

کمی سازی مکانی انتشار گاز دی اکسید کربن انسان زاد در مقیاس شهر با استفاده از

روش "پایین به بالا" (مطالعه موردی: کلان شهر اصفهان)

لقمان خداکرمی؛ دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی منابع طبیعی.

سعید پورمنافی؛^۱ استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی منابع طبیعی.

علیرضا سفیانیان؛ دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی منابع طبیعی.

علی لطفی؛ استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی منابع طبیعی.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۹ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲

چکیده

مصرف سوخت های فسیلی در مناطق شهری، موجب انتشار مقادیر زیادی گاز گلخانه ای به جو می شود. بنابراین، مطالعه پایش میزان گاز دی اکسید کربن منتشر شده از مناطق شهری به یک موضوع مهم پژوهشی تبدیل شده است. هدف اصلی این مطالعه، کمی سازی مکانی انتشار دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت های فسیلی در شهر اصفهان می باشد. بدین منظور در پژوهش حاضر برای کمی سازی میزان گاز دی اکسید کربن، بر اساس منابع تولید آن، در مقیاس شهری و درک تفاوت انتشار دی اکسید کربن در سطح شهر از روش "پایین به بالا" استفاده شد. در این روش میزان انتشار به تفکیک منابع مختلف مصرف انرژی محاسبه شده و سپس نقشه توزیع مکانی انتشار تهیه شد. نتایج این تحقیق نشان داد، میزان انتشار گاز دی اکسید کربن در فرآیند احتراق سوخت های فسیلی در محدوده شهر اصفهان ۱۳۸۵۵۵۲۵/۸۴ تن در سال می باشد که به تفکیک منابع احتراقی ثابت و متحرک بخش های نیروگاهی، خانگی، تجاری، حمل و نقل جاده ای و ریلی و حمل و نقل غیرجاده ای (ماشین آلات کشاورزی) به ترتیب ۵۰/۶۱، ۲۱/۷۸، ۱۷/۱۸، ۴/۹۲، ۴/۳۷، و ۱/۱۴ درصد از کل میزان گاز دی اکسید کربن سالانه را در شهر منتشر می کنند. به طور کلی، با به کارگیری روش پایین به بالا در نقشه سازی انتشار دی اکسید کربن اقدامات کاهش را می توان در بخش های مختلف به صورت بسیار کارآمدتر به کار گرفت.

واژه های کلیدی: گاز گلخانه ای، احتراق سوخت های فسیلی، منابع ثابت و متحرک مصرف انرژی، تغییرات اقلیمی، اقدامات کاهش.

مقدمه

افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در کاربری‌های صنعتی، حمل‌ونقل و سایر کاربری‌های شهری که در اثر افزایش جمعیت و گسترش روز افزون شهرها و مناطق صنعتی به‌وجود آمده است، موجب انتشار حجم عظیمی از گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر می‌شود (Houghton ۲۰۰۱). در میان گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن سهم عمده‌ای در گرمایش جهانی دارد. از این‌رو به‌عنوان مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای محسوب می‌شود (Scott et al. ۱۹۹۹, Petit et al. ۲۰۰۱, Peters ۲۰۰۴, Lal ۲۰۰۲). زیرا در اثر افزایش تراکم آن در جو زمین، از طریق جذب طول موج‌های بازتابی باعث افزایش گرمایش جهانی و در نتیجه تغییر اقلیم می‌شود (Solomon et al. ۲۰۰۷, Robinson ۲۰۲۰, Hamburg et al. ۱۹۹۷).

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین تهدیدات توسعه پایدار می‌باشد و دارای اثرات زیان‌بار مستقیم و غیرمستقیم بر محیط‌زیست، حیات انسان، بوم‌سازگان و دیگر جانداران کره زمین می‌باشد. از جمله آثار نامطلوب تغییرات اقلیم، می‌توان به افزایش گرمای زمین، عدم تعادل اقلیمی، اکولوژیکی، عدم تعادل در طول دوره رویش و تولید زی‌توده و کاهش تنوع‌زیستی اشاره کرد (Wan et al. ۲۰۱۸, Stern and Stern ۲۰۰۷, Solomon et al. ۲۰۰۷). همچنین بر اساس مطالعات انجام شده، افزایش دمای کره زمین که ناشی از افزایش میزان CO₂ و سایر گازهای گلخانه‌ای است، پایداری یخ‌های قطبی را به‌خطر می‌اندازد و موجب ذوب شدن یخ‌های قطبی و بالا آمدن سطح آب دریاها می‌شود. علاوه بر این، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو زمین، باعث افزایش انحلال این گاز در آب اقیانوس‌ها می‌شود که نتیجه آن اسیدی شدن اقیانوس‌ها و تاثیرات منفی بر حیات موجودات آبی است (Petit et al. ۱۹۹۹, Hansen et al. ۲۰۰۸).

از آنجا که، شهرها مسئول انتشار بیش از ۷۰ درصد از انتشارات جهانی گازهای گلخانه‌ای می‌باشند (Oda, Maksyutov and Andres ۲۰۱۸). و در بررسی تغییرات اقلیم، نسبت بالایی از انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن را به مناطق شهری نسبت می‌دهند (Grimm et al. ۲۰۰۸, Churkina ۲۰۰۸). زیرا انتشار این گاز در مناطق شهری، از مقیاس محلی تا مقیاس جهانی نقش مهمی در چرخه کربن دارد و اثرات نامطلوب بر جا می‌گذارد. به‌همین علت شهرها اهمیت بسیاری در به‌کارگیری اقدامات کاهش (mitigation strategies) انتشار این گاز دارند (Gurney et al. ۲۰۱۲).

خطرات و پیامدهای ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و به‌ویژه دی‌اکسید کربن، مورد تاکید و توجه مجامع بین‌المللی می‌باشد. از این‌رو، کشورهای مختلف جهان در پیمان‌نامه‌ها و پروتکل‌های مختلف محیط‌زیستی به‌دنبال راهکارهایی برای برون‌رفت از تغییرات اقلیمی و مشکلات محیطی هستند و بیشتر کشورهای جهان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را پذیرفته‌اند. به‌طوری‌که در سال ۱۹۹۲ تقریباً تمامی کشورهای دنیا کنوانسیون تغییرات اقلیمی را با هدف کاهش و متعادل نمودن غلظت گازهای گلخانه‌ای امضا نموده‌اند. در پی این کنوانسیون پروتکل کیوتو در سال ۱۹۹۷ با هدف دراز مدت و محدود نمودن انتشار این گازها مورد توافق رسمی ۵۵ کشور دنیا قرار گرفت. همچنین، معاهده تغییر اقلیم پاریس که در رابطه با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد از سوی نمایندگان ۱۹۵ کشور در کنفرانس تغییر اقلیم ۲۰۱۵ سازمان ملل متحد در پاریس به تصویب رسید (Fan et al. ۲۰۰۶, Brandon and Lombardi ۲۰۰۹).

از آنجا که گاز دی‌اکسید کربن در بین گازهای گلخانه‌ای موجود در اتمسفر دارای بیشترین تاثیر بر پدیده گرمایش کره زمین می‌باشد، مطالعه پایش میزان کربن منتشر شده از اکوسیستم‌های زمینی در مقیاس جهانی، ملی، منطقه‌ای و شهری به یک موضوع مهم پژوهشی تبدیل شده‌است. از این‌رو، در این مطالعه، تخمین میزان انتشار مکانی گاز دی‌اکسید کربن ناشی

از احتراق سوخت‌های فسیلی در مقیاس شهری به‌عنوان هدف اصلی پژوهش در نظر گرفته شده است. زیرا، به‌منظور کاهش میزان انتشار آن، شناخت و کمی‌نمودن انتشار این گاز از منابع مختلف در مناطق شهری لازم و ضروری می‌باشد (Gurney et al. ۲۰۱۵, Turnbull et al. ۲۰۱۲).

براساس مطالعات انجام شده، روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن وجود دارد. استفاده از ایستگاه‌های زمینی، هواپیماها، کشتی‌ها، برج‌های بلند، بالن‌ها و ماهواره‌ها از جمله روش‌های متداول اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای می‌باشند (Inoue et al. ۲۰۱۳). در میان روش‌های مذکور، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌دلیل پایش مداوم و پوشش جهانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای معرفی شده‌اند (Maksyutov et al. ۲۰۱۳). در خصوص اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای توسط ماهواره‌ها، می‌توان به سنجنده‌های OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory)، AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)، SCIAMACHY (Scanning Absorption Spectrometry) و GOSAT (Greenhouse Gas Observatory Satellite) اشاره کرد که در مقیاس منطقه‌ای و جهانی میزان دی‌اکسید کربن را اندازه‌گیری می‌کنند (Maksyutov et al. ۲۰۱۳).

در روش "پایین‌به‌بالا" که در دهه اخیر استفاده از آن بیشتر در ایالت متحده آمریکا متداول شده‌است، میزان انتشار سوخت‌های فسیلی ناشی از هر یک از تجهیزات صنعتی، مسکونی، تجاری، مزارع، حمل و نقل جاده‌ای و نیروگاه‌ها در سطح شهر گردآوری می‌شود. روش پایین به بالا مبتنی بر موجودی (inventory-based) است و می‌تواند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را در مقیاس شهر و بر اساس منابع تولید آن تخمین بزند. براساس مطالعات پیشین، بسیاری از پژوهش‌گران معتقداند بهترین راه برای تخمین و درک تفاوت انتشار دی‌اکسید کربن در مقیاس شهری، استفاده از روش "پایین به بالا" می‌باشد، زیرا میزان انتشار را بر حسب بخش‌های مختلف منبع کمی می‌نماید (Andres et al. ۲۰۱۱, Gurney et al. ۲۰۱۱, Oda et al. ۲۰۱۸, Oda and Maksyutov ۲۰۱۱, Gurney et al. ۲۰۱۹b, Gurney et al. ۲۰۱۹a).

