

Spatiotemporal Analysis of Urban Dynamics in Tehran Using VIIRS Nighttime Light Data

Mahdi Shojaei¹ 

PhD in Climatology, Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Received: 27 April 2026 Revised: 29 July 2026 Accepted: 30 July 2026

Abstract

Satellite-derived nighttime light data, particularly outcomes of the VIIRS sensor, have become well-established indicators for monitoring urbanization and socio-economic activities at national and regional scales. However, analyzing high-resolution intra-urban dynamics within administrative units (municipal districts) remains a research gap. The present study aims to fill this gap by investigating the spatio-temporal patterns of nighttime brightness in Tehran over a 12-year period (2014–2025). To this end, the monthly VIIRS time series was processed on the Google Earth Engine platform and subjected to analysis using the Mann–Kendall test, Sen’s slope, hierarchical clustering, and Getis-Ord G_i^* statistic. The results reveal a dual structure in the capital: a central core with high brightness and low growth rate (districts 6, 7, and 12), representing physical saturation, as opposed to a dynamic periphery with accelerated growth, particularly in the west (District 22) and north (District 1). All districts, with the exception of District 19 (slope -0.37), exhibited ascending trends, and District 1 recorded the highest growth rate with a Sen’s slope of 1.6. The pattern of relative decline or stabilization of brightness in 2020–2021 with a subsequent surge is consistent with

1. Corresponding Author. Email: mahdi_shojaei@modares.ac.ir



©2024 The author(s). This is an open access article under the CC BY license:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

How to cite this article: Shojaei, M. (2026). Spatiotemporal Analysis of Urban Dynamics in Tehran Using VIIRS Nighttime Light Data. *Journal of Geography and Regional Development*, 24(1), 277-310. <https://doi.org/10.22067/jgrd.2026.98403.1641>

short-term events such as the COVID-19 pandemic. Hot spot analysis identified Districts 6 and 7 as stable cores of nighttime activity and District 21 as a cold spot (dominated by open industrial land uses). Furthermore, the weak statistical correlation between population density and mean brightness, along with the inverse correlation between total population and brightness ($r = -0.32$) confirms the spatial discrepancy and highlights the functional distinction between commercial-administrative centers and bedroom communities. These findings demonstrate the capability of VIIRS data for monitoring physical dynamics, identifying growing or stagnating zones, and assessing environmental consequences such as light pollution. It will provide practical information for spatial planning and infrastructure management in Tehran.

Keywords: Night Light, VIIRS Sensor, Spatio-Temporal Analysis, Intra-Urban Dynamics, Tehran.

تحلیل زمانی-مکانی پویایی‌های شهری در تهران با استفاده از داده‌های نور شب سنجنده

VIIRS

مهدی شجاعی ^{ID} (دانش‌آموخته دکتری تخصصی آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده

جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران)

mahdi_shojaei@modares.ac.ir

چکیده

داده‌های ماهواره‌ای نور شب، به‌ویژه محصولات سنجنده VIIRS، به‌عنوان شاخصی کارآمد برای پایش شهرنشینی و فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی در مقیاس‌های ملی و منطقه‌ای تثبیت شده‌اند. بااین‌حال، تحلیل پویایی‌های درون‌شهری با تفکیک بالا و در قالب واحدهای مدیریتی (مناطق شهرداری) همچنان شکافی پژوهشی محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف پرکردن این شکاف، الگوهای فضایی-زمانی روشنایی شبانه را در کلان‌شهر تهران طی یک دوره ۱۲ ساله (۲۰۱۴-۲۰۲۵) واکاوی می‌کند. برای این منظور، مجموعه زمانی ماهانه VIIRS در بستر Google Earth Engine پردازش و با آزمون ناپارامتری من-کندال، شیب تخمین‌زن سن، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و آماره محلی $Getis-Ord\ G_i^*$ تحلیل شد. نتایج، ساختاری دوگانه را در پایتخت آشکار می‌سازد: هسته‌ای مرکزی با درخشندگی بالا و نرخ رشد پایین (مناطق ۶، ۷ و ۱۲) که معرف اشباع کالبدی است، در برابر پیرامونی پویا با رشد شتابان، به‌ویژه در غرب (منطقه ۲۲) و شمال (منطقه ۱). تمامی مناطق به استثنای منطقه ۱۹ (شیب ۰.۳۷-) روند افزایشی داشته‌اند و منطقه ۱ با شیب ۱.۶ بیشترین نرخ رشد را ثبت کرده است. الگوی کاهش یا ثبات نسبی درخشندگی در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۱ و جهش متعاقب آن با رویدادهای کوتاه‌مدتی مانند همه‌گیری کووید-۱۹ هم‌خوانی دارد. تحلیل نقاط داغ، مناطق ۶ و ۷ را به‌عنوان کانون‌های پایدار فعالیت شبانه و منطقه ۲۱ را به‌عنوان خوشه سرد (غلبه کاربری‌های صنعتی باز) شناسایی کرد. همچنین، همبستگی آماری بسیارضعیف میان تراکم جمعیت و میانگین درخشندگی و همبستگی معکوس میان کل جمعیت و روشنایی ($r = -0.32$) پدیده عدم تطابق فضایی را تأیید و تمایز

نشریه جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، سال بیست‌و‌چهارم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، شماره پیاپی ۵۴ صص ۳۱۰-۲۷۷

تاریخ تصویب: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶

عملکردی مراکز تجاری-اداری از بافت‌های خوابگاهی را برجسته می‌کند. این یافته‌ها توانمندی داده‌های VIIRS را در پایش پویایی‌های کالبدی، شناسایی پهنه‌های روبه‌رشد یا دچار رکود، و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی مانند آلودگی نوری را بیان کرده و توانایی ارائه اطلاعات کاربردی برای برنامه‌ریزی فضایی و مدیریت زیرساخت‌های کلان‌شهر تهران را فراهم خواهد آورد.

واژگان کلیدی: نور شب، سنجنده VIIRS، تحلیل زمانی-مکانی، پویایی درون‌شهری، تهران.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، جهان شاهد رشد بی‌سابقه شهرنشینی بوده است؛ فرآیندی که منجر به تغییرات عمیق در ساختارهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در مقیاس‌های محلی و جهانی شده است. مدیریت و برنامه‌ریزی برای این توسعه پرشتاب شهری، نیازمند دسترسی به داده‌های دقیق، بروز و با پوشش مکانی گسترده است تا بتوان پویایی‌های پیچیده فعالیت‌های انسانی را به‌درستی درک و پایش نمود. در این میان، فناوری سنجش از دور به‌عنوان یک ابزار کارآمد، امکان مشاهده و تحلیل سطح زمین را با توالی زمانی منظم فراهم آورده است (لی^۱ و همکاران ۲۰۱۶). در میان انواع داده‌های ماهواره‌ای، تصاویر نور شب جایگاه منحصر به فردی دارند؛ زیرا به‌طور مستقیم بازتابی از حضور و فعالیت انسان را در ساعات شب به تصویر می‌کشند و به همین دلیل، به‌عنوان یک نماینده قدرتمند برای ارزیابی پدیده‌های اقتصادی و اجتماعی شناخته می‌شوند (شی^۲ و همکاران، ۲۰۱۶؛ ژائو^۳ و همکاران، ۲۰۱۹).

استفاده از داده‌های نور شب در علوم انسانی و مطالعات شهری، با نسل اول سنجنده‌های DMSP-OLS آغاز شد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۸). این داده‌ها به دلیل پوشش جهانی و آرشیو زمانی

1. Li

2. Shi

3. Zhao

طولانی، در حوزه‌های پایش رشد شهری تخمین تولید ناخالص داخلی (هندرسون^۱ و همکاران، ۲۰۱۲)، ارزیابی توزیع جمعیت (چن^۲ و چنگ^۳، ۲۰۲۵) و تحلیل رویدادهای بحرانی به کار گرفته شدند (شو^۴ و کیانگ^۵، ۲۰۲۱). با این وجود، این داده‌ها با محدودیت‌های فنی مهمی از جمله توان تفکیک مکانی پایین، اشباع رادیومتریک و عدم واسنجی مواجه بودند (لی و همکاران، ۲۰۲۰) که در سری‌های زمانی طولانی، نیازمند روش‌های دقیق واسنجی کالیبراسیون برای کلان‌شهری مانند تهران بودند (احمدی و همکاران، ۲۰۲۵). با معرفی نسل جدید سنجنده VIIRS بر روی ماهواره Suomi-NPP، بسیاری از مشکلات نسل قبل مرتفع شد (فولادگر و فیضی، ۱۴۰۱) و پایش چندمقیاسه ساختارهای فضایی و تغییرات اقتصادی-اجتماعی شهرها با دقت بالاتری امکان‌پذیر گردید (ژنگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۳). داده‌های VIIRS با وجود پیچیدگی‌های مکانی (اسمال^۷، ۲۰۲۱)، پایداری بالایی برای مدل‌سازی متغیرهای اقتصادی-اجتماعی (شی و همکاران، ۲۰۱۴) و ایجاد سری‌های زمانی طولانی مدت دارند (ژو^۸ و همکاران، ۲۰۱۷).

در زمینه کاربردهای عملی، داده‌های نور شب به ابزاری قدرتمند برای مطالعه پویایی شهری تبدیل شده‌اند. صالحی‌پور میلانی روند گسترش آلودگی نوری را در ایران تحلیل کرد (میلانی، ۲۰۲۰). باقری و همکاران (۲۰۲۳) ارتباط میان توسعه فیزیکی شهر و اثرات آن بر آلودگی نوری در تهران و تبریز را مدل‌سازی نمودند. در پژوهشی دیگر، اثر متقابل توسعه شهری بر شدت روشنایی شبانه و توزیع فضا-زمانی لکه‌های داغ با بهره‌گیری از بستر Google Earth Engine مورد تأیید قرار گرفته است (چنگ و همکاران، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، پژوهش‌های متعددی در کلان‌شهرهای ایران،

1. Henderson
2. Chen
3. Cheng
4. Xu
5. Qiang
6. Zheng
7. Small
8. Zhu

اثرات تراکم بافت شهری و گسترش کالبدی را بر متغیرهای محیطی، آسایش حرارتی و میزان مصرف انرژی معابر و ساختمان‌ها مورد تأیید قرار داده‌اند؛ به عنوان مثال، کرمی و شجاعی (۱۴۰۱) نشان دادند که متراکم شدن بافت شهری، ساعات آفتابی را کاهش داده و این فشردگی کالبدی مستقیماً بر جهت باد، آسایش حرارتی (شاخص UTCI) و الگوی مصرف انرژی ساختمان‌ها اثرگذار است. این چالش‌های کالبدی، ضرورت پایش مداوم فضا-زمانی کلان‌شهرها را با استفاده از ابزارهای سنجش از دور بیش از پیش نمایان می‌سازد. در مقیاس‌های بزرگ‌تر نیز، این داده‌ها برای تحلیل الگوهای شهرنشینی در کلان‌منطقه‌ها به کار رفته‌اند؛ برای مثال، ژائو و همکاران (۲۰۱۸) و لی و همکاران (۲۰۲۱) با تحلیل سری زمانی داده‌های نور شب، ویژگی‌های فضایی و زمانی فرآیند شهرنشینی را مورد ارزیابی قرار دادند.

