

Research Article

Dor:

Assessing the Effects of the Urban Spatial Organization Development in Proportion to the Reduction of Carbon Production in the Urban compact Development Framework (Case Study: Amol City)

Mohammad Ebrahimi Sarai^{۱*}, Akbar Abdullahzadeh^۲, Mirsaid Mousavi^۳ & Bita Bagheri^۴

^۱. PhD candidate in urban planning, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^۲. Associate Professor, Department of urban planning, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^۳. Associate Professor, Department of urban planning, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^۴. Assistance Professor, Department of urban planning, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

* Corresponding author: Email: Stt_ebrahimi@yahoo.com

Receive Date.....

Accept Date:.....

ABSTRACT

Introduction: Following the urbanization development in recent few decades and increasing use of transportation means in parallel with the growth of travel, has led to an increase in air pollution and carbon production, which in the last decade has become an important problem for the country's metropolises, especially tourist north cities such as Amol. According to some official statistics and data, It's been a while since the problem of air pollution, calmly, has also overshadowed the land of Mazandaran and has affected the favorable air quality of this province.

Research aim: Evaluating the effects of urban spatial organization development in proportion to the reduction of carbon production in urban compact development framework is the purpose of the study.

Methodology: In this study, with the help of metric correlation test results and its various combinations with the consumption of fossil fuels, the spatial pattern of carbon emissions in Amol has been evaluated.

Studied Areas: The geographical area of this research is the city of Amol.

Results: The results indicate that it seems the main factor of Amol traffic as the source of pollution is the lack of proper distribution of activities and more scientifically, it is the spatial imbalance of activities which its root can be traced back to the spatial structure of Amol. On the other hand, carbon emissions in the current situation indicate that urban textures, blocks, and neighborhoods with high density and compaction produce less carbon. Also the probable trend of the urban development and the spatial pattern of carbon emissions in the next five years demonstrate that the spatial structure of Amol will be directed towards compact development and thus sustainability, and accordingly, the amount of carbon production will also be in an optimal status. Meanwhile, on the edges of the main roads and arteries of the city (the size of a plaque), carbon production shows a noticeable increase compared to other parts of the city.

Conclusions: The examination of the spatial pattern of carbon emissions in Amol proves that by maintaining the current pattern of the city form along with the promotion of low-carbon urban elements and functions such as increasing green and refined spaces in densely populated areas, mixing and intensifying land uses, promoting Low-carbon transportation such as strengthening pedestrian and bicycle paths, improving the public transportation system and increasing low-carbon axes such as directing passing traffic through the belt around the city and so on, can optimize the spatial structure of Amol in the process of less carbon production.

KEYWORDS: Fossil fuels consumption, Carbon, Spatial structure, Compact development, Amol city

ارزیابی اثرات توسعه سازمان فضایی شهری متناسب با کاهش تولید کربن در چارچوب توسعه فشرده شهری (مطالعه موردی: شهر آمل)

محمد ابراهیمی سرائی^{۱*}، اکبر عبدالله زاده، میرسعید موسوی^۳ و بیتا باقری^۴

۱. دانش آموخته دکتری شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲. استادیار گروه شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۳. استادیار گروه شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۴. استادیار گروه شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

* نویسنده مسئول: Email: stt_ebrahimi@yahoo.com

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

چکیده

مقدمه: در پی توسعه شهرنشینی در چند دهه اخیر و افزایش استفاده از وسایل حمل و نقل به موازات رشد سفرها، زمینه افزایش آلودگی هوا و تولید کربن را منجر گشته که در یک دهه اخیر به معضلی مهم برای کلانشهرهای کشور به ویژه شهرهای توریستی شمال کشور همچون شهر آمل تبدیل شده است. به استناد برخی آمارها و داده‌های رسمی، مدتی است که معضل آلودگی هوا، آرام و بی صدا بر دیار مازندران نیز سایه افکنده و کیفیت هوای مطلوب این استان را تحت شعاع قرار داده است.

هدف: هدف از این پژوهش ارزیابی اثرات توسعه سازمان فضایی شهری متناسب با کاهش تولید کربن در چارچوب توسعه فشرده شهری می باشد.

روش‌شناسی تحقیق: در این پژوهش با کمک نتایج آزمون همبستگی متریک‌ها و ترکیب‌های مختلف آن با مصرف سوخت‌های فسیلی، صورت الگوی فضایی انتشار کربن در شهر آمل مورد ارزیابی قرار گرفته است.

قلمرو جغرافیایی پژوهش: قلمرو جغرافیایی این پژوهش، شهر آمل می‌باشد.

یافته‌ها: یافته‌ها حاکی از آن است که، بنظر می‌رسد عامل اصلی ترافیک آمل به عنوان منشا آلودگی، عدم توزیع مناسب فعالیت‌ها و به صورت علمی‌تر عدم تعادل فضایی فعالیت‌هاست که ریشه آن را می‌توان در ساختار فضایی آمل جست. از سویی انتشار کربن در وضع موجود حکایت از آن دارد که که بافت‌ها، بلوک‌ها و محله‌هایی که تراکم و فشردگی بالایی دارند، کربن کمتری تولید می‌کنند. همچنین روند احتمالی توسعه شهر و الگوی فضایی انتشار کربن در پنج سال آینده بیانگر این موضوع است که ساختار فضایی شهر آمل به سمت توسعه فشرده و در نتیجه پایداری هدایت می گردد و بر این اساس میزان تولید کربن نیز در وضعیت مطلوبی قرار می‌گیرد. در این بین در حاشیه معابر و شریان‌های اصلی شهر (به اندازه یک پلاک) تولید کربن نسبت به سایر نقاط شهر افزایش محسوسی را نشان می‌دهد.

نتایج: بررسی الگوی فضایی انتشار کربن در شهر آمل گواه آن است که با حفظ الگوی کنونی شکل شهر همراه با ارتقای عناصر و عملکردهای شهری کم کربن نظیر افزایش فضاهای سبز و پالایند در نواحی پرتراکم، اختلاط و تشدید کاربری‌ها، ارتقای حمل و نقل کم کربن نظیر تقویت مسیرهای پیاده و دوچرخه و بهبود سیستم حمل و نقل عمومی و افزایش محورهای کم کربن نظیر هدایت ترافیک عبوری به کمربندی دور شهر و نظایر آن می‌توان ساختار فضایی شهر آمل را در مسیر تولید کربن کمتر بهینه ساخت.

کلیدواژه‌ها: مصرف سوخت‌های فسیلی، کربن، ساختار فضایی، توسعه فشرده، شهر آمل

مقدمه

شواهد موجود نشان‌دهنده آن است که گرم شدن کره زمین هم‌اکنون در حال اتفاق افتادن است و طی این قرن به عنوان یکی از پیامدهای انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط انسان ادامه می‌یابد. افزایش دمایی پیش‌بینی شده، می‌تواند عامل بروز تغییرات بزرگی در اکوسیستم‌های سراسر زمین باشد. چالش اصلی، چگونگی ایجاد تغییرات اساسی در نحوه تولید انرژی است که می‌تواند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در حد ۷۰ تا ۸۰ درصد را طی این قرن موجب شود. همچنین، نیابت دو میلیارد انسان بی‌بهره از دسترسی به انرژی کافی و انسان‌هایی که به زودی به جمعیت جهان اضافه خواهند شد را نادیده بگیریم (گولدن و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۷). در چند دهه اخیر تغییرات سریع آب و هوایی به نگرانی عمده محافل علمی بدل گردیده است. در آغاز هزاره سوم دمای متوسط جهانی ۰٫۴ تا ۰٫۸ درجه سلسیوس افزایش یافته است و پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۱۰۰، ۱٫۴ تا ۵٫۸ درجه سلسیوس به دمای کره زمین اضافه گردد (Pani and Mukhopadhyay, ۲۰۱۰). در طول تاریخ طولانی سیاره زمین اگرچه میان دوره‌های سرما و گرما نوساناتی بوده است، ولی عمدتاً این نوسانات با فاصله چند قرن اتفاق می‌افتاد. سرعت تغییرات هرگز همانند سرعت این چند سال اخیر نبوده است (NOAA, ۲۰۱۱).

بیش از ۷۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در مناطق شهری تولید می‌شوند (International Energy Agency, ۲۰۱۹). انتشار کربن به شکل CO₂ یکی از عمده‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی روندی افزایشی داشته است (Sil et al, ۲۰۱۷). لذا، انتظار می‌رود که رشد شهرنشینی و گسترش سریع وابسته به آن در مناطق توسعه یافته تا قرن بیست و یکم با سرعت بیشتری در کشورهای در حال توسعه ادامه یابد، این عامل پتانسیل ایجاد جزایر حرارتی و پریشانی‌های ناشی از گرما را در مناطق شهری افزایش می‌دهد. گسترش سریع شهرها به دلیل تغییرات گسترده در کاربری و پوشش زمین تأثیرات منفی بر کیفیت زیست محیطی جهانی داشته، از جمله کیفیت هوا، افزایش دما و تغییرات چشم انداز و همچنین تبدیل زمین‌های کشاورزی که منجر به از بین رفتن تنوع زیستی می‌شود. دمای سطح زمین شاخص مهمی در مطالعه مدل‌های تعادل انرژی در سطح زمین و فعل و انفعالات بین زمین و اتمسفر در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱). از مسائل مهم دیگر، در بررسی آب و هوا تأثیر زیادی است که در سلامتی موجودات زنده در یک منطقه دارد، مسئله آلودگی هوا است (شاه محمدی و همکاران، ۱۴۰۱). قرار گرفتن در معرض آلاینده‌ها و ذرات معلق در هوا منجر به تشدید بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی، کاهش ایمنی بدن، ابتلا به سرطان و مرگ زودرس می‌شود (آلودگی هوا و سلامت انسان، ۱۳۹۴). ریح فولر و همکارانش در سال ۲۰۱۹ در سازمان اتحاد جهانی بهداشت و آلودگی، تأثیر آلودگی هوا را بر مرگ‌های زودرس ارزیابی کردند و دریافتند که آلودگی هوا باعث مرگ ۹ میلیون نفر شده است. همچنین طبق گزارشات سازمان جهانی بهداشت، سالیانه حدود ۹۰۰ هزار نفر در اثر آلودگی هوا دچار مرگ زودرس می‌شوند (Cohen et al, ۲۰۲۰) در این میان، در کشور ایران آلودگی هوا سالانه باعث بروز ۴۱ هزار و ۷۰۰ مورد مرگ زودرس می‌شود (وزارت بهداشت، ۱۴۰۰).

بنظر می‌رسد که اشکال شهری و ساختارهای فضایی بر پایداری محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد (Burgalassi and Luzzati, ۲۰۱۵: ۷). به عبارتی دیگر، آلودگی هر شهر به طور مستقیم یا غیرمستقیم با ساختار فضایی آن در ارتباط بوده و از آن نشأت می‌گیرد. برای اثبات این ادعا دلایل متفاوتی وجود دارد، در این راستا می‌توان به مواردی این چنین اشاره نمود. ساختار فضایی شهر به عنوان یک کل سیستمی، از مجموعه‌ای از عناصر تشکیل می‌شود. ویژگی‌های منحصر به فرد هر عنصر که خود به عنوان یک سیستم زیر سیستم‌های دیگر را شامل می‌شود، عاملی مهم در جریان حیات یک شهر محسوب می‌شود. بر این اساس نظام کانون-ها، محورها و پهنه‌ها هر کدام بر حسب ویژگی‌های ذاتی و محیطی، چه به تنهایی و چه در ارتباط با دیگر عناصر، از مولفه‌های اصلی در تعیین میزان مطلوبیت یک شهر محسوب می‌شوند. از سویی دیگر، ساختار فضایی شهر از نظم یا بی‌نظمی خاص تبعیت می‌کند. این امر شکل کلی آن را تعیین کرده، و اگرچه تنها جسم کالبدی شهر را شکل می‌دهد اما در عمل روح حاکم بر زندگی شهری از آن نشأت می‌گیرد (Bertaud: ۲۰۰۱). پژوهش‌های مختلفی نشان دهنده اهمیت پرداختن به ساختار فضایی شهر می‌باشد. نتایج مطالعات بیانگر تأثیر احتمالی اشکال ساختار فضایی شهر نظیر الگوهای فشرده شهری با تراکم مسکونی بالاتر در برابر توسعه‌های پراکنده با تراکم مسکونی پایین تر، تراکم اشتغال یا پراکندگی آن و توسعه‌های با محوریت حمل و نقل عمومی در برابر توسعه‌های متکی بر اتومبیل شخصی در میزان انتشار مواد آلاینده هوا هستند (Rodrigue et al, ۲۰۱۹).