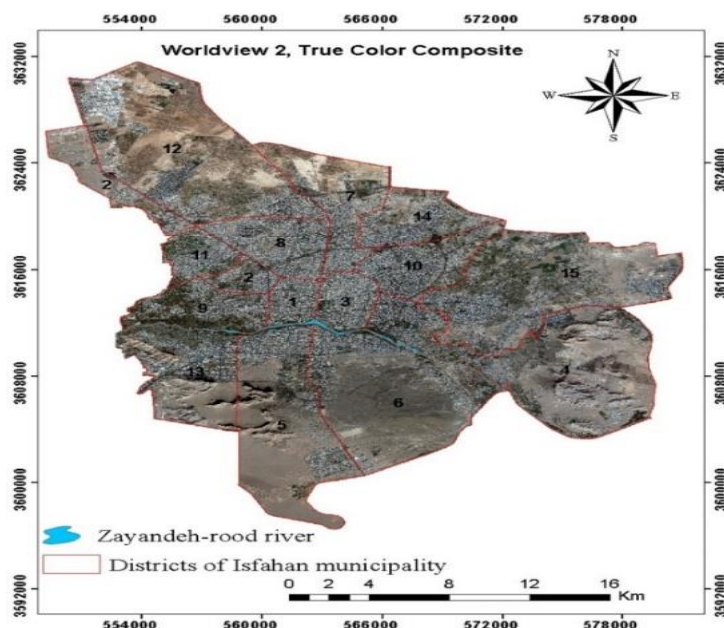
با توجه به عدم وجود ایستگاه‌های اندازه‌گیری گاز دی‌اکسید کربن و تصاویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس (بزرگنمایی مناسب شهر)، در این مطالعه از روش پایین به بالا (bottom-up) برای کمی نمودن انتشار گاز CO₂ استفاده نمودیم. در این پژوهش برای اولین بار، انتشارات سالانه دی‌اکسید کربن حاصل از سوخت‌های فسیلی را در بخش‌های مختلف نیروگاهی، مسکونی، تجاری-عمومی، صنعتی، حمل و نقل جاده‌ای و ریلی و حمل و نقل غیرجاده‌ای (ماشین‌آلات کشاورزی) در محدوده مناطق پانزده‌گانه شهر اصفهان، به‌عنوان سومین شهر پرجمعیت ایران محاسبه شده و سپس نقشه توزیع مکانی آن در هر بخش و در کل محدوده شهر اصفهان تهیه شد.

با توجه به مباحث مطرح‌شده و اهمیت موضوع، اهداف مورد نظر این پژوهش عبارتست از ۱- کمی‌سازی انتشار گاز دی‌اکسید کربن حاصل از منابع احتراقی ثابت و متحرک در محدوده شهر ۲- تهیه نقشه توزیع مکانی انتشار گاز CO₂ ناشی از منابع احتراقی ثابت (نیروگاهی، مسکونی، تجاری-عمومی، صنعتی) و منابع احتراقی متحرک (حمل و نقل جاده‌ای و ریلی و حمل و نقل غیر جاده‌ای) در سطح شهر در مقیاس ۱/۲۰۰۰ به تفکیک هر یک از منابع تولیدکننده ۳- رویهم‌گذاری نقشه‌های توزیع مکانی انتشار گاز دی‌اکسید کربن تمامی منابع ثابت و متحرک در سطح شهر.

داده‌ها و روش کار

• معرفی قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

محدوده مکانی پژوهش شامل کلان‌شهر اصفهان می‌باشد (شکل ۱). شهر اصفهان بین ۳۱ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی واقع شده است. محدوده این کلان‌شهر، از سمت غرب به خمینی‌شهر و نجف‌آباد، از سمت جنوب به کوه صفه و سپاهان‌شهر، از شمال به شاهین‌شهر و از شرق به منطقه بیابانی سگزی منتهی می‌شود. متوسط ارتفاع شهر اصفهان حدود ۱۵۷۰ متر بالاتر از سطح دریای آزاد است. منطقه مورد مطالعه با ۳۶/۸ درصد از جمعیت استان اصفهان و ۲/۳ درصد از جمعیت کشور بعد از کلان‌شهرهای تهران و مشهد، سومین کلان‌شهر ایران است. مساحت آن بالغ بر ۵۵۱ کیلومترمربع بوده و جمعیت آن در سال ۱۳۹۵ برابر با ۱۹۶۱۲۶۰ نفر گزارش شده است. بر اساس آخرین تقسیمات شهرداری در سال ۱۳۹۵ این شهر دارای ۱۵ منطقه شهری است (آمارنامه شهر اصفهان، ۱۳۹۷).



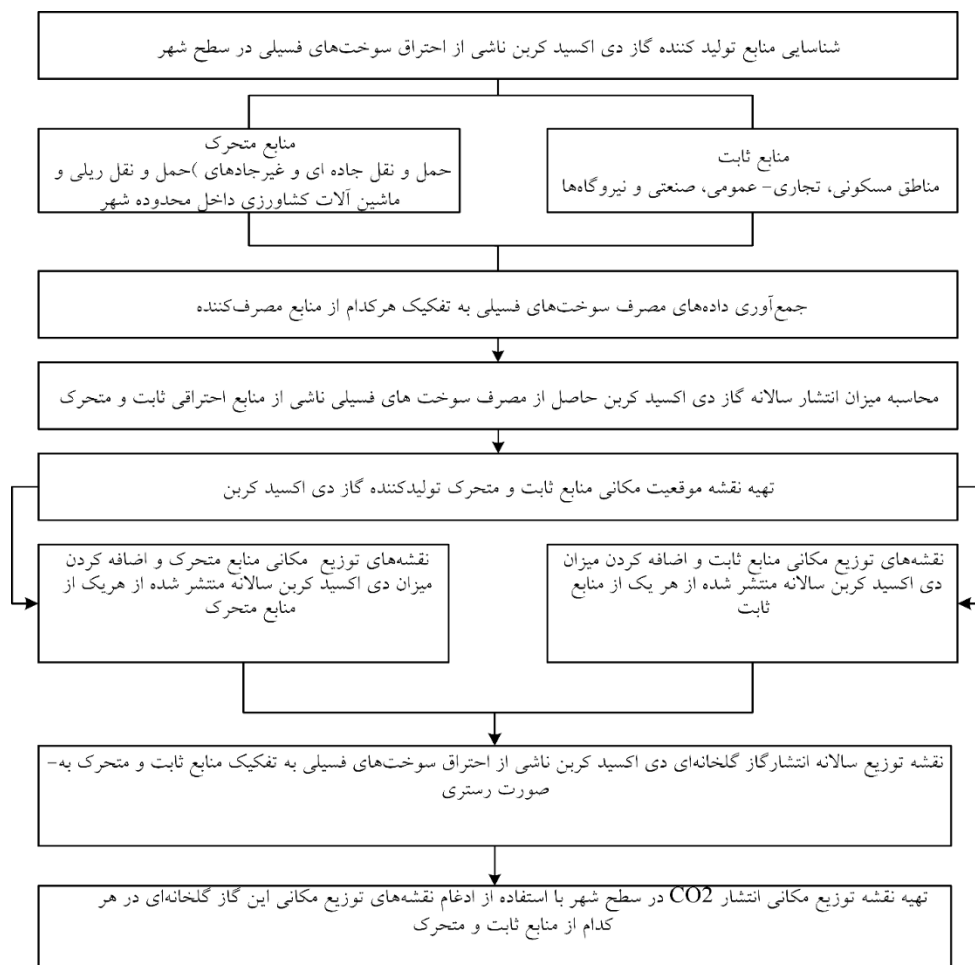
شکل ۱. محدوده منطقه مورد مطالعه

• روش کار

به‌طور کلی، در این پژوهش به‌منظور کمی‌سازی توابع مکانی میزان گاز CO_2 در مقیاس شهری و درک تفاوت انتشار دی‌اکسیدکربن در سطح شهر از روش "پایین به بالا" استفاده شد. مراحل کلی انجام روش پایین به بالا در نمودار ۱ ارائه شده است.

همان‌طور که نمودار شماره ۱ نشان می‌دهد مراحل مدل‌سازی انتشار گاز گلخانه‌ای کربن دی‌اکسید در سطح شهر شامل هفت مرحله می‌باشد. در مرحله اول، منابع تولیدکننده گاز دی‌اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در سطح شهر شناسایی شد. برای شناسایی این منابع از نتایج مطالعات موسسه منابع جهانی (World Resources Institute) و هیئت بین‌دولتی تغییرات آب و هوایی (Intergovernmental Panel on Climate Change) استفاده شد. براساس آمار ارائه شده

از سوی این دو موسسه منابع انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی در سطح شهر در دو گروه منابع ثابت و متحرک طبقه‌بندی شد. منابع ثابت شامل مناطق مسکونی، تجاری-عمومی، صنعتی و نیروگاه‌ها می‌باشند، در حالی که منابع متحرک شامل حمل و نقل جاده‌ای و غیرجاده‌ای (حمل و نقل ریلی، هوایی و ماشین‌آلات کشاورزی متحرک که در اراضی کشاورزی محدوده شهر فعالیت می‌کنند) است (Change ۲۰۰۶, Herzog ۲۰۰۹).



شکل ۲. نمودار کلی روش مطالعه

در مرحله دوم، نقشه موقعیت مکانی و سطح محدوده منابع تولیدکننده گاز دی اکسید کربن در هر دو بخش منابع ثابت و متحرک از تصاویر ماهواره‌ای World view^۲ و نقشه شهری با مقیاس ۱/۲۰۰۰ استخراج شد. همچنین داده‌های مربوط به میزان مصرف سوخت‌های فسیلی به تفکیک هرکدام از منابع ثابت و متحرک از آمارنامه سال ۱۳۹۷ شهر اصفهان جمع‌آوری شد.

در مرحله سوم، میزان انتشار سالانه گاز دی اکسیدکربن حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی در سال ۱۳۹۷ در محدوده شهر محاسبه شد. در این مرحله، میزان انتشار گاز گلخانه‌ای CO_۲ ناشی از منابع احتراقی ثابت و متحرک، از حاصل ضرب مقدار مصرف هر یک از سوخت‌های مصرفی در ارزش حرارتی و ضریب انتشار آن سوخت، مطابق رابطه (۱)، محاسبه شد (Change ۲۰۰۶, EPA ۲۰۱۷, Manual ۲۰۰۵, Shires et al. ۲۰۰۹, Oil ۲۰۱۸).

$$E_{c,i,j} = Q_i \times LHV_i \times EF_{ij} \quad \text{رابطه (۱)}$$

رابطه (۱) انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن از منابع احتراقی ثابت و متحرک را با فرض احتراق کامل محاسبه می‌کند. در این رابطه $E_{c,i,j}$: میزان انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای i یعنی گاز CO_2 حاصل از احتراق سوخت i بر حسب تن، Q_i : مقدار کل مصرف سالانه سوخت i بر حسب Sm^3 (استاندارد متر مکعب) برای سوخت‌های گازی و L (لیتر) برای سوخت‌های مایع، LHV_i : ارزش حرارتی خالص سوخت i بر حسب Gj/Sm^3 (گیگا ژول به ازای هر استاندارد متر مکعب) برای سوخت‌های گازی و Gj/L (گیگا ژول به ازای هر لیتر) برای سوخت‌های مایع EF_{ij} : ضریب انتشار گاز گلخانه‌ای i برای سوخت i بر حسب ton/Gj (تن به ازای هر گیگا ژول) i سوخت (اعم از گاز طبیعی، نفت گاز، نفت کوره و...)، j : گاز گلخانه‌ای CO_2 می‌باشد. نحوه انتخاب هر یک از پارامترهای مورد نیاز شامل: ارزش حرارتی خالص سوخت‌ها (LHV_i) و ضریب انتشار سوخت‌ها (EF_{ij}) تشریح شده‌است (۲۰۱۸ Oil, ۲۰۰۹, Shires et al., ۲۰۰۵ Manual, ۲۰۱۷ EPA, ۲۰۰۶ Change).