مطالعات نوین نشان می‌دهند که پویایی‌های کالبدی در مقیاس درون‌شهری همواره به صورت رشد خطی نبوده و پدیده افول یا زوال شهری در مقیاس خرد کالبدی نیازمند تحلیل‌های دقیق است؛ به عنوان مثال، چن و چنگ (۲۰۲۵) با تلفیق داده‌های VIIRS و مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی^۱ (GWR) نشان دادند که پدیده زوال شهری عمدتاً در حومه شهرها رخ می‌دهد، درحالی‌که هسته مرکزی با رشد کالبدی پایدار همراه است. همچنین پایش الگوهای ترکیبی زوال شهری با داده‌های VIIRS تأیید می‌کند که ساختارهای اقتصادی شهرهای بزرگ به حفظ پایداری هسته مرکزی در برابر پیرامون کمک می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۲۶). در همین راستا، ادغام داده‌های نور شب با مدل‌های آماری پیشرفته نظیر تحلیل روند میانه سن (Theil-Sen) و الگوریتم‌های خوشه‌بندی، ابزاری کارآمد برای تفکیک پهنه‌های رو به زوال از نواحی پویا در کلان‌شهرها فراهم آورده است (ژنگ^۲ و ژانگ^۳، ۲۰۲۵). در مقیاس ابرشهرها نیز، پایش فضایی پویایی‌های توسعه در کلان‌شهر پکن با استفاده

1. Geographically Weighted Regression (GWR)

2. Zheng

3. Zhang

از VIIRS نشان داد که گسترش کالبدی سریع لزوماً در تمام پهنه‌ها همگن نبوده و مرکز ثقل روشنایی شهر به صورت فضایی جابه‌جا شده و حتی پهنه‌های مرکزی به دلیل اشباع کالبدی با رشد منفی همراه بوده‌اند (لیو^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). این تغییرات ساختاری بر ضرورت انجام تحلیل‌هایی در مقیاس درون‌شهری برای درک توزیع نامتوازن رشد و شناسایی مناطق رو به زوال تأکید دارد.

۲. پیشینه پژوهش

در همین راستا، این پژوهش با هدف رفع شکاف تحقیقاتی یاد شده، به تحلیل زمانی و مکانی تغییرات نور شب در مقیاس درون‌شهری برای کلان‌شهر تهران می‌پردازد. تهران به عنوان پایتخت و بزرگ‌ترین مرکز اقتصادی و اجتماعی ایران، در دهه‌های اخیر تحولات شهری بسیار پیچیده‌ای را تجربه کرده است. پویایی‌های کاربری اراضی و گسترش کالبدی نامتوازن تهران در سال‌های اخیر منشأ چالش‌های زیست‌محیطی و فضایی فراوانی بوده و شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده تداوم روند شتابان این توسعه فیزیکی در دهه‌های پیش‌رو است (میرزاخانی و همکاران، ۲۰۲۵). اهمیت استفاده از داده‌های نور شب برای تحلیل‌های اقتصادی در ایران، پیش از این در پژوهش فولادگر و فیضی (۱۴۰۱) به تأیید رسیده است. پژوهش حاضر با الهام از این یافته‌ها، تحلیل را به مقیاس خردتر و درون‌شهری منتقل می‌کند. به منظور تبیین دقیق جایگاه پژوهش حاضر در میان مطالعات پیشین، مرور نظام‌مند پژوهش‌های کلیدی صورت گرفته در این حوزه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مرور انتقادی پژوهش‌های کلیدی پیشین و تبیین شکاف مطالعاتی در حوزه پایش کالبدی با داده‌های

نور شب

منبع: (نویسنده، ۱۴۰۵)

ردیف	پژوهشگران (سال)	مقیاس مطالعه	متدولوژی و داده‌ها	دست‌آورد کلیدی	محدودیت و خلأ مطالعاتی (نسبت به پژوهش حاضر)
الف) مطالعات خارجی (بین‌المللی)					
۱	هندرسون و همکاران، (۲۰۱۲)	ملی و جهانی	DMSP-OLS	ارائه شاخص نور شب به عنوان نماینده (Proxy) معتبر برای رشد اقتصادی.	عدم امکان پایش تغییرات خرد درون‌شهری به دلیل توان تفکیک مکانی پایین.
۲	وانگ ^۱ و همکاران، (۲۰۲۴)	استانی (سین‌کیانگ چین)	VIIRS و بیضی انحراف معیار	تحلیل تغییرات مکانی-زمانی گسترش شهری و تأثیر عوامل اقلیمی بر آن.	فقدان کالبدشکافی کانون‌های داغ روشنایی با آماره‌های محلی
۳	ویناناگه ^۲ و جینگ‌وی ^۳ (۲۰۲۴)	شهرهای چین	VIIRS و الگوریتم K-means	تفکیک مناطق شهری از حومه‌ای و ارزیابی رشد فیزیکی با شاخص‌های اقتصادی.	تمرکز بر مقیاس کلان منطقه‌ای و چشم‌پوشی از ناهمگنی‌های درون‌شهری.
۴	چنگ و همکاران (۲۰۲۵)	خرد درون‌شهری	پردازش ابری (GEE)	تأیید اثر متقابل توسعه کالبدی بر توزیع لکه‌های داغ فضا-زمانی.	عدم ارائه اطلس تفکیک‌شده و مقیاس‌بندی‌شده مبتنی بر مساحت مناطق شهری.

1. Wang
2. Withanage
3. Jingwei

ردیف	پژوهشگران (سال)	مقیاس مطالعه	متدولوژی و داده ها	دستاوردهای کلیدی	محدودیت و خلأ مطالعاتی (نسبت به پژوهش حاضر)
۵	چن و چنگ (۲۰۲۵)	خرد درون شهری	VIIRS & GWR	شناسایی زوال کالبدی ^۱ در نواحی حاشیه ای در برابر ثبات مرکز.	فقدان استراتژی آستانه گذاری ۳ سیگما به منظور حذف نویزهای هاله ای پس زمینه.
۶	لیئو و همکاران (۲۰۲۵)	ابره شهر (پکن)	VIIRS و لندست	تأیید جابه جایی مرکز ثقل روشنایی و اشباع کالبدی در پهنه های مرکزی.	عدم بهره گیری از نقشه های جاده ای باکیفیت برای تأیید بصری کاربری اراضی.
۷	ژنگ و ژانگ (۲۰۲۵)	کلان شهر (ژاپن)	تخمین زن سن و K-means	تفکیک پهنه های رو به زوال از نواحی پویا در چهار کلان شهر.	عدم استخراج مرزهای برداری کانون های بیشینه روشنایی به صورت مجزا.
۸	چن و همکاران (۲۰۲۶)	شهرهای در حال انقباض (چین)	NPP-VIIRS، طبقه بندی الگوهای ترکیبی	ارائه یک سیستم طبقه بندی جدید برای شناسایی الگوهای ترکیبی زوال شهری	عدم کالیبراسیون و تولید اطلس های بومی سازی شده مبتنی بر وسعت مناطق.
۹	لیئو و همکاران (۲۰۲۵)	ابره شهر (پکن)	آمار فضایی، NPP-VIIRS لندست	توسعه چارچوبی برای پایش تأثیر گسترش شهری بر فضاهای سبز با استفاده از شاخص های سرعت و جهت گسترش و متریک های سیمای	عدم ورود به تحلیل های مدیریتی در مقیاس مناطق درون شهری.

1. Shrinkage

ردیف	پژوهشگران (سال)	مقیاس مطالعه	متدولوژی و داده‌ها	دستاوردهای کلیدی	محدودیت و خلأ مطالعاتی (نسبت به پژوهش حاضر)
				سرزمین؛ ثبت افزایش قطعه قطعه شدن اراضی و کاهش تنوع منظر.	
ب) مطالعات داخلی (ایران)					
۱	کرمی و شجاعی (۱۴۰۱)	شهری (مشهد)	مدل سازی سه بعدی کالبدی	تأیید اثر فشردگی بافت کالبدی شهر بر الگوهای مصرف انرژی ساختمان‌ها.	فقدان پایش پیوسته فضا-زمانی با استفاده از شاخص‌های رادیومتریک ماهواره‌ای.
۲	باقری و همکاران (۲۰۲۳)	کلان‌شهر (تهران و تبریز)	تلفیق VIIRS با داده‌های مکانی	مدل سازی اثرات گسترش فیزیکی شهر بر افزایش آلودگی نوری.	عدم بررسی رفتار زمانی پیوسته (۱۲ ساله) به تفکیک مناطق شهرداری.
۳	احمدی و همکاران (۲۰۲۵)	ملی (ایران)	واسنجی متقاطع DMSP-OLS	ارتقای دقت کالیبراسیون داده‌های نور شب در ایران.	تمرکز صرف بر کالیبراسیون فنی و عدم ورود به تحلیل‌های مدیریتی سطح خرد.
۴	میرزاخانی و همکاران (۲۰۲۵)	کلان‌شهر (تهران)	تصاویر ماهواره‌ای و زنجیره مارکوف	شبیه سازی پویایی‌های توسعه فیزیکی و کاربری اراضی در دهه‌های آتی.	عدم پایش شدت فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی با استفاده از رادیانس نور شب.

پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای VIIRS برای یک دوره ۱۲ ساله (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵)، روند تغییرات درخشندگی را به تفکیک مناطق ۲۲ گانه شهرداری تهران تحلیل می‌کند. هدف اصلی،

شناسایی الگوهای فضایی رشد، ثبات یا کاهش فعالیت های شهری در سطح مناطق و ارائه یک تصویر دقیق از پویایی درونی این کلان شهر است. با انجام این تحلیل، این پژوهش به دنبال پاسخ به این پرسش ها است که کدام مناطق بیشترین رشد را تجربه کرده اند، آیا کانون های اقتصادی و فعالیتی شهر در حال جابه جایی هستند و چگونه می توان از این الگوها برای حمایت از برنامه ریزی و مدیریت شهری پایدار بهره برد.

۳. روش شناسی پژوهش

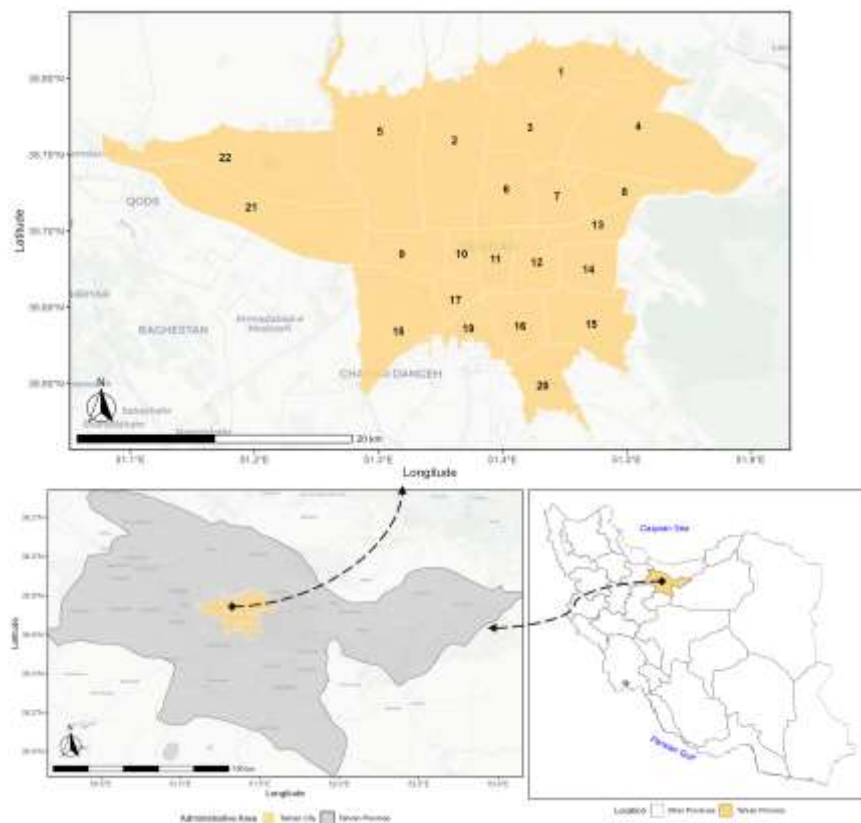
این پژوهش با هدف تحلیل روند زمانی و مکانی تغییرات فعالیت های شهری در تهران، پایتخت ایران، با استفاده از داده های ماهواره ای نور شب انجام شده است. مراحل تفصیلی پیش پردازش، تحلیل و استخراج خروجی ها به صورت خلاصه در طرحواره روش تحقیق (شکل ۲) نشان داده شده است. رویکرد تحقیق مبتنی بر پردازش تصاویر ماهواره ای در بستر سامانه ابری Google Earth Engine (GEE) و تحلیل های آماری و مکانی در محیط برنامه نویسی R است. مراحل انجام این پژوهش به شرح زیر است:

۳. ۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، کلان شهر تهران، شامل ۲۲ منطقه شهرداری است (شکل ۱). مرزهای دقیق مناطق با استفاده از یک فایل برداری^۱ در قالب شیپ فایل تعریف و به عنوان منطقه مورد علاقه^۲ در تحلیل ها مورد استفاده قرار گرفت.

1. Vector

2. Region of Interest - ROI



شکل ۱. شهر تهران و محدوده مناطق ۲۲ گانه شهرداری
منبع: (نویسنده، ۱۴۰۵)

۲.۳. داده‌ها

داده اصلی این مطالعه، به دو دسته اصلی داده‌های سنجش از دوری و داده‌های آماری-جمعیتی تقسیم می‌شوند. مشخصات داده‌های مورد استفاده به شرح زیر است:

۲.۳.۱. داده‌های ماهواره‌ای نور شب

- نام محصول در سامانه GEE: NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSLCFG

- **باند مورد استفاده:** باند avg_rad که نشان دهنده میانگین درخشندگی رادیانسی برحسب نانوات بر سانتی متر مربع بر استرادیان^۱ ($nW/cm^2/sr$) است (ژانگ و گیسون^۲، ۲۰۲۲).
 - **بازه زمانی:** بازه زمانی مطالعه، سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ میلادی است که به طور کامل مطابق با سال آغاز ثبت داده ها و انتهای سال میلادی ۲۰۲۵ تعیین گردید.
 - **توان تفکیک مکانی:** ۱۵ ثانیه قوسی (تقریباً ۵۰۰ متر در استوا).
- این محصول به صورت تصاویر ترکیبی ماهانه^۳ ارائه می شود. در فرآیند تولید این محصول، داده های متأثر از پوشش ابر، نورهای سرگردان و سایر اختلال ها^۴ (ژائو و همکاران، ۲۰۱۹) حذف و تصحیح شده اند. این ویژگی، نیاز به اعمال نقاب^۵ ابر مجزا را مرتفع می سازد.
۳. ۲. ۲. داده های جمعیت و هسته تراکم جمعیتی^۶
- به منظور صحت سنجی فضایی رفتار رادیانس نوری و تبیین ساختار کالبدی کلان شهر تهران، داده های رسمی مربوط به جمعیت کل و تراکم جمعیت (نفر در هکتار) به تفکیک مناطق ۲۲ گانه شهرداری تهران برای سال ۱۳۹۷ از پایگاه اطلاعاتی دبیرخانه کمیسیون ملی انتشار و دسترسی آزاد به اطلاعات استخراج گردید. از آنجاکه این داده ها به صورت مقطعی (ایستا) برای سال ۱۳۹۷ در دسترس بودند، به عنوان یک ساختار مبنایی ثابت برای ارزیابی همبستگی فضایی با میانگین درخشندگی بلندمدت (۲۰۱۴-۲۰۲۵) مورد استفاده قرار گرفتند.

1. Nano Watts per square centimeter per Steradian ($nW/cm^2/sr$)

2. Gibson

3. Monthly Composites

4. Noise

5. Mask

6. Demographic

۴. مبانی نظری پژوهش

۴.۱. پیش‌پردازش و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای نور شب در محیط GEE

تمام مراحل پردازش اولیه و استخراج داده‌ها در سکوی محاسبات ابری GEE و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوااسکریپت^۱ انجام شد.

۴.۱.۱. ایجاد تصاویر ترکیبی سالانه^۲

برای کاهش اختلال‌های باقی‌مانده و ایجاد یک تصویر پایدار برای هر سال، مجموعه تصاویر ماهانه برای هر سال از بازه زمانی تحقیق پالایش^۳ شد. سپس، با استفاده از کاهنده آماری میانه^۴، یک تصویر ترکیبی یکتا برای هر سال تولید گردید. استفاده از میانه به جای میانگین، به حذف اثر داده‌های پرت^۵ و موقتی^۶ کمک شایانی می‌کند.

۴.۱.۲. تحلیل روند سری زمانی

به‌منظور استخراج روند تغییرات درخشندگی برای هر پیکسل در طول بازه زمانی تحقیق، از تحلیل رگرسیون خطی استفاده شد. یک مجموعه تصویر دو-بانده ایجاد شد که باند اول آن متغیر مستقل (سال) و باند دوم متغیر وابسته یعنی مقدار درخشندگی *avg_rad* تعیین شد. سپس، تابع کاهنده^۷ بر روی این مجموعه اعمال شد. خروجی این فرآیند، یک تصویر چند بانده تبدیل گردید که باند *scale* آن، معادل شیب^۸ خط رگرسیون برای هر پیکسل است. بنابراین مقادیر مثبت در این تصویر خروجی نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی نشان‌دهنده روند کاهشی درخشندگی در طول زمان است.

1. Javascript
2. Annual Composite Generation
3. Filter
4. Median Reducer
5. Outlier Dataset
6. Temporary data
7. ee.Reducer.linearFit
8. Slope

۳.۱.۴. استخراج تصاویر تحلیلی و آمارهای منطقه‌ای

به منظور استخراج آمارهای منطقه‌ای، ابتدا دو تصویر تحلیلی اصلی تولید گردید:

۱. **تصویر روند:** با اعمال تابع کاهنده رگرسیون خطی بر روی تمامی سری زمانی تولید شد که نرخ تغییرات سالانه را برای هر پیکسل نمایش می‌دهد.
۲. **تصویر میانگین کلی:** با اعمال تابع کاهنده میانگین بر روی مجموعه تصاویر سالانه تولید شد. این تصویر، میانگین درخشندگی هر پیکسل را در کل بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ نمایش می‌دهد. سپس، با استفاده از شیپ‌فایل مناطق ۲۲ گانه و تصاویر تولید شده، آمارهای مکانی زیر به تفکیک هر منطقه استخراج گردید:

۱. میانگین شیب (روند) برای هر منطقه.
۲. میانگین درخشندگی کلی برای هر منطقه منطبق با بازه زمانی مورد مطالعه.
۳. مجموع درخشندگی کلی برای هر منطقه به تفکیک هر سال.
۴. میانگین درخشندگی برای هر منطقه به تفکیک هر سال.

۴.۱.۴. خروجی داده‌ها

کلیه داده‌های آماری محاسبه شده در مرحله قبل در قالب چهار فایل مجزا در قالب CSV و تصاویر شبکه‌ای^۱ اصلی (تصویر روند و تصویر میانگین کلی) در قالب GeoTIFF استخراج شدند.

