته و نهایتاً پیوند آن با نظریه بازی‌ها تبیین می‌گردد.

رشد شهرنشینی و گسترش اقتصاد شهری، تقاضای لجستیک درون‌شهری را به‌طور معنی‌دار افزایش داده و به دنبال آن، مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار آلاینده‌ها تشدید شده است. [*Rodrigue*, ۲۰۲۰] در تهران نیز سهم بار شهری از انتشار آلاینده‌ها قابل توجه است و به یکی از محورهای اصلی سیاست‌گذاری شهری بدل شده است. [*Naddafi, Sowlat, Safari*, ۲۰۱۲]

در مقیاس جهانی، حمل‌ونقل حدود یک‌چهارم مصرف انرژی و انتشار CO_2 را به خود اختصاص می‌دهد. [*International Energy Agency*, ۲۰۱۶]

شدت انتشار در بار شهری، تابع مجموعه‌ای از عوامل ساختاری و عملیاتی است: (۱) نوع سوخت و فناوری موتور (غلبه دیزل و استانداردهای پایین یورو)، (۲) سن ناوگان (فرسودگی)، (۳) مدیریت ترافیک (توقف و اندرکنش‌های شلوغی) و (۴) الگوی بارگیری [*Bigazzi, Figliozzi*, ۲۰۱۳]

مقایسه‌های بین‌المللی نشان می‌دهد بار شهری می‌تواند ۲۰–۴۰٪ از انتشار شهری را تولید کند و در تهران، سهم CO_2 و $PM_{2.5}$ ناوگان باری به‌طور معناداری بالاست. [*Allen, Browne, Woodburn*, ۲۰۱۲] در پاسخ سیاستی، شهرهای پیشرو بسته‌های چندابزاره‌ای را به‌کار بسته‌اند: *LEZ/ULEZ*، یارانه نوسازی ناوگان، برقی/هیدروژنی‌سازی و مالیات/عوارض انتشار. [*Lee, Colopinto*, ۲۰۱۳]

ارزیابی‌های پس از اجرا در لندن نشان می‌دهد NO_2 و $PM_{2.5}$ به‌طور پایدار کاهش یافته‌اند؛ دلالت ضمنی آن است که مداخله‌های ناحیه‌ای، اگر با پایش مستمر همراه شوند، می‌توانند روند آلودگی را معکوس کنند. [*Int. Carbon Action Partnership*, ۲۰۲۲]

تجارت کربن به‌عنوان سازوکار بازارمحور کاهش انتشار، با تعیین سقف کل انتشارو ایجاد بازار مبادله مجوزها، انگیزه مالی برای کاهش ایجاد می‌کند: بنگاه‌هایی که زیر سقف می‌مانند می توانند مازاد را بفروشند و بنگاه‌های پرانتشار باید خرید کنند یا جریمه بپردازند. [*Stavins*, ۲۰۲۱]

منطق اقتصادی آن، هدایت سیستم به سمت کاهش با کمترین هزینه و تبدیل «کاهش انتشار» به درآمد بالقوه است. [*Stavins*, ۲۰۱۲]

اگرچه بیشتر تجربه‌ها در سطح ملی/بخشی (انرژی/صنعت) بوده، شواهد شهری، از جمله توکیو، نشان می‌دهد، «سامانه سقف–جریمه/ پاداش» شهری با طراحی دقیق پایش و تخصیص می تواند کاهش‌های دو رقمی در بازه‌های میان‌مدت ایجاد کند. [C40 Cities Climate Leadership Group, ۲۰۱۵]

گزارش‌های اروپایی نیز نمونه‌های هم‌خانواده‌ای را در سطح شهر/منطقه مستند کرده‌اند. [Eu Commission, ۲۰۲۰]

در ایران/تهران، ایده قیمت‌گذاری کربن هنوز در مرحله طراحی مفهومی است و چالش‌های قانونی، ساختاری و اقتصادی مسیر اجرا را دشوار می‌سازد. [Fudenberg, Tirole, ۱۹۹۱]

آثار مورد انتظار تجارت کربن در بار شهری در سه محور قابل جمع‌بندی است: (۱) کاهش مستقیم انتشار از مسیر قید سقف و قیمت مجوز، (۲) بهبود بهره‌وری سوخت از طریق نوسازی/مدیریت ناوگان، (۳) بهبود عدالت اقتصادی با پاداش‌دهی به عملکرد بهتر. [Osborne, Rubinstein, ۱۹۹۴]

پایداری این آثار، وابسته به کیفیت پایش، ثبات قیمت کربن و مکانیزم‌های جلوگیری از نشت آلایندگی است. [Weibull, ۱۹۹۵]

در چنین بستری، نظریه بازی‌ها ابزار تحلیلی نیرومندی برای مدل‌سازی رفتار شرکت‌های حمل‌ونقل و سیاست‌گذار محسوب می‌شود. ازآنجاکه تصمیم هر شرکت در خرید، فروش یا مصرف مجوزهای کربنی بر قیمت و رفتار سایر بازیگران اثر می‌گذارد، بازار کربن نمونه‌ای کلاسیک از تعاملات استراتژیک چندبازیگره است. [Carmona, Delarue, ۲۰۱۸]

در ادبیات، سه قالب اصلی مطرح‌اند: تعادل **Nash** برای تحلیل رقابت غیردستوری و رفتار مستقل شرکت‌ها [Babaioff, Kleinberg, Papadimitriou, ۲۰۰۷] بازی رهبر پیرو **Stackelberg** برای بازنمایی نقش شهرداری به‌عنوان رهبر سیاست‌گذار و شرکت‌ها به‌عنوان پیرو. [Roth, ۲۰۰۸] و بازی‌های همکارانه برای بررسی ائتلاف‌ها و همکاری‌های فناورانه. [Aspnes, Richa, Schmid, ۲۰۰۶] افزون بر این، مدل‌های تکاملی نیز به‌کاررفته‌اند تا تغییرات تدریجی استراتژی های شرکت‌ها در طول زمان را تبیین کنند. [Mohammadi, Cohen, Babazadeh, ۲۰۱۲]

یکی از مفاهیم کلیدی که در سال‌های اخیر وارد ادبیات نظریه بازی شده، «بازیکن شرور(*R*)» است.

برخلاف بازیگران عقلانی که به دنبال بیشینه‌سازی سود یا منفعت فردی هستند، بازیکن شرور عامدانه موجب افزایش هزینه اجتماعی یا کاهش کارایی جمعی می‌شود، حتی اگر منفعت شخصی مستقیمی نداشته باشد. [Naddafi, Sowlat, ۲۰۱۱]

مطالعاتی همچون **Aspnes** و همکاران (۲۰۰۶) و **Babaioff** و همکاران (۲۰۰۷) نشان داده‌اند که حضور چنین بازیگری دربازی‌های ازدحام می‌تواند تعادل‌های **Nash** را بی‌ثبات کند و کل سیستم را از کارایی دور سازد. [Ghaffari, Sowlat, Naddafi, ۲۰۱۷]

تعمیم این مفهوم به بازار کربن شهری به معنای آن است که بخشی از ناوگان یا رانندگان حقیقی، با بی‌توجهی به سقف انتشار و تمرکز صرف بر افزایش پیمایش، تعادل بازار را بر هم زده و موفقیت سیاست‌های کربنی را تهدید می‌کنند. بررسی تأثیر حضور یا عدم حضور این بازیگر در سناریوهای مقاله حاضر اهمیت اساسی دارد، زیرا نشان می‌دهد کارایی سیاست **Cap-and-Trade** در شرایط واقعی تا چه اندازه می‌تواند تضعیف یا تقویت شود.