ارزش حرارتی خالص سوخت‌ها (Lower Heating Value): گرمایی ویژه، گرمای خالص آزاد شده از سوخت است و گرمای نهان آب موجود در محصولات احتراق را در بر نمی‌گیرد. بنابراین ارزش گرمایی ویژه سوخت به صورت کل گرمای تولید شده بر اثر احتراق سوخت منهای گرمای لازم برای تبخیر مجموع آب موجود در سوخت و آب تولید شده در فرایند احتراق، محاسبه می‌شود. در این مطالعه برای انتخاب مقدار ارزش حرارتی خالص سوخت‌های مایع و گاز از جدول شماره ۱ استفاده شد. ضریب انتشار سوخت‌ها (ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای) (Emission Factor): ضریبی است که اطلاعات عملکردی را به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تبدیل می‌کند. در این مطالعه، برای انتخاب ضریب انتشار دی اکسید کربن سوخت‌های مختلف از جدول شماره ۱ استفاده شد.

جدول ۱. ارزش حرارتی خالص سوخت‌ها و ضرایب انتشار آنها برای منابع احتراقی (بر حسب تن گاز گلخانه‌ای به ازای هر

گیگاژول ارزش حرارتی خالص) (Oil ۲۰۱۸)

| نوع سوخت | ارزش حرارتی خالص | واحد | ضریب انتشار CO_2 |
|--------------|------------------|------------|--------------------|
| گاز طبیعی | ۰/۰۳۴۲ | Gj/Sm^3 | ۰/۰۵۶۱ |
| LPG | ۰/۰۲۶۴۹ | $Gj/liter$ | ۰/۰۶۳۱ |
| بنزین | ۰/۰۳۳۱ | $Gj/liter$ | ۰/۰۶۹۳ |
| نفت گاز/دیزل | ۰/۰۳۶۷ | $Gj/liter$ | ۰/۰۷۴۱ |

در مرحله چهارم، نقشه توزیع انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، براساس منابع ثابت تهیه شد. در این مرحله، با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی، محدوده و موقعیت مکانی هر کدام از منابع ثابت (مناطق مسکونی، تجاری-عمومی، صنعتی و نیروگاه‌ها) با استفاده از نقشه شهری در مقیاس ۱/۲۰۰۰ تهیه شد. سپس نقشه توزیع سالانه انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در هر کدام از بخش‌های منابع ثابت براساس محدوده و مکان آنها در سطح شهر تهیه شد. مراحل انجام این مرحله به شرح زیر می‌باشد (توجه شود، کلیه روابط استفاده شده در این بخش در جدول ۲ ارائه شده است)

- محاسبه نقشه توزیع انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ در بخش خانگی

برای نقشه‌سازی این بخش، میزان انتشار دی اکسیدکربن سالانه براساس نوع سوخت مصرفی در کل شهر در بخش خانگی و با استفاده از داده‌های آماری شهر اصفهان در سال ۱۳۹۷ و روش محاسبه انتشار CO₂ (رابطه ۱) محاسبه شد. سپس نتایج میزان انتشار سالانه این گاز، بر مجموع مساحت تمام ساختمان‌های سطح شهر تقسیم شد (لازم به ذکر است در محاسبه مساحت ساختمان‌ها در بخش خانگی، مساحت کل طبقات در نظر گرفته شد). مقدار به‌دست‌آمده، بیان‌کننده میزان انتشار دی اکسید کربن در متر مربع منابع ثابت تولیدکننده این گاز در بخش خانگی می‌باشد. در نهایت، برای محاسبه میزان انتشار هر کدام از ساختمان‌ها در سطح شهر عدد به‌دست آمده (میزان CO₂ منتشر شده در هر متر مربع) در مساحت کل هر کدام از ساختمان‌ها ضرب شد. بدین‌صورت، نقشه توزیع میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن بر مبنای بخش خانگی در سطح شهر محاسبه شد (رابطه ۲).

- محاسبه نقشه توزیع انتشار گاز گلخانه‌ای کربن دی اکسید در بخش تجاری-عمومی

در این مرحله، برای نقشه‌سازی توزیع انتشار در بخش تجاری-عمومی، داده‌های مربوط به میزان مصرف سوخت فسیلی در این بخش جمع‌آوری شد. سپس بر اساس رابطه (۱) مقدار انتشار سالانه CO₂ محاسبه شد. در مرحله بعد، مجموع انتشار سالانه این گاز بر مساحت کل مناطق تجاری-عمومی تقسیم شد. عدد به‌دست‌آمده، میزان انتشار CO₂ را در متر مربع مناطق تجاری-عمومی نشان می‌دهد. این مقدار در مساحت هر کدام از ساختمان‌ها در این بخش ضرب شد که حاصل ضرب آن نقشه توزیع انتشار این گاز در بخش تجاری-عمومی را نشان می‌دهد.

- محاسبه نقشه توزیع انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن در بخش صنعتی

به‌دلیل عدم وجود در داده‌های آماری میزان انرژی مصرف‌شده به تفکیک هر کدام از صنایع، مراحل نقشه‌سازی توزیع گاز CO₂ در بخش صنعتی همانند دو بخش خانگی و تجاری-عمومی محاسبه شد.

- محاسبه نقشه انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسیدکربن در نیروگاه‌ها

در دو نیروگاهی که در محدوده منطقه مورد مطالعه واقع شده‌اند، براساس میزان مصرف سالانه سوخت‌های فسیلی، میزان انتشار CO₂ محاسبه شد و این مقدار برای محدوده مکانی نیروگاه‌ها در نظر گرفته شد. در مرحله پنجم، نقشه توزیع انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، براساس منابع متحرک تهیه شد. در این مرحله، با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی، محدوده و مسیر حرکت منابع متحرک از جمله حمل و نقل جاده‌ای و غیرجاده‌ای (حمل و نقل ریلی و ماشین‌آلات کشاورزی) با استفاده از نقشه شهری در مقیاس ۱/۲۰۰۰ تهیه شد. سپس نقشه توزیع سالانه انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در منابع متحرک بر اساس محدوده و مکان آنها در سطح شهر تهیه شد. مراحل انجام این مرحله به شرح زیر می‌باشد.

- محاسبه مقدار دی اکسیدکربن منتشرشده حاصل از مصرف سالانه سوخت‌های فسیلی در بخش منابع متحرک

در این مرحله، مقدار دی اکسید کربن منتشرشده حاصل از مصرف سالانه هر کدام از سوخت‌های فسیلی (بنزین، گاز و گازوئیل) در بخش حمل و نقل جاده‌ای و غیرجاده‌ای (حمل و نقل ریلی و ماشین‌آلات کشاورزی) در محدوده منطقه مورد

مطالعه، با استفاده از داده‌های آماری سال ۱۳۹۷ شهر اصفهان و به‌کارگیری روش محاسبه انتشار CO_2 (رابطه ۱) محاسبه شد.

• محاسبه نقشه توزیع انتشار CO_2 ناشی از سیستم حمل و نقل جاده‌ای

در این گام، معابر شهری به دو طبقه خیابان‌های اصلی (شریانی درجه ۱، شریانی درجه ۲، رمپ، جمع‌کننده، تند راه شهری، آزاد راه شهری، تندراه برون‌شهری و آزاد راه برون‌شهری) و خیابان‌های فرعی (مسکونی) طبقه‌بندی شدند. سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالا تراکم تعداد وسیله نقلیه در هر کدام از دو طبقه جاده‌ای (خیابان‌های اصلی و فرعی) محاسبه شد (Eslami and Faez ۲۰۱۰, Larsen et al. ۲۰۰۸). بدین‌منظور، از سری زمانی تصاویر گوگل ارث استفاده شد و تراکم تعداد وسایل حمل و نقل در هر کدام از طبقات جاده‌ای در واحد کیلومتر با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد (Uddin, Ahmed and Ali ۲۰۱۳). این میزان تراکم در هر کدام از انواع جاده‌ای به‌عنوان وزن آن طبقه جاده‌ای در انتشار دی‌اکسید کربن در نظر گرفته شد.

در ادامه در این مرحله به‌منظور تهیه نقشه توزیع انتشار CO_2 در هر کدام از دو طبقه جاده‌ای، وزن محاسبه شده در مقدار کل دی‌اکسید کربن سالانه منتشر شده از مصرف سوخت در بخش حمل و نقل جاده‌ای (به‌جز مصرف سوخت در شبکه حمل و نقل اتوبوس‌رانی) ضرب شد. بدین‌صورت میزان CO_2 به دو بخش میزان CO_2 منتشر شده از خیابان‌های اصلی و خیابان‌های فرعی تقسیم شد که با استفاده از رابطه (۶) و (۷) محاسبه شد.

سپس با توجه به اینکه هر کدام از خیابان‌های طبقه اول (خیابان‌های اصلی) از نظر میزان تردد حمل و نقل با هم تفاوت دارند، در نتیجه میزان CO_2 منتشر شده در آنها نیز با هم متفاوت می‌باشد. بنابراین، برای محاسبه CO_2 در هر کیلومتر از هر کدام از طبقه خیابان‌ها (شریانی درجه ۱، شریانی درجه ۲، رمپ، جمع‌کننده، تندراه شهری، آزاد راه شهری، تند راه برون‌شهری و آزاد راه برون‌شهری) باید حجم ترافیک ساعتی در آنها محاسبه شود. بدین‌منظور، در این مطالعه از لایه‌های اطلاعاتی طرح مطالعات جامع حمل و نقل شهر اصفهان (سال ۱۳۹۷) که حجم ترافیک در هر کدام از بخش‌ها را محاسبه کرده بود، استفاده شد. در نهایت، میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده در هر بخش از انواع جاده اصلی با استفاده از رابطه (۸) به دست آمد.

از سوی دیگر، با توجه به اینکه میزان تردد وسایل حمل و نقل در خیابان‌های فرعی (مسکونی) وابسته به میزان تراکم جمعیت در محلات می‌باشد. بنابراین، برای محاسبه نقشه توزیع انتشار دی‌اکسید کربن در خیابان‌های فرعی در هر کدام از محلات از نسبت جمعیت در محلات به‌عنوان متغیر وزن استفاده شد. بدین‌صورت نقشه توزیع CO_2 منتشر شده در خیابان‌های فرعی در محلات با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه شد.

محاسبه میزان انتشار سالانه CO_2 ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در خطوط اتوبوس‌رانی: در این گام، در مرحله اول نقشه خطوط اتوبوس‌رانی شهر اصفهان تهیه شد. سپس میزان دی‌اکسید کربن سالانه منتشرشده از سوخت فسیلی در این بخش با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. در مرحله آخر، نقشه توزیع CO_2 در خطوط اتوبوس‌رانی با به‌کارگیری رابطه (۱۲) تهیه شد.