۴.۲. تحلیل‌های نهایی و بصری‌سازی در R

مرحله نهایی پژوهش حاضر شامل تحلیل‌های آماری پیشرفته، تحلیل‌های فضایی و تولید نقشه‌ها و نمودارهای باکیفیت در محیط توسعه یکپارچه^۲ RStudio انجام شد. کتابخانه‌های اصلی به کاررفته عبارت‌اند از *sf*، *terra*، *tidyterra*^۲، *ggplot2*، *ggspatial*، *Kendall*، *trend*، *spdep*، *cluster* و *ggpattern* و در انتها از کتابخانه *showtext* برای پشتیبانی از رسم‌الخط فارسی استفاده شد. در ادامه

1. Raster

2. Integrated Development Environment (IDE)

کلیه نقشه‌ها با رعایت معیارهای نقشه‌نگاری و سیستم مختصات جغرافیایی (WGS84) طراحی شدند. تحلیل‌های انجام‌شده و خروجی‌های بصری متناظر به شرح زیر است:

۴.۲.۱. تحلیل روند و نمودار شیب سن^۱

برای هر منطقه، روند سری زمانی ۱۲ ساله میانگین تابش شب با آزمون ناپارامتری من-کندال^۲ ارزیابی و شیب تخمین‌زن سن محاسبه گردید. نتایج به‌صورت نمودار آبنباتی^۳ نمایش داده شد که در آن، اندازه نقاط متناسب با بزرگی شیب و رنگ آن‌ها نشان‌دهنده سطح معنی‌داری است.

۴.۲.۲. نقشه ترکیبی روند و معنی‌داری

شیب سن هر منطقه به‌صورت نقشه توزیع فضایی همراه با الگوهای هاشور (crosshatch و stripe) برای تمایز سطوح معنی‌داری ۹۵ و ۹۰ درصدی ترسیم گردید. این نقشه تلفیقی، هم‌زمان بزرگی روند و قطعیت آماری آن را در فضا نمایش می‌دهد.

۴.۲.۳. نمودارهای سری زمانی

برای هر یک از ۲۲ منطقه شهرداری تهران، سری زمانی میانگین تابش شب ترسیم و خط روند خطی به همراه معادله آن روی نمودارها درج گردید تا جزئیات تغییرات سالانه قابل‌ردیابی باشد.

۴.۲.۴. نقشه‌های شطرنجی روند و میانگین

تصاویر شبکه‌ای روند سالانه (شیب پیکسلی) و میانگین بلندمدت تابش که در GEE محاسبه شده بودند، در R با پالت‌های واگرا و ترتیبی مناسب به‌صورت نقشه‌های موضوعی با وضوح بالا بازنمایی شدند.

1. Sen's slope

2. Mann-Kendall

3. lollipop chart

۵.۲.۴. خوشه بندی سلسله مراتبی سری زمانی

براساس سری زمانی تابش شب، فاصله اقلیدسی بین مناطق محاسبه و با روش Ward's D₂ خوشه بندی سلسله مراتبی انجام شد. نتیجه به صورت دندروگرام و نقشه توزیع فضایی چهار خوشه ارائه گردید.

۶.۲.۴. تحلیل نقاط داغ (Getis-Ord Gi*)

برای شناسایی خوشه های فضایی با تجمع غیر تصادفی تابش بالا (نقطه داغ) یا پایین (نقطه سرد) از آماره محلی Getis-Ord Gi* استفاده شد (گتیس^۱، ۱۹۹۲؛ آرد جی کی^۲، ۱۹۹۵). این شاخص برای هر منطقه یک z-score طبق رابطه (۱) محاسبه می کند:

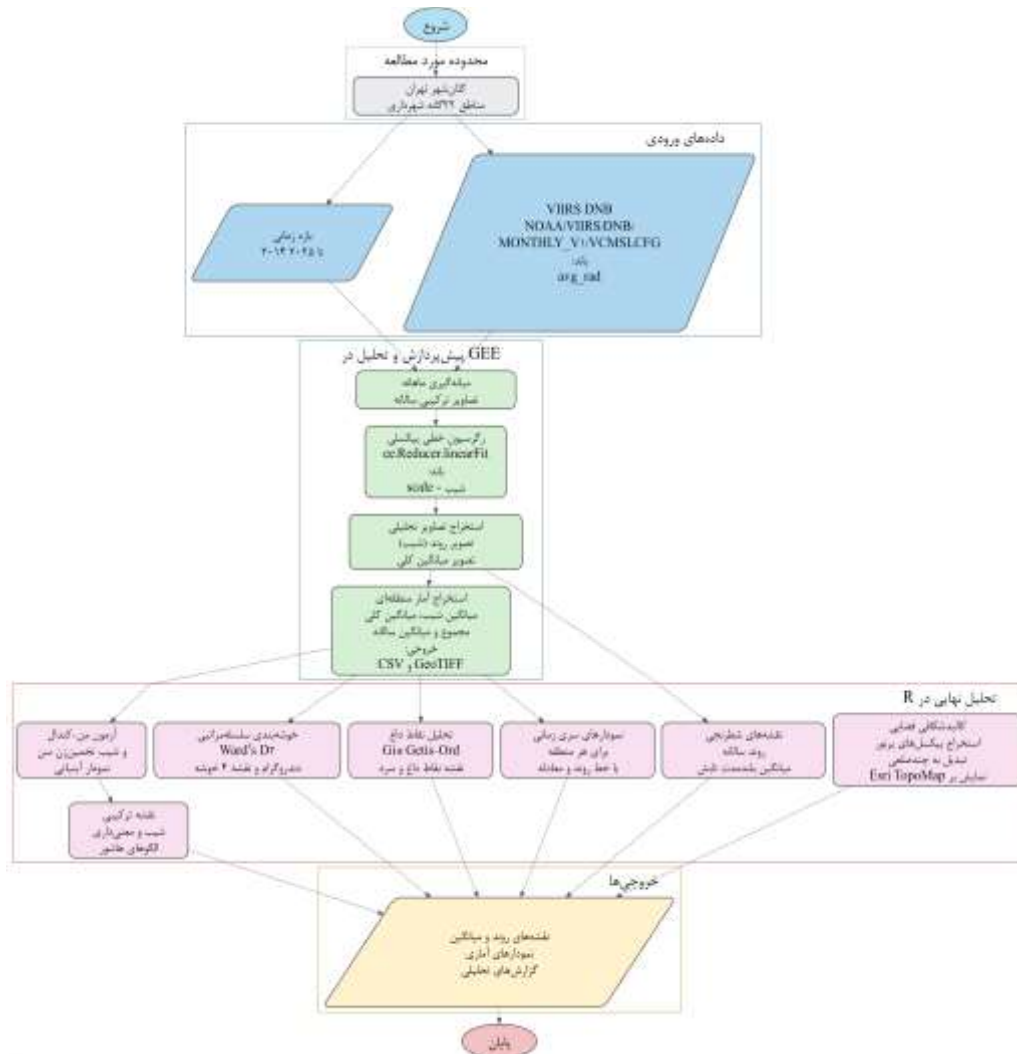
رابطه (۱)

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

که در آن x_j میانگین تابش شب در منطقه j ، $\bar{x}$ و S به ترتیب میانگین و انحراف معیار کل، w_{ij} وزن فضایی دودویی (۱ برای همسایگی Queen و صفر در غیر آن) و n تعداد مناطق است. z-score بزرگتر از ۱.۹۶ گویای نقطه داغ معنی دار، z-score کوچکتر از ۱.۹۶- گویای نقطه سرد معنی دار و مقادیر مابین نشان دهنده الگوی تصادفی و غیر معنی دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. نتیجه این تحلیل در قالب نقشه نقاط داغ و سرد ارائه گردید.

۴.۲.۷. کالبدشکافی فضایی و اعتبارسنجی کالبدی^۱

به منظور ارزیابی دقیق انطباق پیکسل‌های نوری با کاربری‌های روی زمین و جایگزینی آن با پایش‌های سستی میدانی، نقشه‌های کالبدی متمرکز شده برای مناطق دارای ناهنجاری فضایی (نقاط داغ و سرد) با استفاده از قالب‌های رسمی Esri TopoMap در محیط R تولید گردیدند. در این راستا، به منظور بارزسازی کانون‌های خرد تولیدکننده نور، پیکسل‌های دارای بیشینه روشنایی (ارزش‌های رادیانس بزرگ‌تر از میانگین فضایی به علاوه ۱.۵ انحراف معیار) به صورت خودکار به چندضلعی‌های برداری تبدیل شده و به صورت مرزهای قرمز رنگ متمایز بر روی نقشه‌های پایه ترسیم شدند تا توزیع خرد کاربری‌های پرنور به صورت بصری و ریاضی نمایان گردد.



شکل ۲، طرح‌واره روش تحقیق

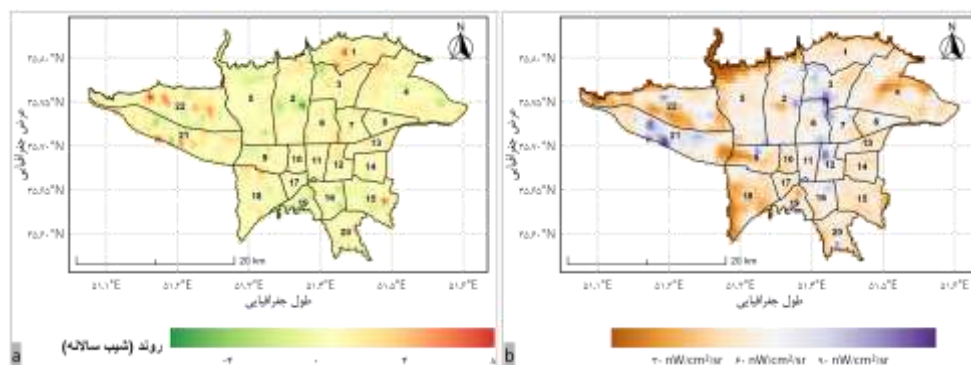
منبع: (نویسنده، ۱۴۰۵)