۳. مطالعه موردی

تهران به‌عنوان کلان‌شهر نخست ایران با جمعیت بالا و تمرکز فعالیت‌های اداری–تجاری، الگوی سفر روزانه‌ی بسیار شدیدی دارد که پیامد آن تراکم‌های پایدار ترافیکی و تمرکز آلاینده‌ها در لایه‌های زیرین جوّ شهری است.

ساخت توپوگرافیک شمال مرتفع- جنوب هموار، الگوی باد ضعیف در دوره‌های وارونگی و ریزپیکربندی دره‌های شهری، زمینه‌ی ماندگاری آلاینده‌ها را تشدید می‌کند. [Tehran Air Quality Control Company, ۲۰۱۹]

مطابق گزارش سیاهه انتشار تهران (شهرداری / سازمان محیط زیست)، سهم منابع متحرک (وسایل نقلیه) در آلودگی هوای تهران بین ۶۰ تا ۸۰٪ برآورد شده است.

ساخت فضایی تهران با پهنه‌های اداری- تجاری در محدوده‌ی مرکزی و جنوبی و مراکز عمده‌ی توزیع/انبار در حاشیه‌های جنوب‌غرب و جنوب‌شرق مشخص می‌شود.

کریدورهای اصلی بَر (شریانی‌های درجه یک و آزادراه‌های ورودی–خروجی) نقش ستون فقرات جابه‌جایی بار را دارند و به رینگ‌های درونی- بیرونی متصل می‌شوند.

این آرایش فضایی باعث می‌شود سفرهای بار در راستای شمال–جنوب (تأمین خرده‌فروشی/خدمات شهری) و شرق–غرب (عبوری/پشتیبانی بازارهای کلان) تمرکز یابند. [Kalantari, Khademi, ۲۰۱۸]

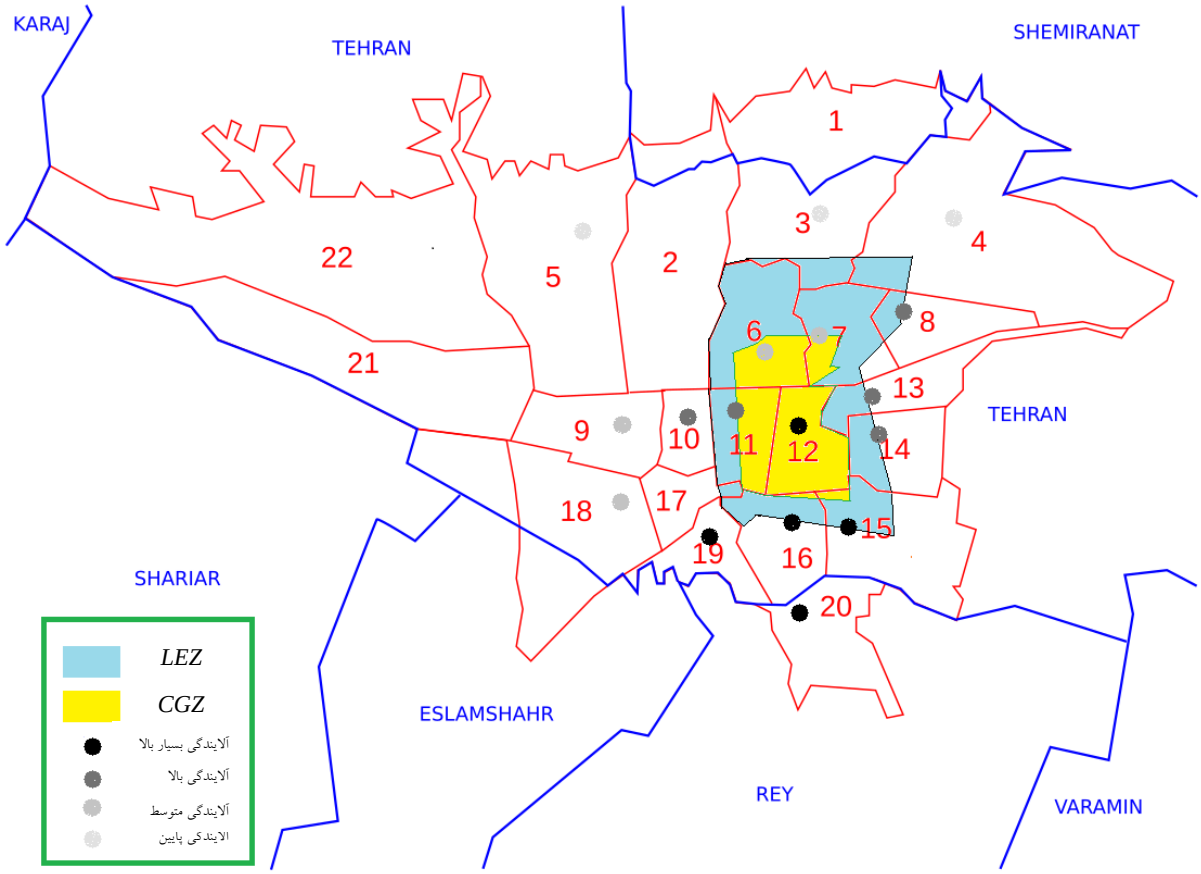
تهران از دهه‌های اخیر دو سازوکار اصلی مدیریت تردد در هسته ی مرکزی داشته است:

طرح ترافیک: ناحیه مرکزی با محدودیت دسترسی و اخذ مجوز برای خودروها. [Hosseini, Shahbazi, ۲۰۱۶]

طرح کاهش آلودگی هوا: الزام رعایت استاندارد معاینه فنی و سطح آلایندگی برای ورود به محدوده. [Hassanvand, Naddafi, ۲۰۱۵]

در تهران، الگوی حملِ بار تحت تأثیر پراکنش فضاییِ مولدهای تقاضا از بازارهای عمده‌فروشی و مراکز لجستیکی حاشیه‌ای تا قرب‌های خدمات شهری و خرده‌فروشی‌های پراکنده در هسته مرکزی شکل می‌گیرد و این نقاط، مبدأ/مقصد اصلی سفرهای باری‌اند. [Qadir, Abbaszade, Schnelle, ۲۰۱۳] ساخت ناوگان با غلبه کامیونت/خاور و ون‌های باری سبک و سهم معنادار موتورهای دیزلی و در عین حال میانگین سنِ بالای ناوگان نسبت به استانداردهای اروپایی، زمینه شدت بالاتر انتشار را فراهم می‌کند. [Tsocheva, Scales, Dove, ۲۰۲۳] از نظر زمانی، پیک‌های صبحگاهی و میانه‌روز در محدوده مرکزی مشاهده می‌شود و بخشی از توزیع‌های سنگین به ساعات کم‌ترافیک در حاشیه‌ها منتقل می‌گردد. [Seifert, Uhrig, ۲۰۱۰]