- محاسبه میزان انتشار سالانه کربن دی اکسید ناشی از مصرف سوخت فسیلی در خطوط حمل و نقل ریلی

در این گام، نقشه خطوط حمل و نقل ریلی در محدوده شهر اصفهان از نقشه‌های توپوگرافی استخراج شد. سپس میانگین مصرف سوخت در هر کیلومتر از خطوط حمل و نقل ریلی با استفاده از داده‌های موجود جمع‌آوری شد و با استفاده از رابطه (۱)، میزان CO_2 منتشر شده سالانه ناشی از مصرف سوخت فسیلی در خطوط حمل و نقل ریلی محدوده مورد بررسی، محاسبه شد. در نهایت برای تهیه نقشه توزیع انتشار سالانه دی اکسید کربن ناشی از خطوط ریلی، مقدار کل CO_2 سالانه منتشر شده از خطوط ریلی در محدوده شهر اصفهان بر طول خطوط ریلی در همین محدوده تقسیم شد (رابطه ۱۳) که نتیجه آن نقشه توزیع انتشار سالانه کربن دی اکسید می‌باشد.

- محاسبه میزان انتشار سالانه دی اکسید کربن حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش حمل و نقل غیر جاده‌ای (بخش کشاورزی)

در این مرحله، به منظور تهیه نقشه توزیع انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش کشاورزی، اراضی کشاورزی داخل محدوده شهر اصفهان از نقشه شهری در مقیاس ۱/۲۰۰۰ استخراج شد و همچنین تعداد ماشین‌آلات کشاورزی و میزان مصرف سالانه سوخت فسیلی در محدوده شهر، جمع‌آوری شد. سپس میزان CO_2 سالانه منتشر شده در این بخش با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه شد. در نهایت مقدار کل CO_2 منتشر شده سالانه، بر مساحت زمین‌های کشاورزی تحت کشت در محدوده شهر اصفهان تقسیم شد. نتیجه آن نشان‌دهنده میزان دی اکسید کربن حاصل از احتراق سوخت فسیلی در هر واحد (متر یا هکتار) از زمین کشاورزی می‌باشد (رابطه ۱۴).

در مرحله هفتم، پس از محاسبه نقشه توزیع انتشار گاز دی اکسید کربن حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی به تفکیک هر یک از منابع ثابت و متحرک، نقشه‌های توزیع انتشار CO_2 در هر یک از کاربری‌ها روی هم‌گذاری شد. نتیجه این روی هم‌گذاری نقشه توزیع انتشار گاز CO_2 در سطح شهر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. معادلات استفاده شده در بخش روش مطالعه

| معادلات استفاده شده | شرح متغیرهای معادلات |
|---|--|
| $CO_2 \text{ emissions from IRB} = \frac{TCO2_r}{BTFA} * IBTFA \text{ (۲) رابطه}$ | <p>CO₂ emissions from IRB</p> <p>مقدار دی‌اکسید کربن انتشار یافته از هر کدام از ساختمان‌های مسکونی بر اساس مجموع مساحت در کل طبقات، $TCO2_r$ مجموع کل دی‌اکسید کربن انتشار یافته در بخش خانگی، $BTFA$: مجموع مساحت کل ساختمان‌های مسکونی (مجموع مساحت کل طبقات) و $IBTFA$: مساحت کل طبقات در هر واحد ساختمانی منفرد.</p> |
| $CO_2 \text{ emissions from ICB \& IPB} = \frac{TCO2_{C\&P}}{TFACPB} * AICPB \text{ (۳) رابطه}$ | <p>emissions from ICB \& IPB</p> <p>مقدار دی‌اکسید کربن انتشار یافته از هر کدام از ساختمان‌های تجاری-عمومی بر اساس مجموع مساحت در کل طبقات، $TCO2_{C\&P}$: مجموع کل دی‌اکسید کربن انتشار یافته در بخش تجاری-عمومی، $TFACPB$: مجموع مساحت کل ساختمان‌های تجاری-عمومی (مجموع مساحت کل طبقات) و $AICPB$: مساحت کل طبقات در هر واحد ساختمانی منفرد تجاری-عمومی.</p> |
| $CO_2 \text{ emissions from IIB} = \frac{TCO2_i}{TFAIB} * AIIB \text{ (۴) رابطه}$ | <p>CO₂ emissions from IIB</p> <p>مقدار دی‌اکسید کربن انتشار یافته از هر کدام از واحد صنعتی بر اساس مساحت واحد‌های صنعتی، $TCO2_i$: مجموع کل دی‌اکسید کربن انتشار یافته در بخش صنعت، $TFAIB$: مجموع مساحت کل ساختمان‌های واحد‌های صنعتی و $AIIB$: مساحت ساختمانی هر کدام از واحد‌های صنعتی منفرد.</p> |
| $K = \frac{N}{L} * 1000 \text{ (۵) رابطه}$ | <p>K : تراکم ترافیک (برحسب تعداد وسیله حمل و نقل در کیلومتر) ، N : تعداد وسیله حمل و نقل در هر کیلومتر بر روی تصویر ماهواره ای و L : طول جاده در هر بخش بر حسب متر می‌باشد.</p> |
| <p>CO₂ emissions from Main street $= K_{MSt}$ * Total CO₂ emissions from gasoline consumption in the city</p> | <p>K_{LSt} و K_{MSt} : به ترتیب تراکم ترافیک در جاده‌های اصلی و فرعی (محلی) بر حسب درصد می‌باشد که از رابطه (۵) محاسبه شده است.</p> |

| | |
|---|---|
| | رابطه (۶) |
| | $\text{CO2 emissions from total Local streets} = K_{LSt} * \text{Total CO2 emissions from gasoline consumption in the city}$ رابطه (۷) |
| Length: طول هر سگمنت در هر کدام از تیپ های جاده های اصلی می باشد، که مقدار حجم ترافیک در آنها محاسبه شده است (طول هر سگمنت می تواند برحسب متر یا کیلومتر باشد) و W_i : وزن هر کدام از سگمنت ها در هر کدام از تیپ های جاده اصلی می باشد و با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می شود. | $\text{CO2 emissions from each segment in any type of Main streets} = \frac{\text{Total CO2 emissions from Main streets} * W_i}{\text{Length}}$ رابطه (۸) |
| | $W_i = \frac{\text{Volume of traffic in each segment of main streets}}{\text{Volume of traffic on all main streets}}$ رابطه (۹) |
| Length: طول هر سگمنت در هر کدام از جاده های فرعی می باشد که مقدار حجم ترافیک در آنها محاسبه نشده است (طول هر سگمنت می تواند برحسب متر یا کیلومتر باشد) و W_i : وزن جاده های فرعی بر اساس نسبت جمعیت در هر کدام از محلات می باشد و با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه شد. | $\text{CO2 emissions from evry Local streets} = \frac{\text{Total CO2 emissions from Local streets} * W_i}{\text{Length}}$ رابطه (۱۰) |
| | $W_i = \frac{\text{Population in each neighborhood}}{\text{The population of the whole city}}$ رابطه (۱۱) |
| Length: طول شبکه حمل و نقل اتوبوس رانی می باشد. | $\text{CO2 emissions from Bus transportation network} = \frac{\text{Total CO2 emissions from Diesel consumption in Bus transport}}{\text{Length}}$ رابطه (۱۲) |

ادامه جدول ۲. معادلات استفاده شده در بخش روش مطالعه

| شرح متغیرهای معادلات | معادلات استفاده شده |
|--|--|
| در این رابطه (۱۳)، Length: طول خطوط حمل و نقل ریلی در محدوده شهر اصفهان می باشد. | $\text{CO2 emissions from Rail transport lines} = \frac{\text{Total CO2 emissions from Diesel consumption in Rail transport lines}}{\text{Length}}$ رابطه (۱۳) |

| |
|---|
| $\text{رابطه (۱۴)} = \frac{\text{CO}_2 \text{ emissions from Diesel consumption in agricultural area}}{\text{Total CO}_2 \text{ emissions from Diesel consumption in agricultural area}} \times \text{Total agricultural area}$ |
| ۱-Individual residential building (IRB) ۲-Total CO ₂ emissions from residential sector (TCO _{2r}) ۳-Building total floor area (BTFA) ۴-individual building floor area (IBTFA) ۵-individual Commercial building (ICB) ۶-individual Public building (IPB) ۷-Total CO ₂ emissions from Commercial and Public sector (TCO _{2C&P}) ۸-Total floor area of commercial & public building (TFACPB) ۹-Area of each individual commercial and public buildings (AICPB) ۱۰-Each of the individual industrial buildings (IIB) ۱۱-Total CO ₂ emissions from industrial sector (TCO _{2i}) ۱۲-Total floor area of industrial building (TFAIB) ۱۳-Area of each individual industrial buildings (AIIB) |

شرح و تفسیر نتایج

• تحلیل داده‌ها

داده‌های مربوط به میزان مصرف سوخت‌های فسیلی به تفکیک هر کدام از منابع احتراقی ثابت و متحرک، به شرح جدول ۳ تا ۶ می‌باشد. جدول ۳ نشان می‌دهد میزان مصرف بنزین معمولی، گاز CNG و بنزین سوپر توسط خودروهای سبک در محدوده

شهر اصفهان در سال ۱۳۹۷، به ترتیب ۸۳، ۱۴/۳ و ۲/۵ درصد می‌باشد. در این جدول مصرف گاز طبیعی با سوخت بنزین معادل‌سازیشده است (یعنی هر متر مکعب معادل ۰/۹۱ لیتر بنزین معمولی در نظر گرفته شده است). محاسبه انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید

کربن ناشی از منابع احتراقی ثابت و متحرک، مقدار کل مصرف سالانه سوخت (Q_i) برای سوخت‌های گازی، بر حسب Sm^3 (استاندارد متر مکعب) می‌باشد. بنابراین، مقدار مصرف گاز CNG در جدول ۴ باید تبدیل به متر مکعب شود، که عدد حاصل ۱۷۲۵۲۷۴۷۳ متر مکعب در سال ۹۷ است.

در جدول ۴ میزان مصرف گازوئیل سالانه در بخش حمل و نقل عمومی، ماشین‌آلات کشاورزی و قطارهای باربری و مسافری ارائه شده است. در حدود سه هزار و ۴۵۰ دستگاه ماشین‌آلات کشاورزی در محدوده شهر اصفهان فعالیت می‌کند. از آنجا که به‌طور متوسط، هر دستگاه سالانه هزار و ۲۰۰ ساعت فعالیت دارد و هر ساعت ۱۴ لیتر سوخت مصرف می‌کند، بنابراین می‌توان بیان کرد به‌طور متوسط هر دستگاه ماشین‌آلات کشاورزی حدود ۱۶ هزار و ۸۰۰ لیتر در سال سوخت مصرف می‌کند. مجموع گازوئیل مصرفی در بخش کشاورزی ۵۷/۹۶ میلیون لیتر در سال می‌باشد.

