

## تحلیل فضایی تأثیر فرم شهر بر مصرف انرژی کلان شهر کرج

کیان شاکرمی (دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران)

sorena94@yahoo.com

محمد رحیم رهنما (استاد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، نویسنده مسئول)

rahnamarahim@gmail.com

محمد اجزاء شکوهی (دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران)

shokouhim@um.ac.ir

تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰

صص ۴۴-۲۱

### چکیده

امروزه افزایش جمعیت شهری باعث رشد و گسترش بدون برنامه برخی شهرها گردیده است که این مسئله باعث بالا رفتن مصرف انرژی از جمله مصرف برق شهرها شده است. لذا هدف تحقیق حاضر، تحلیل فضایی تأثیرات فرم شهر کرج بر مصرف برق و طول خطوط شبکه برق شهر کرج است. نوع تحقیق کاربردی و روش مورد استفاده توصیفی-تحلیلی است. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز به دو روش کتابخانه‌ای و مراجعه به سازمان‌های مربوطه جمع‌آوری شده است. نمونه آماری تحقیق برای تحلیل فضایی ۱۷۳ محله شهر کرج است. از ابزار رگرسیون وزنی جغرافیا (GWR) برای تعیین تغییرات فضایی بین متغیر مستقل و وابسته استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که فرم شهر کرج در محلات مناطق پنج، یک، هفت و دو از حالت فشردگی بالایی برخوردار است؛ اما محلات مناطق ۳ و ۴ به دلیل ویلایی بودن مسکن در این محلات شهر از حالت اسپرال برخوردار هستند. بر اساس نتایج به دست آمده از رگرسیون وزنی محلی شاخص تراکم جمعیتی به عنوان یکی از شاخص‌های مهم فرم شهر دارای بالاترین میزان اثرگذاری بر مصرف برق شهر کرج بوده است، مقدار  $R^2$  آن برابر با ۰/۷۸ است: یعنی شاخص فرم شهر با توجه به این شاخص در سطح اطمینان ۹۵٪ به میزان ۷۸ درصد از مصرف برق را توجیه می‌کند. همچنین شاخص آنتروپی به عنوان یکی از شاخص از متغیر مستقل (فرم شهر) با  $R^2=0/66$  دارای بالاترین میزان اثرگذاری بر طول خطوط شبکه برق شهر کرج است؛ بنابراین نتایج نشان داد که فرم شهر کرج دارای ارتباط فضایی بیش از ۵۰ درصد بر مصرف برق و طول خطوط شبکه برق شهر کرج است.

**کلیدواژه‌ها:** توزیع فضایی، مصرف برق، رگرسیون وزنی، شهر کرج.

## ۱. مقدمه

در حال حاضر بیش از ۶۰ درصد جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند (جوراشک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸، ص. ۷۴) و رشد شتابان و فزاینده شهرنشینی، خصوصاً در کشورهای در حال توسعه پیامدهای مختلفی را در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی، کالبدی و زیست‌محیطی به همراه داشته است. یکی از این پیامدها، رشد صعودی حدود ۲۰ درصدی میزان مصرف و تقاضای انرژی در شهرها در سه دهه اخیر بوده است و پیش‌بینی شده است تا سال ۲۰۳۵ این روند ادامه داشته باشد (رفیعیان و همکاران، ۱۳۹۰؛ ص ۱۰۸). در واقع افزایش جمعیت شهری به همراه الگوی مصرف ناپایدار، فشار فزاینده‌ای را بر زمین، آب، انرژی و سایر منابع ضروری زمین وارد می‌کند. در مطالعات بسیاری که در این زمینه انجام شده است به اهمیت ارتباط بین جمعیت و فرم شهر با فشار بر منابع انرژی از جمله برق تأکید شده است. (اوتا<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۸؛ لی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۷؛ رودی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ کوریا و غیسی، ۲۰۲۰) این وضعیت می‌تواند فراسوی حدود منابع طبیعی و اقتصادی و ظرفیت تحمل شهرها باشد و توانایی اداره‌ی زندگی آن را در درازمدت به مخاطره بیندازد (شاهینی فر و حبیبی، ۱۳۹۴؛ ص. ۴۲). از سوی دیگر این افزایش جمعیت شهری باعث گسترش بی‌رویه و بدون برنامه بسیاری از شهرها گردیده است که در نهایت این مسئله باعث بالا رفتن مصرف انرژی در شهرها شده است. این مسئله در کشورهای در حال توسعه اهمیت بالاتری دارد زیرا که کمبود و ناقص بودن اطلاعات در زمینه مصرف انرژی در شهرهای این کشورها باعث شده بهینه‌سازی ساخت شهر و برنامه‌ریزی شهری در این حوزه دارای اشکالاتی باشد (سیکر<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸؛ ص. ۱۱). بر طبق گزارش سازمان ملل متحد، فرم شهر دارای تأثیر مستقیم بر مصرف انرژی (و دستیابی به توسعه پایدار) می‌باشد. (ماریک و ریتز<sup>۶</sup>، ۲۰۱۱؛ ص. ۳۴). همچنین بر اساس برخی گزارش‌های جدید این سازمان جهانی در مورد شهرها، فرم شهرها می‌تواند اثرات مثبتی بر بهره‌وری منابع، اقتصاد شهر، سلامت شهروندان، انسجام اجتماعی و پویایی فرهنگی شهر داشته باشد (بیری<sup>۷</sup>، ۲۰۲۰؛ ص. ۱) و با توجه به نتایج، بسیاری از مطالعات، برنامه‌ریزی مناسب برای شکل‌دهی به فرم شهرها می‌تواند باعث، کاهش نرخ سرانه مصرف انرژی، کاهش آلودگی، حفظ تنوع در امکانات و خدمات شهری، کاهش استفاده از اتومبیل و صرف جویی در زمان گردد. (ویلیامز<sup>۸</sup>، ۲۰۰۵؛ آربوری<sup>۹</sup>، ۲۰۰۵؛ بیبری و کروگستی<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۷؛ هوفستاد<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۲). در این بین انرژی برق یکی از پر مصرف‌ترین انرژی‌های شهری است و امروزه اهمیت انرژی برق در زمینه روشنایی خانگی، صنعتی و

1. Juraschek
2. Ota
3. Li
4. Rode
5. Cureau & Ghisi
6. Siker
7. Marik & Ritter
8. Biberi
9. Williams
10. Arbur y& Burton
11. Bibri and Krogstie
12. Hofstad

کشاورزی و سایر فعالیت‌های اقتصادی بر کسی پوشیده نیست. رشد روزافزون جمعیت شهری، توسعه زیرساخت‌ها، افزایش تکنولوژی و صنایع برق محور روبه‌روز اهمیت این انرژی ارزشمند را چندین برابر می‌کند. به طوری که امروزه یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های جوامع، مصرف انرژی و ردپای محیطی مصرف‌کنندگان است بر اساس برخی آمارهای رسمی بیش از ۷۵٪ انرژی در شهرها مصرف می‌شود (اولیویرا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶، ص. ۹۱) لذا با توجه به کاهش عدم اطمینان در مورد تقاضا و در مورد تولید برق تجدید پذیر راه‌های مختلفی برای صرفه‌جویی در مصرف مانند اصل مهم قیمت‌گذاری مطرح شده است (گلرت<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۹، ص. ۵۴۶).

مصرف برق، به‌عنوان یکی از شاخص‌های اندازه‌گیری سطح رفاه خانوار، در جهان با میانگین رشد سالانه ۲/۷ روبرو بوده است و این میزان در مورد آسیا ۴.۵ درصد بوده است. بررسی روند مصرف برق در ایران نشان می‌دهد از سال ۱۳۹۵ مصرف برق با رشد ۹/۵ درصدی نسبت به دوره قبل به ۲۴۱۰۹۱ میلیون کیلووات در ساعت رسید. (وضعیت آماری صنعت برق کشور، ۱۳۹۶) میانگین تولید برق در کشور ایران ۵۵ هزار مگاوات در سال است و میزان مصرف در سالهای پرمصرف حدود ۶۶ هزار مگاوات است که یک اختلاف ۱۱ هزار مگاواتی بین تولید و مصرف وجود دارد (<https://isn.moe.gov.ir>) و همین مسئله منجر به قطعی برق در فصول گرم سال در بسیاری از مناطق کشور شده است و نارضایتی عمومی بالایی در پی داشته است؛ و در این بین کلان‌شهر کرج در سال ۱۳۹۶ نسبت به دوره قبل ۶۹ درصد افزایش مصرف برق داشته است (شرکت برق استان البرز، ۱۳۹۸)؛ و متوسط میانگین مصرف مشترکین مناطق چهارگانه شهر کرج ۳/۹۹ مگاوات در سال است که با توجه به میانگین جهانی آمار بالایی نشان می‌دهد. در بحث تراکم جمعیتی و توسعه فضایی، شهر کرج در طی دوره‌های زمانی ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۵ روند متفاوتی طی کرده است. به طوری که آمارها نشان می‌دهد؛ در سال ۱۳۳۵ تراکم جمعیتی این شهر ۷۲/۶۳ نفر در هکتار بوده است اما در سال ۱۳۹۵ به ۱۱۱ نفر در هکتار رسیده است. به‌طور کلی تغییرات زمانی تراکم شهر منجر به تغییراتی در فرم شهری کرج شده است به طوری که؛ تراکم شهری بین سال ۱۳۳۵-۱۳۴۵ روند نزولی داشته است و شهر در این دوره زمانی دچار پراکنده رویی شده است. در ادامه بین سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۷۵ تراکم شهر روندی صعودی داشته است، لذا شهر به‌صورت فشرده رشد کرده است (شماعی و همکاران، ۱۳۹۵، ص. ۴۹)؛ همچنین با توجه به آمار ارائه شده در تحقیق حاضر (برگرفته از شرکت برق استان البرز) شهر کرج دارای مصرف بالاتری از حد استاندارد در زمینه مصرف برق است که جهت بهینه‌سازی این مصرف، شهر کرج نیازمند بررسی و ارزیابی در همه ابعاد تأثیرگذار بر مصرف برق است و از آنجا که در سایر تحقیقات مرتبط (داخلی و خارجی) اثبات شده که فرم شهرها دارای تأثیرگذاری بالایی بر مصرف انرژی از جمله برق شهری است، لذا مجموع این مسائل ضرورت تحقیق را در زمینه بررسی و تحلیل تأثیرگذاری فرم شهر کرج بر مصرف برق دو چندان می‌کند؛ بنابراین تحقیق حاضر با توجه به موضوعات و مسائل مطرح شده در صدد پاسخگویی به سؤالات زیر است: ۱- فرم شهری مناطق و محلات

1. Oliveira

2. Gellert

شهر کرج از لحاظ میزان فشردگی و اسپرال (آنتروپی شانون) در چه وضعیتی قرار دارد؟ ۲- الگوی مصرف شبکه خطوط برق مناطق و محلات شهر کرج در چه وضعیتی قرار دارد؟ ۳- بر اساس تحلیل آمار فضایی آیا بین فرم محلات شهری کرج با میزان مصرف انرژی (طول خطوط شبکه و میانگین مصرف) رابطه معناداری برقرار است؟ لذا همان طور که از ساختار کلی سؤالات تحقیق مشخص است، هدف اصلی این تحقیق، در ابتدا ارزیابی از وضعیت شهر کرج با توجه به شاخص های فرم شهری (اختلاط کاربری، تراکم جمعیت و آنتروپی شانون) است و در مرحله بعدی تحلیلی فضایی از تأثیرگذاری فرم شهر کرج بر مصرف برق و طول خطوط شبکه برق به کار رفته شده در سطح ۱۷۳ محله کلان شهر کرج است. معمولاً فرم شهری را توزیع فضایی کاربری اراضی و ویژگی های جمعیتی (کل جمعیت، تعداد خانوار، اشتغال و ...) تعریف می کنند (ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶، ص. ۱۳۹).