هم‌زمان، محدودیت‌های دسترسی برای برخی رده‌های خودرویی به‌ویژه دیزل سنگین در بازه‌های زمانی و محدوده‌های خاص برقرار است و رعایت استاندارد فنی در طرح «کاهش (LEZ)» پیش‌شرط ورود به محدوده به‌شمار می‌رود. [Lee, Ha, ۲۰۱۸] در بعد عملیاتی نیز توقف‌های کوتاه و غیراستاندارد در معابر باریک مرکزی، کمبود سکوهای بارگیری و تداخل با ترافیک سواری باعث افت بهره‌وری پیمایش و افزایش شدت انتشار مسیرمحور می‌شود. [Welch, Jaimungal, ۲۰۲۴]



شکل ۱. نقشه تهران با محدوده‌های طرح ترافیک (*CGZ*) و طرح کاهش آلودگی (*LEZ*) و میانگین آلودگی مناطق. داده‌ها: گزارش‌های سالانه *AQCC*

۴. روش پژوهش

این پژوهش بر داده‌های عملیاتی «باربرگ» شهرداری تهران (۳۶۰۰ رکورد در ماهِ پایه، تعمیم‌یافته به سال) و داده‌های رفتاری پرسشنامه‌ی پنج توزیع‌کنندخ حمل بار درون شهری با کدگذاری (*B,C,D,E,F*)، تکیه دارد. محاسبات انتشار بر اساس استانداردهای *COPERT/EMEP-EEA* انجام می‌شود و از *IPCC 2006* صرفاً برای برآورد/اعتبارسنجی *FC* استفاده می گردد. رفتار بازیگران به کمک نظریه‌ی بازی‌ها مدل‌سازی می شود.

گام نخست گردآوری و پایش داده‌ها است؛ رکورد هر سفر شامل: نوع/مدل وسیله، سوخت، تاریخ و ساعت، مبدأ/مقصد (کد مناطق ۱...۲۲)، وزن بار، شناسه یکتا. داده‌ها پس از *QC* پاک‌سازی می‌شوند: حذف تکراری‌ها، کنترل سرعت‌های غیرواقعی، مسافت‌های صفر، زمان‌های منفی/نامعتبر و *winsorization* صدک‌های ۱ و ۹۹ برای متغیرهای کلیدی.

درگام دوم مرکز هندسی هر یک از ۲۲ منطقه از فایل *GeoJSON* استخراج و با *Distance-Matrix API*، مسافت و زمان رانندگی برای تمام زوج‌های (i, j) بدست می‌آید. هر رکورد سفر باتوجه به مبدأ/ مقصد به (D_{ij}, T_{ij}, v) متناظر نگاشت می‌شود.

برای هر سفر، مبدأ و مقصد به‌طور مستقل با سه برچسب «*LEZ/CGZ/Other*» کدگذاری شد (بر اساس ضوابط رسمی شهرداری). این برچسب‌ها در سنجه‌های رفتاری و شناسایی «بازیکن شرور» به‌کار می‌روند؛ ورودی مستقیم معادلات انتشار نیستند.

در گام سوم ناوگان بومی تهران به کدهای *NFR 1.A.3.b.i–iv* نگاشت می‌شود. (*LCV/HDV*، بنزین/دیزل/*CNG*، طرح محوری و استاندارد یورو).

ضرایب انتشار و مصرف از جداول *COPERT* برداشت و برای هر سفر اعمال شد:

$$E_{trip}(g) = EF_{CO2}\,[g/km] \times d\,[km] \quad (۱)$$

$$FC_{trip}(g) = FC\,[g/km] \times d\,[km] \quad (۲)$$

تجمیع در سطح شرکت i و سال پایه:

$$E_i^{base} = \sum_{r \in \mathcal{R}_i} EF_{CO2,r}\; d_r, \quad (۳)$$

$$FC_i^{base} = \sum_{r \in \mathcal{R}_i} FC_r\; d_r. \quad (۴)$$

انتشار سیستم در سال پایه:

$$E_{sys}^{base} = \sum_{i \in \{B,\ldots,F\}} E_i^{base}. \quad (۵)$$

واحدها پس از جمع تبدیل به *tCO_2/yr* می‌شوند.

سپس در گام چهار دو سازه رفتاری شرکت i به‌صورت نمره نرمال‌شده $[۱,۰]$ تعریف می‌شود:

α_i: پیمایش‌گرایی (تمایل به افزایش پیمایش/سود اقتصادی)

β_i: حساسیت زیست‌محیطی (میزان توجه به کاهش انتشار)

این ضرایب در سناریوهای بازی اثر می‌گذارند؛ در سناریو صفر فقط برای گزارش توصیفی ذخیره می‌شوند.

گام پنجم در این پژوهش، چندین پارامتر برای سنجش تأثیر رانندگان شرور (R) در مدل انتشار آلاینده‌ها تعریف خواهد شد. این پارامترها شامل *total_CO2, CGZ_ratio, LEZ_ratio* و *trip_count* هستند که بر اساس داده‌های سفر استخراج‌شده و سپس با استفاده از *Z-Score* نرمال‌سازی شده‌اند.

در نهایت قاعده برچسب‌گذاری بازیکن شرور تعریف می‌شود.

۴-۱ طراحی سناریوها

در سناریو صفر، فرض بر این است که هیچ مداخله‌ای در بازار کربن یا سیاست‌های مربوط به کاهش آلایندگی انجام نمی‌شود؛ به عبارت دیگر، هیچ سقف انتشار، قیمت کربن، جریمه یا پاداشی به شرکت‌های حمل‌ونقل اعمال نخواهد شد. این سناریو به‌عنوان خط مبنا برای مقایسه با سایر سناریوهای بازی‌ها و مدل‌های کربنی استفاده می‌شود.

رشد سالانه CO_2 در این سناریو به‌صورت مرکب محاسبه می شود. نرخ رشد سالانه برای این سناریو برابر با ۵٪ در نظر گرفته شده است که بر اساس ترکیب شواهد پروفایل حمل‌ونقل تهران (*ATO, 2022*) و به‌روز رسانی موجودی انتشار تهران (شهبازی و همکاران، ۲۰۲۲) است.

فرمول رشد *CO2* بصورت زیر است:

$$g = 0.05\ (5\%\ \text{per year})$$
$$CO_2(t) = CO_2(1403) \times (1+g)^{(t-1403)} \quad (۶)$$

که در آن:

CO2 (t): انتشار *CO2* در سال t

CO2 (1404): انتشار *CO2* در سال پایه (۱۴۰۴) برابر با ۲۲۴ تن

g: نرخ رشد سالیانه (۵٪)

سناریو صفر هیچ‌گونه سیاست مداخله‌ای ندارد. رشد CO_2 به‌طور طبیعی و با نرخ رشد مشخص (۵٪ سالانه) پیش‌بینی شده است.

g بر پایه ترکیب شواهد «پروفایل حمل‌ونقل تهران، *ATO*، ۲۰۲۲)» و «به‌روز رسانی موجودی انتشار تهران (شهبازی، ۲۰۲۲)» برداشت شده‌است.

نتیجه این سناریو به‌عنوان مبنای مقایسه برای دیگر سناریوهای مداخله‌ای استفاده می‌شود.

در ادامه طراحی سناریوها برای محاسبه نحوه اثر سیاست‌گذاری در قیمت بر انتشار سناریو بازی از مدل (*Nash- 5 Player*) استفاده شده است.