ساختار فضایی شهر اثرات بسیار زیادی بر کارآمدی و کیفیت زیست محیطی شهر دارد. فرم و الگوی یک شهر و نحوه پراکندگی جمعیت و کاربری‌ها و فعالیت‌های شهری در کیفیت هوا و به دنبال آن شاخص‌های دیگر شهر، موثر می‌باشد (قدمی، یوسفیان، ۱۳۹۴: ۶۷). تراکم مردم، زیرساخت‌ها و خدمات اکوسیستم باعث می‌شود مناطق شهری مکان اصلی برای سازگاری تغییرات آب و هوایی باشند. با توجه به انتشار گازهای گلخانه‌ای گذشته و فعلی، ما با برخی از تغییرات آب و هوایی شتابان روبرو هستیم و بعید است که در آینده‌ای نزدیک میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به طور قابل توجهی کاهش یابد (۱۷: Hughes, ۲۰۱۵). سازمان هواشناسی جهانی در کنگره جهانی هواشناسی اخیر تأکید کرد که شهرنشینی سریع که در حال حاضر رخ می‌دهد، نیازمند انواع جدیدی از خدمات است که بهترین استفاده از علم و فناوری را داشته باشند و این مسئله را یکی از اولویت‌های اصلی آن می‌دانند (Masson et al, ۲۰۱۷: ۶).

براساس آخرین اطلاعات موجود بانک جهانی، میزان انتشار دی اکسید کربن به عنوان مهمترین گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف انواع سوخت‌های فسیلی در جهان از حدود ۹,۳ میلیارد متریک تن در سال ۱۹۶۰ با نرخ رشد سالانه ۲,۶ درصد حدود ۳,۷ برابر افزایش یافته است. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، ایران با انتشار ۵۲۱ میلیون تن گاز دی اکسید کربن پس از کشورهای چین، آمریکا، هند، روسیه، ژاپن، آلمان، کره و کانادا، در جایگاه نهم جهان قرار داشته است. بر اساس این آمار کشورهایی که انتشار گاز دی اکسید کربن بیشتری نسبت به ایران دارند جزء اقتصادهای پیشرفته و یا در حال گذار هستند و حجم فعالیت اقتصادی بسیار بالایی دارند. از این رو چنین جایگاهی برای اقتصاد ایران چندان منطقی نبوده و تأمل‌انگیز است. ادامه چنین وضعیتی در آینده پیامدهای سیاسی، اقتصادی، محیط زیستی زیادی را برای کشور در پی خواهد داشت که باید بدان توجه خاص شود (حیدرزاده و همکاران، ۱۳۹۶).

در مقایسه با تحولات جهان، بررسی روند توسعه در ایران نشان می‌دهد که طی پنج دهه گذشته نسبت جمعیت شهرنشین کشور از ۳۱/۶ درصد به ۶۸/۳ درصد افزایش پیدا کرده است و در حالیکه جمعیت کشور طی سه دهه اخیر افزایشی دو برابری را تجربه کرده و از حدود ۳۳/۷ میلیون نفر در سال ۱۳۵۵ به ۸۵ میلیون نفر در سال ۱۴۰۰ رسیده است (مرکز آمار ایران)، مصرف نهایی انرژی در همین بازه از میزان ۱۷۳/۴ میلیون بشکه نفت خام^۱ به حدود ۹۹۷/۳ میلیون بشکه افزایش یافته و رشدی ۵/۷ برابری را تجربه کرده است (دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو). عمده انرژی کشور از طریق سوخت‌های فسیلی تامین می‌گردد و روند تصاعدی مصرف انرژی در سال‌های اخیر باعث شده تا طبق گزارش آژانس اطلاعات انرژی آمریکا و سازمان بهداشت جهانی، ایران رتبه دهم تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای و رتبه هشتم آلودگی هوا را در جهان به خود اختصاص دهد. به همین ترتیب، بررسی روند توسعه در شهر آمل نشان می‌دهد در حالی که جمعیت شهر آمل طی سه و نیم دهه اخیر افزایش تقریباً سه برابری را تجربه کرده است (مرکز آمار ایران)، مصرف انرژی نیز در همین بازه افزایش چشم‌گیری یافته است. ترافیک شهر آمل، سطوح بالای اختصاص یافته به کاربری مسکونی و کمبود فضای سبز عوامل اصلی تولید کربن و در نتیجه آلودگی شهر آمل هستند. بنظر می‌رسد عامل اصلی ترافیک آمل عدم توزیع مناسب فعالیت‌ها و به صورت علمی‌تر عدم تعادل فضایی فعالیت‌هاست که ریشه آن را می‌توان در ساختار فضایی آمل جست. بنابراین مساله‌ای که از واقعیت موجود یعنی تولید کربن بالا و آلودگی شهر آمل نشأت گرفته است. لذا هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی اثرات توسعه سازمان فضایی شهری متناسب با کاهش تولید کربن در چارچوب توسعه فشرده شهری می‌باشد.

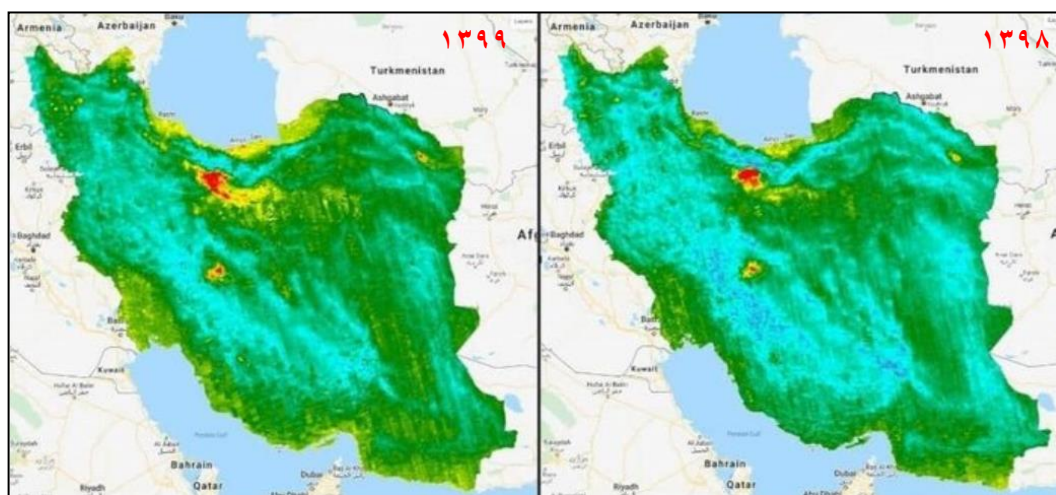
آلودگی هوا در زمستان و پدیده وارونگی هوا که در یک دهه اخیر به معضلی مهم برای کلانشهرهای کشور تبدیل شده و نفس پایتخت‌نشینان را در برخی روزها بند می‌آورد و گاهی هم سبب افزایش سفرها به مازندران می‌شود، به استناد برخی آمارها و داده‌های رسمی حالا مدتی است که آرام و بی صدا بر مازندران هم سایه افکنده و کیفیت هوای این استان را کاهش داده است. هرچند که تصور درگیری مازندران با آلودگی هوا و پدیده "اینورژن" یا وارونگی هوا که در تهران و کلانشهرها سال‌هاست که زمستان‌هایی آلوده را ایجاد می‌کند، دشوار است، اما واقعیت این است که مازندران برخلاف تصورات موجود، در بین استان‌های بالای جدول آلودگی هوا قرار دارد؛ موضوعی که طی چند سال اخیر اشاره‌هایی در قالب هشدارهای زیست‌محیطی به آن شد و اکنون همان هشدارها به واقعیت پیوسته است.

۱. مجموع کلیه انرژی‌های مصرف شده براساس مصرف نفت خام معادل سازی شده است.

دهم دی ماه سال ۱۳۹۶ با انتشار خبری مبنی بر آلودگی موقت هوای شهر آمل و قرار گرفتن این شهر در فهرست شهرهای آلوده کشور مشخص شد که پای آلودگی هوا به طور رسمی به مازندران هم باز شد. همان زمان از این موضوع به عنوان زنگ خطری در حوزه سلامت هوای مازندران یاد شده بود. حسینعلی ابراهیمی کارنامی مدیرکل حفاظت محیط زیست مازندران اعلام کرده بود که این آلودگی موقتی برای لحظاتی در آمل رخ داد و عامل آن هم افزایش مصرف سوخت زمستانی به دلیل سرد شدن هوا و همچنین ورود مقداری از جریانات شرقی از استان گلستان و فعالیت کانون‌های داخلی آلودگی بود.

این پدیده زیست محیطی سال‌های بعد هم تکرار شد و هر بار نیز هشدارها در باره احتمال آلودگی هوای مازندران در صورت کم‌توجهی به کنترل آلاینده‌ها افزایش یافت. دی ماه پارسال نیز مدیرکل حفاظت محیط زیست مازندران در همایش استانی روز ملی هوای پاک هشدارهای پیش‌تر مطرح شده را تکرار کرد و این بار صراحتاً گفت که آژیر قرمز آلودگی هوا در مازندران به صدا در آمده است.

در تصویر زیر می‌توان حداکثر تراکم مونوکسید کربن جو در آذر ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ را که با رنگ زرد نشان داده شده، به صورت مقایسه‌ای مشاهده کرد. در این تصویر دو نکته کاملاً مشهود است: نخست این که میزان آلودگی مونوکسیدی هوای مازندران در آذر ۱۳۹۹ نسبت به آذر ۱۳۹۸ بسیار بیشتر شده و دوم این که نوار شمالی کشور و بویژه مازندران و مناطق شرقی این استان پس از تهران و اصفهان میزان آلودگی بسیار بالایی دارد.



شکل ۱. مقایسه حداکثر تراکم آلاینده مونوکسید کربن جو در آذر ماه ۱۳۹۹ در مقایسه با آذرماه ۱۳۹۸

در ایران در راستای کاهش آلودگی‌های زیست محیطی در شهرها، تنها به کارایی انرژی و کاربری‌های زمین توجه شده است و تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه تاکنون از جامعیت و کارایی لازم برخوردار نبوده است. با توجه به اینکه بیشتر مطالعات صورت گرفته در ارتباط با موضوع پژوهش در سطح خارجی و داخلی، به تحلیل و ارزیابی روابط میان ساختار، شکل و فرم فضایی شهری و انتشار کربن دی اکسید پرداخته‌اند و کمتر تحقیقی به مقوله بهینه‌سازی و نقش توسعه فشرده در این امر متمرکز شده است؛ و با توجه به اینکه تفاوت‌های قابل توجهی در الگوهای شکل شهری و میزان انتشار کربن دی اکسید وجود دارد، پس پژوهش حاضر می‌کوشد پس از کمی‌سازی ساختار، شکل و فرم فضایی شهر آمل و تحلیل رابطه آن با انتشار کربن دی اکسید حاصل از سوخت‌های فسیلی، ساختار و شکل شهری را در جهت تولید کربن کمتر بهینه‌سازی کرده و الگوی فشرده ارائه دهد. بنابراین شاید بتوان گفت این تحقیق از بعد اینکه به طور مستقیم به ساختار و فرم شهر و نقش آن در کاهش آلودگی‌های زیست محیطی - کربن دی اکسید - می‌پردازد، پژوهشی است که به رغم اهمیت آن، کمتر در ایران به آن پرداخته شده است.