به طور اختصاصی ساختار شهری با رویکردها و روش های مختلف نظیر شهر فشرده، چندمرکزی و فرم های شهری اسپرال، شهر حاشیه ای، شهر لبه ای و شهر اقماری بررسی و تحلیل شده است (دیوسالار و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۴۱). اسپیکدر<sup>۲</sup> و همکارانش نیز در معرفی ویژگی های فرم شهر، اعتقاد دارند؛ که مصرف انرژی و تولید به عنوان دو پارامتر اصلی تأثیرگذار بر پایداری شهرها هستند که برنامه ریزان و شهر سازان در تدوین و طراحی فرم شهرها باید به این پارامترها توجه ویژه داشته باشند (اسیکدر، ۲۰۱۸، ص. ۱۱). تأثیرات تراکم شهری بر روی مصرف انرژی پیچیده است. مراکز مصرفی انرژی بسیار متمرکز و فشردگی الگوهای کاربری دانه های شهری، فواید زیادی را برای توزیع انرژی و طراحی سامانه های حمل و نقل به همراه دارند (هوی سام<sup>۳</sup>، ۲۰۰۱). امروزه با افزایش جمعیت شهرها و تراکم بالای صنایع و کارخانجات در کنار کشاورزی فشار زیادی به حامل های انرژی وارد شده است و دانشمندان با توجه به این فشار زیاد و از طرف دیگر کمبود منابع انرژی زا به فکر استفاده از بهترین راهکارها و مدلها برای مصرف کمتر و صرفه جویی در منابع انرژی هستند (ژائو<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰، ص. ۲). در این میان شهر سازان و برنامه ریزان شهری در طی دو دهه گذشته به این نتیجه رسیده اند؛ که موضوع شکل و فرم شهر و طراحی شهری می تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف آب و هزینه های جانبی آن (انشعابات، تأسیسات و ...) آن داشته باشد (چیپی شرستا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۷، ص. ۷۸۹). به خاطر همین موضوع طرح های زیادی از جمله شهر اکولوژیک، اقتصاد سبز، شهر سبز و ... ارائه گردید. همچنین در کنار این طرح ها برنامه ریزان به فرم و ساختار شهرها به ویژه در حوزه اشتغال، خدمات و حمل و نقل توجه ویژه ای کردند و در اکثر خروجی های به دست آمده (مخصوصاً اروپا) شهرهای با فرم فشرده در این حوزه دارای شرایط و ساختاری بهتر شناسایی شدند (سونگ<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۰، ص. ۲). هو<sup>۷</sup> رابطه تراکم شهری و

1. Zhang
2. Sikder
3. Hui, Sam.
4. Zhao
5. Chipi Shrestha
6. Song
7. Hui

تقاضای انرژی را مورد بررسی قرار داده است که نتایج بررسی ایشان بیانگر تأثیرات مثبت و منفی تراکم بر روی تقاضای انرژی است، چن و فانگ<sup>۱</sup> (۲۰۲۱) در تحقیقی با عنوان «مصرف برق صنعتی، سرمایه‌گذاری سرمایه انسانی و اقتصادی رشد در شهرهای چین» انجام دادند به این نتیجه رسیدند؛ اجرای استراتژی صرفه‌جویی در مصرف برق در شهرهای مرکزی چین بدون اینکه مانع رشد اقتصادی گردد امکان‌پذیر است. وانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۱) برای پیش‌بینی مصرف روزانه برق در مقیاس شهری از سه مدل داده محور استفاده می‌شود: مدل‌های رگرسیون خطی، مدل‌های یادگیری ماشین برای داده‌های سری زمانی و مدل‌های یادگیری ماشین برای داده‌های جدولی، لیندزی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل خطی برای پیش‌بینی میزان استفاده از انرژی حمل‌ونقل در سطح شهر و انتشار گازهای گلخانه‌ای در شیکاگو ایجاد کرد. کوسهلا<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل رگرسیون خطی چند متغیر را برای پیش‌بینی مصرف انرژی در مقیاس محله ایجاد کرد. نتایج پژوهش ژیان-شیانگ لی<sup>۵</sup> (۲۰۱۸)، در ارتباط با مصرف برق با توجه به عمل اقلیم در یک شهر گرمسیری نشان داد: که منازل مسکونی ویلایی و عمومی در مقایسه با منازل آپارتمانی مصرف برق بیشتری دارند و در نهایت راهکارهایی از جمله فشرده‌سازی را برای کاهش مصرف مفید دانستند.

## ۲. روش شناسی

### ۲.۱. روش تحقیق

نوع تحقیق کاربردی و روش مورد استفاده توصیفی-تحلیلی است. برای جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز با مطالعات کتابخانه‌ای؛ مبانی نظری، پیشینه پژوهش و شاخص‌های تحقیق مطالعه و شناسایی گردید؛ و با مراجعه به سازمان‌های مختلف (شهرداری، اداره برق، سازمان آمار و فناوری اطلاعات شهرداری کرج) داده‌ها و اطلاعات آماری مورد نیاز تهیه گردید. متغیر مستقل تحقیق فرم شهر است که شاخص‌ها و نحوه محاسبه آن در جدول شماره ۱ ارائه شده است؛ و متغیر وابسته (میزان مصرف برق محلات و طول خطوط شبکه برق محلات شهر کرج) است.

جدول ۱. متغیر مستقل تحقیق و نحوه محاسبه

متغیر	شاخص‌ها	نحوه محاسبه	توضیحات
مستقل (فرم شهر)	تراکم جمعیت	$\text{تراکم} = \frac{\text{جمعیت}}{\text{مساحت}}$	برای محاسبه این شاخص تعداد جمعیت محلات هر محله تقسیم بر مساحت (هکتار) محله شده است.

1. Chen & Fang
2. Wang
3. Lindsey
4. Kuusela
5. Xian-Xiang Li

متغیر	شاخص‌ها	نحوه محاسبه	توضیحات
	اختلاط کاربری	$H = -\sum P_i \ln P_i$ $G = \frac{H}{\ln K}$	برای محاسبه این شاخص از ۵ کاربری اصلی (آموزشی، تجاری، اشتغال، اداری و خدمات) استفاده شده است. به طوری که مساحت هر کدام از این کاربری‌ها نسبت به سایر کاربری‌ها سنجیده شده و عدد نهایی به دست آمده نشان‌دهنده میزان اختلاط کاربری هر محله است. مقدار صفر نشان‌دهنده همگونی و تک کاربری بودن محلات و مقدار ۱ نشان‌دهنده تنوع و اختلاط کاربری‌ها است.
	آنتروپی هر محله	$H = -\sum P_i \ln P_i$ $G = \frac{H}{\ln K}$	با استفاده از آنتروپی شانون فرم هر محله یعنی کاربری مسکونی تقسیم بر مساحت ساخته شده هر محله محاسبه شده است. اگر عدد به دست آمده به صفر نزدیک باشد نشان‌دهنده تراکم و فشردگی و هر چه به عدد ۱ نزدیک باشد نشان‌دهنده وضعیت اسپرال و پراکندگی محله است.

مأخذ: (یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰)

تحقیق ابتدا با استفاده از داده‌های آماری شرکت توزیع برق استان البرز میانگین مصرف برق مناطق و محلات شهری (دوره ۵ ساله) و طول خطوط شبکه بکار برده شده (برحسب کیلومتر) در سطح مناطق و محلات شهر محاسبه گردید و اطلاعات نهایی وارد نرم‌افزار ArcGIS گردید. مدل‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری آماره‌های خودهمبستگی فضایی وجود دارد که در تحقیق حاضر از آماره عمومی  $G$  (Getis-Ord General Clustering) در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است؛ و همچنین به منظور نشان دادن توزیع فضایی الگوی حاکم بر مصرف انرژی (مصرف برق و طول خطوط شبکه) از تحلیل لکه‌های داغ (Hot Spot Analysis) آمارگتیس-آرد جی (Getis-Ord Gi) استفاده شده است؛ که در کجای داده‌ها مقادیر زیاد و یا کم خوشه‌بندی شده‌اند؛ و در نهایت از رگرسیون OLS استفاده شده است؛ و در توضیح این رگرسیون باید گفت؛ که در بین رگرسیون متداول، روش حداقل مربعات معمولی، ساده‌ترین و مرسوم‌ترین روش است. طرح اولیه این روش معمولاً با OLS نشان داده می‌شود. زیربنای فکری روش حداقل مربعات معمولی این است که ضرایب مدل مقادیری اختیار کنند که مدل رگرسیون نمونه بیشترین نزدیکی را به مشاهدات داشته باشد، به عبارت دیگر کمترین انحراف را از مشاهدات فوق نشان می‌دهد. در مدل‌سازی مکانی با روش OLS فرض می‌شود که ضرایب یا پارامترهای مدل آماری نسبت به مکان (مختصات جغرافیایی) ثابت می‌شود؛ بنابراین مقدار متغیر وابسته که با این مدل تخمین زده می‌شود برای کل منطقه مورد مطالعه بوده و در نقاط مختلف حوزه نیز مقداری یکسان را تخمین می‌زند که به عنوان نقطه ضعف این روش در مدل‌سازی مکان محسوب می‌شود (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۲: ص. ۳۵). در واقع این رگرسیون با پارامترهای مختلفی که دارد نشان‌دهنده معناداری رابطه بین متغیر مستقل و وابسته را نشان می‌دهد. مدل رگرسیون معمولی به شکل زیر است:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

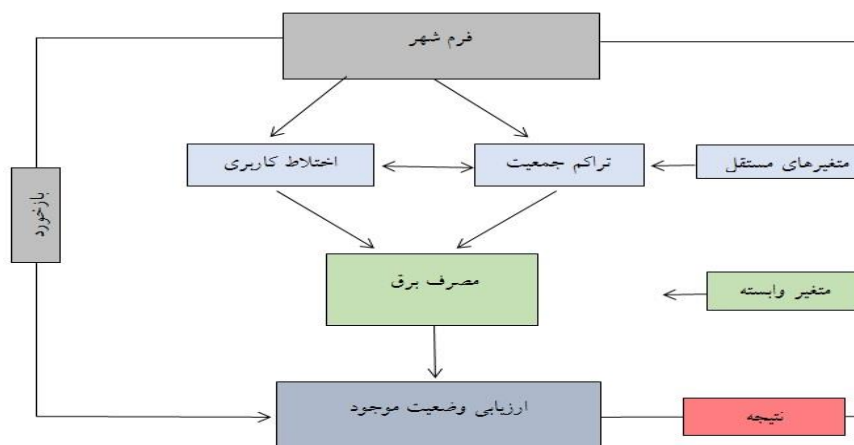
که  $y$  متغیر وابسته (برآورد شده)،  $x$  متغیر مستقل (برآورد کننده)، خطا  $\varepsilon_i$  یا انحراف مدل در برآورد،  $\beta_0$  و  $\beta_1$  پارامترها یا ضرایب مدل می‌باشند. برای تمام سطح حوزه آبخیز، مقادیر  $\beta_0$  و  $\beta_1$  ثابت فرض می‌شود. مدل آماری OLS و ماتریس تخمین ضرایب مدل، با روابط زیر بیان می‌شود:

$$y = X\beta + \varepsilon$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$$

که در آن  $T$  ترانهاده ماتریس،  $(X^T X)^{-1}$  معکوس ماتریس واریانس-کوواریانس و  $X$  ماتریس متغیرهای مستقل می‌باشد. ضرایب مدل رگرسیونی چند متغیره SLO در سراسر مکان ثابت است. با استفاده از این مدل امکان تهیه نقشه تغییرات مکانی پارامترها یا ضرایب مدل وجود ندارد. بعلاوه، این مدل با نرم افزار ArcGIS ناسازگار بوده و همبستگی مکانی را در نظر نمی‌گیرد (زیبایی و باقری، ۱۳۹۲، ص. ۴). در نهایت با توجه به نتایج رگرسیون OLS نیاز به ابزاری دیگر برای تحلیل فضایی مشهود گردید؛ که در نهایت از رگرسیون وزنی جغرافیا (GWR) برای تعیین تغییرات فضایی بین متغیر مستقل و وابسته استفاده شده است.