شرکت‌ها $i \in \{B,C,D,E,F\}$ تصمیم بر بهینه‌سازی سطح پیمایش خود می‌گیرند:

$X_i(km)$

شدت انتشار شرکت (*COPERT* و داده‌های باربرگ):

$EFi\ tCO_2$

سقف انتشار سال هدف:

$Cap_i\ (tCO_2)$

پارامترهای رفتاری (از پرسشنامه):

$\alpha_i\ ,\ \beta_i \in [0,1]$

برای اینکه ضرایب رفتاری αi و βi تنها در سطح نمره نرمال‌شده باقی نمانند و اثر واقعی در تابع هدف شرکت‌ها داشته باشند، در این پژوهش ضرایب تعدیل k_α و k_β تعریف می‌شوند.

این ضرایب نقش «مقیاس‌گذار» را ایفا کرده و ترجیحات رفتاری را به واحد اقتصادی قابل مقایسه با درآمد و هزینه‌های واقعی تبدیل می‌کند.

ضریب k_α شدت اثر «پیمایش‌گرایی» α_i را بر سطح فعالیت کمی‌سازی می‌کند. به بیان دیگر، اگر k_α بزرگ باشد، شرکت حتی با وجود محدودیت‌های کربنی یا هزینه‌های عملیاتی، گرایش بیشتری به افزایش پیمایش خواهد داشت. این ضریب از نظر اقتصادی معادل یک مطلوبیت درونی یا پاداش غیرمستقیم برای افزایش پیمایش است و بر مبنای داده‌های پرسشنامه و کالیبراسیون تجربی تعیین می‌شود:

$$\mathrm{Motiv_i} = \mathrm{k_\alpha}.\,\alpha_\mathrm{i}.\,\mathrm{X_i} \qquad (۷)$$

در مقابل k_β میزان حساسیت زیست‌محیطی β_i را به واحد مالی تبدیل می‌کند. این ضریب بیانگر «هزینه کربن داخلی» است؛ یعنی ارزشی که شرکت‌ها حتی فراتر از جریمه‌های رسمی، به دلیل فشار اجتماعی، الزامات برند یا تعهدات سازمانی برای کاهش انتشار در نظر می‌گیرند. در نتیجه، افزایش مقدار k_β به معنای آن است که شرکت در تصمیم‌گیری‌های خود انتشار کربن را پررنگ‌تر لحاظ خواهد کرد:

$$\mathrm{ICC_i} = \mathrm{K_\beta}.\,\beta_\mathrm{i}.\,\mathrm{EF_i}.\,\mathrm{X_i} \qquad (۸)$$

به این ترتیب α_i و β_i صرفاً شاخص‌های رفتاری مقیاس‌نرمال نیستند، بلکه با کمک ضرایب تعدیل به اجزای اقتصادی مؤثر در تابع هدف تبدیل شده و می‌توانند بر تعادل $Nash$ تأثیر واقعی بگذارند.

پارامترهای اقتصادی (از داده‌های باربرگ شهرداری):

$r_i\ (\$/km)\ ,\quad c_i\ (\$/km)$

درعمل ri، از ستون‌های درآمدی نظیر r_0 و c_i از اجزای هزینه مانند هزینه زمان، هزینه سوخت و هزینه تعمیرات تجمیع می‌شوند.

نرخ پاداش و جریمه کربن:

$$b,\ S\ (\$/tCO_2),\qquad k_\alpha,\ k_\beta > 0$$

انتشار و کران فعالیت:

$$\mathrm{E_i} = \mathrm{EF_i}\,\mathrm{X_i}\ ،$$
$$\cdot \le \mathrm{X_i} \le \mathrm{X_i^{max}},\qquad (۹)$$
$$\mathrm{X_i^{max}} = \frac{\kappa\,\mathrm{Cap_i}}{\mathrm{EF_i}},\quad \kappa > 1$$

پاداش و جریمه کربن (قیمت‌گذاری بیرونی سیاست‌گذار):

$$\mathrm{Bonus_i} = \mathrm{b}\cdot\max\{\mathrm{Cap_i} - \mathrm{E_i},\,0\}$$
$$\mathrm{Penalty_i} = \mathrm{S}\cdot\max\{\mathrm{E_i} - \mathrm{Cap_i},\,0\} \qquad (۱۰)$$

شرط تعادل نش:

بردار $X = (X_B, \ldots, X_F)$ یک تعادل نش است هرگاه برای هر i:

$$\mathrm{X_i^*} \in \arg\max_{0\le \mathrm{X_i} \le \mathrm{X_i^{max}}} \qquad (۱۱)$$

از آنجا که Π_i فقط به X_i وابسته است و اثر متقابل قیمتی بین شرکت‌ها در این سناریو وجود ندارد، مسئله به‌صورت مجموعه‌ای از بهینه‌سازی‌های تک‌عاملی حل می‌شود.

یک تعادل نش است اگر برای هر i:

$$\text{If } \mathrm{X_i} < \mathrm{X_{i_{cap}}} : \frac{\mathrm{dPi}}{\mathrm{dXi}} = \mathrm{A_i} - \mathrm{b.EFi}$$
$$\text{If Xi} > \mathrm{X_{i_{cap}}} : \frac{\mathrm{dPi}}{\mathrm{dXi}} = \mathrm{A_i} + \mathrm{S.EFi}$$
$$\text{Candidates: } \mathrm{X(0)} = 0\ ,\ \mathrm{X_{(cap)}} = \mathrm{X_{i_{cap}}}, \mathrm{X_{(max)}}$$
$$= \frac{\mathrm{k}\,.\,\mathrm{Cap_i}}{\mathrm{EF_i}}$$
$$\text{Rule:}$$
$$-\ \text{If } (\mathrm{Ai} - \mathrm{b.EFi}) \le 0 \qquad (۱۲)$$
$$\Rightarrow \mathrm{X_i^*} = \mathrm{X}\left(\cdot\right)$$
$$-\ \text{If } (\mathrm{A_i} - \mathrm{b.EF_i}) > 0 \text{ and } (\mathrm{A_i} + \mathrm{S.EF_i}) \le 0$$
$$\Rightarrow \mathrm{X_i^*} = \mathrm{X_{(cap)}}$$
$$-\ \text{If } (\mathrm{A_i} + \mathrm{S.EF_i}) > 0$$
$$\Rightarrow \mathrm{X_i^*} = \mathrm{X_{(max)}}$$
$$\mathrm{S_i^{thr}} = \max\left\{0, \frac{\mathrm{Ai}}{\mathrm{EFi}}\right\}\ \left[\frac{\$}{\mathrm{tCO2}}\right]$$

نتایج استخراج‌شده:

$$E_i^* = EF_i X_i^*$$
$$E_{sys}^* = \sum_i E_i^* \qquad (۱۳)$$
$$Bonus_i^*, \quad Penalty_i^*, \quad \Pi_i^*$$

در بازی دوم، علاوه بر پنج شرکت حقوقی (*B, C, D, E, F*) که هدفشان بهینه‌سازی سطح پیمایش خود است، یک بازیکن شرور (*R*) نیز اضافه می‌شود. این بازیکن شرور مستقل از دیگر بازیکنان عمل می‌کند و هدفش فقط بیشینه‌سازی پیمایش است، بدون توجه به پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی.

در این بخش، ۵ شرکت حقوقی که در مدل بهینه‌سازی رفتار خود را به سمت بیشینه‌سازی پیمایش سوق می‌دهند، شبیه‌سازی می‌شوند. برای هر شرکت، هدف بهینه‌سازی تحت تأثیر سیاست‌ها و محدودیت‌ها قرار می‌گیرد.