روش پژوهش

به طور کلی پژوهش حاضر در دو گام ذیل انجام گردیده است:

گام اول: در مرحله اول تغییرات پوشش زمین در سال‌های آینده پیش‌بینی شده است. برای این امر، نخست نقشه احتمال تغییر اراضی تولید شده، سپس متغیرهای پیش‌بینی انتخاب و نقشه‌های مربوط به هر متغیر تولید شده است و در نهایت نیز این داده‌ها وارد مدل شبکه عصبی پروسپترون چند لایه شده و نقشه پیش‌بینی پوشش زمین آمل تهیه شده است.

گام دوم: در مرحله دوم تولید کربن مدل‌سازی شده است. این امر با کمک نتایج آزمون همبستگی متریک‌ها و ترکیب‌های مختلف آن با مصرف سوخت‌های فسیلی صورت پذیرفته است و در نتیجه نیز الگوی فضایی انتشار کربن دی اکسید در شهر آمل به دست می‌آید.

متریک‌ها (سنجه‌های) سیمای سرزمین

همانطور که در بخش مبانی نظری مرور شد، سیمای سرزمین ابزارهایی برای اندازه‌گیری، کمی‌سازی و بیان وجه‌های مختلف از الگوی سیمای سرزمین در یک دوره زمانی است. متریک‌های سیمای سرزمین غالباً در ۳ سطح تشریح و محاسبه می‌شوند (Zhao et al, ۲۰۲۲):

(۱) متریک‌های سطح لکه: این متریک‌ها برای لکه‌های منفرد تعریف می‌شوند و ویژگی‌های فضایی و بافت لکه را اندازه‌گیری می‌کنند. سنجه‌های سطح لکه، ویژگی‌های لکه مثل اندازه، شکل و فاصله نزدیک‌ترین همسایه را کمی می‌کنند و به هر لکه یک ارزش واحد اختصاص می‌دهند.

(۲) متریک‌های سطح کلاس (طبقه): یک کلاس یا طبقه مجموعه‌ای از لکه‌های هم نوع و یا متعلق به یک نوع پوشش سرزمین است. در بیشتر کاربردها، ویژگی‌ها در سطح کلاس بیش از همه مورد توجه قرار می‌گیرند، زیرا گسترش و تکه تکه شدن یک کلاس خاص مورد توجه اصلی برنامه‌ریزان سیمای سرزمین است.

(۳) متریک‌های سطح سیمای سرزمین (موزائیک): این متریک‌ها در کل محدوده مورد بررسی محاسبه شده و برآیند ویژگی‌های لکه‌ها و کلاس می‌باشند. بیشتر متریک‌های سطح سیمای سرزمین می‌توانند به طور وسیعی به عنوان شاخص‌های همگونی سیمای سرزمین تفسیر شوند، زیرا آنها الگوهای کلی سیمای سرزمین را اندازه‌گیری می‌کنند.

در پژوهش حاضر، شهرستان آمل به عنوان سیمای سرزمین لحاظ شده است و به این ترتیب شهر آمل در سطح کلاس و ساختار فضایی، بافت و ویژگی‌های فضایی شهر آمل در سطح لکه مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفته است.

به طور کلی، متریک‌های سیمای سرزمین الگوریتم‌هایی برای کمی‌سازی ویژگی‌های مکانی لکه‌ها، کلاس‌ها، یا موزائیک‌های کل سیمای سرزمین هستند. این متریک‌ها در نزدیک کردن و همسو سازی زبان برنامه‌ریزان شهری و متخصصان اکولوژی اهمیت بسزایی دارند. متریک‌ها ویژگی شکلی، هندسی و ماهیت پراکنش و توزیع اجزای ساختاری سیمای سرزمین را قابل تعریف و مقایسه کمی با عدد و رقم می‌کنند (دهمرد و همکاران، ۱۴۰۲). این محاسبات کمی غالباً با کمک نرم افزار Fragstats صورت می‌پذیرد. سنجه‌ها و متریک‌های سیمای سرزمین ابزار مناسبی هستند که متغیرهای ساختار فضایی شهری (از حیث فشردگی، نظم و مرکزیت) کمی‌سازی شوند. لذا در طرح حاضر سنجه‌های سیمای سرزمین موردنظر جهت محاسبه معیارهای فضایی فشردگی، نظم و مرکزیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در انتخاب بهترین سنجه سیمای سرزمین، طبقه‌بندی سنجه‌ها مهم است. بنابراین ارزیابی خوشه‌بندی بر طبق فاصله اقلیدسی در ۳ سطح لکه، کلاس و سیمای سرزمین انجام شده که دارای بیشترین فاصله بوده‌اند. برای این امر، پس از تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی شده، این نقشه‌ها وارد نرم افزار Fragstats شده و در ۳ سطح کلاس، لکه و سیمای سرزمین برای مطالعه موردی محاسبه شده و سپس نتایج وارد نرم افزار Past گردیده و در نتیجه طبقه‌بندی خوشه‌ای در سطوح مختلف صورت پذیرفته است. سنجه‌هایی که دارای بیشترین فاصله بوده‌اند بیانگر این موضوع هستند که در دوره مطالعاتی بیشترین تغییرات را داشته‌اند و میزان تاثیر کدام سنجه بیشتر بوده است. در نهایت با کمک نتایج مربوط به آن، ساختار فضایی شهری بر مبنای سنجه‌های سیمای سرزمین در ۳ سطح کلاس، لکه و سیمای سرزمین بررسی و تحلیل شده است.

همچنین از آزمون همبستگی پیرسون در جهت کمی‌سازی روابط میان سنجه‌های سیمای سرزمین و میزان مصرف سوخت‌های فسیلی استفاده شده است. در ادامه، در جداول زیر نخست متریک‌های مرتبط با هر معیار ارائه شده و سپس سنجه‌های استفاده شده در پژوهش حاضر تشریح شده است.

جدول ۱. معرفی سنجه‌های مورد استفاده برای هر معیار

معیار	متریک (سنجه)
فشرده‌گی	PC
	AREA
	PA
	ED
	TE
نظم	SHAPE
	FRAC
	FRAC-MD
	PAFRAC
	PARA
	PARA-RA
مرکزیت	NE
	PRIM
	CONTING

تنظیم: نگارنده

جدول ۲. معرفی سنجه‌های مورد استفاده

متریک (سنجه)	مخفف	نام متریک	کاربرد	فرمول محاسباتی	واحد	دامنه تغییرات
Perimeter	PRIM	شاخص محیط	-	$PRIM = P_{ij}$	متر	$PRIM > 0$
Area	AREA	شاخص مساحت	-	$AREA = a_{ij}$	مترمربع	$AREA > 0$
Path Area	PA	شاخص مساحت	مساحت کلیه همسایه‌های یک کاربری را نشان می‌دهد.	$PA = \sum_{j=1}^n a_{ij}$	مترمربع	$PA > 0$
Shape Index	SHAPE	شاخص شکل	شکل کاربری را نشان می‌دهد	$SHAPE = \frac{2\pi P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}}$	ندارد	$SHAPE \leq 1$
Contiguity Index	CONTING	شاخص مجاورت و پیوستگی	همسایگی و ارتباط لکه‌ها را نشان می‌دهد	$CONTIG = \frac{\left[\sum_{r=1}^v c_{ijr} \right] - 1}{v - 1}$	ندارد	$0 \leq CONTING \leq 1$
Edge Density	ED	تراکم حاشیه	نوع لبه کاربری‌ها را نشان می‌دهد.	$ED = \frac{\sum_{k=1}^m e_{ik}}{A} (1, \dots, 1)$	متر در هر هکتار	$ED \geq 0$
Fractal Dimension Index	FRAC	شاخص پیچیدگی و پیچ خوردگی	براساس روابط مساحت و محیط است و ابعاد آن را نشان می‌دهد.	$FRAC = \frac{2 \ln(2\pi p_{ij})}{\ln a_{ij}}$	ندارد	$1 \leq FRAC \leq 2$
Median Fractal Dimension Index	FRAC-MD	میان‌ه شاخص پیچ خوردگی	میان‌ه ابعاد محیط را نشان می‌دهد.	$FRAC_{2 \times 2}$	ندارد	$1 \leq FRAC-MD \leq 2$
Perimeter-Area Fractal Dimension	PAFRAC	نسبت چولگی یا کشیدگی لبه	میزان تفکیک کاربری‌ها و تقسیم‌شدگی آن را نشان می‌دهد.	$PAFRAC = \frac{2 \left[n_i \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij} \cdot \ln a_{ij}) \right] - \left[\left(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right) \left(\sum_{j=1}^n \ln a_{ij} \right) \right]}{\left(n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right) - \left(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right)^2}$	ندارد	$1 \leq PAFRAC \leq 2$

متریک (سنجه)	مخفف	نام متریک	کاربرد	فرمول محاسباتی	واحد	دامنه تغییرات
Perimeter-Area Ratio	PARA	نسبت محیط به مساحت	نسبت محیط به مساحت را نشان می‌دهد.	$PARA = \frac{p_{ij}}{a_{ij}}$	ندارد	$PARA > 0$
Range in Perimeter-Area Ratio	PARA-RA	ضریب پراکنش نسبت به محیط	در همبستگی محیط از لحاظ تجسم سیما حائز اهمیت است.	$PARA_{max} - PARA_{min}$	ندارد	$PARA-RA > 0$
Largest patch index	LPI	شاخص بزرگترین لکه	درصدی از کل مساحت که به وسیله بزرگترین لکه اشغال شده است.	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} (100)$	درصد	$0 \leq LPI \leq 100$
Total Edge	TE	کل لبه	کل محیط لکه را بیان می‌کند.	$TE = \sum_{k=1}^m e_{ik}$	متر	$TE \geq 0$
Percentage of Landscape	PLAND	درصد پوشش اراضی	نسبت درصد هر نوع پوشش را اندازه‌گیری می‌کند.	$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^u a_{ij}}{A} (100)$	درصد	$0 < PLAND \leq 100$
Compaction	PC	تراکم یک گروه از کلاس‌ها	فشرده‌گی را نشان می‌دهد.	$PC = SQRT(\frac{AP}{AC})$	ندارد	$PC \geq 0$
Normalized Shannon's Evenness Index	NE	شاخص آنتروپی نرمال	بیشترین آنتروپی و همسایگی را نشان می‌دهد.	$NE = \frac{-\sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i)}{\ln m}$	ندارد	$0 \leq NE \leq 1$
Relative Patch Richness	RR	شاخص نسبت تنوع کاربری‌ها	نسبت تنوع را نشان می‌دهد.	$RR = \frac{m}{m_{max}} (100)$	درصد	$0 < RR \leq 100$

نحوه محاسبه سنجه‌ها

FRAGSTATS یک برنامه تجزیه و تحلیل الگوی فضایی برای کمی‌سازی ساختار (به عنوان مثال توزیع و ترکیب) سیمای سرزمین است. این نرم افزار به سادگی ناهمگونی فضایی سیمای سرزمین را کمی نموده و روی یک نقشه دسته‌بندی شده نمایش می‌دهد. متریک‌ها در ۳ سطح کلاس، لکه و سیمای سرزمین محاسبه شده‌اند. به طور مختصر می‌توان چنین گفت که این نرم افزار قادر است در ۵ مرحله متریک‌های مورد نظر را استخراج نماید (شکل ۳-۲). این مراحل شامل (میرسنجری و محمدیاری، ۱۴۰۱) (دهمرد و همکاران، ۱۴۰۲) :