مدل مفهومی تحقیق که نشان دهنده چارچوب تشکیل دهنده مراحل تحقیق است در شکل ۱ ارائه گردید.

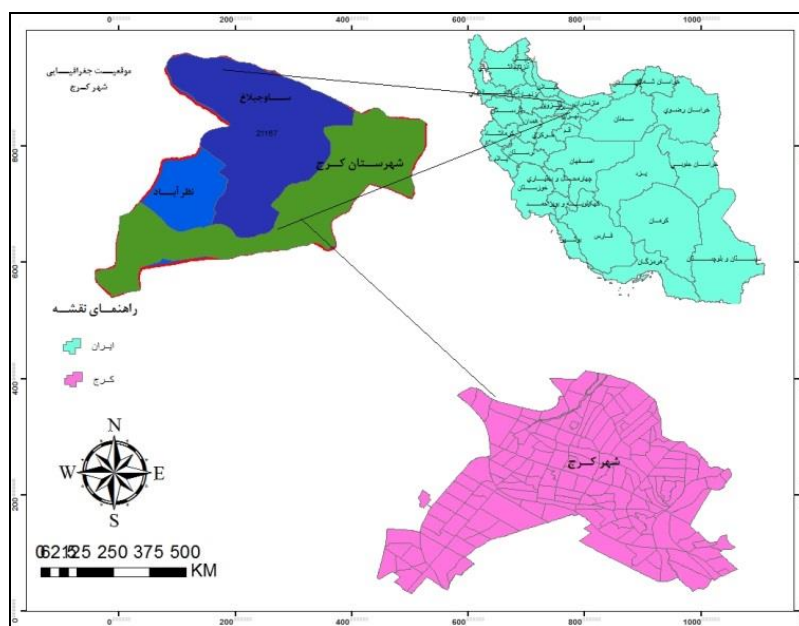


شکل ۱. مدل مفهومی تحقیق

## ۲.۲. محدوده مورد مطالعه

کرج مرکز استان البرز، مرکز شهرستان کرج و یکی از کلان‌شهرهای ایران است. این شهر با ۱۳۹۲۴۹۲ نفر جمعیت در سال ۱۳۹۵ چهارمین شهر پرجمعیت ایران است. شهر کرج با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه خاوری و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۴۵ ثانیه شمالی، با ارتفاع ۱۲۹۷ متر از سطح دریا (ایستگاه

راه آهن)، در فاصله ۴۸ کیلومتری غرب شمالی تهران واقع شده است. کلان‌شهر کرج نیز بیست و دومین کلان‌شهر پرجمعیت خاورمیانه است. مساحت کلان‌شهر کرج برابر با ۱۳۲۶۰.۹۹ هکتار است.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی شهر کرج

### ۳. یافته‌ها

در این بخش از تحقیق ابتدا وضعیت شاخص‌های تعیین‌کننده فرم شهر در قالب محلات ۱۷۳ گانه شهر کرج تعیین شده است.

#### ۳.۱. تراکم جمعیتی

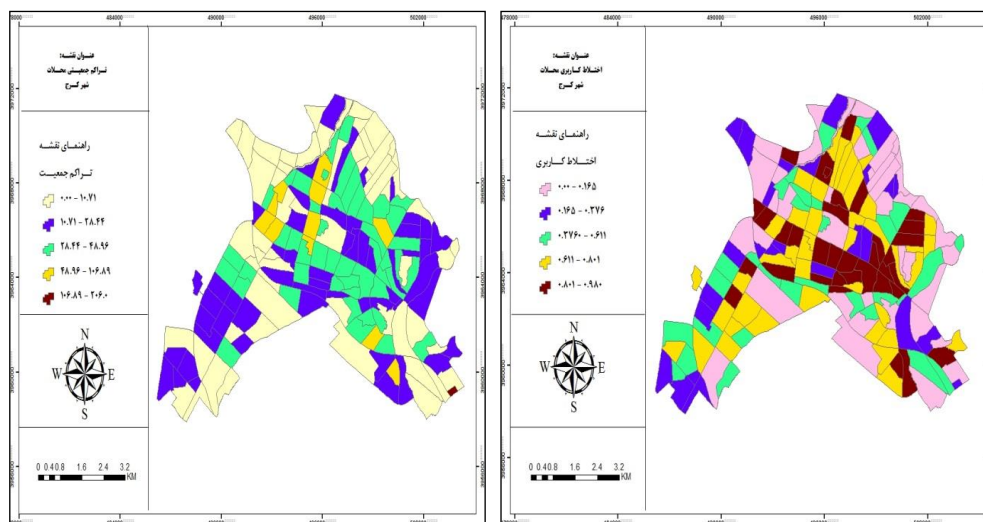
برای محاسبه عدد این شاخص تعداد جمعیت تک‌تک محلات شهر کرج (۱۷۳ محله) تقسیم بر مساحت کلی هر محله شده است؛ و نتایج نشان داد محلات؛ حیدرآباد غربی ۱۰۶، مالک اشتر ۶۹، رضا شهر ۶۸، شهرک خاتم ۲۰۶ دارای بالاترین سطح تراکم جمعیتی در سطح شهر کرج هستند که البته غیر از محله شهرک خاتم که در منطقه ده قرار دارد سایر مناطق فشرده و متراکم جمعیتی در مناطق مرکزی شهر تجمع دارند (شکل ۳).

#### ۳.۲. اختلاط کاربری

در این مرحله با استفاده از مدل آنتروپی شانون مقدار اختلاط کاربری‌های محلات شهر کرج محاسبه گردید. برای تعیین میزان اختلاط کاربری محلات از ۵ کاربری: اداری، آموزشی، خدماتی، تجاری و درمانی استفاده شده است. (شکل ۳) نتایج به‌دست‌آمده مؤید این مطلب است که در زمینه اختلاط کاربری محلاتی مانند؛ گلشهر غربی ۱، دهقان ویلای ۱، دهقان ویلای دو، کوی کارمندان جنوبی، گلزار جنوبی، رجب آباد، عظیمه یک، عظیمه دو دارای



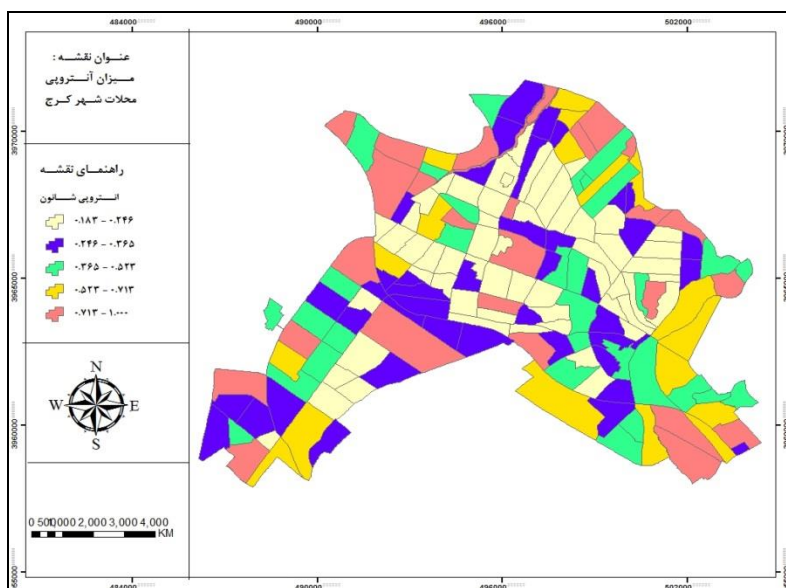
بیشترین اختلاط کاربری هستند. در واقع با توجه به نقشه اختلاط کاربری مشخص است که مناطق مرکزی شهر دارای اختلاط کاربری بالاتری هستند؛ و مناطق حاشیه‌ای شهر دارای اختلاط کاربری ضعیفی هستند.



شکل ۳. اختلاط کاربری و تراکم جمعیتی محلات شهر کرج

### ۳.۳. آنتروپی شانون

در اینجا برای بررسی میزان فشردگی یا اسپرال بودن فرم محلات شهر از آنتروپی شانون استفاده شده است (شکل ۴)؛ و همان‌طور که از شکل زیر مشخص است بیشترین محلات با فرم فشرده در محلات مرکزی شهر یعنی مناطق؛ ۱.۲.۷.۸.۹.۵ قرار دارند؛ که شامل محلاتی مانند؛ حیدرآباد غربی، شاهین ویلای جنوبی، فاز ۳ مهرشهر، حصارک بالا، شکرآباد و عظیمه ۲ دارای فشردگی بالایی از لحاظ فرم شهری و جمعیتی هستند که از دلایل این موضوع تجمع امکانات و خدمات شهری و دسترسی‌پذیری این مناطق است. همچنین محلاتی مانند؛ معراج، شهرک کوثر، ریحانه، باغ سیب، باغ ارتش و طرخانی دارای فرم اسپرال و تراکم جمعیتی پایین هستند. در ساختار کلی شهر مشهود است که محلاتی حاشیه بخصوص منطقه ده شهر میزان اسپرال بیشتر است که از دلایل آن کمبود امکانات و خدمات شهری، فقر و عدم دسترسی‌پذیری مناسب و موانع طبیعی بخصوص در قسمت‌های شرقی شهر را می‌توان ذکر کرد.



شکل ۴. فرم محلات شهر کرج بر اساس میزان فشردگی یا اسپرال

بعد از اینکه فرم محلات شهر کرج محاسبه و تعیین گردید. وضعیت موجود شهر را در زمینه متغیر وابسته تحقیق یعنی (مصرف برق و طول شبکه) مورد بررسی قرار دادیم. برای بررسی این وضعیت از داده‌های دوره ۵ ساله استفاده شده است. (جدول ۲).