۵. یافته‌های پژوهش

۵.۱. توزیع مکانی روند تغییرات و میانگین درخشندگی نور شب

تحلیل توزیع مکانی روند تغییرات و میانگین درخشندگی نور شب در محدوده کلان‌شهر تهران، مطابق شکل ۳، الگوی گسترده و ناهمگن را در سراسر مناطق ۲۲ گانه شهر آشکار می‌سازد؛ به گونه‌ای که شدت و جهت تغییرات، بسته به موقعیت جغرافیایی و کاربری‌های شهری، تفاوت‌های چشمگیری نشان می‌دهد. براساس شکل ۳a، روندهای مثبت درخشندگی عمدتاً در مناطق ۱ و ۲۲، بخش‌های جنوبی و شرقی منطقه ۲۱، نواحی شرقی منطقه ۱۵، محدوده مرزی مناطق ۹ و ۱۸، و پهنه‌های مرزی میان مناطق ۱ و ۳ و نیز میان مناطق ۶، ۷، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود. شدت این روندهای افزایشی در شمال منطقه ۱، غرب و شمال‌غرب و شرق منطقه ۲۲ و همچنین در شرق منطقه ۱۵ برجسته‌تر است. در مقابل، نواحی شرقی و مرکزی منطقه ۲، بخش‌های شمالی و برخی نواحی جنوب‌شرقی منطقه ۵، شمال‌غرب منطقه ۳ در مجاورت بزرگراه چمران، شرق و مرکز منطقه ۴، و پهنه‌های شرقی تا جنوب‌شرقی مناطق ۱۶ و ۱۹ روندی منفی را تجربه کرده‌اند. شکل ۳b نیز نشان می‌دهد که نواحی مرزی میان مناطق ۲، ۳، ۷ و ۶ همچون محوری پرنور از حوالی بزرگراه مدرس تا بزرگراه شهید سلیمانی امتداد یافته‌اند. در منطقه ۲۱، بخش‌های جنوبی، جنوب‌غربی و غربی، و در منطقه ۱۲، نواحی شمال‌غربی تا مرکزی، سطوح بالایی از درخشندگی دارند. همچنین نواحی شمالی منطقه ۲۲ (مجاورت دریاچه شهدای خلیج فارس) و بخش‌های شمالی منطقه ۹ (حوالی فرودگاه مهرآباد) از روشنایی بالایی برخوردارند. در مقابل، پهنه‌های شرقی، مرکزی و غربی منطقه ۴، بخش‌های جنوبی و مرکزی منطقه ۲، محدوده غربی و محور جنوب‌شرقی تا جنوب‌غربی منطقه ۲۲، امتداد شمال‌شرقی تا شمال‌غربی مناطق ۵ و ۲، محور جنوبی تا شمال‌غربی منطقه ۱۸، نواحی شمالی منطقه ۱۹، مسیر مرکزی تا غرب و جنوب‌غربی منطقه ۲۱، نواحی شرقی تا جنوب‌شرقی منطقه ۱۵ و بخش‌های مرکزی منطقه ۱۳ کمترین میزان درخشندگی را به خود اختصاص داده‌اند.

این یافته‌ها یک دوگانگی فضایی کلیدی را در الگوی توسعه شهر ترسیم می‌کنند: یک هسته مرکزی بسیار روشن و نسبتاً پایدار، در برابر حاشیه‌ای پیرامونی با نرخ رشد بالا، به‌ویژه در پهنه غربی. رشد سریع درخشندگی در مناطق پیرامونی نظیر منطقه ۱ و ۲۲، مؤید فرآیند گسترش نامتوازن شهری است که در بسیاری از کلان‌شهرهای در حال توسعه دیده می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۸). رشد قابل توجه در منطقه ۲۲ که با برنامه‌های بزرگ‌مقیاس مسکونی و تجاری و توسعه زیرساخت‌هایی مانند بزرگراه شهید همت همراه بوده، گویای یک توسعه برنامه‌ریزی شده به سمت غرب است و نتایج پژوهش باقری و همکاران (۲۰۲۲) را در مقیاسی کمی تأیید می‌کند. در نقطه مقابل، مناطق مرکزی (مانند ۶، ۷ و ۱۲) با وجود میانگین درخشندگی بالا، نرخ رشد کمتری نشان می‌دهند که می‌توان آن را به اشباع توسعه فیزیکی نسبت داد؛ جایی که بافت شهری به تراکم نهایی خود رسیده و فرصت چندانی برای توسعه جدید باقی نمانده است. این وضعیت، یادآور پدیده اشباع رادیومتریکی در داده‌های DMSP-OLS است (لی و همکاران، ۲۰۲۰)، با این تفاوت که در پژوهش حاضر، یک اشباع واقعی در توسعه فیزیکی رخ داده که حتی توسط سنجنده VIIRS نیز به‌صورت نرخ رشد پایین ثبت شده است. بدین ترتیب، مقایسه دو نقشه شکل ۳ این نتیجه کلیدی را آشکار می‌سازد که باوجود روشنایی پایدار در مرکز شهر، پویاترین رشد و توسعه در دهه اخیر در مناطق پیرامونی، به‌ویژه غرب تهران، رخ داده است.



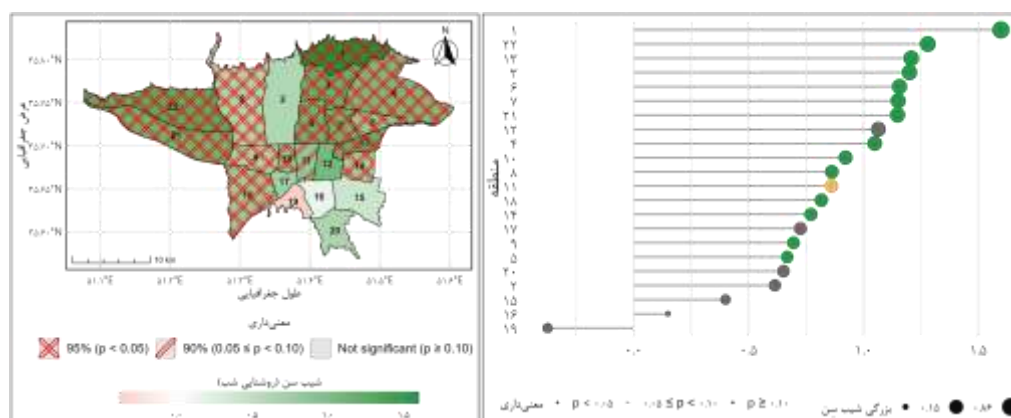
شکل ۳. مقایسه روند تغییرات و میانگین درخشندگی نور شب در تهران (۲۰۱۴-۲۰۲۵، VIIRS). (a) توزیع پراکندگی روند (شیب سالانه). (b) توزیع پراکندگی میانگین توزیع فضایی روشنایی. منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۵)

۵.۲. مقایسه روند رشد در مناطق و نابرابری‌های درون‌شهری

شکل ۴ نتایج تحلیل روند تغییرات سالانه درخشندگی نور شب را به تفکیک مناطق ۲۲ گانه تهران در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ نمایش می‌دهد. براساس آزمون من-کندال و شیب تخمین‌زن سن، تمامی مناطق به استثنای منطقه ۱۹ روند افزایشی داشته‌اند. منطقه ۱ با شیب سن ۱.۶ بیشترین و سریع‌ترین نرخ رشد را نشان می‌دهد و مناطق ۱۳ و ۲۲ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در مقابل، کمترین رشد مثبت معنادار در منطقه ۵ دیده می‌شود. منطقه ۱۹ تنها منطقه‌ای است که شیب منفی (۰.۳۷-) را ثبت کرده، هرچند این روند از نظر آماری معنی‌دار نیست ($p \geq 0.10$). همچنین در مناطق ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۲۰ نیز روندهای مثبت فاقد معنی‌داری آماری هستند و می‌توانند ناشی از نوسانات تصادفی باشند.

این یافته‌ها نشان‌دهنده رشد غالب فعالیت شبانه در اکثر مناطق تهران، همراه با نابرابری‌های درونی مشخص است. شناسایی روند منفی در منطقه ۱۹، هرچند غیرمعنی‌دار، یافته‌ای غیرمنتظره است، زیرا الگوی غالب در مطالعات نور شب، رشد و گسترش است. این روند کاهشی می‌تواند

بازتابی از تغییرات ساختاری مانند جابه جایی فعالیت های صنعتی، نوسازی شهری یا تغییر فناوری روشنایی در این منطقه باشد و با پژوهش هایی که از داده های نور شب برای شناسایی رکود اقتصادی یا تأثیر بحران ها استفاده کرده اند (ژو و کیانگ، ۲۰۲۱) همخوانی دارد. این امر تأیید می کند که تحلیل های درون شهری قادرند چنین تغییرات ساختاری ظریفی را نیز آشکار سازند.



شکل ۴. مقایسه نرخ رشد سالانه درخشندگی نور شب در مناطق ۲۲ گانه تهران با استفاده از آزمون من-کندال

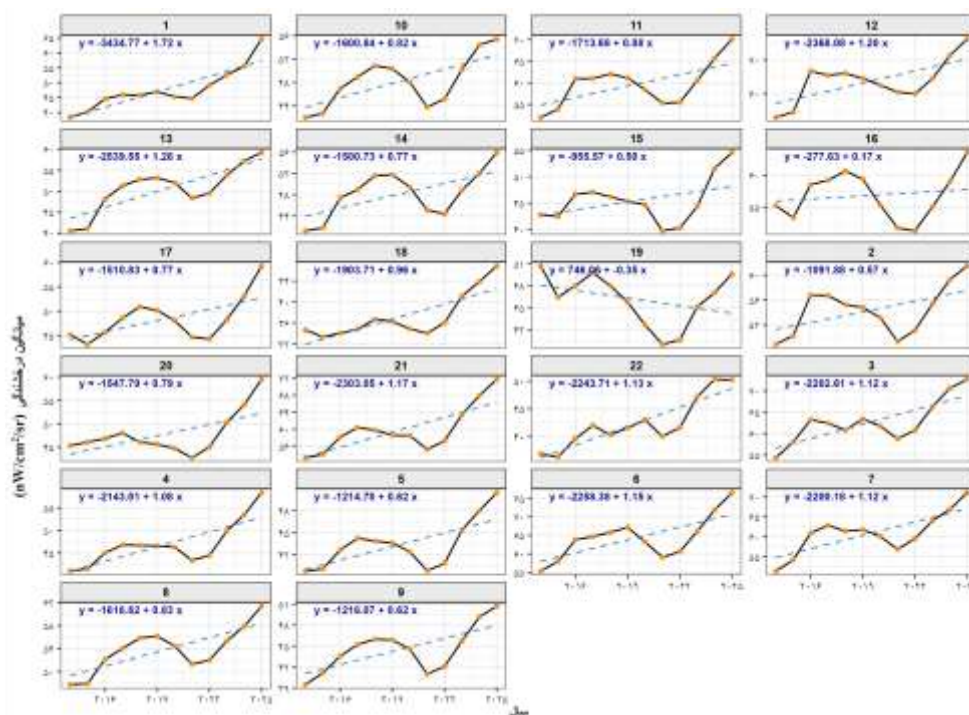
(۲۰۱۴-۲۰۲۵). (چپ) توزیع شیب سن و معنی داری؛ (راست) نمودار شیب سن.