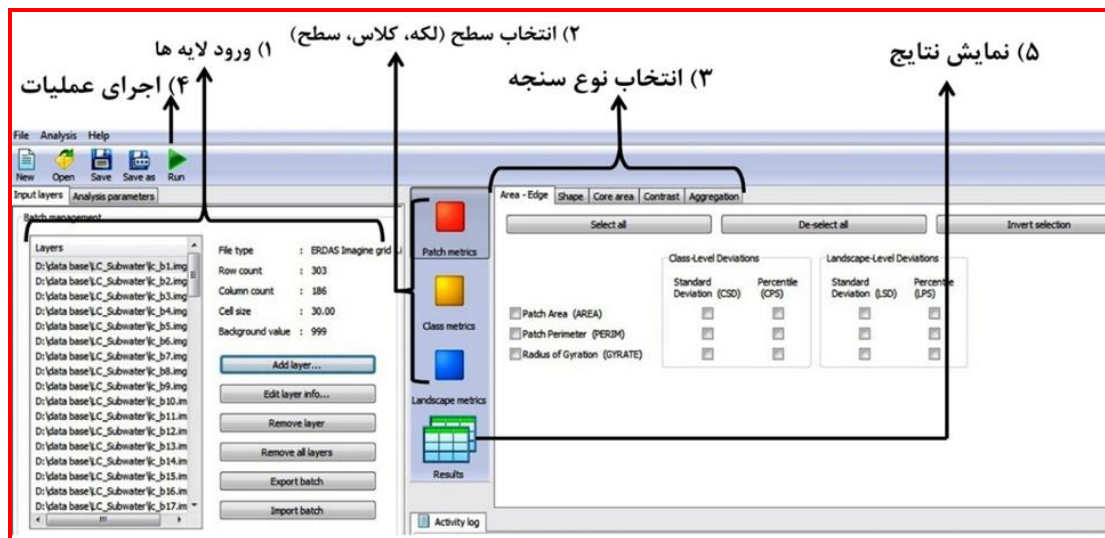
(۱) ورودی داده : در این قسمت ورودی‌هایی تحت فرمت‌های img،Ascii و نظایر آن می‌توان وارد نمود؛

(۲) انتخاب سطح: در این قسمت می‌توان سطح تحلیل مکانی (لکه، کلاس و سیما) برای سنجه‌های مورد نظر را انتخاب کرد؛

(۳) در این قسمت نوع سنجه‌ها از قبیل محیط، مساحت، شکل، هسته و همسایگی (مجاورت) مشخص می‌شوند؛

(۴) اجرای عملیات استخراج سنجه‌ها؛

(۵) ارائه و ذخیره نتایج با فرمت txt، که برای انجام عملیات‌های بعدی به محیط نرم افزار Excel انتقال می‌یابد.



شکل ۲. مراحل استخراج متریک‌ها در محیط نرم افزار Fragstats

تهیه داده‌های مربوط به میزان مصرف سوخت‌های فسیلی آمل

داده‌های مربوط به میزان مصرف بنزین معمولی، بنزین سوپر، نفت گاز (گازوئیل)، نفت سفید و نفت کوره بر حسب متر مکعب به صورت سالانه و برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ از سازمان پخش فرآورده‌های نفتی گردآوری شده است.

محاسبه انتشار کربن دی اکسید

میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید ناشی از سوخت‌های فسیلی در شهر آمل با استفاده از معادله زیر و ضرایب منتشر شده توسط هیئت بین الدول تغییر اقلیم^۱ محاسبه شده است.
رابطه (۱):

$$CO_2 \frac{t}{yr} = \left(Fuel \frac{t}{yr} \right) \times \left(LHV_{Fuel} \frac{Gj}{t} \times \frac{1t}{1000kg} \right) \times \left(EF_{Fuel} \frac{kgCO_2}{Gj} \right)$$

Fuel: میزان مصرف سوخت بر حسب تن در سال

LHV_{Fuel}: حداقل ارزش حرارتی سوخت بر حسب گیگاژول در تن

EF_{Fuel}: ضریب انتشار کربن دی اکسید سوخت بر حسب کیلوگرم کربن دی اکسید در گیگاژول

روش مدل سازی و الگوسازی توسعه شهری

برای مدل‌سازی توسعه شهری برای آینده در تحقیق حاضر از مدل‌ساز تغییر کاربری اراضی^۲ استفاده شده است. زیرا، فرایند تغییر پوشش/ کاربری اراضی به ویژه گسترش مناطق مسکونی و ساخته شده و تبدیل اراضی طبیعی به اراضی کشاورزی بسیار پیچیده و نیازمند متغیرهای متعدد است. این مدل، از کارایی بهتری در شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده از طریق تلفیق و ترکیب توانایی‌های مدل زنجیره مارکوف و روش شبکه عصبی چندلایه پروسپترون^۳ برخوردار است. مدل LCM به طور سریع آنالیز تغییرات پوشش زمین را مدل‌سازی و تغییرات زمین را برای آینده پیش‌بینی می‌نماید. به کمک LCM می‌توان میزان تغییرات در کاربری‌های مختلف را در بازه‌های زمانی متفاوت بررسی، همچنین میزان تغییرات از یک کاربری به سایر کاربری‌ها، جهت تغییرات از کاربری‌های مختلف به یکدیگر و ... را انجام داد.

^۱. IPCC

^۲. Land Change Modeler (LCM)

^۳. The multi-layer perceptron (MLP)

نخستین گام در مدل‌سازی توسعه شهری برای سال ۱۴۰۶، دستیابی به پارامترهای مورد اطمینان است. این مهم تنها با آزمون و راستی آزمایی صورت می‌گیرد. در این تحقیق، متغیرها از طریق بررسی منطقه مطالعاتی و پژوهش‌های پیشین انتخاب شده است. تغییرات طبیعت ممکن است متأثر از پارامترهای ثابتی نظیر نیم رخ ارتفاعی، شیب، جهت و پدیده‌های متغیری همچون اقلیم و هوا باشد، اما آنچه که ناشی از دستکاری انسان در طبیعت باشد نیازمند معیارهای متناسب‌تر است. در این مطالعه از پنج سنجه مکانی ED، PA، RR، PC و NE استفاده شده است که هر یک ویژگی خاصی از زمان را بازگو می‌نماید. در کنار این سنجه‌ها، پیکت (۲۰۰۳) معتقد است که توسعه شهر مسلماً نیازمند یک سری پارامترهای اولیه همچون مشخصات ارتفاع و گرادیان آن، شیب برای ساخت و سازها و جهت جغرافیایی برای استفاده بیشتر از حالات اولیه محیط محلی است (Pickett, ۲۰۰۳). پارامتر اساسی دیگر، راه‌های دسترسی است و با توجه به مقیاس این پژوهش پراکنش جاده‌ها و شریان‌ها و دسترسی به آنها قطعاً در توسعه لکه‌های جدا افتاده خود را بهتر نشان خواهند داد (Batty and Longley, ۱۹۹۷).

مدل سازی و الگوی میزان مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید کربن

ساختار فضایی و نیز مدل‌های پیش‌بینی مصرف سوخت‌های فسیلی با استفاده از تغییرات مکانی - زمانی ابزار مناسبی است تا به بی‌نظمی، آشفتگی و اختلال‌های موجود در اکوسیستم شهری پی برد که سبب شده است مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید کربن افزایش یابد. از آن جایی که داده‌های موجود دارای نقص مکانی هستند، مدل‌سازی مستقیم با داده‌های مصرف سوخت‌های فسیلی بهتر جواب خواهد داد. بنابراین مدل‌سازی مکانی سنجه‌ها و سنجش روابط آنها با میزان مصرف سوخت‌های فسیلی می‌تواند راهکارهای مناسب و بهتری برای شناسایی فاکتورها و عوامل کلیدی در الگوی مصرف پایدار شهری باشد.

روش ارزیابی همبستگی سنجه‌های سیمای سرزمین با میزان مصرف سوخت‌های فسیلی

در گام نخست متغیرهای مکانی سنجه‌های سیمای سرزمین بررسی گردیده که نشان داده است ترکیب‌های مختلف آنها دارای همبستگی‌های مختلف می‌باشد. بر این اساس از تحلیل واریانس یک طرفه^۱ استفاده شده است؛ زیرا به کمک این روش استنباط آماری می‌توان اثرات چند عامل را بررسی کرد. لذا در تحقیق حاضر ترکیب‌های مختلف سنجه‌های سیمای سرزمین با میزان مصرف سوخت‌های فسیلی با کمک آنالیز واریانس همبستگی سنجیده شده است تا روشن گردد میزان همبستگی در ترکیب کدام سنجه‌ها با مصرف سوخت‌های فسیلی بالا هستند. محاسبات مدل مذکور در محیط نرم افزار Past ۳۱۸ صورت گرفته است.

▪ الگوی فضایی میزان مصرف سوخت‌های فسیلی

پس از سنجش میزان همبستگی متریک‌ها با مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه آن شناسایی متریک‌هایی که بالاترین همبستگی را میزان مصرف سوخت‌های فسیلی داشته‌اند، و نیز با توجه به روش تحلیل واریانس یک طرفه و همچنین طبق مدل رگرسیون خطی چند متغیره، الگوی فضایی مصرف سوخت‌های فسیلی طبق فرمول زیر (رابطه ۲) محاسبه شده و در نتیجه در محیط نرم افزار Arc Gis نقشه الگوی فضایی سوخت‌های فسیلی برای شهر آمل تهیه و استخراج شده است.

رابطه (۲):

$$\{(Coeff_{metric1} * metric1) + \dots + (Coeff_{metricn} * metricn)\} + Constant$$

▪ الگوی فضایی تولید و انتشار دی اکسید کربن

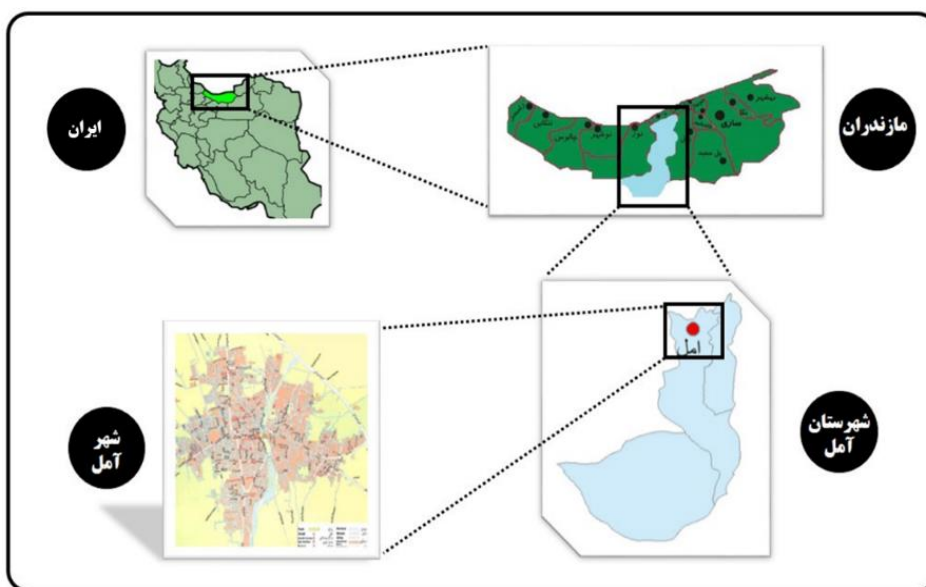
با حاصل ضرب نقشه الگوی فضایی سوخت‌های فسیلی در رابطه ۱ (فرمول محاسبه انتشار گاز دی‌اکسید کربن از سوخت‌های فسیلی) در محیط نرم افزار Arc Gis، نقشه الگوی فضایی انتشار دی‌اکسید کربن برای شهر آمل در سال‌های مورد نظر تهیه و استخراج شده است.