جدول ۲. میانگین مصرف برق مشترکین سالانه بر اساس مگاوات ساعت

مناطق	خانگی	عمومی	کشاورزی	صنعتی	تجاری	روشنایی معابر	جمع	جمعیت مشترکین	مناطق شهرداری
شرق کرج	۲/۱۹۳	۱۰/۰۹۲	۲۸۹/۷۸۶	۱۴۵/۰۶۵	۴/۹۶۸	۲۴/۸۸۱	۴/۰۳۷	۲۶۰/۵۳۹	۱۸.۱۰
غرب کرج	۲/۲۲۶	۷/۳۷۵	۲۱۵/۸۷۲	۱۹۸/۰۹۴	۴/۴۸۰	۴۳/۱۴۶	۳/۴۷۳	۳۳۸/۶۳۸	رجایی شهر (مناطق ۶ و ۷)
جنوب کرج	۱/۸۹۰	۱۱/۴۹۲	۱۱۶/۵۱۹	۱۷۹/۲۳۰	۵/۶۸۵	۲۲/۶۸۴	۴/۸۱۳	۹۳/۶۱۰	۵ و ۹ و قسمت‌هایی از ۱۰
مهرشهر	۲/۱۶۹	۷/۱۹۹	۲۳۰/۳۰۰	۱۴۵/۴۳۳	۴/۳۳۶	۱۱/۴۹۷	۳/۶۹۰	۱۷۱/۵۹۶	۳ و ۴

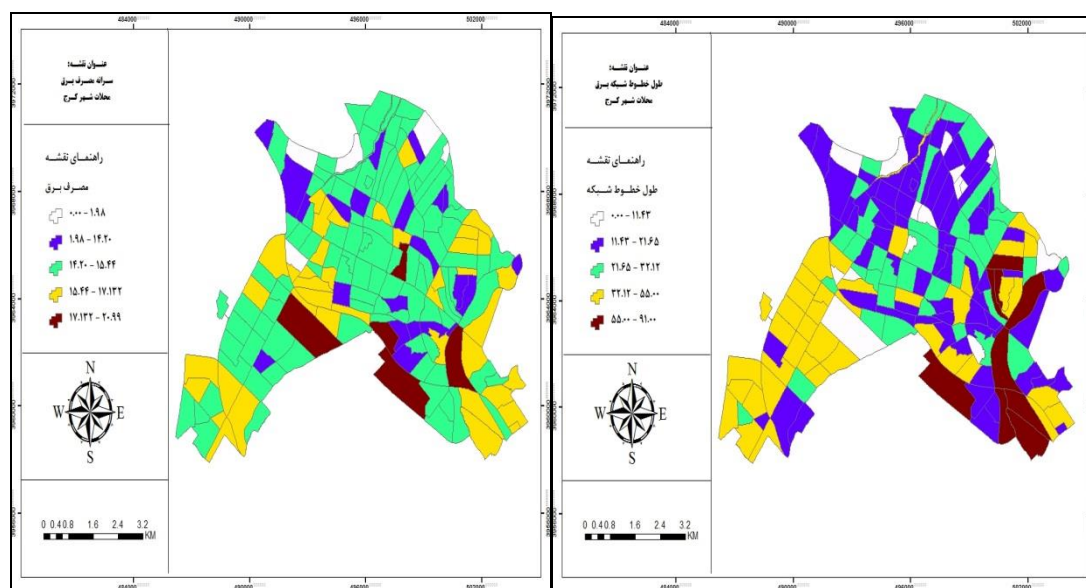
مأخذ: (شرکت برق استان، ۱۳۹۸-۱۳۹۵)

جدول ۳. طول خطوط شبکه برق شهر کرج

مناطق	طول خطوط توزیع شبکه برحسب کیلومتر	مناطق شهرداری
غرب کرج	۱۴۰۷	رجایی شهر (مناطق ۶ و ۷)
شرق کرج	۱۷۵۷	۵، ۱۸، ۱۰
مهرشهر	۱۱۶۸	۳ و ۴
جنوب کرج	۹۷۱	۹ و ۵ و ۲ و قسمت‌هایی از ۱۰

مأخذ: (شرکت برق استان البرز، ۱۴۰۰)

همان‌طور که از نتایج تحقیق در شکل ۵ مشخص شد؛ مناطق و محلات جنوبی و تا حدودی شرقی شهر دارای الگوی مصرف بالاتری نسبت به سایر بخش‌های دیگر شهر هستند که از دلایل عمده می‌توان به وجود تعداد بالاتر صنایع و فضاهای سبز شهری به همراه خانه‌های باغی در این مناطق اشاره کرد به‌طور مثال وجود پارک بزرگ چمران در منطقه ده شهر، محله خلج آباد، کارخانه ذوب‌آهن در محله شیخ‌آباد یا وجود برخی صنایع در محله کلاک پایین است. همچنین در مهرشهر کرج علی‌رغم بالابودن مصرف برق مشترکین در بخش کشاورزی، محلات ریحانه و آق تپه ۳، دارای میانگین مصرف پایین سایر مناطق شهر کرج است که از دلایل پایین بودن مصرف مشترکین روشنایی معابر و عمومی در سطح محلات شهر است؛ و با توجه به نقشه فرم شهر مشخص است مناطقی که دارای فرم پراکنده هستند دارای میزان مصرف بیشتری هستند و مناطق مرکزی شهر که داری فشردگی بالاتری هستند مصرف پایین‌تری هستند (شکل ۵).



شکل ۵. طول خطوط شبکه و میزان سرانه مصرف برق محلات شهر کرج

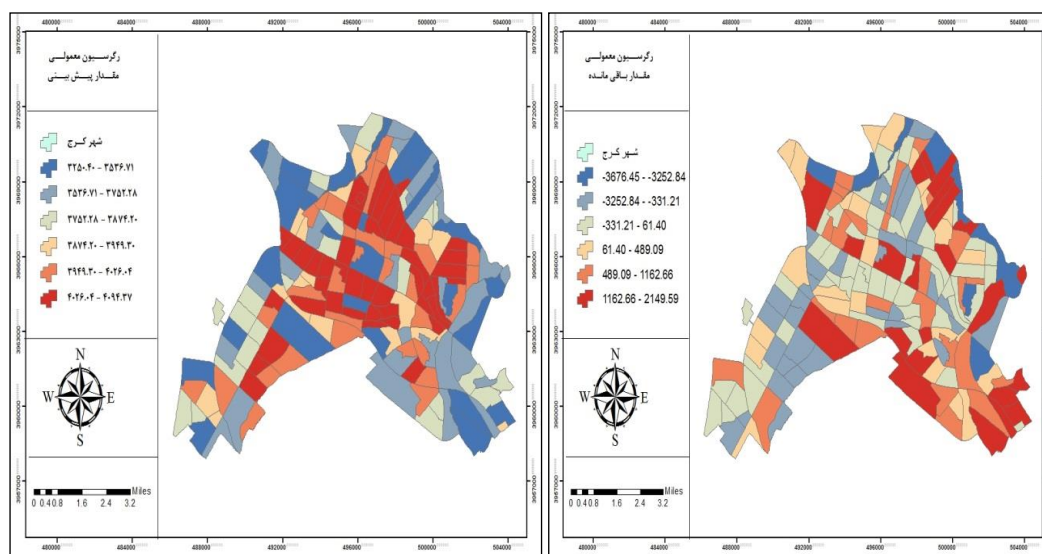
### ۳. ۴. رگرسیون OLS

در این مدل چند پارامتر نشان‌دهنده معناداری رابطه، تأثیرگذاری متغیر مستقل و مؤثر بودن مدل هستند: Coefficient: این پارامتر نشان‌دهنده اثرگذاری متغیر مستقل بر متغیر وابسته است و هر چقدر عدد به دست آمده بیشتر از صفر باشد نشان‌دهنده اثرگذاری بالای متغیر مستقل است لذا در اینجا عدد به دست آمده برای متغیر آنتروپی شانون مقدار ۰/۴۰۵۳۲۶، اختلاط کاربری ۰/۰۷۸۹۳، تراکم جمعیت ۰/۵۰۰۸۶۱ است. همانطور که از اعداد به دست آمده مشخص است در هر سه متغیر عدد به دست آمده به سمت صفر نزدیک‌تر است که این موضوع نشان‌دهنده اثرگذاری کم تر متغیر مستقل است. همچنین پارامتر Probability و Robst-pr هر چقدر به عدد صفر نزدیک باشد نشان‌دهنده این موضوع است که ضریب متغیر مستقل از نظر آماری معنادار است و متغیر مستقل یک متغیر مؤثر در پیش‌بینی متغیر وابسته است (البته در صورتی که پارامتر Jarque-staticiec معنادار نباشد). لذا اعداد به دست آمده به صفر نزدیک است؛ اما در نهایت عدد آماره Jarque-staticiec برابر با \*۰/۰۰۰۹۱۰ است که نزدیک به عدد صفر است یعنی در سطح معناداری بالایی قرار دارد. لذا جایگزین نمودن یک روش رگرسیون مناسب فضایی (از جمله تأخیر، خطا و موزون جغرافیایی) لازم به نظر می‌آید.

جدول ۴. آزمون تشخیص صحت مدل رگرسیون مربعات معمولی (OLS)

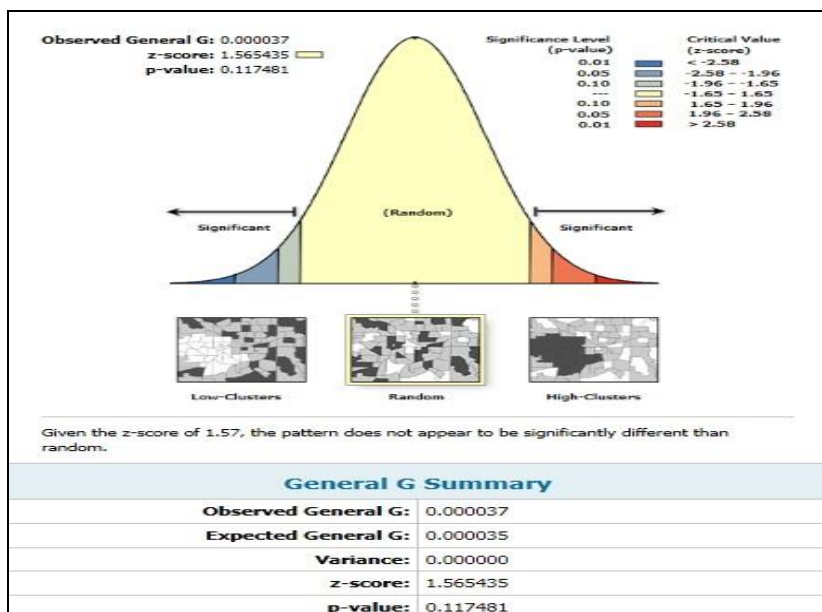
Jarque-staticiec(dependent)	Robst-pr	Probability	t-statistic	Coefficient	Variable
Intercept	۱۲.۸۷۶۵	۵/۶۸۴۵	۰.۹۰۵۲۷	۰/۷۶۱۸	----
آنتروپی شانون	۰/۴۰۵۳۲۶	۴/۳۱۲۷	*۰.۰۰۷۴	۰/۰۳۴	*۰/۰۰۰۹۱۰
اختلاط کاربری	۰/۰۷۸۹۳	۱/۵۲۷۸	*۰/۰۰۰	*۰/۰۰۰	
تراکم جمعیت	۰/۵۰۰۸۶۱	۵/۰۴۵۷	*۰/۰۰۵۳	*۰/۰۸۲	