منبع: (یافته های تحقیق، ۱۴۰۵)

۳.۵. تحلیل سری زمانی تغییرات سالانه

شکل ۵ با ارائه سری زمانی مجزا برای هر منطقه، جزئیات بیشتری از پویایی این روندها را نمایان می سازد. اغلب مناطق (به جز منطقه ۱۹) مسیر کلی صعودی دارند، اما این رشد خطی نبوده و نوسانات سالانه قابل توجهی در بسیاری از مناطق دیده می شود. الگویی تکرارشونده در بیشتر مناطق، کاهش یا ثبات نسبی در حدود سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ و به دنبال آن، یک دوره رشد شتابان تا سال ۲۰۲۵ است. این الگو به احتمال زیاد بازتابی از تأثیرات همه گیری COVID-۱۹ بر فعالیت های شهری است؛ کاهش فعالیت های تجاری، محدودیت های تردد و تغییر الگوهای کار و زندگی در این دوره،

همان‌طور که در مطالعات جهانی با داده‌های نور شب نشان داده شده، به تازگی شدن موقتی شهرها منجر شده است. رشد شتابان پس از این دوره نیز می‌تواند بیانگر بازگشت به وضعیت عادی و جریان رکود اقتصادی ناشی از همه‌گیری باشد. این موضوع، حساسیت بالای داده‌های ماهانه VIIRS را برای پایش رویدادهای کوتاه‌مدت و تأثیرگذار تأیید می‌کند. در منطقه ۱، که بیشترین شیب رشد را دارا است، این روند به صورت یک خط صعودی قوی با شیب فزاینده در سال‌های پایانی نمایان است. در مقابل، نمودار منطقه ۱۹ الگوی متفاوتی دارد و در نهایت به سطحی پایین‌تر از سال ۲۰۱۴ می‌رسد که نتیجه آن ثبت شیب منفی در تحلیل کلی (شکل ۴) بوده است.



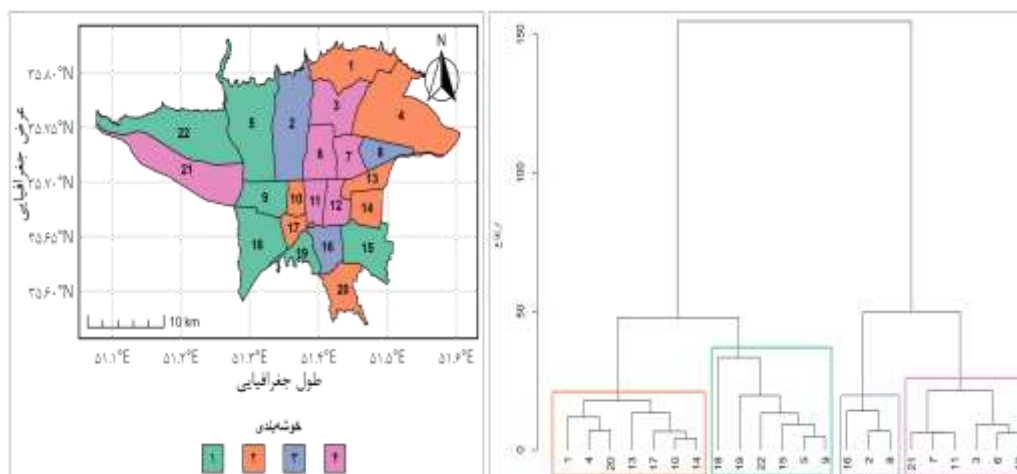
شکل ۵. روند تغییرات سالانه میانگین درخشندگی نور شب بر حسب $(nW/cm^2/sr)$ به تفکیک مناطق ۲۲ گانه

تهران (۲۰۲۵-۲۰۱۴).

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۵)

۵.۴. تحلیل خوشه‌ای مناطق براساس رفتار زمانی درخشندگی

نتایج خوشه‌بندی سری زمانی روشنایی شب با روش سلسله‌مراتبی به چهار گروه متمایز انجامید (شکل ۶). خوشه ۱ (مناطق ۵، ۱۸، ۱۵، ۱۹، ۲۲ و ۱) بیشتر در حاشیه‌های شمال‌غربی و جنوب‌غربی شهر متمرکز شده و شامل مناطقی با بالاترین سطح درخشندگی و رفتار نسبتاً مشابه است؛ حضور منطقه ۱۹ با شیب منفی در این گروه نشان می‌دهد که معیار خوشه‌بندی صرفاً روند مثبت نیست، بلکه الگوی کلی نوسان‌ها و میانگین نیز مؤثر بوده است. خوشه ۲ (مناطق ۱، ۴، ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۷ و ۲۰) مناطق مرکزی و شرقی را دربرمی‌گیرد که از نظر توسعه شبانه سطح میانه‌ای دارند. خوشه ۳ کم‌تعدادترین گروه است و تنها مناطق ۲، ۸ و ۱۶ را شامل می‌شود که در شاخه‌ای مجزا از دندروگرام قرار گرفته‌اند و رفتاری نسبتاً مستقل از سایر مناطق نشان می‌دهند. بزرگ‌ترین خوشه، یعنی خوشه ۴ (مناطق ۳، ۶، ۷، ۹، ۱۱، ۱۲، ۲۱)، عمدتاً مناطق جنوبی و میانی را پوشش می‌دهد و الگوی رشد شبانه متوسط روبه‌بالا و همگنی را نمایندگی می‌کند. توزیع فضایی خوشه‌ها همگنی کامل جغرافیایی ندارد و این فاصله در رفتار زمانی (نظیر آهنگ رشد یا ثبات) بوده که عامل اصلی گروه‌بندی محسوب می‌شود.

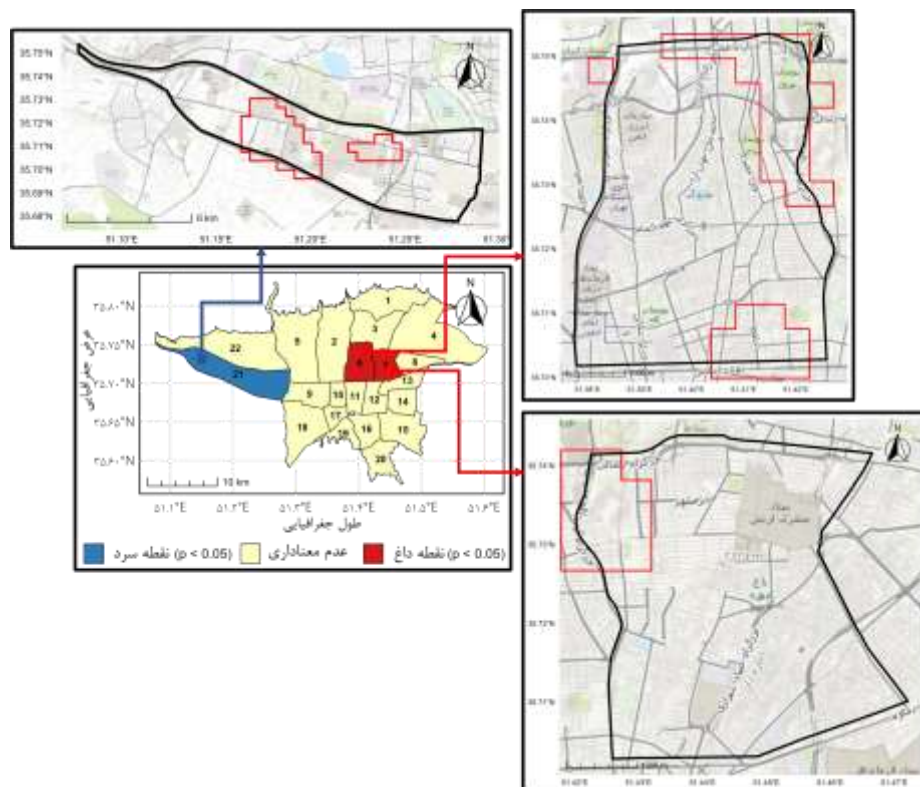


شکل ۶. خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی مناطق ۲۲ گانه تهران بر پایه سری زمانی روشنایی شب (۲۰۱۴-۲۰۲۵). (چپ) توزیع فضایی خوشه‌ها؛ (راست) دندروگرام با معیار وارد و فاصله اقلیدسی. منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۵)

۵.۵. تحلیل نقاط داغ و الگوی خودهمبستگی مکانی

مطابق شکل ۷، تحلیل نقاط داغ ($Getis-Ord\ Gi^*$) بر روی متغیر میانگین درخشندگی نور شب نشان می‌دهد که تنها سه منطقه دارای خودهمبستگی مکانی معنی‌دار هستند. مناطق ۶ و ۷ به‌عنوان نقاط داغ شناسایی شده‌اند؛ از منظر آمار فضایی، این بدان معناست که نه تنها خود این مناطق دارای تابش شبانه بالایی هستند، بلکه در مجاورت همسایگانی با درخشندگی بسیار بالا قرار گرفته و یک کانون یکپارچه از فعالیت شبانه را در هسته مرکزی تشکیل می‌دهند. همان‌طور که در پنل‌های تفکیک شده شکل (۷) بر بستر نقشه Esri TopoMap مشهود است، مرزبندی‌های قرمز رنگ که نشانگر کانون‌های بیشینه روشنایی هستند، بخش عمده‌ای از مساحت این دو منطقه را در بر گرفته‌اند که نشان‌دهنده تمرکز کاربری‌های تجاری، اداری، درمانی و شریان‌های متراکم مرکزی تهران است.