^۱ . Analysis of variance (One-Way ANOVA)

قلمرو جغرافیایی پژوهش

شهرستان آمل به مرکزیت شهر آمل در مرکز جغرافیایی استان مازندران قرار گرفته که از شمال به شهرستان محمودآباد، از جنوب به استان تهران، از غرب به شهرستان نور و از شرق به شهرستان بابل محدود شده است. این شهرستان در سال ۱۳۹۵ با جمعیتی برابر با ۴۰۱۶۳۹ نفر و ۳۰۷۴٫۴ کیلومتر مربع مساحت دارای ۶ شهرآمل، رینه، گزنک، دابودشت، بابکان و امامزاده عبدالله و ۵ بخش مرکزی، لاریجان، دابودشت، دشتسر و امامزاده عبدالله است (مرکز آمار، ۱۳۹۵).

شهر آمل با مساحتی برابر با ۳۱۷۵٫۵ هکتار و جمعیتی معادل ۲۷۱۲۶۹ نفر مرکز شهرستان آمل و در موقعیت جغرافیایی بین عرض شمالی ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه و حد فاصل طول جغرافیایی شرقی ۵۱ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۳۳ دقیقه واقع شده است. این شهر در منطقه میانی مازندران واقع شده و در محل تلاقی راههای دسترسی شمالی- جنوبی و شرقی- غربی واقع شده و دارای مرکزیت مکانی نسبی به هاله روستایی اطرافش است.



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

یافته‌ها و بحث

بررسی روند مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید کربن ناشی از آن

مصرف سوخت‌های فسیلی آمل در ۱۵ سال اخیر (۱۳۸۷ تا ۱۴۰۱) در جدول و نمودار ذیل نشان داده شده است. بر این اساس در طی چند سال اخیر مصرف بنزین روند افزایشی اما مصرف گازوئیل (نفت گاز) روند کاهشی را طی کرده است. هر گالن بنزین تقریباً معادل با ۱۲۵۰۰۰ انرژی گرمایی (حرارتی) است که معادل با نرخ ۱۹٫۳۵ تن کربن در هر بیلیون انرژی گرمایی آزاد می‌کند. سوخت گازوئیل نیز در هر گالن تقریباً ۱۳۸۷۰۰ انرژی گرمایی تولید می‌کند که در نهایت ۱۹٫۹۵ تن کربن در هر بیلیون انرژی گرمایی آزاد می‌نماید (Pezzetta & Drossman, ۲۰۰۵). از آنجایی که هر گالن برابر با ۳٫۷۸۳۵ لیتر است، بنابراین به ازای سوختن یک لیتر بنزین ۳۳۰۲۲٫۵ و گازوئیل ۳۶۶۴۱٫۷ انرژی گرمایی آزاد می‌شود. و در نهایت به ازای سوختن یک لیتر بنزین ۰٫۰۰۰۶ تن کربن و به ازای سوختن یک لیتر گازوئیل ۰٫۰۰۰۷ تن کربن منتشر می‌شود. براساس این محاسبات و با توجه به حجم بنزین و گازوئیل مصرف شده در آمل طی سال‌های مورد بررسی، میزان کربن تولید شده از سوخت‌های فسیلی^۲

^۱ . British Thermal Units (BTU)

^۲ . با توجه به اینکه در دسترس نبودن داده‌های میزان مصرف سوخت گاز طبیعی متراکم (Compressed Natural Gas: CNG)، نگارنده از آن صرف‌نظر نموده و تنها کربن تولید شده از بنزین و گازوئیل (نفت گاز) مورد محاسبه قرار گرفته است.

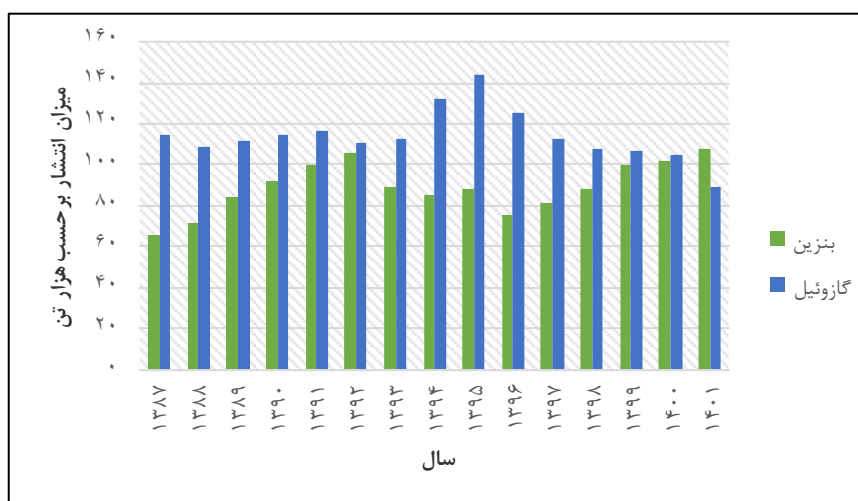
(بنزین و گازوئیل) طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۱ در جدول و نمودار زیر ارائه شده است. نتایج گویای این موضوع است که طی ۱۵ سال‌های گذشته میزان کربن منتشر شده از بنزین روند صعودی داشته است. در مقابل با اینکه میزان کربن منتشره از مصرف گازوئیل روند نزولی داشته ولیکن کمترین میزان آن بالاتر از مقدار استاندارد است. در بخش‌های قبلی نشان داده شد که رشد فیزیکی شهر افزایش یافته است لذا این روند افزایشی الگوی مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه تولید کربن نیز دور از انتظار نیست. اما آنچه که اهمیت می‌یابد پاسخ به این سوال است که روند تغییرات مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه تولید کربن چه ارتباطی با سنجش‌های سیمای سرزمین دارد؟ در ادامه پژوهش حاضر سعی شده است به این سوال پاسخ داده شود.

جدول ۳. میزان مصرف سوخت‌های فسیلی و کربن منتشر شده از آن ۱ در آمل طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۱

سال	میزان مصرف بنزین (میلیون لیتر)	کربن منتشر شده از بنزین (هزار تن)	میزان مصرف گازوئیل (میلیون لیتر)	کربن منتشر شده از گازوئیل (هزار تن)	جمع کربن منتشر شده (هزار تن)
۱۳۸۷	۱۰۴	۶۶	۱۵۷	۱۱۵	۱۸۱
۱۳۸۸	۱۱۲	۷۲	۱۴۹	۱۰۹	۱۸۱
۱۳۸۹	۱۳۲	۸۴	۱۵۳	۱۱۲	۱۹۶
۱۳۹۰	۱۴۵	۹۲	۱۵۷	۱۱۵	۲۰۷
۱۳۹۱	۱۵۶	۱۰۰	۱۶۰	۱۱۷	۲۱۷
۱۳۹۲	۱۶۶	۱۰۶	۱۵۳	۱۱۱	۲۱۸
۱۳۹۳	۱۴۰	۸۹	۱۵۵	۱۱۳	۲۰۳
۱۳۹۴	۱۳۳	۸۵	۱۸۱	۱۳۲	۲۱۸
۱۳۹۵	۱۳۹	۸۸	۱۹۸	۱۴۴	۲۳۳
۱۳۹۶	۱۲۰	۷۶	۱۷۱	۱۲۵	۲۰۱
۱۳۹۷	۱۲۷	۸۱	۱۵۵	۱۱۳	۱۹۵
۱۳۹۸	۱۳۸	۸۸	۱۴۸	۱۰۸	۱۹۶
۱۳۹۹	۱۵۷	۱۰۰	۱۴۷	۱۰۷	۲۰۸
۱۴۰۰	۱۶۰	۱۰۲	۱۴۳	۱۰۵	۲۰۷
۱۴۰۱	۱۶۹	۱۰۸	۱۳۳	۸۹	۱۹۸

ماخذ (سازمان پخش فرآورده‌های نفتی و Pezzetta and Drossman, ۲۰۰۵)

شکل ۴. نمودار میزان کربن منتشر شده از سوخت‌های فسیلی در آمل طی ۱۵ سال اخیر



ماخذ (سازمان پخش فرآورده‌های نفتی و Pezzetta and Drossman, ۲۰۰۵)

^۱. ستون‌های اول و دوم بر مبنای داده‌های سازمان پخش فرآورده‌های نفتی مازندران بوده و ستون‌های سوم و چهارم نتایج محاسبات صورت گرفته با روش‌های استفاده شده در کالج کلرادو است.

بررسی همبستگی سنجه های سیمای سرزمین با میزان مصرف سوخت های فسیلی

در این بخش پس از اخذ داده های مربوط به میزان مصرف سوخت های فسیلی، رابطه این داده ها با متریک های منتخب سنجیده شده است. در سطح کوچک مقیاس سیمای سرزمین یعنی اراضی ساخته شده (لکه ها) رابطه ای معنادار و منفی با مصرف سوخت- های فسیلی وجود دارد. در وهله نخست مساحت اراضی انسان ساخت، رابطه منفی با مصرف سوخت های فسیلی دارد، در نتیجه ساختار فضایی که دارای تراکم بالایی بوده و روابط همسایگی بالاتری را داشته باشد میزان کربن کمتری را تولید می کند، در پژوهش ها و تحقیقات پیشین کمتر توجهی به مقیاس لکه ها شده است با این وجود در تحقیق حاضر نتیجه گرفته شده است که سنجه های این مقیاس، رابطه ای معنادار و منفی با مصرف سوخت های دارند. بی و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی که به بررسی روابط میان فرم های فضایی شهر و انتشار دی اکسید کربن در تقریباً صد شهر چین در یک دوره ده ساله پرداختند، نشان دادند که تراکم مسکونی شهرها رابطه ای منفی با انتشار دی اکسید کربن دارند. این پژوهش نیز نوعی رابطه منفی را روشن ساخت که در نتیجه با نتایج پژوهش پی و همکاران همسو می باشد. دو سنجه کل لبه (TE) و تراکم حاشیه (ED) که هر ۲ در امتداد یکدیگر هستند، نشان دهنده الگوی پراکنده رویی شهری می باشند. پرواضح است که توسعه پراکنده رویی رابطه ای معنادار و منفی با مصرف سوخت های فسیلی دارد. با توجه به اینکه در بخش های پیشین اثبات گردید شهر آمل طی سال های اخیر با پراکنده رویی مواجه است، لذا این امر در مصرف سوخت های فسیلی و در نتیجه تولید کربن اثری منفی برجای گذاشته و باعث افزایش آلودگی شده است. یکی از دلایل عمده الگوی پراکنده رویی در شهر آمل این است که در اثر توسعه توریسم و در نتیجه مهاجرت پذیری، جمعیت این مکان ها به صورت فوق العاده ای افزایش یافته است و افزایش جمعیت باعث افزایش تقاضا برای زمین و مسکن و در نتیجه افزایش قیمت زمین های کشاورزی و تغییر و تبدیل آنها به کاربری های مسکونی، خدماتی، صنعتی و ... گردیده است. بنابراین تشدید روند توسعه اراضی ساخته شده در کاربری های مناطق شهری منجر به تغییر روزافزون کاربری اراضی شده و در نتیجه ازدیاد اراضی شهری و ساخته شده را در پی داشته است.