از سوی دیگر، متوسط مصرف سوخت برای قطارهای باربری و مسافری ۷/۹۷ لیتر در هر کیلومتر می‌باشد (Forouzandeh ۲۰۰۹). آمار سرویس‌های ورودی و خروجی در پایانه راه‌آهن اصفهان در سال ۹۷ پنج سرویس در روز بوده است. از این‌رو، با توجه به اینکه طول مسیر راه‌آهن در محدوده شهر اصفهان، حدود ۷۱/۹ کیلومتر می‌باشد، میزان مصرف سالانه سوخت این قطارها ۱/۰۴۶ میلیون لیتر است.

همچنین، نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد، سهم میزان مصرف گاز در سال ۱۳۹۷ در بخش خانگی ۵۱ درصد، در بخش صنعتی ۳۷ درصد و مصرف تجاری-عمومی ۱۲ درصد می‌باشد. جدول ۶ میزان مصرف گاز طبیعی در بخش نیروگاهی در دو نیروگاه شهر اصفهان را ارائه می‌کند. در نیروگاه‌های شهر به دلیل آلاینده‌گی تولید برق از سوزاندن نفت کوره و گازوئیل مصرف این دو حامل انرژی را در سال‌های اخیر متوقف کرده‌اند. از این‌رو، در این پژوهش فقط میزان مصرف گاز طبیعی در نیروگاه‌ها بررسی شده است. بر اساس آمارنامه سال ۹۶ و ۹۷ اصفهان، میزان مصرف گاز طبیعی جهت تولید ۱ کیلو وات ساعت برق به ترتیب ۰/۲۷ و ۰/۲۸ مترمکعب می‌باشد.

به‌طور کلی، میزان مصرف سوخت‌های فسیلی در محدوده شهر اصفهان به تفکیک هر یک از منابع احتراقی ثابت و متحرک یعنی بخش خانگی، تجاری-عمومی، صنعتی، نیروگاهی، حمل و نقل جاده‌ای و ریلی و حمل و نقل غیرجاده‌ای (ماشین‌آلات کشاورزی) به ترتیب ۲۲/۱۲، ۴/۹۹، ۴/۴۴، ۵۱/۴۱، ۱۶/۱۴ و ۰/۹ درصد می‌باشد.

جدول ۳. میزان مصرف سوخت خودروهای سبک در محدوده شهر اصفهان در سال ۹۷

| شرح | *گاز طبیعی CNG | بنزین معمولی (میلیون لیتر) | بنزین سوپر (میلیون لیتر) |
|------------|----------------|----------------------------|--------------------------|
| مقدار مصرف | ۱۵۷ | ۸۲۸ | ۲۵ |

*مقدار مصرف گاز طبیعی با سوخت بنزین معادل‌سازی شده است (یعنی هر متر مکعب معادل ۰/۹۱ لیتر بنزین معمولی در نظر گرفته شده است). ماخذ: آمارنامه شهر اصفهان ۱۳۹۶. شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران-منطقه اصفهان.

جدول ۴. میزان مصرف گازوئیل سالانه (میلیون لیتر) در محدوده شهر اصفهان در سال ۹۷

| شرح | گازوئیل سالانه (میلیون لیتر) | | |
|------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|
| | حمل و نقل عمومی | ماشین‌آلات کشاورزی | قطارهای باربری و مسافری |
| میزان مصرف | ۳۳/۱۲ | ۵۷/۹۶ | ۱/۰۴۶ |

ماخذ: آمارنامه شهر اصفهان. (شرکت واحد اتوبوس‌رانی اصفهان و حومه شهرداری اصفهان ۱۳۹۷).

جدول ۵. میزان مصرف گاز توسط مشترکان در شهر اصفهان (هزار متر مکعب) طی سال ۹۷

| سال | مصرف خانگی | مصرف تجاری - عمومی | مصرف صنعتی |
|-----|------------|--------------------|------------|
| ۹۷ | ۱۵۷۳۰۲۵ | ۳۵۵۰۳۸ | ۳۱۵۳۷۸/۷۶ |

ماخذ: آمارنامه شهر اصفهان ۱۳۹۷، شرکت ملی گاز ایران- منطقه اصفهان

جدول ۶. وضعیت میزان مصرف گاز طبیعی سالانه در نیروگاه‌های اصفهان (هزار متر مکعب) طی سال ۹۷

| نام نیروگاه | سال | هزار متر مکعب گاز طبیعی مصرف شده (سالانه) |
|-------------|-----|---|
| اصفهان | ۹۷ | ۸۱۹۶۸۸/۲۴ |
| شهید منتظری | ۹۷ | ۲۸۳۵۵۵۸/۰۴ |

ماخذ: آمارنامه شهر اصفهان ۱۳۹۷، شرکت برق منطقه‌ای اصفهان

• تحلیل میزان انتشار سالانه گاز دی اکسید کربن حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی

میزان انتشار دی اکسید کربن ناشی از منابع احتراقی ثابت و متحرک در سال ۹۷ به شرح جدول شماره ۷ تا ۱۰ می‌باشد. به‌طور کلی، میزان انتشار دی اکسید کربن ناشی از اکسید شدن هیدروکربن‌ها در طول فرآیند احتراق سوخت‌های فسیلی ۱۳۸۵۵۵۲۵/۸۴ تن در سال می‌باشد، که به تفکیک هر یک از منابع احتراقی ثابت و متحرک یعنی بخش خانگی، تجاری-عمومی، صنعتی، نیروگاهی، حمل و نقل جاده‌ای و ریلی و حمل و نقل غیرجاده‌ای (ماشین‌آلات کشاورزی) به ترتیب ۴/۳۷، ۵۰/۶۱، ۱۷/۱۸ و ۱/۱۴ درصد از دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی را به جو منتشر می‌کنند. جدول ۷. میزان انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای کربن دی اکسید براساس میزان مصرف گاز طبیعی در منابع ثابت در سال

۱۳۹۷

| سال | میزان انتشار سالیانه گاز CO ₂ (بر حسب تن) | | |
|-----|--|---------------|--------|
| | خانگی | تجاری - عمومی | صنعتی |
| ۹۷ | ۳۰۱۸۰۳۷/۲۳ | ۶۸۱۱۸۳/۰۱ | ۶۰۵۰۹۲ |

جدول ۸. میزان انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای کربن دی اکسید براساس میزان مصرف گاز طبیعی در نیروگاه‌ها در سال ۱۳۹۷

| نام نیروگاه | سال | میزان انتشار سالانه گاز CO ₂ (بر حسب تن) |
|-------------|-----|---|
| اصفهان | ۹۷ | ۱۵۷۲۶۷۰/۲۵ |
| شهید منتظری | ۹۷ | ۵۴۴۰۳۵۸/۳۷ |

جدول ۹. میزان انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای کربن دی اکسید براساس میزان مصرف گازوئیل سالانه در سال ۱۳۹۷

| شرح | میزان انتشار سالانه گاز CO ₂ (بر حسب تن) | | |
|---|---|--------------------|-------------------------|
| | حمل و نقل عمومی | ماشین‌آلات کشاورزی | قطارهای باربری و مسافری |
| میزان انتشار سالانه گاز CO ₂ | ۹۰۰۶۸/۸۵ | ۱۵۷۶۲۰/۴۸ | ۲۸۴۴ |

جدول ۱۰. میزان انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن براساس میزان مصرف سوخت خودروهای سبک در سال ۹۷

| میزان انتشار سالانه گاز CO ₂ (بر حسب تن) | | | شرح |
|---|----------------------------|----------------|-------------------------------|
| بنزین سوپر (میلیون لیتر) | بنزین معمولی (میلیون لیتر) | *گاز طبیعی CNG | |
| ۵۷۳۴۵/۷۵ | ۱۸۹۹۲۹۱/۲۴ | ۳۳۱۰۱۴/۶۶ | انتشار سالانه CO ₂ |

• نقشه‌سازی توزیع مکانی انتشار گاز CO₂

- نقشه‌سازی توزیع مکانی انتشار گاز CO₂ ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در منابع ثابت

شکل ۲ و ۳ نتایج نقشه توزیع مکانی میزان انتشار CO₂ در بخش منابع ثابت در سطح شهر اصفهان در مقیاس ۱/۲۰۰۰ را نشان می‌دهد. نتایج این بخش از پژوهش نشان می‌دهد، میزان انتشار دی اکسید کربن ناشی از اکسید شدن هیدروکربن‌ها در طول فرآیند احتراق سوخت‌های فسیلی در بخش منابع ثابت ۱۱۳۱۷۱۹۳/۵۱ تن در سال می‌باشد که ۸۱/۶۸ درصد کل دی اکسید کربن منتشر شده ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در شهر اصفهان را به خود اختصاص می‌دهد. هرکدام از کاربری‌های مسکونی، تجاری-عمومی، صنعتی و نیروگاهی به ترتیب ۲۶/۶۷، ۶/۰۱، ۵/۳۵ و ۶۱/۹۷ درصد از دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در بخش منابع ثابت را به هوا منتشر می‌کند.

- نقشه‌سازی توزیع مکانی انتشار گاز CO₂ مرتبط با مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش منابع متحرک

نتایج نقشه توزیع مکانی انتشار گاز CO₂ ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در بخش منابع متحرک در سه گروه حمل و نقل جاده‌ای، ریلی و ماشین‌آلات کشاورزی به شرح زیر طبقه‌بندی شده است:

✓ نقشه توزیع مکانی انتشار گاز CO₂ ناشی از سیستم حمل و نقل جاده‌ای

نتایج تراکم وسایل حمل و نقل در شریان‌های اصلی و فرعی در دو طبقه جاده‌ای نشان داد حجم خودرو در خیابان‌های اصلی ۷۸ درصد و در خیابان‌های فرعی و کوچه‌ها ۲۲ درصد می‌باشد. این میزان تراکم در هر یک از انواع جاده به‌عنوان وزن آن طبقه جاده‌ای در انتشار دی اکسید کربن در نظر گرفته شد. در ادامه در این مرحله، وزن محاسبه شده در مقدار کل دی اکسید کربن سالانه منتشر شده از مصرف سوخت در بخش حمل و نقل جاده‌ای (به‌جز مصرف سوخت در شبکه حمل و نقل اتوبوس‌رانی) ضرب شد. بدین‌صورت میزان CO₂ به دو بخش، میزان CO₂ منتشر شده از خیابان‌های اصلی و خیابان‌های فرعی تقسیم شد که با استفاده از رابطه (۶) و (۷) محاسبه شد. نتایج نشان داد میزان انتشار دی اکسید کربن ناشی از حمل و نقل در جاده‌های اصلی ۱۷۸۴۳۶۸/۲۹ تن در سال و در جاده‌های فرعی ۵۰۳۲۸۳/۳۶۳ تن در سال می‌باشد.