مأخذ: (یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰)



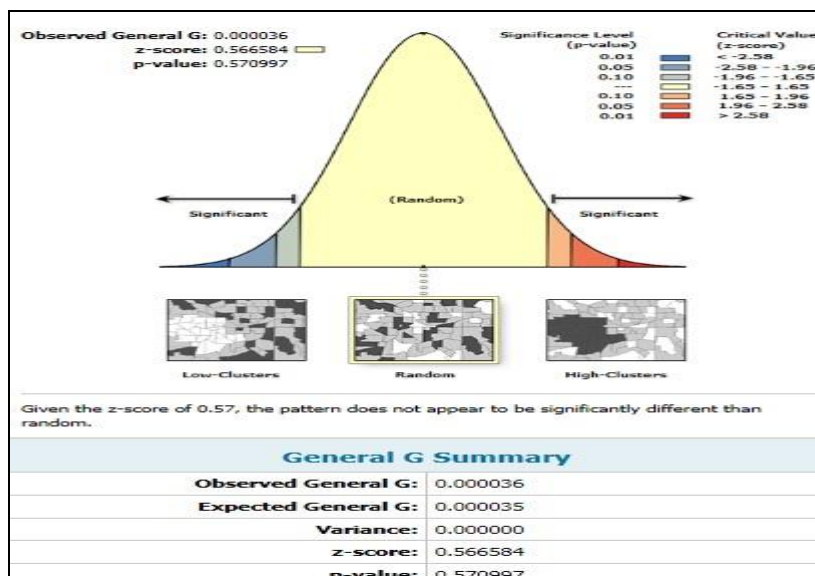
شکل ۶. ضرایب رگرسیون معمولی OLS مقدار باقی مانده و مقدار پیش بینی شده

در این مرحله بررسی و تحلیل الگوی توزیع مصرف برق و طول خطوط شبکه برق در سطح محلات شهر کرج انجام شده است. برای دستیابی به این موضوع از ابزار High/Low (Getis-Ord General G) Clustering در نرم افزار ArcGIS استفاده شد. در واقع ابزار خوشه بندی زیاد/کم نوعی آمار استدلالی و استنتاجی است و به معنای آن است که نتایج آن با توجه به فرضیه صفر تعبیر و تفسیر می شوند. در واقع این تحلیل نشان می دهد که که مکان جغرافیایی چه تأثیری بر توزیع داده ها دارد؛ بنابراین زمانی که مقدار امتیاز استاندارد Z بسیار بزرگ و مقدار P-Value بسیار کوچک و نزدیک به صفر باشد، آنگاه نتیجه می گیریم که فرضیه صفر رد می شود. در واقع فرض صفر نشان دهنده عدم خوشه بندی فضایی داده ها است؛ بنابراین با توجه به شکل ۷ نتایج نشان دهنده این مطلب است که؛  $Z\text{-Score} = 1.065435$  که در سطح  $0.01$  معنادار است؛ و مقدار  $P\text{-Value} = 0.117481$  بنابراین فرضیه صفر تایید می شود و این مقدار از این دو پارامتر نشان دهنده توزیع تصادفی داده های مصرف برق در سطح محلات شهر کرج هستند. ولی با توجه به عدد Z به دست آمده که بالاتر از ۱ است الگو نشان از حرکت به سمت توزیع خوشه ای داده ها دارد. همچنین بیشتر لکه های داغ یا خوشه های نزدیک در اطراف و حاشیه مناطق شهر تجمیع شده است. و در واقع خوشه ها در نواحی حاشیه مناطق روند افزایشی و در نواحی مرکز روند کاهشی دارا هستند.



شکل ۷. نتایج آزمون آماری G در ارزیابی مصرف برق

همچنین با توجه به اعداد به دست آمده، نمودار الگوی شبکه و طول خطوط (برحسب کیلومتر) برای شهر کرج نشان می دهد؛ برای دو پارامتر،  $Z\text{-Score} = 0.566584$  و مقدار  $P\text{-Value} = 0.570997$  نتایج مؤید رد شدن فرضیه صفر (عدم خوشه بندی) و تأیید خوشه بندی فضایی اعداد به صورت اتفاقی است. البته با توجه به عدد Z که خیلی بزرگ نیست و به صفر نزدیک است خوشه بندی ضعیف صورت گرفته است (شکل ۸).



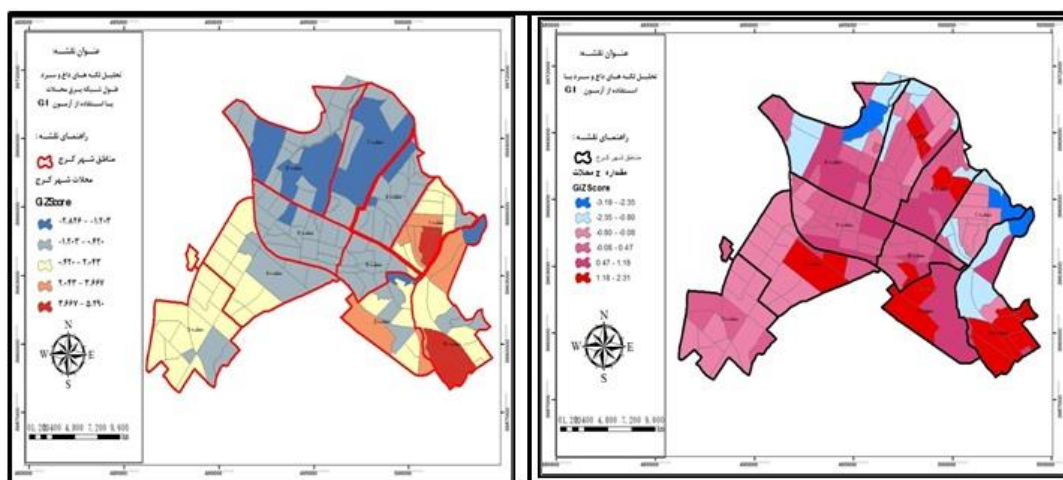
شکل ۸. نتایج آزمون آماری G در ارزیابی طول خطوط شبکه برق

در مرحله بعد با استفاده از مدل تحلیل لکه‌های داغ (Hot Spot Analysis) آمارگتیس-آرد جی (Getis-Ord  $G_i^*$ ) برای کلیه عوارض موجود در داده‌ها محاسبه شد. امتیاز  $Z$  محاسبه‌شده نشان می‌دهند که در کجای داده‌ها مقادیر زیاد و یا کم خوشه‌بندی شده‌اند. برای اینکه یک عارضه لکه داغ تلقی شود و از نظر آماری معنادار باشد باید هم خودش و هم عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارند دارای مقادیر بالا باشند (عسگری، ۱۳۹۰: ۷۶). فرمول آن به شرح زیر است:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad \bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{s \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}}$$

در این فرمول  $x_j$  مقدار خصیصه برای عارضه  $j$ ،  $w_{ij}$  وزن فضایی بین عارضه  $i$  و  $j$  و  $n$  برابر با تعداد کل عارضه‌ها می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل این دستور در ابزار GIS و همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است؛ بیشتر محلات شهر کرج از لحاظ مصرف برق دارای آماره  $Z$  پایین‌تر از سطح معناداری هستند و در طیف دانه‌ای ۱- تا صفر قرار گرفته‌اند و البته محلاتی مانند کوی بعثت، سرچوب ویسه، باغستان غربی ۳ و نهر دلمبر لکه‌های آبی یا محلات خیلی کم مصرف برق را تشکیل می‌دهند و مقدار  $Z$  به‌دست‌آمده برای این محلات از نظر سطح معناداری اختلاف زیادی دارند و در طیف ۳- تا ۲- قرار می‌گیرند. همچنین محلات (ذوب‌آهن، زینیه، باغ سیب، کلاک احمدیه و موسسه تحقیقات جهان موجود) در منطقه ۱۰ و ۲ و ۴ بیشترین لکه داغ، میانگین مصرف سالانه را نشان می‌دهند که از دلایل این موضوع می‌توان به قرار گیری؛ باغات و زمین‌های کشاورزی و صنایع تولیدی اشاره کرد که در این مناطق مستقر هستند. همچنین با توجه به نتایج آزمون مناطقی مانند منطقه ده شهر کرج که دارای وضعیت اسپرال و پراکندگی بالاتری هستند مصرف برق بیشتری دارند.



شکل ۹. تحلیل لکه‌های داغ میانگین مصرف برق و طول خطوط شبکه برق با آزمون GI

در این مرحله با استفاده از آزمون رگرسیون وزنی جغرافیایی به عنوان یکی از آزمون‌های تحلیل آمار فضایی، ارتباط فضایی بین فرم محلات شهر کرج به عنوان متغیر مستقل با متغیر وابسته (میزان مصرف برق، طول خطوط شبکه) محاسبه شده است. GWR تکنیک آماری فضایی محلی است. هنگامی که واحد سنجش متغیر مورد بررسی از مکانی به مکان دیگر متفاوت می‌شود، این رگرسیون برای تحلیل ناهمسانی فضایی به کار می‌رود فرمول رگرسیون وزنی به شرح زیر است:

$$\hat{y} = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad \beta_0(\mu_i, v_i) \beta_k(\mu_i, v_i) N(0, \sigma^2)$$