بازیکن شرور *R* نماینده‌ی زیرمجموعه‌ای از رانندگان حقیقیِ پرریسک است که مطابق قاعده‌ی «شاخص اثرگذاری» (*ImpactScore*) شناسایی شده‌اند.

شاخص اثرگذاری (*Impact Score*) ابزاری برای شناسایی رانندگانی است که الگوی آلایندگی آن‌ها به‌طور معناداری از میانگین جامعه انحراف دارد. در این پژوهش، چهار متغیر کلیدی به‌عنوان مؤلفه‌های این شاخص در نظر گرفته شده‌اند: نسبت سفرهای انجام‌شده در محدوده‌های کنترل ترافیک (*CGZ_ratio*)، نسبت سفرها در مناطق کاهش آلودگی (*LEZ_ratio*)، تعداد کل سفرها (*Trip_count*) و کل انتشار CO_2 هر راننده (*Total_CO₂*). برای محاسبه *Total_CO₂*، ضریب انتشار خودرو از مدل *COPERT* و فاصله واقعی پیمایش‌شده از ماتریس *O–D* استخراج می‌شود. به‌منظور مقایسه ی متغیرهایی با واحدهای متفاوت، همه داده‌ها با استفاده از نمره معیار (*Z-Score*) نرمال‌سازی می‌شوند تا اثر مقیاس حذف و تأثیر واقعی هر متغیر حفظ شود.

سپس شاخص اثرگذاری وزن‌دار به‌صورت ترکیب خطی از متغیرهای استانداردشده محاسبه می‌شود: ۰٫۴ برای *CO₂*، ۰٫۳ برای *CGZ_ratio*، ۰٫۲ برای *LEZ_ratio* و ۰٫۱ برای تعداد سفر. بدین ترتیب، اهمیت بیشتر آلایندگی مستقیم در مدل لحاظ می‌شود. مقدار نهایی *Impact Score* نشان‌دهنده‌ی شدت نسبی تأثیر هر راننده بر آلودگی شهری است. برای تعیین بازیکنان شرور (*Rogue*)، میانگین و انحراف معیار این شاخص در کل جامعه محاسبه و رانندگانی که امتیاز آن‌ها حداقل یک انحراف معیار بالاتر از میانگین باشد، به‌عنوان بازیگران پرریسک (*R*) برچسب‌گذاری می‌شوند. این روش از دید سیاست‌گذاری شهری با هدف کنترل متمرکز منابع آلاینده همسو است.

شکل (۱) نقشه مناطق ۲۲گانه شهر تهران همراه با محدوده‌های طرح ترافیک (*CGZ*) و طرح کاهش آلودگی هوا (*LEZ*). این نقشه مبنای برچسب‌گذاری مکانی سفرهای ثبت‌شده در داده‌های باربرگ شهرداری است؛ به‌گونه‌ای که برای هر رکورد سفر، مبدأ و مقصد بر اساس این محدوده‌ها مشخص و متغیرهای (*CGZ_ratio*) و (*LEZ_ratio*) در شاخص اثرگذاری (*Impact Score*) محاسبه شده‌اند. در این پژوهش، مناطق واقع در محدوده زرد (*CGZ*) به‌عنوان ناحیه کنترل ترافیک مرکزی و مناطق آبی (*LEZ*) به‌عنوان نواحی کاهش آلودگی هوا در نظر گرفته شده‌اند. نقاط سیاه، خاکستری تیره و روشن به‌ترتیب نشان‌دهنده مراکز پرتردد بارگیری در نواحی دارای آلایندگی بسیار بالا، بالا و متوسط هستند. این چارچوب فضایی، بستر اصلی تحلیل مکانی انتشار و رفتار رانندگان حقیقی (بازیکنان شرور) در مدل بازی‌ها را فراهم می‌کند.

رابطه (۱۴)، مبنای تعیین آستانه آماری برای تفکیک رانندگان معمولی از بازیکنان شرور است. بر اساس این رابطه، مقدار آستانه به‌صورت مجموع میانگین و یک انحراف معیار از توزیع شاخص اثرگذاری وزن‌دار محاسبه می‌شود:

$$\text{threshold} = \text{mean}(\text{ImpactScore}_{\text{weighted}}) + 1.\ \text{std}(\text{ImpactScore}_{\text{weighted}}) \qquad (۱۴)$$

رانندگانی که مقدار شاخص آن‌ها برابر یا بالاتر از این آستانه باشد، به‌عنوان بازیکن شرور (*R*) شناسایی می‌شوند. این قاعده مبتنی بر منطق تشخیص داده‌های پرت (*Outlier Detection*)

است و کمک می‌کند تا شناسایی بازیگران با اثرگذاری غیرعادی، بر پایه انحراف آماری انجام گیرد.

در فضای بازی‌ها طراحی شده در این پژوهش، بازیگر (R) در بازار کربن مشارکت ندارد، هیچ پاداش/جریمه‌ی کربنی دریافت/پرداخت نمی‌کند و تصمیم او صرفاً بر افزایش فعالیت (تعداد سفر) متمرکز است. برای R درآمد هزینه به‌صورت میانگین هر سفر مدل می‌شود و برای جلوگیری از «فعالیتِ بی نهایت»، یک مؤلفه‌ی هزینه‌ی نهایی فزاینده در نظر گرفته می‌شود (ترکیب شلوغی، فرسودگی، ریسک اجرایی، و محدودیت‌های عملیاتی).

$$\Pi_R = [\underbrace{(r_R - c_R)\,x_R}_{\text{حاشیه درآمدی سفر}} - \underbrace{q_R\,x_R^2}_{\text{هزینه نهایی فزاینده}}] \qquad (۱۵)$$

۵. تحلیل داده‌ها

سناریو صفر فرض می‌کند هیچ مداخله‌ای (سقف انتشار، قیمت کربن، جریمه/پاداش) اعمال نمی‌شود. بنابراین انتشار CO_2 با رشد مرکب سالانه افزایش می‌یابد. سال مرجع ۱۴۰۳ با مقدار پایه ۲۱۴ تن در نظر گرفته شده است و رشد ۵ درصد از ۱۴۰۴ تا ۱۴۰۸ اعمال می‌شود.

$$E_{(zero)}(t) = 214\,.\,(1.05)^{(t-1403)} \qquad (۱۶)$$
$$t \in 1404, \dots, 1408$$

بدین ترتیب انتشار کل سیستم (بر اساس باربرگ موجود) در سال ۱۴۰۴ ۲۲۴,۷۰ تن در سال و در سال ۱۴۰۸ معادل ۲۷۳,۱۲ تن CO_2 خواهد بود.

خط مبنا «مسیر طبیعی رشد تقاضای بار شهری» را بدون مداخله نشان می‌دهد؛ این معیار مرجع است تا هر سیاستی نسبت به آن سنجیده شود.

در بازی اول، برای پیدا کردن مقادیر بهینه Xi^* برای هر شرکت، مسئله به بهینه‌سازی تک‌عاملی تقسیم شد. در ابتدا برای هر شرکت، مشتق یک‌طرفه‌ی تابع هدف نسبت به X_i محاسبه و علامت آن در دو ناحیه مختلف از فضای X_i بررسی شد.