در نهایت، میزان دی اکسید کربن منتشر شده در هر بخش از انواع جاده اصلی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد، که در شکل ۴ نقشه توزیع مکانی آن مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۴ نشان می‌دهد که در شریان‌های درجه ۱ و درجه ۲ و در اطراف میدین شهری و به‌طور کلی در جاده‌هایی که میزان ترافیک ساعتی بالا است، میزان انتشار گاز دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی هم بالا می‌باشد. به‌طور کلی حداکثر میزان انتشار این گاز در خیابان‌های اصلی ۶۲۱ کیلوگرم در متر مربع در سال ۱۳۹۷ می‌باشد.

از سوی دیگر، نقشه توزیع CO₂ منتشر شده در خیابان‌های فرعی در محلات با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه شد، که نقشه توزیع مکانی آن در شکل ۵ آمده است. نتایج نقشه توزیع مکانی انتشار سالانه گاز CO₂ ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی از خودروهای سبک در خیابان‌های فرعی (شکل ۵) نشان می‌دهد که حداقل میزان انتشار این گاز ۲/۷۹ و حداکثر میزان آن ۱۱۹/۴۴ کیلوگرم در متر مربع می‌باشد.

✓ نقشه توزیع میزان انتشار سالانه CO₂ ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در خطوط اتوبوس‌رانی

نقشه توزیع میزان دی اکسید کربن منتشر شده در هر بخش از خطوط حمل و نقل عمومی با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه شد، که نتیجه آن در شکل ۶ ارائه شده است. نقشه توزیع مکانی انتشار سالانه گاز CO₂ ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در خطوط حمل و نقل عمومی (شکل ۶) نشان می‌دهد، حداقل میزان انتشار این گاز ۰/۴۷۸ و حداکثر میزان آن ۶۱/۲۴ کیلوگرم در متر مربع می‌باشد.

به‌طور کلی نتایج این بخش از پژوهش نشان می‌دهد میزان انتشار دی اکسید کربن ناشی از اکسید شدن هیدروکربن‌ها در طول فرآیند احتراق سوخت‌های فسیلی در خیابان‌های اصلی و فرعی در محدوده شهر اصفهان ۲۳۷۷۷۲۰/۵ تن در سال می‌باشد که ۱۷/۱۶ درصد کل دی اکسید کربن منتشر شده ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در شهر اصفهان را به خود اختصاص می‌دهد.

✓ نقشه میزان انتشار سالانه کربن دی اکسید ناشی از مصرف سوخت فسیلی در خطوط حمل و نقل ریلی

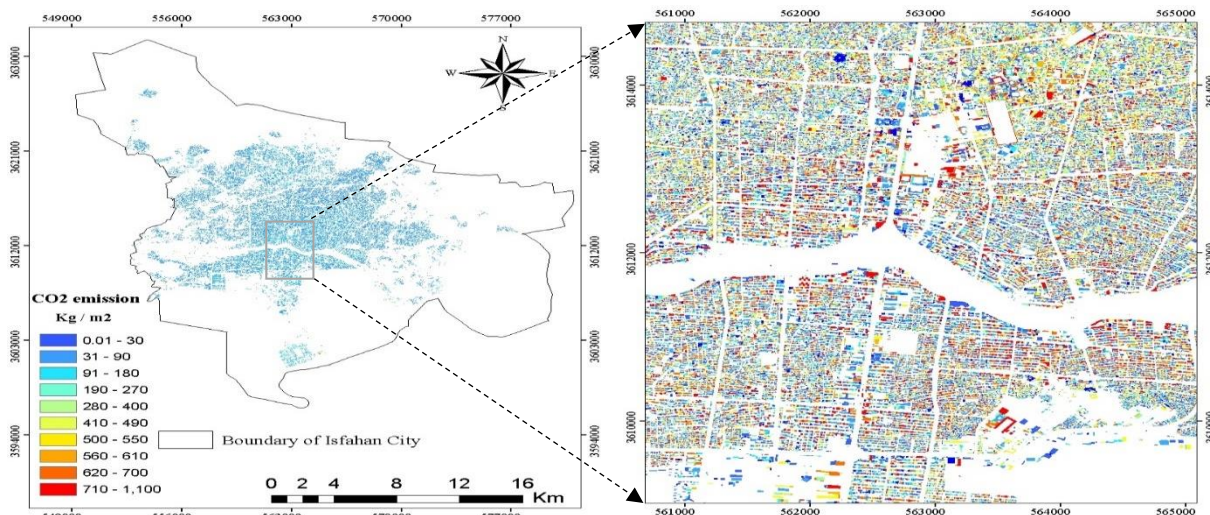
مجموع انتشار این گاز در بخش ریلی ۲۸۴۴ تن در سال ۱۳۹۷ می‌باشد. نقشه توزیع انتشار سالانه دی اکسید کربن در این بخش می‌باشد (شکل ۷B).

- نقشه توزیع مکانی میزان انتشار سالانه دی اکسید کربن حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش حمل و نقل غیر جاده‌ای (بخش کشاورزی)

مساحت اراضی کشاورزی در محدوده مناطق ۱۵ گانه شهر اصفهان حدود ۱۳۷۲۴ هکتار می‌باشد. بر اساس آمار نامه شهر اصفهان حدود سه‌هزار و ۴۵۰ دستگاه ماشین‌آلات کشاورزی در این اراضی فعالیت می‌کنند. از آنجا که به‌طور متوسط، هر دستگاه سالانه هزار و ۲۰۰ ساعت فعالیت دارد و هر ساعت ۱۴ لیتر سوخت مصرف می‌کند، بنابراین می‌توان بیان کرد به‌طور متوسط هر دستگاه ماشین‌آلات کشاورزی حدود ۱۶ هزار و ۸۰۰ لیتر در سال سوخت مصرف می‌کند که مجموع گازوئیل مصرفی در بخش کشاورزی ۵۷/۹۶ میلیون لیتر در سال می‌باشد. مجموع میزان گاز دی اکسید کربن انتشار یافته از بخش حمل و نقل کشاورزی ۱۵۷۶۲۰/۴۸ تن در سال ۱۳۹۷ می‌باشد. در نهایت به‌منظور تهیه نقشه توزیع مکانی CO₂ انتشار یافته از اراضی کشاورزی، مقدار کل CO₂ منتشر شده سالانه بر مساحت زمین‌های کشاورزی تحت کشت در محدوده شهر اصفهان تقسیم شد، نتیجه آن در شکل ۷A ارائه شده است. نقشه توزیع مکانی گاز گلخانه‌ای CO₂ در بخش کشاورزی بیانگر این است که در هر متر مربع از زمین‌های کشاورزی محدوده مناطق ۱۵ گانه شهر اصفهان سالانه حدود ۱/۱۴۸۵ کیلوگرم دی اکسید کربن به اتمسفر منتشر می‌شود.

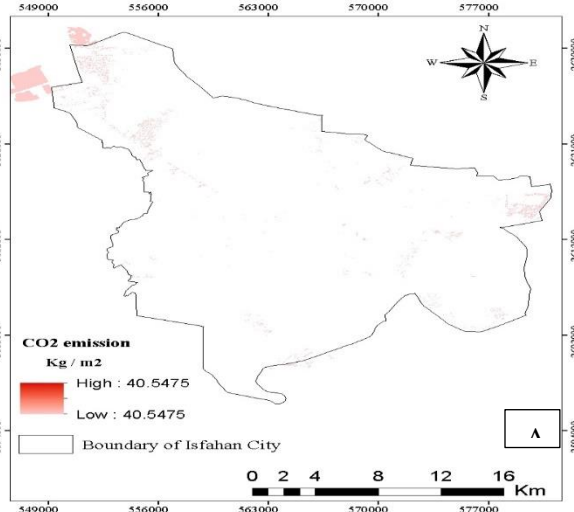
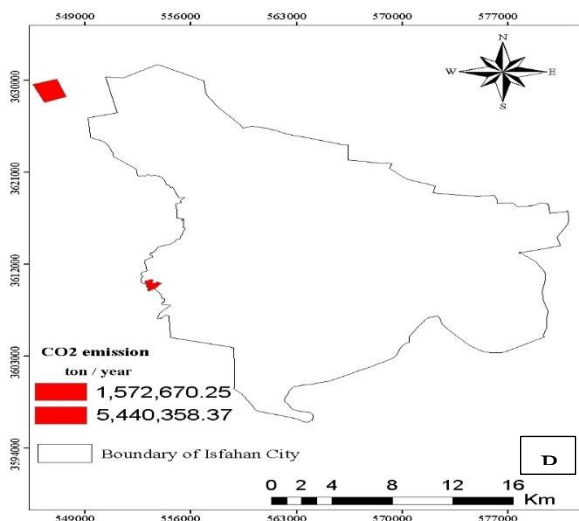
• روی هم گذاری نقشه های توزیع مکانی گاز گلخانه ای دی اکسید کربن ناشی از منابع احتراقی ثابت و متحرک

نقشه های توزیع انتشار CO_2 هر یک از منابع با استفاده از تحلیل هم پوشانی با هم روی هم گذاری شد. شکل ۸ نتیجه روی هم گذاری نقشه توزیع مکانی انتشار گاز دی اکسید کربن سالانه در سطح شهر اصفهان را نشان می دهد. به طور کلی این نقشه نشان می دهد، میزان انتشار دی اکسید کربن، ناشی از اکسید شدن هیدروکربن ها در طول فرآیند احتراق سوخت های فسیلی در محدوده شهر اصفهان ۱۳۸۵۵۵۲۵/۸۴ تن در سال می باشد که هر کدام از کاربری های مسکونی، تجاری-عمومی، صنعتی، نیروگاهی، حمل و نقل جاده ای-ریلی و حمل و نقل غیرجاده ای (ماشین آلات کشاورزی) به ترتیب ۲۱/۷۸، ۴/۹۲، ۴/۳۷، ۵۰/۶۱، ۱۷/۱۸ و ۱/۱۴ درصد از کربن ناشی از احتراق سوخت های فسیلی را به جو منتشر می کنند.