در این رابطه  $(\mu_i, v_i)$  مختلف هر موقعیتی از  $i$  است.  $\beta_0(\mu_i, v_i)$  محل تقاطع برای موفقیت  $i$ ، پارامتری محلی است که متغیر مستقل  $x_k$  را در موقعیت  $i$  تخمین می‌زند و  $\varepsilon_i$  خطای تصادفی با فرض  $N(0, \sigma^2)$  (فرض نرمال بودن) است. برای مجموعه داده‌های پارامتری محلی،  $\beta_k(\mu_i, v_i)$  با استفاده از مراحل حداقل مربعات وزنی تخمین زده می‌شود. وزن‌های  $w_{it}$  برای  $2, I=1, \dots, n$  در هر موقعیت  $(\mu_i, v_i)$  به عنوان تابع پیوسته‌ای از فواصل میان موقعیت  $i$  و موقعیت دیگر به دست می‌آید. (رفیعیان و زاهد، ۱۳۹۷، ص. ۳۷۱). در واقع تحلیل رگرسیون وزنی جغرافیا خروجی‌های مختلفی را ارائه می‌دهد که در بین خروجی‌های ارائه شده، مقادیر  $R^2$  و  $R^2$  تعدیل شده ( $Adjusted R^2$ ) مهم‌ترین مقادیر هستند که میزان تبیین مدل را نشان می‌دهند و هرچه این اعداد به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده این است که متغیر مستقل مورد استفاده به خوبی تغییرات متغیر وابسته را شرح می‌دهد. در واقع، نقشه‌های ضرایب محلی نشان می‌دهد که تأثیر متغیر مستقل در مدل به میزان قابل توجهی در محدوده مورد مطالعه تغییر می‌کند. یعنی اگر ضرایب رگرسیون محلی تخمین زده شده برای متغیر مستقل مثبت باشد، حاکی از آن است که با افزایش سهم متغیر مستقل در محدوده مورد نظر، بر سهم متغیر وابسته افزوده می‌شود و اگر ضرایب محلی تخمین زده شده منفی باشد، حاکی از آن است که با افزایش سهم متغیر مستقل، از سهم متغیر وابسته در محدوده مورد مطالعه کاسته می‌شود. لذا با استفاده از رگرسیون وزنی محلی میزان تأثیر تراکم جمعیتی، اختلاط کاربری‌ها و آنتروپی شانون به عنوان سه شاخص مهم فرم شهر بر مصرف برق برآورد شده است، تغییرات محلی در  $R^2$  Squared، میزان برآزش مدل محلی به داده‌ها و ناهمگنی مکانی در رابطه بین مصرف برق و پارامترهای مرتبط را منعکس می‌کند. در واقع در شکل ۸ این تغییرات از محلی به محل دیگر مشهود است. به طوریکه مقدار  $R^2$  متغیر تراکم جمعیتی برابر با  $0/78$  است؛ یعنی شاخص فرم شهر با توجه به این دو شاخص در سطح اطمینان  $95\%$  به میزان  $78\%$  درصد از مصرف برق را توجیه می‌کند. و این تغییرات در مناطق شرقی، شمالی و جنوبی شهر (منطقه ۳) مشهود است. در واقع مقدار بالای ضریب  $Local R^2$  در این مناطق و محلات شهر می‌تواند به دلیل وضعیت اسپرال منطقه ۳ و استفاده بالا از روشنایی معابر و فضاهای سبز در سطح محلات باشد. همچنین مقدار  $Local R^2$  در مورد متغیر اختلاط کاربری بین  $0/17$  تا  $0/48$  است که مقدار پایینی را نشان می‌دهد در واقع مقدار تعیین محلی  $R^2$  نشان می‌دهد



که در مناطق شمال غربی و منطقه مهر شهر متغیر مستقل تأثیرگذاری بیشتری بر متغیر وابسته نشان می‌دهد. که البته این سطح معناداری کمتر از ۰/۵۰ است و برازش خوب و با دقت بالایی را نشان نمی‌دهد. مقدار  $R^2$  متغیر آنتروپی شانون برابر بین ۰/۵۴ تا ۰/۷۴ است و برازش خوب و با دقت بالایی را نشان می‌دهد. و مقدار محلی  $R^2$  در محلات مناطق ۶، ۵، ۲، ۱، ۴، ۳ مقدار بالایی نشان می‌دهد. که از دلایل این امر؛ حالت اسپرال شهر در حاشیه منطقه ۶ و مناطق ۳ و ۴، وجود کارخانه ذوب آهن در منطقه ۲ اشاره کرد.

همچنین مقدار  $AICc^2$  در سه متغیر تراکم جمعیت، آنتروپی شانون عدد پایینی را نشان می‌دهد که این موضوع نشان‌دهنده انطباق بهتر مدل با داده‌های مشاهداتی است. آماره توصیفی  $Pridicted$  در هر سه متغیر تغییرات چشمگیری را نشان می‌دهد به طوری که مشخصاً تغییرات فضایی بین متغیر مستقل و متغیر وابسته را به سمت مناطق مرکزی شهر (منطقه ۱، ۲، ۵، ۹، ۸، ۷) نشان می‌دهد. یعنی تغییرات محلی در  $R$ -Squared در مناطق مرکزی و جنوب منطقه ۱۰ دارای تغییرات چشمگیری است و این مقدار نسبت به  $R^2$  تغییرات را در این مناطق نشان می‌دهد. یعنی انتظار می‌رود برخلاف رویه کنونی ارتباط بین فرم شهر و مصرف برق در این مناطق و محلات آن‌ها بیشتر شود. و عدد مورد انتظار در هر سه متغیر بیشتر از  $R^2$  کنونی روابط فرم شهر و مصرف برق را نشان می‌دهد. و این موضوع در نقشه  $Pridicted$  هر سه متغیر مشهود است.

#### جدول ۵. رگرسیون وزنی تراکم جمعیت و اختلاط کاربری

متغیر	$R^2$	$AICc^2$	$\Sigma^1$	Adjusted $R^2$	Squares Residual	$Pridicted$
تراکم جمعیتی	۰/۷۸	۱۶۳/۰۶	۱/۲۱	۰/۷۱	۹۶/۶۷	۰/۹۲
اختلاط کاربری	۰/۴۸	۲۰۵/۰۸	۱/۶۵	۰/۴۵	۱۲۱/۵۲	۰/۶۱
آنتروپی شانون	۰/۷۴	۱۷۸/۰۸	۱/۲۵	۰/۶۲	۹۸/۰۸	۰/۷۶
کل متغیرها	۰/۶۰	۱۸۲/۳۳	۱/۴۳	۰/۵۳	۷۶/۱۱	۰/۷۶

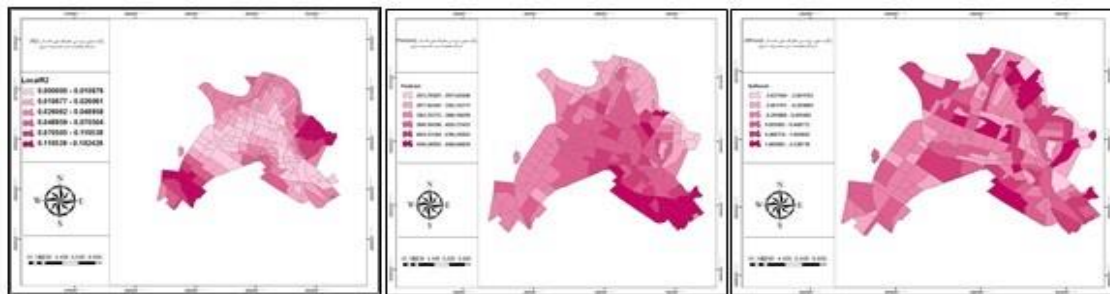
مأخذ: (یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰)

با توجه به نقشه شماره ۱۰، ۱۱ و ۱۲، مشخص است که میزان ضریب همبستگی متغیرهای تراکم جمعیت، میزان آنتروپی بر مصرف برق در اکثر محلات شهر کرج تقریباً مثبت است. این همبستگی در محلاتی مانند؛ کوی بعثت، معراج، حصار، گلستان یکم، عظیمیه یک، عظیمیه سه بیشتر و مثبت است؛ و این نتایج نشان می‌دهد که بین شاخص‌های (تراکم جمعیتی و اختلاط کاربری)، در محلات حاشیه شهر که دارای فرم اسپرال یا پراکنده هستند این

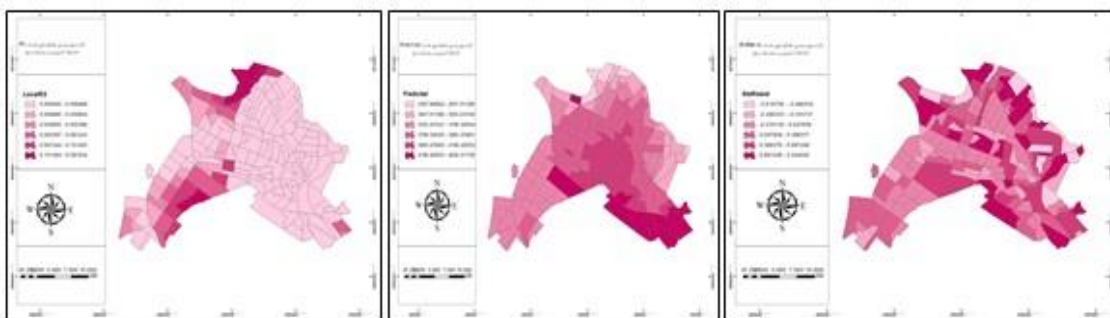
۱. سیگما: شاخص انحراف معیار باقی مانده‌هاست و کوچکتر بودن آن نشانه برتری مدل است.

۲. آکاییک: یکی از شاخص‌های بسیار مفید برای مقایسه مدل‌های رگرسیون است که مقدار پایین آن نشان دهنده انطباق بهتر مدل با داده‌های مشاهداتی است.

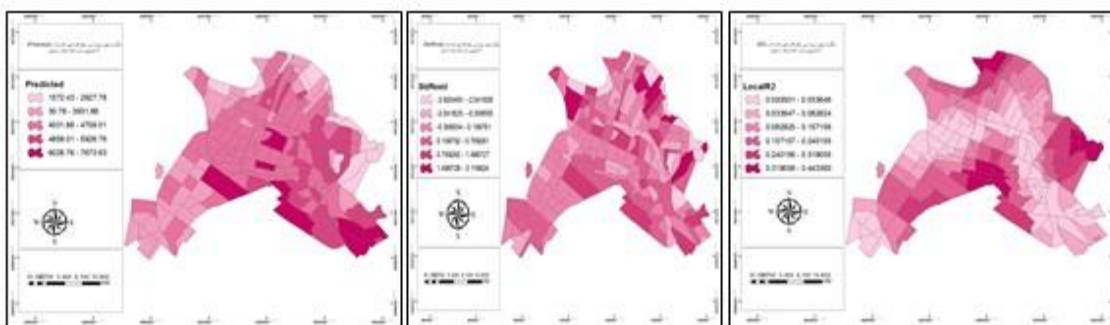
همبستگی با مصرف برق بیشتر است و محلاتی که دارای فرم فشرده‌ای در مناطق ۵ و ۲ و ۹ این میزان همبستگی پایین‌تر است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. آماره‌های توصیفی ( $StdResid$ ,  $R^2$ ,  $Pridicted$ ) متغیر تراکم جمعیت



شکل ۱۱. آماره‌های توصیفی ( $StdResid$ ,  $R^2$ ,  $Pridicted$ ) متغیر اختلاط کاربری



شکل ۱۲. آماره‌های توصیفی ( $StdResid$ ,  $R^2$ ,  $Pridicted$ ) آنتروپی شانون

در این مرحله با استفاده از رگرسیون وزنی جغرافیایی به دنبال تحلیل فضایی ارتباط فرم شهر با طول خطوط شبکه برق در سطح کلان‌شهر کرج هستیم. نتایج نشان می‌دهد که متغیرهای تراکم جمعیتی ( $R^2=0/41$ ) و اختلاط کاربری ( $R^2=0/54$ ) به ترتیب دارای اثرگذاری ضعیف و متوسطی بر طول خطوط شبکه برق هستند؛ اما آنتروپی

شانون محلات شهر با عدد ( $R^2=0/66$ ). دارای اثرگذاری تقریباً بالایی بر طول خطوط شبکه برق شهر کرج است؛ و در تفسیر نقشه‌های می‌توان گفت محلاتی که در منطقه ده (همت‌آباد و کلاک پایین)، با مقدار  $R^2=0/60$  محلات منطقه سه (محلاتی مانند؛ کوی مهر، قزل‌حصار، آزادی، فاز ۱، کاخ مروارید، گلستان یکم) دارای  $R^2=0/66$  و بالاتر هستند. همچنین محلات حاشیه‌ای منطقه هفت و هشت و یک دارای  $R^2$  بالاتر  $0/60$  درصد هستند. با توجه به مقدار  $R^2$  به دست آمده برای شاخص فرم هر محله بر اساس عدد آنتروپی شانون میزان اثرگذاری این شاخص بر متغیر (طول خطوط شبکه برق شهر کرج) به صورت متوسط رو به پایین ارزیابی می‌گردد؛ و مقدار  $R^2$  فقط در محلاتی مانند همت‌آباد، کلاک پایین، ذوب‌آهن بالاتر از عدد  $0/75$  است؛ و نکته قابل توجه این است که مناطق شاهین ویلا، حیدرآباد غربی، عظیمه که دارای تراکم جمعیتی و فشردگی فرم بالا هستند طول خطوط شبکه کمتری به خود اختصاص داده‌اند که این موضوع نشان‌دهنده ارتباط بالایی بین فرم پراکنده با طول خطوط شبکه است. همچنین مقدار  $AICc^2$  در دو متغیر اختلاط کاربری، آنتروپی شانون عدد پایینی را نشان می‌دهد که این موضوع نشان‌دهنده انطباق بهتر مدل با داده‌های مشاهداتی است. آماره توصیفی Predicted متغیر تراکم جمعیتی تغییرات عدد ( $0/59$ ) را نشان می‌دهد و از لحاظ فضایی تغییرات در مناطق ده، شش و هفت کاملاً محسوس است و ارتباط فضایی متغیر مستقل و وابسته در این مناطق بیشتر پیش‌بینی شده است.