برای حل این مسئله از کتابخانه‌های *Python* مانند *numpy* و *scipy.optimize* استفاده شد. ابتدا، برای هر شرکت به‌طور جداگانه، تابع هدف تعریف شد و سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مقادیر بهینه Xi^* برای هرشرکت به دست آمد.

بعد از حل بهینه‌سازی برای هر شرکت، مقادیر بهینه X_i^* به دست آمد. سپس، این مقادیر در تابع انتشار $Xi\,.\,EFi = Ei$ جایگذاری شدند. در ادامه، انتشار کل سیستم در سال ۱۴۰۸ محاسبه شد.

جدول ۱ انتشار $CO2$ سیستم و مقدار Xi بهینه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج بازی اول (*Nash- 5 player*)

شرکت	*(Cap_i)* *(t)*	*(X_i^*)* *(km)*	*(E_i^*)* *(tCO_2)*
B	۱۱,۰۷	۱۴,۳۹	۳,۳۲
C	۲۳,۴۵	۳۰,۴۹	۷,۰۴
D	۱۲,۹۱	۱۶,۷۸	۳,۸۷
E	۱۷,۰۲	۲۲,۱۳	۵,۱۱
F	۱۲,۹۶	۱۶,۸۵	۳,۸۹
جمع	۷۷,۴۱	۱۰۰,۶۳	۲۳,۲۲

در سناریو صفر، انتشار CO_2 به‌طور طبیعی و با نرخ رشد ۵٪ سالانه پیش‌بینی می‌شود. مقدار انتشار CO_2 سیستم در سال ۱۴۰۸ بدون هیچ مداخله‌ای برابر ۲۷۳,۱۲ تن خواهد بود.

با توجه به سیاست‌های سقف- پاداش/جریمه، انتشار CO_2 سیستم در سال ۱۴۰۸ به مقدار ۲۳۶,۴۵ تن کاهش یافته است. این کاهش معادل ۱۳,۴٪ کاهش در مقایسه با سناریو صفر است. اما همچنان انتشار سیستم ۳۰٪ بیشتر از سقف سیستم (۱۸۱,۸۸ تن) است.

نتایج نشان می‌دهند که با اعمال سیاست سقف- پاداش/جریمه، انتشار CO_2 در سال ۱۴۰۸ ۱۳,۴٪ کمتر از خط مبنا (سناریو صفر) خواهد بود. این به این معناست که سیاست‌های کربنی در کاهش انتشار اثرگذار بوده‌اند.

با این‌که انتشار کل سیستم نسبت به سناریو صفر کاهش یافته، ولی ۳۰ درصد بالاتر از سقف سیستم قرار دارد. دلیل این امر این است که مقدار (S) ۳۵۰ دلار به ازای هر تن از آستانه جریمه

کوچک‌تر است و باعث می‌شود که شرکت‌ها تمایل به افزایش فعالیت خود تا کران ظرفیت داشته باشند. پاداش (b) تنها در صورتی مؤثر است که شرکت‌ها زیر سقف باقی بمانند. در این مدل، چون همه شرکت‌ها به سقف انتشار رسیدند، پاداش هیچ نقشی در انتخاب Xi^* نداشت. بنابراین در چنین سناریویی، جریمه‌ها تنها اثرگذار بوده‌اند. برای قرار دادن شرکت‌ها دقیقاً روی سقف انتشار، باید یکی از موارد زیر تقویت شود:

افزایش جریمه (S) تا حداقل (S_i^{thr}) ۴۹۰ دلار بر هر تن $CO2$.

کاهش کران ظرفیت (k) به ۱,۱ یا ۱,۰ برای محدود کردن فعالیت شرکت‌ها:

$$0 < X_i \leq \left(k \times Cap_i\right)/EF_i \qquad (۱۷)$$

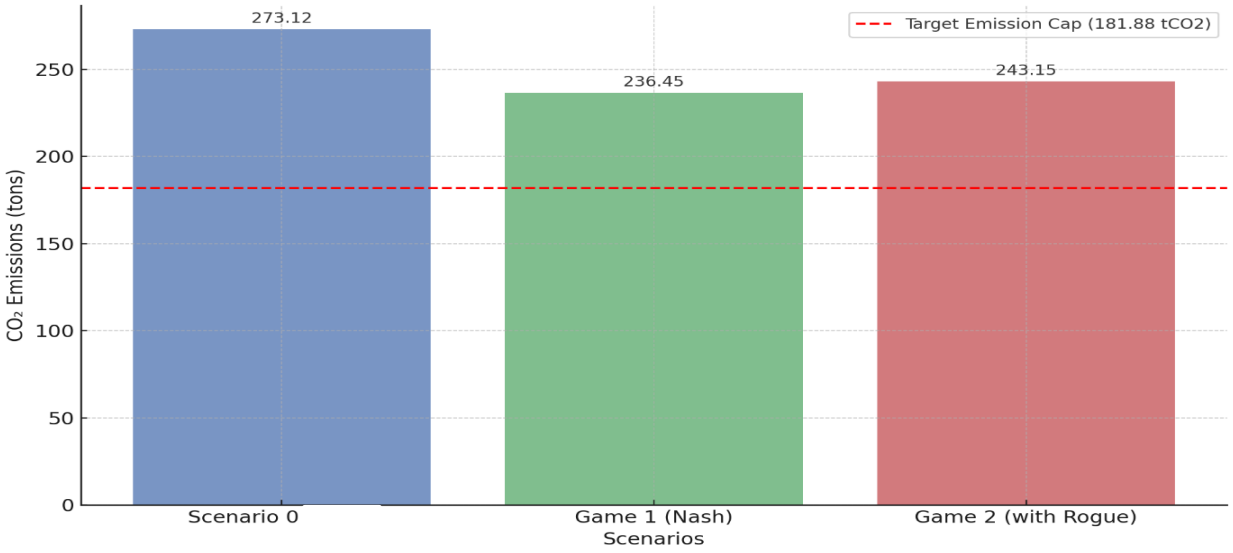
در بازی دوم، شش بازیکن وجود دارد: پنج شرکت حقوقی (B تا F) و یک بازیکن شرور (R) که هدف او فقط بیشینه‌سازی تعداد سفرها است و هیچ پاداش یا جریمه‌ای دریافت نمی‌کند.

برای حل مسئله و یافتن تعادل *Nash*، تابع هدف برای شرکت‌ها و بازیکن شرور به‌طور جداگانه مدل‌سازی شده و سپس نتایج به دست آمده تحلیل می‌شود.

تابع هدف هر شرکت تغییری نخواهد کرد و منطبق با رابطه (۱۲) خواهد بود و تابع هدف بازیکن شرور (R) در رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

برای حل این مسئله و به دست آوردن مقادیر بهینه Xi^* و X_R^* از کتابخانه‌های *Python* مانند *numpy* و *scipy.optimize* استفاده شد. ابتدا برای هر شرکت، تابع هدف به‌طور جداگانه تعریف شد و سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مقادیر بهینه X_i^* و X_R^* به دست آمد.

اما حضور بازیکن شرور که به‌طور عمدی به دنبال افزایش پیمایش بدون توجه به کاهش آلایندگی است، موجب می‌شود کاهش انتشار نسبت به سناریوی پایه از ۱۳،۴ درصد در بازی اول به حدود ۱۱ درصد در بازی دوم کاهش یابد؛ به‌عبارتی، حضور این بازیگر کارایی سیاست را حدود ۲،۸ درصد کاهش می‌دهد.