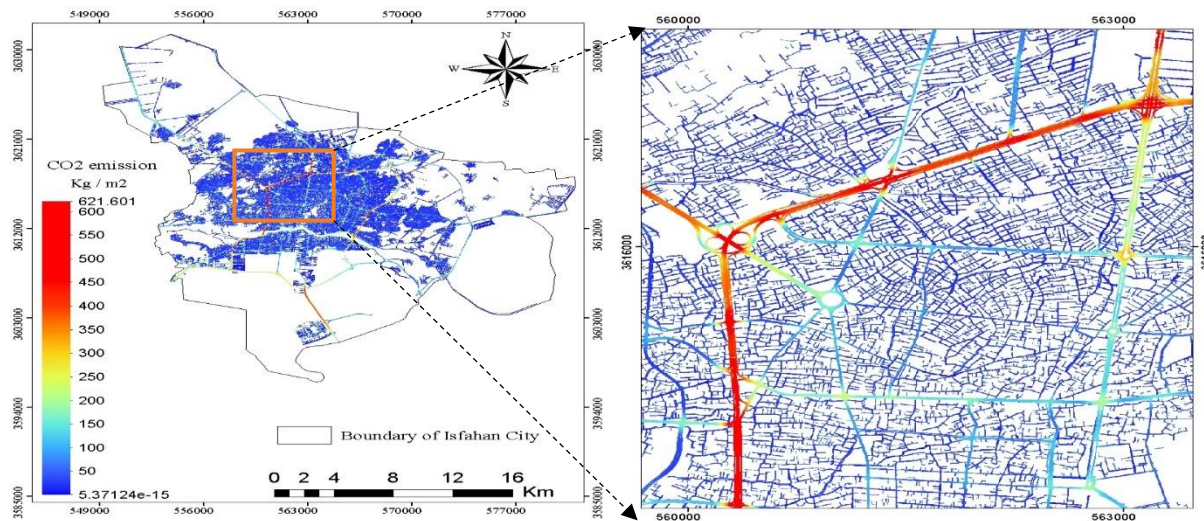
شکل ۲. نقشه توزیع مکانی انتشار سالانه گاز CO_2 ناشی از احتراق سوخت های فسیلی در بخش خانگی و عمومی -

تجاری



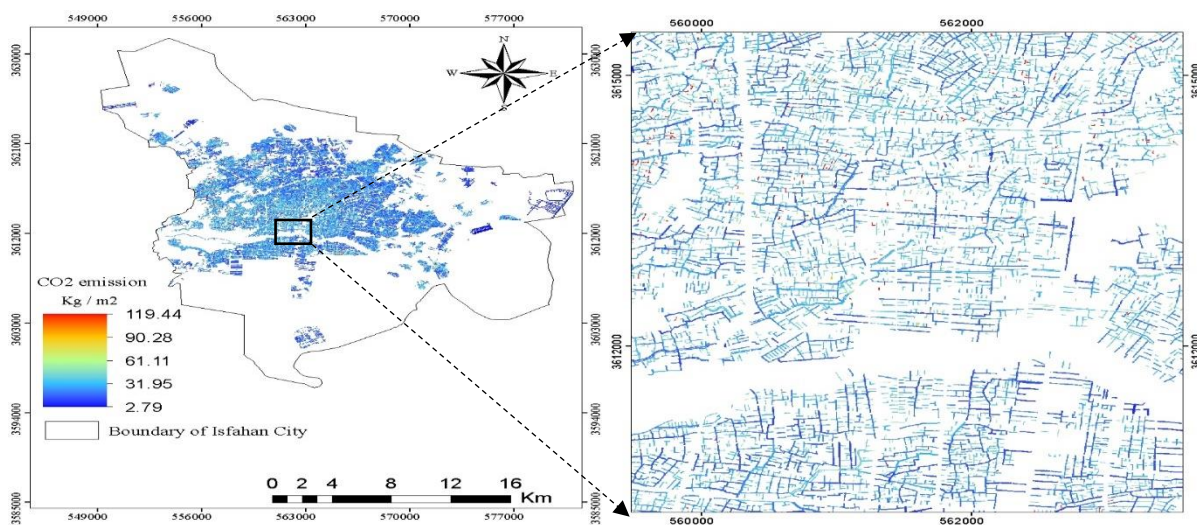
شکل ۳. نقشه توزیع مکانی انتشار سالانه گاز CO₂ ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در بخش صنعتی (A) و بخش

نیروگاهی (B)



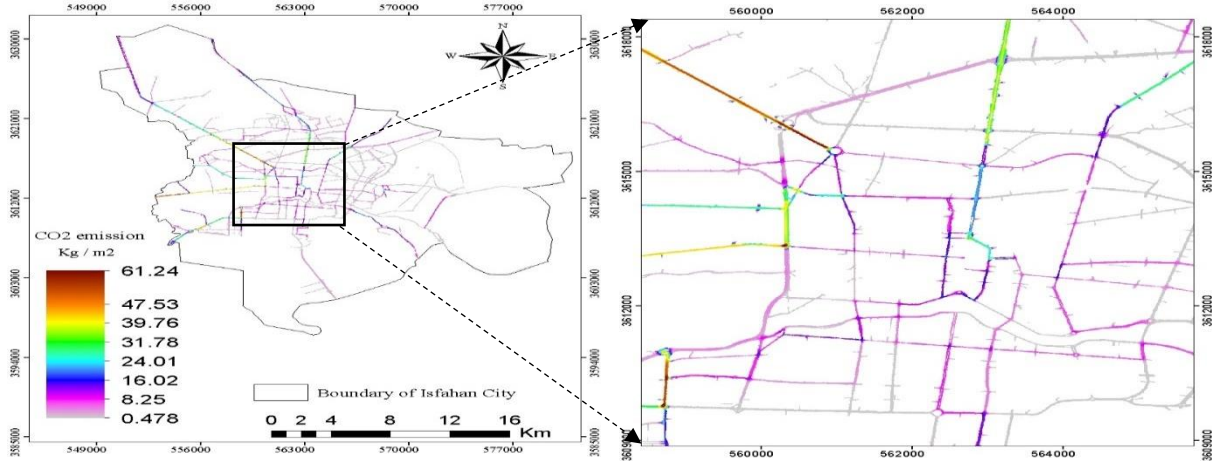
شکل ۴. نقشه توزیع مکانی انتشار سالانه گاز CO₂ ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی از خودروهای سبک در خیابان-

های اصلی

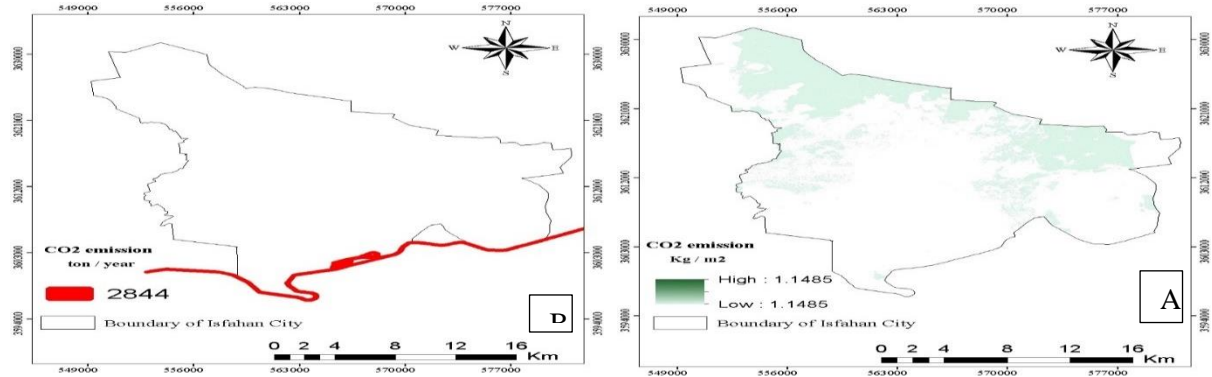


شکل ۵. نقشه توزیع مکانی انتشار سالانه گاز CO₂ ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی از خودروهای سبک در خیابان-

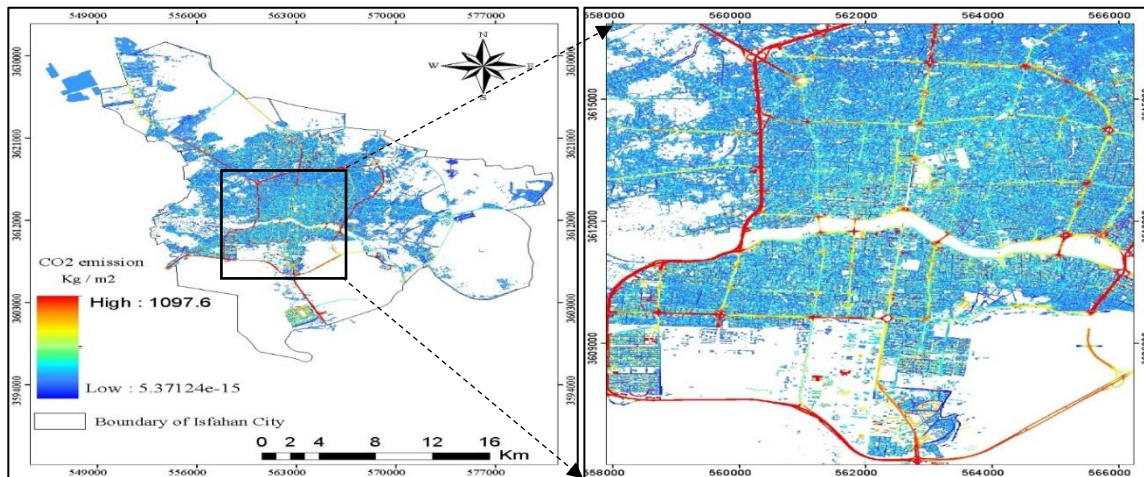
های فرعی



شکل ۶. نقشه توزیع مکانی انتشار سالیانه گاز CO₂ ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی از حمل و نقل عمومی در خطوط حمل و نقل عمومی



شکل ۷. نقشه مکانی انتشار سالیانه گاز CO₂ ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در اراضی کشاورزی (A) و حمل و نقل ریلی در محدوده شهر اصفهان (B)



شکل ۸. نقشه توزیع مکانی گاز گلخانه‌ای کربن دی اکسید ناشی از منابع احتراقی ثابت و متحرک (بخش خانگی، تجاری - عمومی، صنعتی و حمل و نقل جاده‌ای)