#### جدول ۶. نتایج آماره‌های توصیفی متغیرها حاصل رگرسیون وزنی جغرافیا

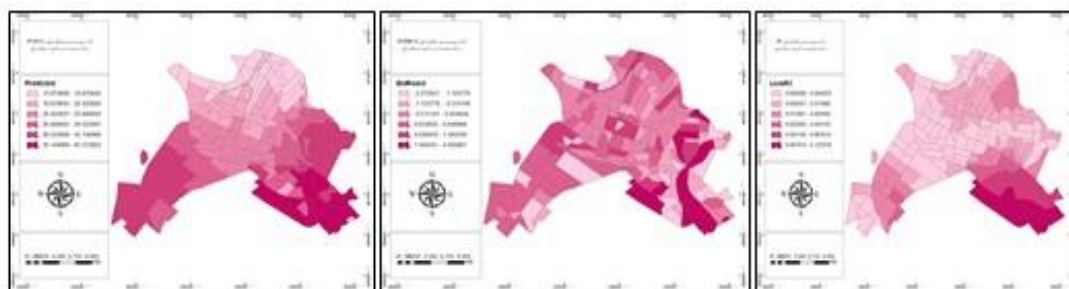
متغیر	$R^2$	$AICc^2$	$\Sigma\sigma^1$	Adjusted $R^2$	Squares Residual	Predicted
تراکم جمعیتی	۰/۴۱	۲۱۱/۰۶	۱/۳۶	۰/۵۱	۱۲۶/۶۷	۰/۵۹
اختلاط کاربری	۰/۵۴	۱۸۳/۰۸	۱/۶۵	۰/۵۰	۱۱۲/۵۲	۰/۵۵
آنتروپی شانون	۰/۶۶	۱۵۴/۰۸	۱/۲۸	۰/۴۰	۸۲/۰۸	۰/۶۵
کل متغیرها	۰/۵۳	۱۸۳/۲۲	۱/۴۳	۰/۴۷	۱۰۷/۰۹	۰/۵۹

با توجه به نقشه فرم محلات بر اساس میزان آنتروپی هر محله، نتایج نشان می‌دهد که محلاتی که در حاشیه شهر و لبه مناطق قرار دارند و میزان اسپرال آن‌ها بیشتر است دارای همبستگی بالایی با مصرف برق هستند. محلاتی مانند؛ عظیمه یک، عظیمه دو، عظیمه سه، محله ذوب آهن، فاز یک و فاز دو غربی این میزان بالاست و دارای ارتباط معناداری است. در واقع نتایج مؤید این مطلب است که محلات حاشیه شهر کرج که دارای میزان آنتروپی بالا نزدیک به یک هستند و حالت اسپرال دارند میزان همبستگی تقریباً بالاتری در زمینه مصرف برق دارند؛ و متغیر مستقل تحقیق (فرم شهر) در این محلات حاشیه و پراکنده دارای تأثیرگذاری بالایی بر مصرف برق هستند؛ و البته آماره توصیفی

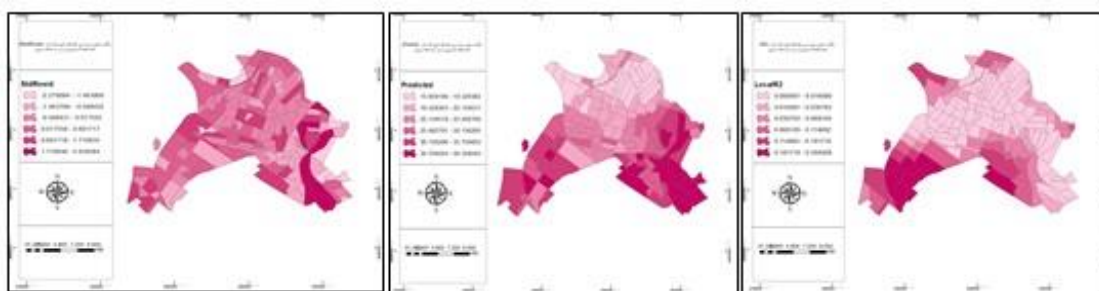
۱. سیگما: شاخص انحراف معیار باقی مانده‌هاست و کوچکتر بودن آن نشانه برتری مدل است.

۲. آکاییک: یکی از شاخص‌های بسیار مفید برای مقایسه مدل‌های رگرسیون است که مقدار پایین آن نشان‌دهنده انطباق بهتر مدل با داده‌های مشاهداتی است.

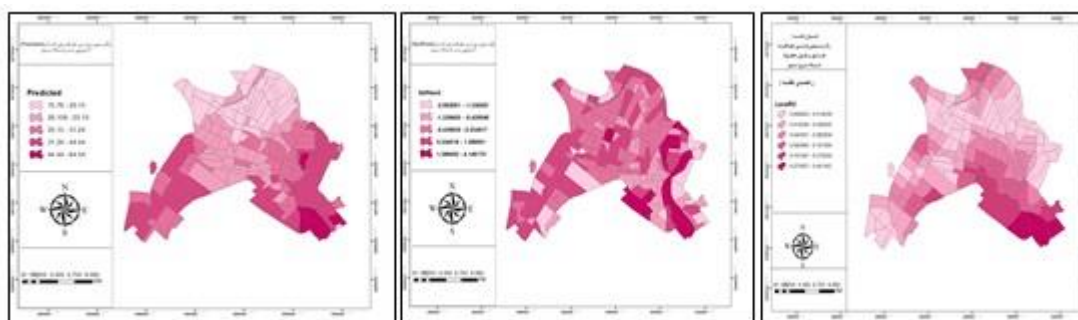
Pridicted با عدد  $R^2$  متفاوت است و تغییرات فضایی ارتباط فرم شهر با طول خطوط شبکه را به سمت مناطق تراکم مناطق؛ ۵، ۲، ۹، ۸ را نشان می دهد.



شکل ۱۳. آماره‌های توصیفی ( $StdResid$ ,  $R^2$ , Pridicted) متغیر تراکم جمعیت در ارتباط با طول خطوط شبکه برق شهر کرج



شکل ۱۴. آماره‌های توصیفی ( $StdResid$ ,  $R^2$ , Pridicted) متغیر اختلاط کاربری در ارتباط با طول خطوط شبکه برق شهر کرج



شکل ۱۵. آماره‌های توصیفی ( $StdResid$ ,  $R^2$ , Pridicted) متغیر آنتروپی شانون در ارتباط با طول خطوط شبکه برق شهر کرج

## ۴. بحث

در این بخش نتایج به دست آمده از تحقیق با سایر نتایج سایر تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است مقایسه می شود. نتایج تحقیقی که موسوی و همکاران (۱۳۹۷) در ارتباط با پرکنده رویی شهر مراغه انجام دادند نشان داد؛ میزان ضریب تأثیر شاخص ها را به صورت فضایی و در سطح محلات شهری مثبت و بین متغیرهای تحقیق ارتباط فضایی معناداری حاکم است که این موضوع با نتایج تحقیق حاضر دارای همسانی نزدیکی است. همچنین نتایج تحقیقات عرفانیان و همکاران در سال (۱۳۹۲) نشان داد؛ که مدل GWR یک ابزار ساده و مفید در تشخیص میزان همبستگی مختلف مکانی می باشد؛ بنابراین با نتایج تحقیق حاضر در بعد تحلیل مکان همخوانی دارد. نتایج تحقیق روستایی و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد که بین متغیرهای چهارگانه و قیمت مسکن رابطه معناداری وجود دارد و لذا با نتایج تحقیق حاضر در زمینه به کارگیری رگرسیون وزنی و ارتباط سنجی فضایی متغیر مستقل و وابسته دارای همخوانی است. نتایج پژوهش ژیان-شیانگ لی<sup>۱</sup> (۲۰۱۸)، در ارتباط با مصرف برق با توجه به عمل اقلیم در یک شهر گرمسیری نشان داد؛ که منازل مسکونی ویلایی و عمومی در مقایسه با منازل آپارتمانی مصرف برق بیشتری دارند و در نهایت راهکارهایی از جمله فشردگی را برای کاهش مصرف مفید دانستند. همانطور که از نتایج اکثر این تحقیقات مشخص است استفاده از فرم شهری فشردگی و ساخت وسازه های فشردگی بجای ویلایی سازی منازل مسکونی می تواند تأثیر بالایی در کاهش مصرف برق و کاهش هزینه زیرساختها داشته باشد. و با توجه به این موارد در تحقیق حاضر جهت داشتن نوآوری و حصول به یک نتیجه گیری منطقی در زمینه تأثیر فرم شهر بر مصرف برق و زیرساختهای آن از تحلیل فضایی در سطح یکی کوچکترین سطوح از تقسیمات فضایی سطح شهر (محله) استفاده شده است. در نهایت نتایج و یافته های این تحقیق نشان داد که فرم شهر دارای تأثیری بالای ۵۰٪ در مصرف برق و زیرساختها برق شهر کرج دارد. لذا این یافته ها با نتایج سایر تحقیقاتی که در این حوزه انجام گرفته همخوانی دارد. در واقع نوآوری تحقیق حاضر استفاده از تحلیل فضایی در سطح محلات ۱۷۳ گانه شهر، بکارگیری مدل های مختلف اما همسو در زمینه تحلیل فضایی و ارائه نقشه مورد انتظار با توجه به تحلیل داده های موجود است. که می تواند در برنامه ریزی برای آینده شهر مؤثر و مفید باشد.