شکل ۲. مقایسه انتشار در سناریو صفر، بازی اول و بازی دوم

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش با تکیه بر داده‌های عملیاتی باربرگ و ضرایب رفتاری استخراج‌شده از پرسشنامه، کارایی رویکردهای بازارمحور کاهش کربن را در بخش حمل‌ونقل بار شهری تهران ارزیابی کرده است. چارچوب مدل‌سازی مبتنی بر نظریه بازی‌ها و در دو پیکره اصلی طراحی شد: (الف) تعادل *Nash* میان پنج شرکت حقوقی، و (ب) همان تعادل با حضور یک بازیگر شرور (*R*) که در بازار کربن مشارکت نمی‌کند و صرفاً به دنبال بیشینه‌سازی فعالیت است. نتایج به‌صورت خلاصه و تحلیلی به شرح زیر است:

مسیر انتشار در سناریوی عدم مداخله. خط مبنا نشان داد که در غیاب هرگونه سیاست، انتشار CO_2 با رشد مرکب سالانه افزایش می‌یابد و در افق ۱۴۰۸ به سطحی می‌رسد که از منظر برنامه‌ریزی شهری نگران‌کننده است. این مسیر، معیار ارزیابی کارایی سناریوهای مداخله‌ای قرار گرفت.

کارایی سازوکار سقف- پاداش/جریمه در تعادل *Nash* (۵ شرکت). اعمال سقف شرکت‌محور و قیمت‌گذاری بیرونی بر مازاد/کسری انتشار، کاهش معناداری در انتشار کل نسبت به خط مبنا رقم زد (کاهش ۱۳٫۴٪). با این‌حال، فاصله با سقف سیستم باقی ماند و نشان داد پارامترگذاری سیاستی هنوز برای قرار دادن شرکت‌ها «روی سقف» کفایت ندارد.

اثر حضور بازیگر شرور. ورود بازیگر شرور موجب تضعیف بخشی از دستاورد کاهش انتشار شد و کاهش خالص نسبت به خط مبنا را به حدود ۱۱٪ تقلیل داد. این نتیجه مؤید وجود «نشت سیاستی» از کانال کنشگران غیرهمکار و ضرورت ابزارهای مکمل کنترلی است.

آستانه جریمه مؤثر. تحلیل حاشیه‌ای نشان داد برای آن‌که انتخاب بهینه شرکت‌ها روی سقف انتشار توقف کند، شدت جریمه باید حداقلی معنادار داشته باشد (برآورد آستانه مؤثر در این مطالعه در حدود *490$*). مقادیر پایین‌تر از این آستانه، شرکت‌ها را به حرکت تا کران ظرفیت ترغیب می‌کند.

مدیریت ظرفیت فعالیت. کاهش کران ظرفیت فعالیت به حدود ۱٫۰–۱٫۱ می‌تواند به‌مثابه قید مکمل، انتخاب شرکت‌ها را در همسایگی سقف انتشار نگه دارد و از اثرات جانبی افزایش پیمایش بکاهد.

سازوکارهای ضدنشت برای بازیگر شرور. در حضور کنشگران غیرهمکار، صرف قیمت‌گذاری کربن کافی نیست. ترکیب «پایش هدفمند در *CGZ/LEZ*»، «سقف‌های خرد برای سفرهای پُرخطر»، و «هزینه نهایی فزاینده عملیاتی» برای سفرهای پرتکرار می‌تواند نرخ فعالیت شرور را به سطحی اجتماعی‌پذیر نزدیک کند.

پاداش تنها زمانی عمل‌گر است که شرکت زیر سقف بماند. بنابراین بازتنظیم نرخ پاداش و تسهیم منافع کاهش (مانند امکان فروش مازاد مجوز) برای انگیزش رفتار پاک ضروری است.

حکمرانی داده و پایش؛ پایداری اثرات در گروی زیرساخت اندازه‌گیری، گزارش‌دهی، راستی‌آزمایی (*MRV*) شهری، یکپارچه‌سازی فایل‌های سفر–ناوگان و انتشار دوره‌ای شاخص‌های عملکرد (انتشار، شدت انتشار، سهم سفر در *CGZ/LEZ*) است.

از منظر روش‌شناختی؛ پیوند «ترجیحات رفتاری» (α، β) با توابع اقتصادی شرکت‌ها از طریق ضرایب مقیاس‌گذار $k\alpha$ و $k\beta$ شیوه‌ای عملی برای شبیه‌سازی پاسخ‌های پرسشنامه به رفتار تعادلی فراهم ساخت.

ورود صریح بازیگر شرور به مدل *Nash* چندبازیگره، میدان مشاهده «نشت سیاستی» را مهیا کرد و حساسیت نتایج به کنشگران خارج از بازار کربن را به‌صورت کمی نشان داد.

استخراج قواعد آستانه‌ای (برای جریمه و کران ظرفیت) مجموعه‌ای از «قواعد تنظیم‌گری» قابل استفاده برای سیاست‌گذار شهری ارائه کرد.

۶-۱ محدودیت‌ها

برآوردهای انتشار متکی بر ضرایب استاندارد (در سطح رده‌های خودرویی) است و ناهمگنی‌های درون‌رده ممکن است تا حدی پوشش داده نشود.

ضرایب رفتاری و هزینه–درآمد در افق کوتاه‌مدت ثابت فرض شده‌اند؛ پویایی‌های بلندمدت (یادگیری، نوسازی ناوگان) در دامنه این مطالعه قرار نگرفته‌اند.

صورت‌بندی شرور به‌مثابه یک بازیگر تجمیعی، رفتار طیفی از رانندگان مستقل را به میانگین فرو می‌کاهد؛ مدل‌های چندگانه شرور با گونه‌شناسی دقیق‌تر می‌تواند تصویر ریزدانه‌تری ارائه دهد.

۶-۲ پیشنهادات برای پژوهش‌ها آتی

پویاسازی استکلبرگ با سقف‌های کاهنده: رهبر شهرداری، پیرو شرکت‌ها.

بازار کربن با بازه قیمت و «رزرو» برای ثبات قیمتی

ائتلاف‌های فناورانه و تقسیم منافع: اگر دو/چند شرکت برای نوسازی یا به‌اشتراک‌گذاری فناوری سبز همکار شوند، منفعت چگونه عادلانه تقسیم می‌شود؟

گونه‌شناسی بازیکن شرور و ابزارهای «ضدنشت» هدفمند: همه، شرورها یکسان نیستند؛ ابزارِ یکسان هم اثربخش نیست.

یادگیری تکاملی استراتژی‌ها در بازار کربن: شرکت‌ها با مشاهده نتایج، استراتژی‌ها را به‌تدریج تغییر می‌دهند.

حکمرانی داده و *MRV* برای بازار کربن شهری: بدون *Measurement–Reporting–Verification* پایدار، قیمت‌گذاری کربن کارایی ندارد.

بهینه‌سازی ظرفیت و مسیرهای فعالیت تحت عدم‌قطعیت: k ابزار کلیدی مدیریت فعالیت است اما به تقاضا حساس است.