در یک مقیاس بزرگتر از لکه (سطح کلاس یا طبقات)، مدل سازی با دقت بالاتر و با سنجه های جامع تری انجام شده است. آن گونه که نتایج نشان می دهند در مقیاس طبقه یا کلاس تنها سه سنجه رابطه ای معناداری با مصرف سوخت های فسیلی دارند. اولین متریک ضریب محیط به مساحت (PARA_RA) می باشد که حالت حاشیه ای و تفکیک پذیری را بیان می کند و هر چه میزان این متریک بالاتر باشد تفکیک شهر در نواحی پیرامونی نیز بیشتر می باشد. رابطه معنادار و مثبت مصرف سوخت های فسیلی با این سنجه تاثیر توأم مساحت و پیرامون را نشان می دهد. با توجه به معادله موجود نسبت حاشیه به مساحت در متریک PARA_RA همبستگی مثبت و توسعه افقی نواحی پیرامونی شهری و انسان ساخت را برآورد می کند و رابطه مصرف سوخت های فسیلی با پراکنده رویی و در جهت های خاص در سطح ۱۰ درصد معنادار می گردد. FRAC_MD متریکی است که تغییرات شهری را در بعد و مقیاس توسعه عمودی نشان می دهد. افزایش این متریک نشان دهنده بالا رفتن لبه های توسعه شهری است و وقتی ضریب آن به دو نزدیک می شود تفکیک شدگی و جدا افتادگی را به اثبات می رساند که هر چه شهر از حالت فشرده، متمرکز و مرکزیت خود خارج گردد و توسعه افقی افزایش یابد، همزمان با آن نیز مصرف سوخت های فسیلی و در نتیجه تولید کربن بیشتر می شود. این بخش از پژوهش با نتایج مطالعات فانگ و همکاران (۲۰۱۶) قابل قیاس است و به وضوح تاثیر ساختار و شکل شهری را نشان داده و همسو با آن یافته ها، همبستگی و رابطه معنادار و مثبتی میان رشد مناطق (پیرامونی) شهری و میزان انتشار کربن را به اثبات می رساند. سنجه نسبت چولگی لبه (PAFRAC) در تایید آنچه بحث شد کاربرد خواهد داشت. زمانی که اندازه توسعه پیرامون نامتناسب با شهر باشد کاربرد بیشتری خواهد داشت. متریک مذکور رابطه ضعیفی با الگوی مصرف سوخت های فسیلی دارد اما جهت آن مثبت ارزیابی شده است. به بیان ساده تر هر چه بی نظمی شکل و ساختار شهر افزایش یابد در نتیجه آن مصرف سوخت های فسیلی و تولید کربن ناشی از آن نیز افزایش می یابد. همچنین در بررسی سنجه های مقیاس بزرگتر (موزائیک) رابطه معناداری با میزان مصرف سوخت های فسیلی یافت نشد.

جدول ۴. رابطه میان سنجه‌ها و مصرف سوخت‌های فسیلی

مقیاس	رابطه سنجه‌ها با مصرف سوخت‌های فسیلی						
	Variable	Slope	Error	Intercept	Error	r	p
کلاس یا طبقات	PARA_RA	۰,۰۰	۰,۰۰	۳۹۹۵,۹۰	۰,۰۴	۰,۹۰	۰,۱۰
	FRAC_MD	۰,۰۰	۰,۰۰	۱,۰۱	۰,۰۱	۰,۹۰	۰,۱۰
	PAFRAC	۰,۰۰	۰,۰۰	۱,۲۹	۰,۰۶	۰,۶۱	۰,۳۹
سیمای سرزمین	PAFRAC	۰,۰۰	۰,۰۰	۱,۱۰	۰,۲۶	۰,۵۹	۰,۴۱
	PERIM	۰,۰۰	۰,۰۰	۱۷۰,۵۳	۹۶,۱۷	۰,۲۲	۰,۷۸
	PARA	۰,۰۰	۰,۰۰	۱۳۶۴,۶۰	۱۷۹,۹۰	۰,۱۴	۰,۸۶
	TE	۲,۳۴	۱۸,۰۸	۳۳۲۷۸,۰۰	۱۴۵۷۱۰۰,۰۰	۰,۰۹	۰,۹۱
	ED	۰,۰۰	۰,۰۰	۲,۶۶	۱۱,۶۳	۰,۰۹	۰,۹۱
	PLAND	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۲۹	۱,۲۰	۰,۰۸	۰,۹۲
	CA	۰,۰۰	۰,۰۲	۳۶۰,۸۲	۱۵۰۸,۲۰	۰,۰۸	۰,۹۲
لکه	Area-path	-۰,۰۲	۰,۰۱	۲۰۵۰,۲۰	۹۰۴,۴۷	-۰,۷۵	۰,۲۵
	TE -path	-۱۷,۸۷	۹,۵۲	۵۶۲۷۰۰۰,۰۰	۷۶۷۴۱۰۰,۰۰	-۰,۸۰	۰,۲۰
	ED-path	۰,۰۰	۰,۰۰	۴۴,۹۰	۶,۱۲	-۰,۸۰	۰,۲۰

تنظیم بر مبنای خروجی نرم افزار Past

مدل سازی پیش بینی توسعه شهری

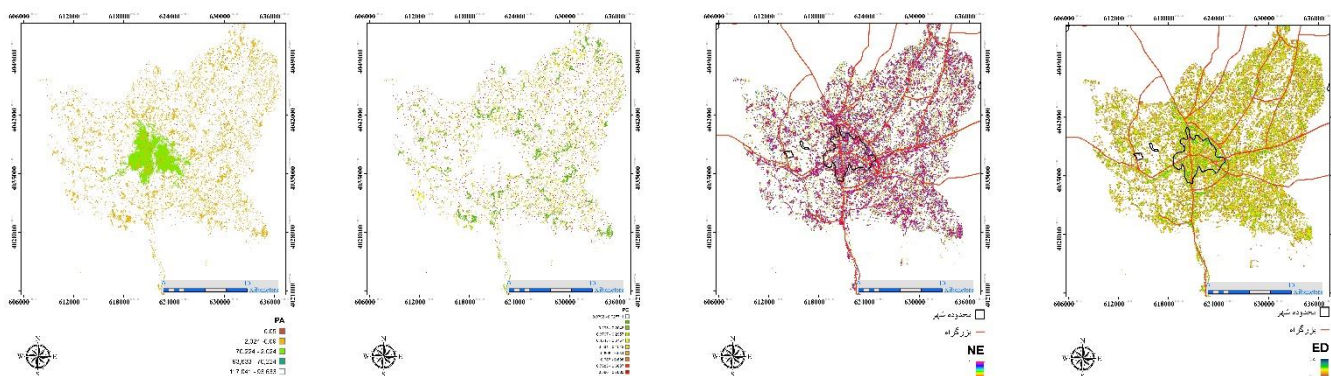
در برازش نقشه تغییرات کاربری اراضی با سنجه‌های توپولوژی نظیر جهت، ارتفاع، شیب، مشخص شده است که به دلیل هموار بودن شهر آمل و پهنه توسعه شهری از کمترین شدت در بعد شهری برخوردار است، این در حالی است که برای دیگر پوشش‌های زمین رابطه‌ای معنادار وجود دارد. از طرفی متریک‌های سیمای سرزمین نقش کلیدی در تغییرات سطح شهرستان آمل ایفا می‌کند. مساحت اراضی ساخته شده (PA) در بخش تغییرات اراضی ساخته شده بالاترین تاثیر را دارد و ۹۵ درصد ثبات و تغییر در سطح شهر آمل را توجیه می‌کند. سایر متریک‌های نیز با درجه معناداری بالا در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. همچنین رابطه معناداری بین شبکه معابر و فاصله از آن با تغییرات اراضی کشاورزی و جنگل وجود دارد. منابع آبی و اراضی دارای سنگ و خاک هیچگونه رابطه معناداری با سنجه‌های مورد استفاده ندارند. در مجموع می‌توان چنین گفت که برای ارزیابی مدل و ورود پارامترها به آن، ضرایب بیشتر از ۰/۲ مناسب‌تر می‌باشند. لذا در یک نگاه اجمالی، برای شبیه‌سازی مقبولیت هر ۹ متغیر مورد تایید است.

جدول ۵. ضرایب کرامر ورودی‌های مدل شبکه عصبی

شیب	نسبت تنوع (RR)	فاصله از جاده	تراکم لکه (PC)	مساحت (PA)	آنترپی نرمال (NE)	تراکم حاشیه (ED)	ارتفاع	جهت	پوشش زمین
۰,۳۸۷۷	۰,۲۶۷	۰,۳۵۱۸	۰,۳۷۳۲	۰,۴۷۵۹	۰,۳۰۵۳	۰,۳۲۸۲	۰,۱۹۷۴	۰,۲۷	جمع کل
۰,۷۷۱۴	۰,۲۹۲	۰,۶۷۶۱	۰,۱۸۸۸	۰,۲۶۵۹	۰,۳۵۲۱	۰,۳۸۴۵	۰,۳۸۶۷	۰,۵۳	جنگل
۰,۶۳۳۷	۰,۰۳۴	۰,۵۳۶۸	۰,۲۵۵	۰,۳۰۳۳	۰,۰۸۹۴	۰,۱۵۱۵	۰,۳۱۸۷	۰,۳۹	کشاورزی
۰,۱۹۲۹	۰,۴۳۱	۰,۲۶۳۸	۰,۷۴۶۴	۰,۹۵۰۹	۰,۵۶۵۳	۰,۵۹۸۷	۰,۱۰۰۸	۰,۱۴	اراضی ساخته شده
۰,۰۳۹۳	۰,۱۵۸	۰,۰۴۳۴	۰,۰۱۳۲	۰,۰۱۵۳	۰,۰۴۹۶	۰,۰۵۷۷	۰,۰۱۶۵	۰,۰۶	آب
۰,۰۲۴۱	۰,۱۹۷	۰,۰۶۸۶	۰,۰۲۳	۰,۰۳۰۸	۰,۰۱۷۴	۰,۰۱۰۱	۰,۰۶۰۵	۰,۰۶	خاک و سنگ