## ۵. نتیجه گیری

در نهایت تحلیل نتایج مطالب به دست آمده مؤید این نتیجه گیری است که؛ با توجه به میزان  $R^2$  به دست آمده بین فرم شهر اسپرال در مناطق ۱۰، ۶، ۳، ۴ با مصرف برق و طول خطوط شبکه ارتباط معناداری بالاست؛ و مناطق بخش مرکزی شهر که دارای فرم فشردگی بالا هستند دارای مصرف برق کمتری هستند. در واقع، محلاتی مانند؛ حیدرآباد غربی، شاهین ویلایی جنوبی، فاز ۳ مهرشهر، حصارک بالا، شکرآباد و عظیمه ۲ دارای فشردگی بالایی از لحاظ فرم شهری و تراکم جمعیتی هستند که از دلایل این موضوع تجمع امکانات و خدمات شهری و دسترسی پذیری این

مناطق است. به طوری که عدد آنتروپی نسبی به دست آمده برای این محلات کمتر از ۰.۲۰۰ و نزدیک به صفر است که نشان دهنده فشردگی بالا این محلات است؛ و اکثر محلات باغ سیب، کاخ مروارید، کیانمهر ۱ و ۳ مستقر در مناطق ۳ و ۴ (مهرشهر) به دلیل ویلایی بودن مساکن و سطح بالای زیربنا میزان آنتروپی نسبی بالا عدد ۰.۵۰۰ و به سمت اسپرال و پراکندگی بالاست. همچنین محلات موجود در حاشیه شهر دارای وضعیت اسپرال و محلات مرکزی شهر حالت فشرده دارند. بر اساس نتیجه رگرسیون وزنی محلی شاخص تراکم جمعیتی به عنوان یکی از شاخص های مهم فرم شهر دارای بالاترین میزان اثرگذاری بر مصرف برق شهر کرج بوده است، مقدار  $R^2$  آن برابر با ۰/۷۸ است یعنی شاخص فرم شهر با توجه به این شاخص در سطح اطمینان ۹۵٪ به میزان ۷۸ درصد از مصرف برق را توجیه می کند. همچنین شاخص آنتروپی به عنوان یکی شاخص از متغیر مستقل (فرم شهر) با  $R^2=0/66$  دارای بالاترین میزان اثرگذاری بر طول خطوط شبکه برق شهر کرج است. لذا نتایج نشان داد؛ که فرم شهر کرج دارای ارتباط فضایی بیش از ۰/۵۰ درصد بر مصرف برق و طول خطوط شبکه برق شهر کرج است. در نتیجه گیری نهایی می توان گفت؛ که بین فرم شهر با توجه به دو شاخص اختلاط کاربری ها و تراکم جمعیتی و مقدار آنتروپی شانون، ارتباط معناداری در سطح بالاتر از متوسط با مصرف برق وجود دارد. لذا با توجه به نتایج به دست آمده پیشنهادات زیر ارائه می گردد؛

- از مناطق خالی شهر و بازسازی بافت های فرسوده شهر در جهت فشرده سازی استفاده شود و از اسپرال شدن شهر جهت کاهش مصرف برق و طول خطوط شبکه جلوگیری شود.
- با توجه به اینکه آمار توصیفی Predicted نشان از تغییرات فضایی تأثیر فرم شهر بر مصرف برق به سمت نقاط متراکم دارد باید برنامه ریزی اساسی و راهبردی در این حوزه صورت گیرد و با استفاده از تجربیات شهرهای فشرده از اتلاف انرژی و هزینه های اضافی در سطح کلان شهر کرج جلوگیری شود.
- با توجه به مصرف بالای انرژی برق در باغات و کارخانجات صنعتی در مناطق ۱۰ و مناطق ۳ و ۴ که به صورت ویلایی ساخته شده است باید جهت صرفه جویی در مصرف انرژی برق از گسترش این فعالیت ها در سطح شهر جلوگیری شود و با برنامه ریزی مناسب به بیرون شهر هدایت شوند.

#### کتاب نامه

۱. دیوسالار، ا.، کیانژاد تجنکی، ق.، عبدی بورا، م.، و خداداد، م. (۱۳۹۷). تحلیل تطبیقی و سنجش ساخت و شکل شهری (مطالعه موردی: شهر بابل). *مطالعات محیطی هفت حصار*، ۱(۲۹)، ۳۹-۵۰.
۲. رفیعیان، م.، فتح جلالی، آ.، و داداشپور. ه (۱۳۹۰)، بررسی و امکان سنجی تأثیر فرم و تراکم بلوک های مسکونی بر مصرف انرژی شهر، نمونه موردی شهر جدید هشتگرد. *مجله آرمان شهر*، ۶، ۱۰۷-۱۱۶.
۳. رفیعیان، م.، و زاهد. ن (۱۳۹۸). تحلیل فضایی فرسودگی محله های شهر قم با استفاده از رگرسیون وزنی جغرافیایی. *پژوهش های جغرافیای برنامه ریزی شهری*، ۶(۲)، ۳۶۱-۳۸۳.

۴. روستایی، ش.، پورمحمدی، م.، و درویشی، ف. (۱۳۹۷). تحلیل فضایی عوامل مؤثر بر افزایش قیمت مسکن در کلانشهر تبریز با استفاده از ضریب همبستگی و مدل برازش رگرسیون. *فصلنامه مطالعات مدیریت شهری*، ۱۰(۳۳)، ۸۵-۹۶.
۵. شاهینی فر، ح. م. (۱۳۹۷). کاربرد روش جای پای اکولوژیک در ارزیابی پایداری جغرافیای ناحیه ای (مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه). *آمایش محیط*، ۹(۳۲)، ۶۲-۴۱.
۶. شماعی، ع.، قاسمی کفرودی، س.، و مردای، ث. (۱۳۹۵). تحلیل فضایی - کالبدی توسعه شهر کرج با تأکید بر شاخص‌های رشد هوشمند شهری. *فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۵(۱۷)، ۳۳-۵۲.
۷. عرفانیان، م.، حسین خ، م.، و علیجانپور، ا. (۱۳۹۲). مقدمه‌ای بر روش‌های رگرسیون چند متغیره OLS و GWR در مدلسازی مکانی اثرات کاربری اراضی بر کیفیت آب. *نشریه ترویج و توسعه آب‌خیزداری*، ۱(۱).
۸. عسگری، ع. (۱۳۸۹). *تحلیل آمار فضایی با GIS*. کرج: سازمان فناوری اطلاعات شهرداری کرج.
۹. موسوی، م.، آهار، منوچهری میاندوآب، ا.، و قیصری، ح. (۱۳۹۷). تحلیل اثرات رشد پراکنده رویی شهری بر سرمایه اجتماعی مطالعه موردی: شهر مراغه. *فصلنامه شهر پایدار*، ۱(۳)، ۱-۱۶.

10. Arbury, J. (2005). From urban sprawl to compact city – an analysis of urban growth management in Auckland. Available at: <http://portal.jarbury.net/thesis.pdf>, 175.
11. Bibri, S. E. (2020). *Advances in the Leading Paradigms of Urbanism and Their Amalgamation: Compact Cities, Eco-Cities, and Data-Driven Smart Cities*. Switzerland AG, Cham Switzerland: Springer Nature.
12. Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: an extensive interdisciplinary literature review. *Sustain Cities & Society*, 31, 183–212.
13. Bibri, S. E., Krogstie, J., & Kärrholm, M. (2020). Compact city planning and development: emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. *Developments in the Built Environment*, 4, 100021.
14. Bibri, S. E., Krogstie, J., & Kärrholm, M. (2020). Compact city planning and development: emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. *Developments in the Built Environment*, 4, 100021.
15. Burton, E. (2002). Measuring urban compactness in UK towns and cities. *Environ. Plann. Plann. Des.*, 29, 219–250.
16. Chen, Y., & Fang, Z. (2018). Industrial electricity consumption, human capital investment and economic growth in Chinese cities. *Economic Modelling*, 69, 205-219.
17. Chhipi-Shrestha, G., Hewage, K., & Sadiq, R. (2017). Impacts of neighborhood densification on water-energy-carbon nexus: investigating water distribution and residential. *Landscaping System*. *J. Clean. Prod.*, 156, 786-795.
18. Cho, H. S., & Choi, M. J. (2014). Effects of compact urban development on air pollution: Empirical evidence from Korea. *Sustainability*, 6(9), 5968-5982.
19. Cureau, R. J., & Ghisi, E. (2020). Electricity savings by reducing water consumption in a whole city: a case study in Joinville, Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121194.
20. Ewing, R., Rong, F. (2008). The impact of urban form on U.S. residential energy use. *Hous. Policy Debate*. 19, 1–30.

21. Gellert, A., Florea, A., Fiore, U., Palmieri, F., & Zanetti, P. (2019). A study on forecasting electricity production and consumption in smart cities and factories. *International Journal of Information Management*, 49, 546-556.
22. Hui, S. C. (2001). Low energy building design in high density urban cities. *Renewable Energy*, 24(3-4), 627-640.
23. Kuusela, P., Norros, I., Weiss, R., Sorasalmi, T. (2015). Practical lognormal framework for household energy consumption modeling. *Energy Build*, 108, 223-35.
24. Li, C., Song, Y., & Kaza, N. (2018). Urban form and household electricity consumption: A multilevel study. *Energy and Buildings*, 158, 181-193.
25. Li, X. X. (2018). Linking residential electricity consumption and outdoor climate in a tropical city. *Energy*, 157, 734-743.
26. Lindsey, M., Schofer J. L., Durango-Cohen, P., Gray, K. A. (2011). The effect of residential location on vehicle miles of travel, energy consumption and greenhouse gas emissions: Chicago case study. *Transp Res Part Transp Environ*, 16(1), 1-9.
27. Muraca, B., & Voget-Kleschin, L. (2011). Strong sustainability across culture(s). In: Banse, G. Nelson, G.L. Parodi, O. (Eds.), *Sustainable Development—The Cultural Perspective: Concepts, Aspects, Examples*. Berlin: Edition Sigma.
28. Næss, P., Strand, A., Næss, T., & Nicolaisen, M. (2011) On their road to sustainability?: challenge of sustainable mobility in urban planning and development in two Scandinavian capital regions?. *Town Planning Review*, 82 (3), 287-315.
29. Oliveira-Lima, J. A., Morais, R., Martins, J. F., Florea, A., & Lima, C. (2016). Load forecast on intelligent buildings based on temporary occupancy monitoring. *Energy and Buildings*, 116, 512-521.
30. Ota, T., Kakinaka, M., & Kotani, K. (2018). Demographic effects on residential electricity and city gas consumption in the aging society of Japan. *Energy Policy*, 115, 503-513.
31. Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., & Schofield, J. (2014). Cities and energy: Urban morphology and residential heat-energy demand. *Environment and Planning B Planning and Design*, 41(1), 138-162.
32. Sikder, S. K., Nagarajan, M., Kar, S., & Koetter, T. (2018). A geospatial approach of downscaling urban energy consumption density in mega-city Dhaka, Bangladesh. *Urban Climate*, 26, 10-30.
33. Silva, L. T., & Monteiro, J. P. (2016). The Influence of Urban Form on Environmental Quality within a Medium-sized City. *Procedia Engineering*, 161, 2046-2052.
34. Song, M., Zhao, X., & Shang, Y. (2020). The impact of low-carbon city construction on ecological efficiency: Empirical evidence from quasi-natural experiments. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104777.
35. Zhang Y., Guindon, B., Sun, K. (2016). Exploring the link between urban form and work related transportation using combined satellite image and census information: Case of the Great lakes region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 139-15
36. Zhao, S., Liu, Y., Liang, S., Wang, C., Smith, K., Jia, N., & Arora, M. (2020). Effects of urban forms on energy consumption of water supply in China. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119960.