در مقابل، منطقه ۲۱ در غرب تهران به عنوان تنها نقطه سرد^۱ ظاهر شده است. شناسایی این منطقه به عنوان نقطه سرد نشان می‌دهد که میانگین درخشندگی پایین در این پهنه با همسایگانی با تابش متوسط روبه پایین هم‌افزایی فضایی داشته است. نگاهی به نقشه کالبدی این منطقه در شکل (۷) و عدم حضور معنادار خطوط قرمز بیشینه در بخش‌های وسیعی از آن، نشان می‌دهد که غلبه کاربری‌های صنعتی باز، کارخانجات با فعالیت محدود شبانه، و فضاهای بایر در لبه غربی تهران، عامل اصلی شکل‌گیری این شکاف در درخشندگی بوده است. شایان ذکر است که مناطقی نظیر منطقه ۱۹ علیرغم داشتن روند زمانی نزولی، به دلیل برخورداری از میانگین روشنایی بالا در کل دوره، از نظر محاسباتی شرایط تشکیل خوشه سرد فضایی را نداشته‌اند. سایر مناطق فاقد خودهمبستگی فضایی معنی‌دار بوده و در رده الگوی تصادفی جای می‌گیرند. این الگو به وضوح نشان می‌دهد که توزیع فعالیت شبانه در تهران از یک ساختار قطبی و نامتوازن (تجمع حداکثری در مرکز و تمرکز پهنه‌های کم‌نور در لبه غربی) پیروی می‌کند.



شکل ۷. کالبدشکافی فضایی و آماری کانون‌های روشنایی در کلان‌شهر تهران.

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۵)

۵. ۶. تقابل فضایی نور شب و تراکم جمعیت: تیپولوژی عملکردی مناطق تهران
به‌منظور اعتبارسنجی یافته‌های سنجش از دور با واقعیت‌های هسته‌های تراکم جمعیتی سطح زمین، در گام نهایی این پژوهش، رابطه میان تراکم جمعیت (به‌عنوان نماگر سکونت) و درخشندگی شبانه (به‌عنوان نماگر شدت فعالیت‌های اقتصادی و زیرساختی) مورد تحلیل آماری و واکاوی فضایی قرار گرفت (شکل ۸). نتایج تحلیل آماری مؤید وجود عدم همبستگی و ناهمخوانی شدید میان تراکم جمعیت و میانگین درخشندگی شبانه در مناطق ۲۲ گانه تهران است؛ به‌طوری‌که ضریب همبستگی

پیرسون بین تراکم جمعیت و شدت نور شب مقدار نزدیک به صفر $r = -0.017$ را با سطح معنی‌داری بسیار بالا و غیرمعنی‌دار بودن آماری کامل $p = 0.937$ ثبت نمود. همچنین ضریب همبستگی اسپیرمن به‌عنوان یک شاخص غیرپارامتریک، رابطه ضعیف $p = 0.1767$ را نشان داد. پدیده شگفت‌انگیز و جالب‌توجه دیگر، وجود همبستگی معکوس و منفی متوسط $r = -0.3235$ میان کل جمعیت ساکن مناطق و میانگین درخشندگی شبانه آن‌ها است که نشان می‌دهد با افزایش جمعیت مسکونی کالبدی، از شدت فعالیت‌های زیرساختی شبانه کاسته می‌شود. درنهایت، مدل رگرسیون خطی ساده مشخص ساخت که تغییرات تراکم جمعیت دموگرافیک تنها قادر به تبیین کمتر از ۰.۰۳ درصد از واریانس و تغییرات روشنایی شبانه در سطح مناطق کلان‌شهر تهران است ($p = 0.937, R^2 = 0.0003$).

این عدم همبستگی آماری و ضریب تعیین نزدیک به صفر، از منظر اقتصاد فضایی نه تنها یک نقص به شمار نمی‌رود، بلکه مهم‌ترین سند و تأیید آماری بر پدیده عدم تطابق فضایی^۱ در پایتخت است. بررسی تطبیقی نقشه تراکم جمعیت (شکل ۸a) و نمودار پراکندگی مناطق (شکل ۸b) به‌خوبی این رفتار ناهمگن فضایی را کالبدشکافی می‌کند:

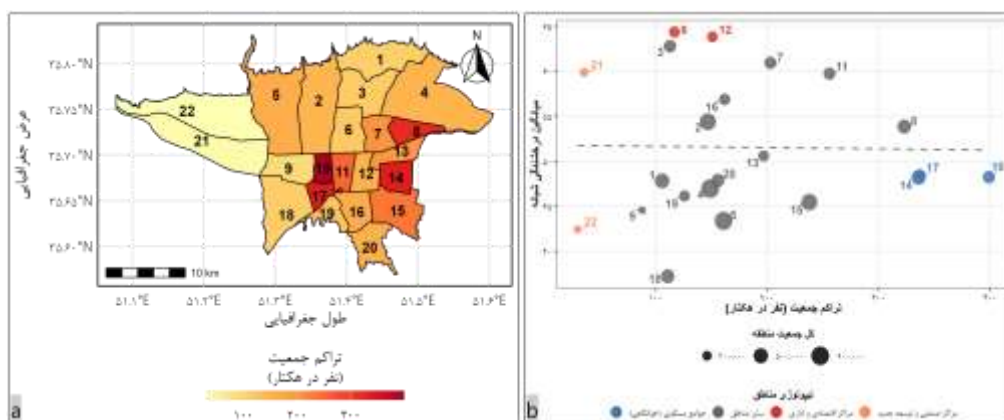
مناطق ۶ و ۱۲ به‌عنوان هسته‌های مرکزی تجاری-اداری^۲ (CBD)، بالاترین سطح درخشندگی شبانه را در کلان‌شهر تهران دارند، درحالی‌که تراکم جمعیت ساکن در آن‌ها در پایین‌ترین سطوح (۱۱۷ و ۱۵۱ نفر در هکتار) قرار دارد که نشان‌دهنده تمرکز مطلق کانون‌های فعالیت اقتصادی و زیرساخت‌های شبانه بر روی بافت کم‌جمعیت مسکونی است. در نقطه مقابل، مناطقی نظیر ۱۰، ۱۴ و ۱۷ با ثبت بالاترین مقادیر تراکم جمعیتی (به‌ویژه منطقه ۱۰ با ثبت بیشینه تراکم ۳۹۹ نفر در هکتار)، کمترین تناسب را با روشنایی شبانه دارند؛ این انحراف شدید آماری ثابت می‌کند که مناطق مذکور عمدتاً نقش جوامع خوابگاهی^۳ را ایفا کرده و فاقد زیرساخت‌های بزرگ‌مقیاس تجاری و معابر عریض

1. Spatial Mismatch

2. A Central Business District (CBD)

3. Bedroom Communities

روشن هستند. از سوی دیگر، مناطق ۲۱ و ۲۲ علیرغم ثبت کمترین میزان تراکم جمعیتی (به ترتیب ۳۶ و ۳۰ نفر در هکتار)، به واسطه استقرار صنایع عظیم در منطقه ۲۱ و قطب‌های تجاری-تفریحی نوین در منطقه ۲۲، انحراف مثبت فاحشی از خط روند رگرسیون خطی نشان می‌دهند. عدم انطباق هسته‌های تراکم جمعیتی با کانون‌های کالبدی-اقتصادی در تهران که پیش از این در مقیاس‌های منطقه‌ای دیگر ایران نیز مورد تأکید قرار گرفته بود (خداوند و شهابی شاهمیری، ۱۳۹۴)، نشان می‌دهد که داده‌های رادیومتریک VIIRS ابزاری گریزناپذیر برای سیاست‌گذاران شهری به‌منظور کشف توزیع واقعی ظرفیت‌های اقتصادی فعال و فرار از خطاهای سیاست‌گذاری مبتنی بر آمارهای صرفاً جمعیتی به‌شمار می‌رود.



شکل ۸. واکاوی ارتباط میان تراکم جمعیت و شدت روشنایی شبانه در کلان‌شهر تهران. (a) نقشه توزیع فضایی تراکم جمعیت (نفر در هکتار) در مناطق ۲۲ گانه؛ (b) نمودار پراکندگی میانگین درخشندگی شبانه (VIIRS NTL) در برابر تراکم جمعیت.

منبع: (یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۵)

۵.۷. پیامدهای برنامه ریزی شهری و محیط زیستی

در مجموع، یافته های این پژوهش تصویری چندوجهی از توسعه نامتوازن شهری در تهران به دست می دهد. شناسایی کانون های رشد سریع در غرب تهران، ضرورت توجه ویژه به توسعه زیرساخت های حمل و نقل، خدمات و انرژی را در این مناطق گوشزد می کند. از منظر زیست محیطی، تطابق این کانون های رشد با مناطقی که در مطالعات پیشین به عنوان نقاط بحرانی آلودگی نوری شناسایی شده اند (باقری و همکاران، ۲۰۲۳؛ میلانی، ۲۰۲۰)، اهمیت تلفیق سیاست های کنترل نورپردازی با طرح های جامع و تفصیلی شهری را دوچندان می سازد. این پژوهش نشان می دهد که داده های نور شب نه تنها ابزاری برای توصیف گذشته، بلکه وسیله ای قدرتمند برای پیش بینی روندهای آتی و مدیریت پایدار توسعه شهری می توانند قلمداد شوند.

۵.۸. محدودیت ها و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی

باوجود نتایج قابل تأمل، این پژوهش با محدودیت هایی روبه روست. نخست آنکه داده های VIIRS با توان تفکیک مکانی حدود ۵۰۰ متر، قادر به تفکیک دقیق کاربری های مختلف (مسکونی، تجاری، صنعتی) در یک پیکسل واحد نیستند و تفسیر ماهیت تغییرات را با عدم قطعیت همراه می کنند. ثانیاً، مطالعه حاضر مبتنی بر تحلیل همبستگی است و برای شناسایی روابط علت و معلولی، تلفیق این داده ها با سایر متغیرهای اقتصادی-اجتماعی در مدل های پیشرفته تر ضروری است. برای تحقیقات آتی، استفاده از داده های نور شب با توان تفکیک مکانی بالاتر به منظور تفکیک دقیق تر کاربری ها، تلفیق با تصاویر حرارتی برای تحلیل جزایر حرارتی شهری یا تصاویر ماهواره ای با وضوح بالا برای پایش تغییرات کاربری اراضی، و توسعه مدل های پیش بینی کننده بر پایه سری های زمانی نور شب پیشنهاد می شود. این رویکردها می توانند به درک جامع تری از پویایی کلان شهر تهران منجر شده و ابزاری قدرتمند برای مدیران شهری فراهم آورند.