تنظیم بر مبنای خروجی مدل LCM

شکل ۵. پارامترها و نتایج مدل سازی پیش بینی پوشش زمین برای سال ۱۴۰۶

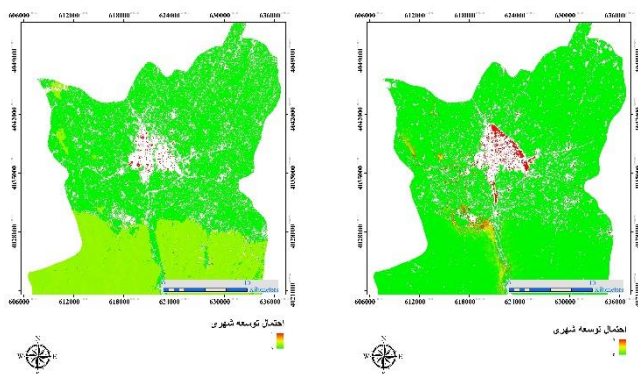


ت: سنجه PA

پ: سنجه PC

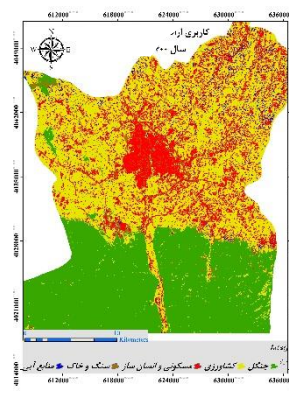
ب: سنجه NE

الف: سنجه ED

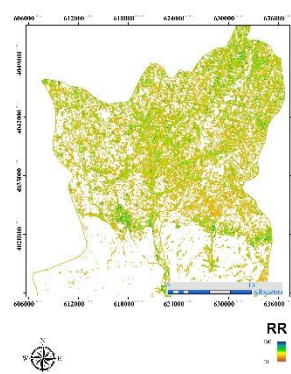


ز: احتمال توسعه در سال ۱۴۰۶

ر: احتمال توسعه در سال ۱۴۰۱



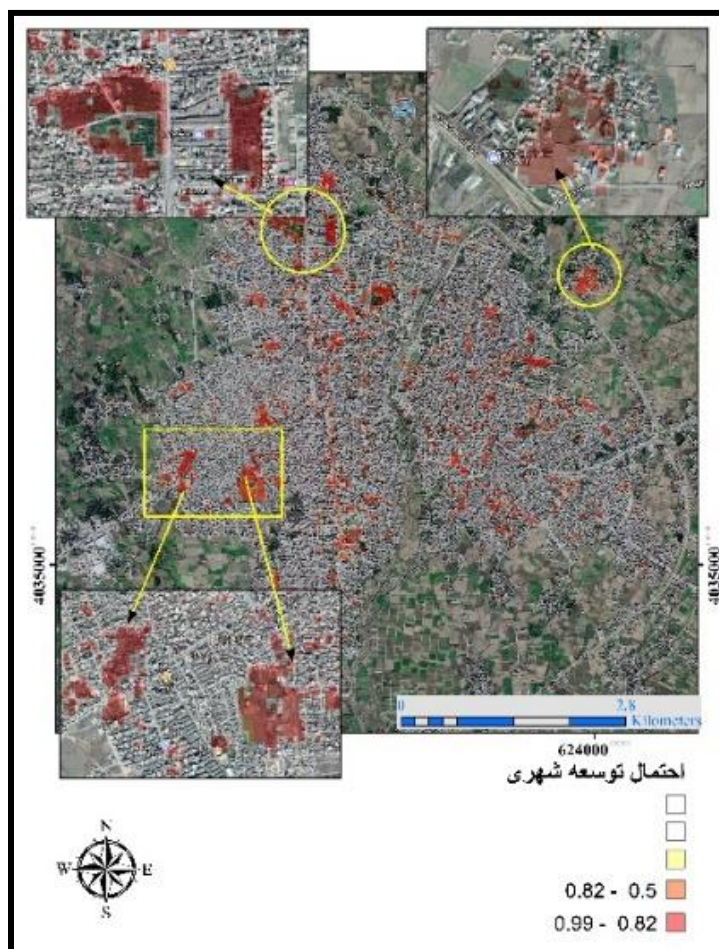
د: پوشش زمین سال ۱۴۰۶



ث: سنجه RR

تنظیم بر مبنای (خروجی نرم افزار Fragstats) (خروجی نرم افزار Gis) (خروجی مدل LCM موجود در نرم افزار TerrSet) (خروجی مدل LPA موجود در نرم افزار TerrSet)

نتایج حاصل از مدل‌سازی پیش‌بینی برای سال ۱۴۰۶ نشان داده است که مساحت اراضی ساخته شده به ۲۴۰۰ هکتار خواهد رسید. با توجه به پیش‌بینی ۳٪ درصد رشد، انتظار می‌رود توسعه افقی با سرعت کندی پیش رود. نتایج نشان داده است که رشد فیزیکی و افقی شهر آمل در نواحی پیرامونی به طور نسبی روند کندی تجربه خواهد کرد و در مقابل نواحی درونی شهر دستخوش تغییراتی در چیدمان و آرایش خواهند بود و شدت تراکم شهر آمل افزایش خواهد یافت و به عبارتی دیگر توسعه درونی و فشرده شهر آمل افزایش خواهد یافت. آنچه که مشخص است شهر آمل در حال حرکت به سوی پایدار شدن بعد از نوسانات شدید است.



چنانچه نقشه وضع موجود شهر آمل با نقشه احتمال توسعه اراضی انسان ساخت برای سال ۱۴۰۶ تلفیق گردد، می‌توان چنین یافت که دو نوع رویه در حال انجام است که دو عامل اصلی در توسعه گذشته، حال و آینده را به وضوح تشریح می‌کند. رویه نخست، توسعه در اراضی خاکستری و سبز می باشد که در افزایش و ترغیب ساخت و ساز در سال‌های اخیر موفق عمل کرده و به نظر می‌رسد رویه‌ای برتر در سیاست‌های جذب ساخت و ساز است. لذا با برنامه‌ریزی و مدیریت این نوع توسعه، ساختار فضایی شهر در سال‌های آتی بهینه خواهد شد و از این طریق از ایجاد فشار مضاعف به نواحی مرکزی شهر و از هم گسیختگی و بی‌نظمی توسعه در نواحی پیرامونی جلوگیری به عمل خواهد آورد. از سوی دیگر سیاست‌های توسعه و ساخت و ساز در نواحی همجوار بیانگر این است که تمایل به توسعه در مناطق دورتر، پرت‌تر و نواری کاهش یافته است و در مقابل گرایش به توسعه میان‌افزا و دورنزا و در نتیجه به سمت فشرده‌گی برای دسترسی بهتر به خدمات دارد. بررسی برخی سنجه‌ها در طول زمان گویای مصداق این نوع الگوی توسعه در شهر آمل می‌باشد.

بررسی الگوهای فضایی سیمای سرزمین با میزان مصرف سوخت های فسیلی

بر اساس نتایج تحلیل همبستگی و رگرسیون خطی که در جدول زیر نشان داده شده است سه متریک مساحت لکه (PA)، تراکم لکه (PC) و آنتروپی نرمال (NE) همبستگی بالایی با مصرف سوخت های فسیلی دارند. در واقع ترکیب این سه سنجه ۹۹/۷ درصد تغییرات را پیش بینی می نمایند. متریک NE مرزهای موجود را به عنوان همپوشانی و همسایگی در زوایای مشخص بررسی می کند و ضرایب آن را تولید می کند. رابطه مثبت این سنجه با تولید کربن بدین معناست که هر چه نواحی پیرامونی شهر از حالت اولیه خود خارج شوند و لجام گسیختگی شکل شهر بیشتر شود، به انرژی بیشتری جهت حفظ ساختار اولیه خود در مواجهه با شرایط محیطی حاکم بر آن منطقه نیاز خواهند داشت. با این وجود دو سنجه اصلی PC و PA اگرچه در تناقض با یکدیگر قرار دارند اما رابطه مثبت و معناداری با مصرف سوخت های فسیلی دارند. سنجه PA که از کمترین ضریب برخوردار بوده و کمتر از ۰/۰۳۳ تغییرات را پیش بینی می کند، افزایش مساحت لکه های شهری در مصرف سوخت های فسیلی را به صورت خیلی خفیف نشان می دهد. در مقابل در بررسی سنجه PC افزایش لکه ها با افزایش مصرف سوخت های فسیلی و به دنبال آن تولید کربن رابطه ای معنادار دارد. به این نتیجه فانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز در پژوهش خود رسیده بودند به طوری که ادعا داشتند همبستگی مثبتی بین رشد شهری و سطح انتشار کربن وجود دارد.

در ادامه نقشه های زیر تغییرات الگوی مصرف سوخت های فسیلی را طی سال های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۶ نشان می دهند. این الگوها براساس فرمول زیر پیش بینی شده و مدل سازی تولید کربن نیز از طریق فرمول عنوان شده در روش شناسی پژوهش انجام شده است.

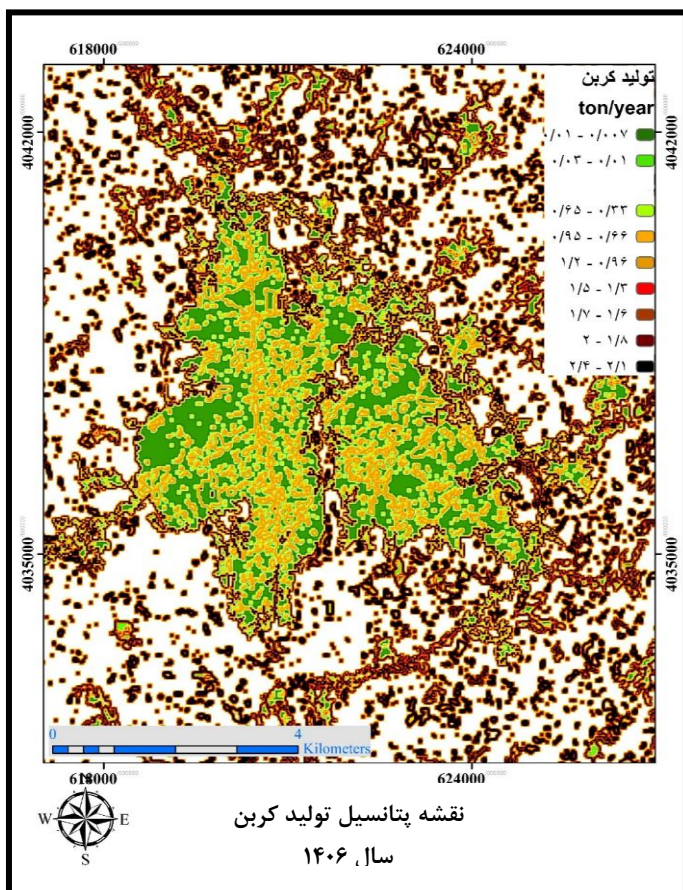
$$\text{الگوی مصرف سوخت} = \{(Coeff_{NE} * NE) + (Coeff_{PA} * PA) + (Coeff_{PC} * PC)\} - Constant$$

در سال ۱۴۰۱ به دلیل تغییرات ایجاد شده در الگوی توسعه (گرایش به توسعه درونزا) تولید کربن اکثرا در طیف مطلوب قرار گرفته اند. ولی در مقابل در نواحی پیرامونی شهر بالاترین میزان تولید را به خود اختصاص داده اند. در سال ۱۴۰۶ سرعت توسعه به شدت روند کندی خواهد داشت و در مقابل در اراضی خاکستری شهر توسعه با سرعت بیشتری ادامه خواهد یافت و نواحی پیرامونی شهر (مرز محدوده و حریم) با تغییراتی مواجه خواهد بود. بر همین اساس نقشه پتانسیل تولید کربن نشان داده است که تعادلی در وضعیت متریک ها به وجود خواهد آمد به طوری که با کاهش رشد پراکنده رویی، شهر آمل گرایش به توسعه درونی و تبدیل شدن به شهر فشرده گام خواهد گذاشت. لذا به طور کلی می توان گفت که شهر آمل به سمت رشد فشرده، توسعه درونزا و تراکم بالا می رود. همین امر نیز باعث شده است که تولید کربن در سال ۱۴۰۶ روندی کاهشی به خود گرفته است. پرواضح است که منطق الگوی تولید کربن در دوره مورد مطالعه (سال های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۶) برای تولید و انتشار کربن نیز صدق می کنند. همانطور که در بخش ادبیات و مبانی نظری پژوهش مطالعه شد بسیاری از اندیشمندان اعتقاد دارند شهرهای فشرده فرصت های نوینی جهت کاهش مصرف سوخت های فسیلی و در نتیجه کاهش انتشار کربن دی اکسید ارائه می کنند.