نتیجه‌گیری

انتشار دی‌اکسید کربن حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی در مناطق شهری به‌عنوان بزرگ‌ترین شار خالص سالانه این گاز به‌جمله‌ها می‌باشد. در این مطالعه برای اولین بار با استفاده از روش پایین به بالا، کمی‌سازی انتشار سالانه دی‌اکسید کربن حاصل از سوخت‌های فسیلی و توزیع مکانی آن در بخش‌های مختلف نیروگاهی، مسکونی، تجاری-عمومی، صنعتی، حمل و نقل جاده‌ای و ریلی و حمل و نقل غیر جاده‌ای (ماشین‌آلات کشاورزی) در شهر اصفهان انجام گرفت. به‌طور کلی، نتایج نشان داد میزان انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از اکسید شدن هیدروکربن‌ها در طول فرآیند احتراق سوخت‌های فسیلی ۱۳۸۵۵۵۲۵/۸۴ تن در سال در محدوده شهر اصفهان می‌باشد. همچنین یافته‌های این پژوهش بیانگر این است، بیشترین میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن مربوط به بخش نیروگاهی، خانگی و حمل و نقل می‌باشد. نتایج این پژوهش تأیید می‌کند در صورت به‌کارگیری این روش در مقیاس شهری، منطقه‌ای و جهانی، مدیران و برنامه‌ریزان شهری و محیط‌زیست قادر خواهند بود از نتایج آن جهت ارائه راهکارهای مختلف به‌منظور کاهش انتشار گاز CO₂ در جهت رسیدن به اهداف پیمان‌نامه‌های مختلف محیط‌زیستی از جمله کنوانسیون تغییرات آب‌وهوایی (UNFCCC) (۱۹۹۰)، پروتکل کیوتو (۱۹۹۷) و کنوانسیون پاریس (۲۰۱۵) و همچنین جهت دستیابی به توسعه پایدار استفاده نمایند. با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان راهکارهایی در برنامه‌ریزی شهری به‌منظور کاهش میزان انتشار و جذب گاز دی‌اکسید کربن در سطح شهر اصفهان ارائه داد. از جمله این راهکارها می‌توان به جداسازی کربن از منابع اصلی رها سازی (مانند نیروگاه‌های سوخت فسیلی) و انتقال آن به سایت‌های ذخیره‌سازی (تزیق دی‌اکسید کربن به مخازن زیرزمینی نفت به‌منظور افزایش استخراج آن، ذخیره‌سازی این گاز در مخازن نفت و گاز تهی‌شده، ذخیره‌سازی در سفره‌های آب شور زیر زمینی) اشاره کرد. همچنین، استفاده از انرژی خورشیدی و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح شهر اصفهان می‌تواند باعث کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی شود. علاوه بر این، می‌توان با گسترش فضای سبز و درخت‌کاری در مناطق با میزان انتشار بالا جذب دی‌اکسید کربن توسط پوشش گیاهی را افزایش داد.

منابع

- Andres, R. J.; J. S. Gregg, L. Losey, G. Marland, and T. A. Boden. ۲۰۱۱. Monthly, global emissions of carbon dioxide from fossil fuel consumption. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, ۶۳, ۳۰۹-۳۲۷. doi.org/10.1111/j.1600-0889.2011.00530.x
- Brandon, P. S. and P. Lombardi. ۲۰۰۹. *Evaluating sustainable development: in the Built Environment*. John Wiley & Sons.
- Change, I. P. O. C. ۲۰۰۶. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. *Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan*.
- Churkina, G. ۲۰۰۸. Modeling the carbon cycle of urban systems. *ecological modelling*, ۲۱۶, ۱۰۷-۱۱۳. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.03.006
- EPA, U. ۲۰۱۷. Center for Corporate Climate Leadership GHG Emission Factors Hub.
- Eslami, M. and K. Faez. ۲۰۱۰. Automatic traffic monitoring from satellite images using artificial immune system. In *Joint IAPR International Workshops on Statistical Techniques in Pattern Recognition (SPR) and Structural and Syntactic Pattern Recognition (SSPR)*, ۱۷۰-۱۷۹. Springer. doi.org/10.1007/978-3-642-14980-1_116
- Fan, Y. ; L.-C. Liu, G. Wu, and Y.-M. Wei. ۲۰۰۶. Analyzing impact factors of CO₂ emissions using the STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*, ۲۶, ۳۷۷-۳۹۵. doi.org/10.1016/j.eiar.2005.11.007
- Forouzandeh, K. ۲۰۰۹. Comparison of environmental effects of rail and road transport *Silk Road*, ۱۰۲.
- Grimm, N. B.; S. H. Faeth, N. E. Golubiewski, C. L. Redman, J. Wu, X. Bai, and J. M. Briggs. ۲۰۰۸. Global change and the ecology of cities. *science*, ۳۱۹, ۷۵۶-۷۶۰. DOI: 10.1126/science.1150190
- Gurney, K. R.; J. Liang, D. O'Keefe, R. Patarasuk, M. Hutchins, J. Huang, P. Rao and, Y. Song. ۲۰۱۹a). Comparison of global downscaled versus bottom-up fossil fuel CO₂ emissions at the urban scale in four US urban areas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, ۱۲۴, ۲۸۲۳-۲۸۴۰. doi.org/10.1029/2018JD.28809
- Gurney, K. R.; R. Patarasuk, J. Liang, Y. Song, D. O'keefe, P. Rao, J. R. Whetstone, R. M. Duren, A. Eldering, and C. Miller. ۲۰۱۹b. The Hestia fossil fuel CO₂ emissions data product for the Los Angeles megacity (Hestia-LA). *Earth System Science Data*, ۱۱. doi.org/10.5194/essd-11-1309-2019
- Gurney, K. R.; I. Razlivanov, Y. Song, Y. Zhou, B. Benes, and M. Abdul-Massih. ۲۰۱۲. Quantification of fossil fuel CO₂ emissions on the building/street scale for a large US city. *Environmental science & technology*, ۴۶, ۱۲۱۹۴-۱۲۲۰۲. doi.org/10.1021/es3011282
- Hamburg, S. P.; N. Harris, J. Jaeger, T. R. Karl, M. McFarland, J. F. Mitchell, M. Oppenheimer, B. D. Santer, S. Schneider, and K. E. Trenberth. ۱۹۹۷. Common questions about climate change. *United Nation Environment Programme, World Meteorology Organization*.
- Hansen, J.; M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner, V. Masson-Delmotte, M. Pagani, M. Raymo, D. L. Royer, and J. C. Zachos. ۲۰۰۸. Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *arXiv preprint arXiv:0804.1126*. DOI: 10.21203/18742823.0802010217
- Herzog, T. ۲۰۰۹. World greenhouse gas emissions in ۲۰۰۵. *World Resources Institute*. <http://www.wri.org/publication/navigating-the-numbers>.
- Houghton, J. ۲۰۰۱. *Climate Change ۲۰۰۱: The Scientific Basis*.
- Inoue, M.; I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, and C. Sweeney. ۲۰۱۳. Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data. *Atmos. Chem. Phys*, ۱۳, ۹۷۷۱-۹۷۸۸. doi.org/10.5194/acp-13-9771-2013
- Lal, R. ۲۰۰۴. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, ۱۲۳, ۱-۲۲. doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- Larsen, S. Ø.; J. Amlien, H. Koren, and R. Solberg. ۲۰۰۸. Mapping road traffic conditions using high resolution satellite images. In *Proceedings of GEOBIA*, ۱-۶.

- Maksyutov, S.; H. Takagi, V. Valsala, M. Saito, T. Oda, T. Saeki, D. Belikov, R. Saito, A. Ito, and Y. Yoshida. ۲۰۱۳. Regional CO₂ flux estimates for ۲۰۰۹-۲۰۱۰ based on GOSAT and ground-based CO₂ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۱۳, ۹۳۵۱-۹۳۷۳. [doi:10.5194/acpd-12-29230-2012](https://doi.org/10.5194/acpd-12-29230-2012)
- Manual, E. S. ۲۰۰۵. Energy Statistics Division of the International Energy Agency (IEA) in co-operation with the Statistical Office of the European Communities (Eurostat). *Paris, France*.
- Oda, T. and S. Maksyutov. ۲۰۱۱. A very high-resolution (۱ km² × ۱ km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۱۱, ۵۴۳. doi.org/10.5194/acp-11-543-2011
- Oda, T.; S. Maksyutov, and R. J. Andres. ۲۰۱۸. The Open-source Data Inventory for Anthropogenic Carbon dioxide (CO₂), version ۲۰۱۶ (ODIAC_{۲۰۱۶}): A global, monthly fossil-fuel CO₂ gridded emission data product for tracer transport simulations and surface flux inversions. *Earth system science data*, ۱۰, ۸۷. doi.org/10.5194/essd-10-87-2018
- Oil, M. o. ۲۰۱۸. General Department of Health, Safety, Environment and Passive Defense, guide for calculating and reporting greenhouse gas emissions.
- Peters, R. W. ۲۰۰۱. Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change--An Overview. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, ۲۰, A۴.
- Petit, J.-R.; J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, and G. Delaygue. ۱۹۹۹. Climate and atmospheric history of the past ۴۲۰,۰۰۰ years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, ۳۹۹, ۴۲۹. doi.org/10.1038/۲۰۸۵۹
- Robinson, S. a. ۲۰۲۰. Climate change adaptation in SIDS: A systematic review of the literature pre and post the IPCC Fifth Assessment Report. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, e۶۵۳. doi.org/10.1002/wcc.۶۵۳
- Scott, N.; K. Tate, D. Giltrap, C. T. Smith, H. Wilde, P. Newsome, and M. Davis. ۲۰۰۲. Monitoring land-use change effects on soil carbon in New Zealand: quantifying baseline soil carbon stocks. *Environmental Pollution*, ۱۱۶, S۱۶۷-S۱۸۶. [doi.org/10.1016/S0269-74۹۱\(۰۱\)۰۰۲۴۹-۴](https://doi.org/10.1016/S0269-74۹۱(۰۱)۰۰۲۴۹-۴)
- Shires, T. M.; C. J. Loughran, S. Jones, and E. Hopkins. (۲۰۰۹). Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry. *Prepared by URS Corporation for the American Petroleum Institute (API). API, Washington DC*.
- Solomon, S.; M. Manning, M. Marquis, and D. Qin. ۲۰۰۷. *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge university press.
- Stern, N. and N. H. Stern. ۲۰۰۷. *The economics of climate change: the Stern review*. Cambridge University press.
- Turnbull, J. C.; C. Sweeney, A. Karion, T. Newberger, S. J. Lehman, P. P. Tans, K. J. Davis, T. Lauvaux, N. L. Miles, and S. J. Richardson. ۲۰۱۵. Toward quantification and source sector identification of fossil fuel CO₂ emissions from an urban area: Results from the INFLUX experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, ۱۲۰, ۲۹۲-۳۱۲. doi.org/10.1002/۲۰۱۴JD۰۲۲۵۵۵
- Uddin, W.; A. Ahmed, and M. Ali. ۲۰۱۳. Satellite Imagery Applications of Urban Road Inventory, Traffic Flow Attributes, and Road Capacity Assessment. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, ۱. www.ijrdet.com (ISSN ۲۳۴۷-۶۴۳۵)
- Wan, J.-Z.; C.-J. Wang, H. Qu, R. Liu, and Z.-X. Zhang. ۲۰۱۸. Vulnerability of forest vegetation to anthropogenic climate change in China. *Science of The Total Environment*, ۶۲۱, ۱۶۳۳-۱۶۴۱. doi.org/10.1016/j.scitotenv.۲۰۱۷.۱۰.۰۶۵