۶-۳ جمع‌بندی نهایی

نتایج این پژوهش، علاوه بر تأیید کارایی نظری سیاست‌های بازارمحور در کاهش انتشار، دلالت‌های اجرایی روشنی برای مدیریت شهری تهران دارد. نخست، تنظیم سطح جریمه در محدوده‌ی ۴۹۰ دلار بر تن CO_2، به‌عنوان آستانه‌ی مؤثر سیاست، ضروری است تا شرکت‌ها در تعادل *Nash* دقیقاً روی سقف انتشار توقف کنند. دوم، اعمال محدودیت کران فعالیت مانع از رشد بیش‌ازحد پیمایش و انحراف از اهداف کاهشی می‌شود. سوم، ترکیب پایش هوشمند در مناطق *LEZ* و *CGZ* با سیاست‌های مالی، امکان مهار بازیگران غیرهمکار (رانندگان حقیقی پرریسک) را فراهم می‌سازد. در نهایت، اجرای آزمایشی بازار کربن شهری برای ناوگان باری، می‌تواند گامی مؤثر در مسیر سیاست‌گذاری پایدار حمل‌ونقل تهران باشد.

این مطالعه نشان داد که در بستر تهران، سازوکار سقف–پاداش/جریمه قادر است کاهش معناداری در انتشار CO_2 نسبت به خط مبنا ایجاد کند؛ بااین‌حال حضور بازیگر شرور بخشی از این دستاورد را مستهلک می‌سازد. بنابراین معماری سیاست موفق نیازمند ترکیب سه رکن است: (۱) شدت جریمه کافی برای نشاندن شرکت‌ها روی سقف، (۲) قیود ظرفیت معقول برای مهار انگیزه افزایش پیمایش، و (۳) ابزارهای هدفمند ضدنشت برای بازیگران غیرهمکار. بر پایه این سه رکن، می‌توان مسیر کاهش انتشار را به‌صورت پایدارتر تثبیت کرد و در عین حال، پذیرش اقتصادی سیاست را نزد ذی‌نفعان ارتقا داد.

۷. مراجع

– Shahbazi H, Reyhanian M, Hosseini V, Afshin H. The relative contributions of mobile sources to air pollutant emissions in Tehran, Iran: an emission inventory approach. Emission Control Science & Technology. 2016;2:44-56.

– Heger M, Sarraf M. Air pollution in Tehran: health costs, sources, and policies. Washington, DC: World Bank; 2018.

– Kakouei A, Vatani A, Idris AK. An estimation of traffic-related CO_2 emissions from motor vehicles in the capital city of Iran. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering. 2012;9(1):13.

– Hosseini ST, Ariyana M, Abroodi SM. Transport and urban traffic management in Tehran with economic view. Journal of Urban Economics & Management. 2016; 4(15): 95-109.

– Holman C, Harrison R, Querol X. Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. Atmospheric Environment. 2015;111:161-169.

– California Air Resources Board. Cap-and-Trade program: summary of design and results. Sacramento: CARB; 2013.

– Rodrigue J-P. The geography of transport systems. 5th ed. New York: Routledge; 2020.

– Naddafi K, Sowlat MH, Safari MH. Integrated assessment of air pollution in Tehran over the period from September 2008 to September 2009. Iranian Journal of Public Health. 2012;41(2):77-86.

– International Energy Agency (IEA). World energy outlook 2016: transport sector energy demand. Paris: IEA; 2016.

– Bigazzi AY, Figliozzi MA. Review of heavy-duty vehicle emission factors and their effect on exposure. Transportation Research Part D. 2013;21:10-18.

– Allen J, Browne M, Woodburn A, Leonardi J. The role of urban consolidation centres in reducing freight traffic and pollution. Transport Reviews. 2012;32(4):473-490.

– Lee M, Colopinto K. Tokyo’s emissions trading system: a case study. Washington, DC: World Bank; 2013.

– International Carbon Action Partnership. Emissions trading worldwide: status report 2022. Berlin: ICAP; 2022.

– Stavins RN. What can we learn from the European Union’s emissions trading system? Oxford Review of Economic Policy. 2021;37(2):326-354.

– Stavins RN. Lessons from the American cap-and-trade experience. The Environmental Forum. 2012;29(3):38-44.

– C40 Cities Climate Leadership Group. Tokyo’s urban cap-and-trade scheme delivers substantial carbon reductions. Case Study. London: C40; 2015.

– European Commission. EU Emissions Trading System (EU ETS): factsheets on 2020 progress. Brussels: Directorate-General for Climate Action; 2020.

– Fudenberg D, Tirole J. Game theory. Cambridge, MA: MIT Press; 1991.

– Osborne MJ, Rubinstein A. A course in game theory. Cambridge, MA: MIT Press; 1994.

– Weibull JW. Evolutionary game theory. Cambridge, MA: MIT Press; 1995.

– Carmona R, Delarue F. Probabilistic theory of mean field games with applications I–II. New York: Springer; 2018.

– Babaioff M, Kleinberg R, Papadimitriou C. Congestion games with malicious players. In: Proceedings of the 8th ACM Conference on Electronic Commerce (EC ’07). 2007:103-110.

– Roth A. The price of malice in linear congestion games. Carnegie Mellon University Technical Report; 2008.

– Aspnes J, Richa AW, Schmid S. When selfish meets evil: Byzantine players in a virus inoculation game. In: Proceedings of the 25th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC). 2006:129-138.

– Hassanvand MS, Naddafi K, Faridi S, et al. Indoor–outdoor relationships of PM_{10}, $PM_{2.5}$ and PM_1 mass concentrations and their water-soluble ions in Tehran, Iran. Air Quality, Atmosphere & Health. 2015;8(1):81-91.

– Qadir RM, Abbaszade G, Schnelle-Kreis J, et al. A comparison of air quality inside and outside European low-emission zones: evidence from London, Berlin and Copenhagen. Atmospheric Environment. 2013;80:225-246.

– Tsocheva I, Scales J, Dove R, et al. Investigating the impact of London's ultra-low emission zone on children's health: CHILL study protocol. BMC Pediatrics. 2023;23:556.

– Seifert J, Uhrig-Homburg M. Modelling the dynamics of carbon futures and the costs of emission compliance. Energy Economics. 2010;32(3):688-699.

– Lee BY, Ha S. A game-theoretic analysis of carbon emission reduction in supply chains. Transportation Research Part E. 2018;112:10-26.

– Welch L, Jaimungal S. Nash equilibria in greenhouse gas offset credit markets. arXiv preprint 2024;2401.0142.

– Mohammadi H, Cohen D, Babazadeh M, Rokni L. The effects of atmospheric processes on Tehran smog forming. Iranian Journal of Public Health. 2012;41(5):1-12.

– Naddafi K, Sowlat MH, Safari MH. The relationship between atmospheric temperature inversion and air pollution in Tehran. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering. 2011;6(3):193-200.

– Ghaffari HR, Sowlat MH, Naddafi K, Safaie Y. Spatio-temporal analysis of Tehran air quality and meteorological associations. Environmental Monitoring and Assessment. 2017;189:197.

– Tehran Air Quality Control Company. Annual report on the traffic zone and low emission zone (LEZ) results. Tehran Municipality; 2019.

– Kalantari N, Khademi A. Analysis of urban freight trip patterns in Tehran using spatial data. Journal of Transportation Research. 2018;15(3):45-63.

– Hosseini V, Shahbazi H. Age distribution and emission standards of Tehran heavy-duty fleet: implications for policy. Environmental Monitoring and Assessment. 2016;188:593.