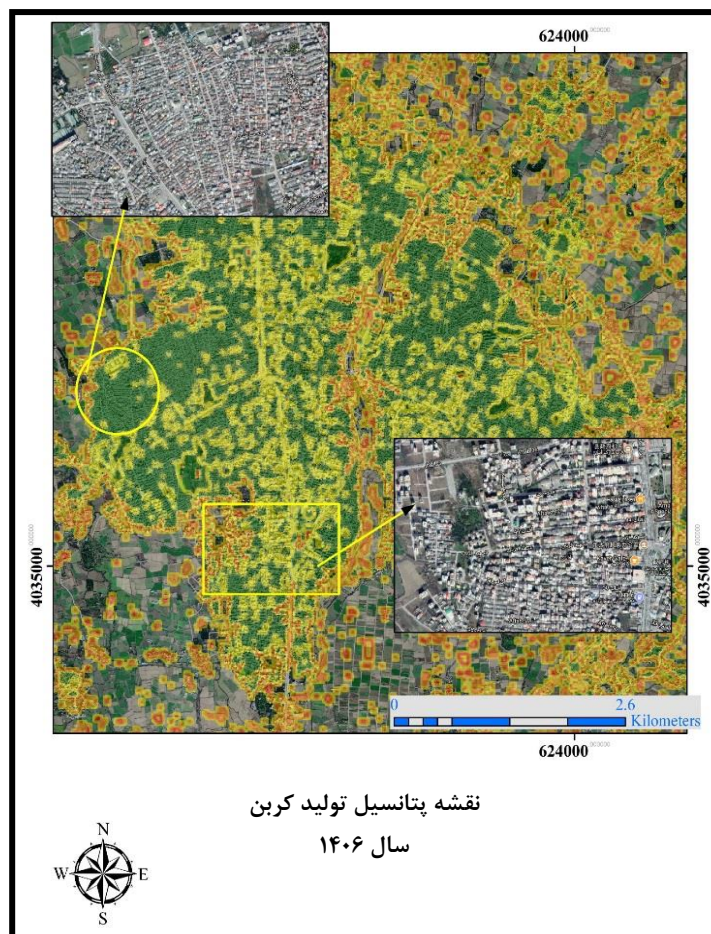
جدول ۵. آماره های رابطه خطی سنجه ها با مصرف سوخت های فسیلی

ANOVA		Dependent variable:	FEUL	Coeff.	Std.err.	t	p	R ^۲	
F:	۵۶,۴۸	N:	۵	Constant	-۲۹۹۱,۹	۶۶۵,۸۸	-۴,۴۹۳۱	۰,۱۳	
df ^۱ , df ^۲ :	۳, ۱	Multiple R:	۰,۹۹۷	NE	۶۰۳۰,۹	۸۷۷,۳۵	۶,۸۷۴	۰,۰۹۱	۰,۲۰۹
p:	۰,۰۹۷	Multiple R ^۲ :	۰,۹۹۴	PA	۰,۰۳۰۷۸۱	۰,۰۰۵۵۱۵۱	۵,۵۸۱۲	۰,۱۱۲	۰,۰۳۱
		Multiple R ^۲ adj.:	۰,۹۷۶	PC	۶۵۱۰,۴	۸۲۵,۷۲	۷,۸۸۴۴	۰,۰۸۰۳	۰,۶۸

تنظیم بر مبنای خروجی نرم افزار Past



کاربری‌های پرتدد بیشتر از مسکونی باشد میزان تولید کربن بیشتر از سایر نواحی است. همچنین در نواحی پیرامونی شهر به دلیل وجود اراضی باغی و زراعی (به عنوان پالایش طبیعی) میزان تولید کربن کاهش می‌یابد.



الگوهای توسعه آبی و تولید کربن بیانگر آن است که در سال ۱۴۰۶ زمینه‌های پایداری محیطی و کالبدی ساختار فضایی شهر آمل ایجاد می‌شود و به علت کاهش نرخ رشد ساخت و ساز در نواحی پیرامون و نیز افزایش توسعه درونی در زمین‌های خاکستری، شهر آمل به سمت توسعه فشرده می‌رود. شریان‌های اصلی شهر بیشترین میزان بی‌نظمی را دارند و در نتیجه میزان تولید کربن در حاشیه این معابر بیشتر می‌باشد. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که در سال ۱۴۰۶ ساختار فضایی شهر آمل به سمت توسعه فشرده و در نتیجه پایداری هدایت می‌گردد و بر این اساس میزان تولید کربن نیز در وضعیت مطلوبی قرار می‌گیرد. در این بین در حاشیه معابر و شریان‌های اصلی شهر (به اندازه یک پلاک) تولید کربن نسبت به سایر نقاط شهر افزایش محسوس را نشان می‌دهد. با این اوصاف، با حفظ الگوی کنونی شکل شهر همراه با ارتقای عناصر و عملکردهای شهری کم کربن نظیر افزایش فضاهای سبز و پالایند در نواحی پرتراکم، اختلاط و تشدید کاربری‌ها و امثال آن، ارتقای حمل و نقل کم کربن نظیر تقویت مسیرهای پیاده و دوچرخه و بهبود سیستم حمل و نقل عمومی و افزایش محورهای کم کربن نظیر هدایت ترافیک عبوری به کمربندی دور شهر و نظایر آن می‌توان ساختار فضایی شهر آمل را در مسیر تولید کربن کمتر بهینه ساخت.

منابع

- دهمرد، رضا، برهانی، محمد و گنجعلی، مجتبی. (۱۴۰۲). واکاوی تغییرات سنجه های سیمای سرزمین در یک دوره ۳۰ ساله (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تچن)، مطالعات علوم محیط زیست، دوره هشتم، شماره دوم: ۶۶۰۳-۶۶۱۱.
- دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو، گزارش و جدول ترازنامه انرژی، www.ppp.moe.gov.ir
- حیدرزاده، حمیده، پوراصغر، فرزاد؛ رضانی، جواد و بهرامی، سجاد. (۱۳۹۶). بررسی رابطه همبستگی میزان انتشار دی اکسید کربن با جمعیت، نرخ شهرنشینی و تولید ناخالص داخلی در ایران با استفاده از مدل رگرسیون چندمتغیره، مطالعات علوم محیط زیست، ۲ (۴): ۵۲۶-۵۹۸.
- سازمان پخش فرآورده‌های نفتی مازندران. (۱۴۰۲). داده‌های مربوط به میزان مصرف سوخت‌های فسیلی در منطقه آمل طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱. تهران: سازمان پخش فرآورده‌های نفتی.
- شاه محمدی، عاطفه؛ بیات، علی و مشهدی زاده، سعید. (۱۴۰۱). بررسی آلودگی هوا شهر اصفهان براساس آلاینده دی اسید نیترژن اندازه گیری شده با سنجنده امی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۲۲، شماره ۶۷: ۱-۱۴.
- قدمی، مصطفی، لطفی، صدیقه و خالقی نیا، کوکب. (۱۳۹۲). بررسی تاثیر سیاست های فضایی بر ساختار فضایی با تاکید بر تراکم ساختمانی (مطالعه موردی: تهران). فصلنامه مطالعات شهری، ۱ (۶): ۸۹-۱۰۴.
- قدمی، مصطفی و یوسفیان، پریناز. (۱۳۹۴). تحلیلی بر تغییرات ساختار فضایی شهر اصفهان با گریزی بر آلودگی هوا. مطالعات ساختار و کارکرد شهری، ۲ (۸): ۶۳-۸۶.
- عابدینی، موسی؛ قلعه، احسان؛ آقازاده، نازفر و محمدزاده، مریم. (۱۴۰۱). پایش دمای سطح زمین و بررسی رابطه کاربری اراضی با دمای سطح با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و TM، (مطالعه موردی: شهرستان مشکین شهر)، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۲۲، شماره ۶۷: ۳۷۵-۳۹۳.
- گولدن، جنی، داگلاس، باب و فرناس، برایان. (۱۳۹۵). شهر و توسعه پایدار. ترجمه سید مسلم سیدالحسینی و مصطفی اکبری مطلق. چاپ اول. تهران: طحان.
- میرسنجری، میرمهرداد، محمدیاری، فاطمه. (۱۴۰۱). تحلیل کاربری سرزمین در شهرستان بهبهان با رویکرد اکولوژی سیمای سرزمین. علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و چهارم، شماره سه: ۱۹۱-۲۰۴.
- محمدی، حسین. (۱۳۸۵). ارتباط عناصر اقلیمی و آلاینده‌های هوای تهران با مرگ و میرهای ناشی از بیماری‌های قلبی (دوره مطالعاتی ۲۰۰۳-۱۹۹۹). پژوهش‌های جغرافیایی، (۵۷): ۴۷-۶۶.
- مرکز آمار ایران. سرشماری‌های رسمی کشور در سال‌های ۱۳۵۵ و ۱۳۹۵. پایگاه اطلاعاتی نشریات مرکز آمار، www.amar.sci.org.ir
- وزارت بهداشت، گروه سلامت هوا و تغییر اقلیم مرکز سلامت محیط و کار. (۱۴۰۰). گزارش سالانه انسیتیوی سنجش و ارزیابی سلامت دانشگاه واشنگتن، ترجمه دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی.
- یوسفیان، پریناز. (۱۳۹۳). تاثیر ساختار فضایی شهر بر روی آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر اصفهان). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه مازندران، دانشکده ادبیات و علوم انسانی.
- Bertaud, Alain. (۲۰۰۱). Metropolis: A Measure of spatial Organization of large Cities. At: <https://pdfs.semanticscholar.org/b77c/11cfb27a4d622083cb8cc1fc9bc981f09a9.pdf>.
- Bertaud, A. (۲۰۱۰). Brasilia spatial structure: between the cult of design and markets. http://alainbertaud.com/wpcontent/uploads/2012/06/AB_Brasilia_2010_20_August_1.pdf, www.alainbertaud.com.
- Burgalassi, D. & Luzzati, T. (۲۰۱۵). Urban spatial structure and environmental emissions: a survey of the literature and some empirical evidence for Italian NUTS-۳ regions. Cities, (۴۹): ۱۳۴-۱۴۸.
- Cohen, A. J., Ross Anderson, H., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., ...& Smith, K. (۲۰۲۰). The global burden of disease due to outdoor air pollution. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, ۷۸(۱۳-۱۴), ۱۳۰۱-۱۳۰۷.
- Fang C and Sh Wang and G Lia. (۲۰۱۵). Changing Urban Forms and Carbon Dioxide Emissions in China ،A Case Study of ۳۰ Provincial Capital Cities. Applied Energy, ۱۵۸: ۵۱۹-۵۳۱.
- Hughes, J. (۲۰۱۵). Climate change ۲۰۰۱: The scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- International Energy Agency. World energy outlook (۲۰۱۹), Paris: International Energy Agency.
- Masson, Linda Juhasz-Horvath, Simona Pedde, Laszlo Pinter, Mark D.A. Rounsevell, Paula A. Harrison, Integrated modelling of urban spatial development under uncertain climate futures: A case study in Hungary, *Environmental Modelling & Software* ۹۶ (۲۰۱۷) ۲۵۱-۲۶۴.
- NOAA.(۲۰۱۱). State of the climate. Message posted to <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/upper-air/۲۰۱۱/۱>.
- Pickett, S. (۲۰۰۳). URBAN ECOLOGICAL SYSTEMS: Linking Terrestrial Ecological, Physical, and Socioeconomic, Urban Ecosystems. Doi: www.۱۰.۱۱۴۶/annurev.ecolsys.۳۲.۰۸۱۵۰۱.۱۱۴۰۱۲.
- Pani, R., & Mukhopadhyay, U. (۲۰۱۰). Identifying the major players behind increasing global carbon dioxide emissions: A decomposition analysis. *Environmentalist*, ۳۰(۲), ۱۸۳-۲۰۵.
- Pezzetta, W.E. & H., Drossman. (۲۰۰۵). The Ecological Footprint of the Colorado College: An Examination of Sustainability. <http://www۲.coloradocollege.edu/Sustainability/EcoFootprint.pdf>.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (۲۰۱۹). The geography of transport systems. London, England: Routledge.
- Sil Â, Fonseca F, Gonçalves J, Honrado J, Marta- Pedroso C, Alonso J, et al. (۲۰۱۷) Analysing carbon sequestration and storage dynamics in a changing mountain landscape in Portugal: insights for management and planning. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*. ۲۰۱۷;۱۳(۲):۸۲-۱۰۴.
- Zhao G., Huang, H. Xia, O. (۲۰۲۲). Exploring the impact of landscape changes on runoff under climate change and urban development: Implications for landscape ecological engineering in the Yangmei River Basin, *Ecological Engineering* Vol . ۱۸۴, P. ۱۰۶۷۹۴.