۶. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف پایش فضا-زمانی ساختار کلان‌شهری تهران، به واکاوی رفتار روشنایی شبانه به‌عنوان شاخصی کارآمد از تمرکز کالبدی و فعالیت‌های انسانی در سطح مناطق ۲۲ گانه طی یک دوره ۱۲ ساله (۲۰۱۴-۲۰۲۵) پرداخت. پایش رادیومتریکی در این پژوهش با اعمال الگوریتم آماری مقاوم استرچ انحراف معیار ۳ سیگما در محیط برنامه‌نویسی R صورت پذیرفت که به‌طور ساختارمند نویزهای پس‌زمینه را پالایش و پیکسل‌های فرین را کالبره نمود. یافته‌های این پژوهش، وجود یک دوگانگی فضایی شدید و الگوی توسعه قطبی‌شده را در پایتخت تایید کرد.

نتایج رگرسیون خطی و تحلیل روند با آزمون ناپارامتری من-کندال نشان داد که تمامی مناطق تهران به‌استثنای منطقه ۱۹ روند افزایشی معنی‌داری را تجربه کرده‌اند. در این میان، منطقه ۱ با شیب s_n بالا (۱.۶) سریع‌ترین نرخ رشد نوری را ثبت نمود و مناطق ۱۳ و ۲۲ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کالبدشکافی فضایی لکه‌های داغ (آماره $Getis-Ord Gi^*$) نشان داد که مناطق ۶ و ۷ به دلیل تمرکز شدید فعالیت‌های اداری، تجاری و درمانی، کانون پایدار و داغ روشنایی تهران را تشکیل می‌دهند. این مناطق مرکزی علی‌رغم میانگین رادیانس بالا، با پدیده اشباع زیرساخت‌های روشنایی به دلیل حداکثر تراکم ساختمانی مواجه بوده و نرخ رشد پایینی را ثبت نموده‌اند. در مقابل، منطقه ۲۱ در لبه غربی تهران به‌عنوان تنها خوشه سرد فضایی شناسایی شد که ناشی از غلبه کاربری‌های صنعتی باز و اراضی بایر در این محدوده و مجاورت با پهنه‌های باز منطقه ۲۲ است. پایش روند نزولی در منطقه ۱۹ (شیب منفی ۰.۳۷-)، واقعیت کالبدی جدیدی را فاش ساخت؛ این کاهش روشنایی بازتابی دقیق از اعمال سیاست‌های انضباط شهری شهرداری تهران مبنی بر خروج کارگاه‌های صنعتی مزاحم، ساماندهی اراضی خلأزیر و خاموش‌سازی ۲۳ کوره آجرپزی سنتی مخروبه در این منطقه جنوبی براساس بند ۲۰ ماده ۵۵ قانون شهرداری‌ها و مصوبات طرح جامع کالبدی است (حسینی و همکاران، ۱۴۰۱؛ ایثاری و برغم‌دی، ۲۰۲۶). بخش کلیدی و متمایزکننده این پژوهش، بررسی تطبیقی داده‌های

سرشماری سال ۱۳۹۷ مناطق ۲۲ گانه تهران با میانگین تابش شبانه بود که نشان داد توزیع فضایی جمعیت با توزیع فضایی روشنایی شبانه دارای عدم تقارن شدید آماری است. به عنوان نمونه، مناطقی نظیر منطقه ۶ و ۱۲ با وجود اینکه هسته‌های اصلی تجاری، اداری و اقتصادی کلان‌شهر تهران محسوب می‌شوند و درخشندگی شبانه بسیار بالایی دارند، از نظر تراکم جمعیت ساکن براساس آمار مبنای سال ۱۳۹۷ در رتبه‌های پایین (به ترتیب ۱۱۷ و ۱۵۱ نفر در هکتار) قرار دارند. در مقابل، مناطقی مانند منطقه ۱۰ و ۱۷ با بالاترین تراکم جمعیتی (بیش از ۳۳۰ نفر در هکتار)، عمدتاً نقش پهنه‌های مسکونی-خوابگاهی را ایفا می‌کنند و همبستگی معناداری با توزیع نور ندارند. این یافته‌ها، همسو با مطالعات پیشین (خداپنده و شهابی شاهمیری، ۱۳۹۴) تأکید می‌کند که اتکای صرف به داده‌های جمعیتی برای سنجش پویایی‌های شهری گمراه‌کننده است و داده‌های رادیومتریک VIIRS ابزاری ضروری برای کشف واقعیت‌های پنهان اقتصادی و زیرساختی در مقیاس درون‌شهری به شمار می‌روند. در نهایت، تولید اطلس ۲۲ منطقه‌ای با کادربندی‌های پویا و بزرگ‌نمایی عمیق بر بستر نقشه OpenStreetMap، کارایی بالای روش‌های محاسباتی نوین را در پایش ساختار فیزیکی معابر با رزولوشن بالا تأیید کرد. این یافته‌ها ابزاری سیستماتیک و عاری از سوگیری در اختیار برنامه‌ریزان شهری قرار می‌دهد تا به پایش کالبدی، مدیریت هوشمند کلان‌شهرها و کنترل اثرات زیست‌محیطی آلودگی نوری بپردازند.

کتابنامه

۱. حسینی، ا.، معروفی، م.، معروفی، ا.، حبیبی، ک.، و شریفی، ع.ر. (۱۴۰۱). ساماندهی بافت‌های مسئله‌دار شهری با رویکرد تحلیل ذینفعان و شبکه اجتماعی (نمونه تجربی: محدوده خلایز جنوبی در منطقه ۱۹ شهر تهران). *جغرافیای اجتماعی شهری*، ۹(۲)، ۲۵-۴۶.

<https://doi.org/10.22103/JUSG.2022.2073>

۲. فولادگر، و.، و فیضی، م. (۱۴۰۱). برآورد تولید ناخالص داخلی فصلی ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نور شب. *اقتصاد و توسعه منطقه‌ای*، ۲۹ (پاییز و زمستان ۲۴)، ۱-۲۹.
<https://doi.org/10.22067/erd.2023.77085.1127>
۳. کرمی، م.، و شجاعی، م. (۱۴۰۱). بررسی بهترین راهبردهای طراحی معماری همساز با اقلیم در شهر مشهد. *جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۲۰ (۲)، ۱۹۵-۲۲۲.
<https://doi.org/10.22067/jgrd.2022.73181.1081>

4. Ahmadi, F., kiani, A., & sahebi, M. (2025). Enhancing night light data accuracy: an analytical review of DMSP-OLS inter-calibration methods. *Earth Science Informatics*, 18(3), 438. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01925-7>
5. Bagheri, S., Karimzadeh, S., & Feizizadeh, B. (2023). Investigation and modeling of physical development of urban areas and its effects on light pollution using night light data. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(1), 98-110. <https://doi.org/10.26833/ijeg.976495>
6. Chang, T.-C., Tang, J. H., & Chan, T. C. (2025). Spatiotemporal impact of urban development on nighttime light intensity and its hotspot distribution. *PLOS One*, 20(6), e0325696. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325696>
7. Chen, S., & Cheng, C. (2025). Monitoring Fine-Scale Urban Shrinkage Space with NPP-VIIRS Imagery. *Remote Sensing*, 17(4), 688. <https://doi.org/10.3390/rs17040688>
8. Chen, Z., Cheng, L., Chen, Y., Wu, J., & Tu, Y. (2026). Identifying composite spatial patterns of China's shrinking cities from nighttime light remote sensing. *GIScience & Remote Sensing*, 63(1). <https://doi.org/10.1080/15481603.2025.2605710>
9. Getis, A. O., J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 24(3), 189-206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
10. Isari, M., & Barghamadi, H. (2026). Gentrification as a Tool of Urban Intervention: Representations of space in Urban Policies (A Case Study of Brick Kilns in Tehran Municipality District 19). *Research of deviance and social problems*, 5(17), 1-34.
11. Khodabandeh, A., & Shahabi Shahmiri, M. (2025). Same method, different data: rethinking polycentricity in Mazandaran, Iran. *Papers in Applied Geography*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/23754931.2025.2589414>

12. Li, D., Zhao, X., & Li, X. (2016). Remote sensing of human beings – A perspective from nighttime light. *Geo-spatial Information Science*, 19(1), 69-79. <https://doi.org/10.1080/10095020.2016.1159389>
13. Li, X., Zhou, Y., Zhao, M., & Zhao, X. (2020). A harmonized global nighttime light dataset 1992–2018. *Scientific Data*, 7(1), 168. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0510-y>
14. Li, Y., Ye, H., Gao, X., Sun, D., Li, Z., Zhang, N., Leng, X., Meng, D., & Zheng, J. (2021). Spatiotemporal Patterns of Urbanization in the Three Most Developed Urban Agglomerations in China Based on Continuous Nighttime Light Data (2000–2018). *Remote Sensing*, 13(12), 2245. <https://doi.org/10.3390/rs13122245>
15. Liu, Y., Xu, M., Li, R., Zhang, A., & Gao, P. (2025). Geospatial Monitoring of Urban Dynamics and Urbanization Impacts on Urban Green Landscape in Megacity Beijing Using NPP-VIIRS Nighttime Light Data and Landsat Imagery (1999–2021). *Sensors and Materials*, 37(4), 1423-1447. <https://doi.org/10.18494/sam5299>
16. Milani, R. (2020). Monitoring artificial light pollution in Iran. *Sustainable Earth Review*, 1(3).
URL:https://www.academia.edu/125782373/Monitoring_artificial_light_pollution_in_Iran
17. Mirzakhani, A., Behzadfar, M., & Azizi Habashi, S. (2025). Simulating urban expansion dynamics in Tehran through satellite imagery and cellular automata Markov chain modelling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 142. <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02325-y>
18. Ord JK, G. A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 27(4), 286-306. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x>
19. Shi, K., Chen, Y., Yu, B., Xu, T., Chen, Z., Liu, R., Li, L., & Wu, J. (2016). Modeling spatiotemporal CO2 (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis. *Applied Energy*, 168, 523-533. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.055>
20. Shi, K., Yu, B., Huang, Y., Hu, Y., Yin, B., Chen, Z., Chen, L., & Wu, J. (2014). Evaluating the Ability of NPP-VIIRS Nighttime Light Data to Estimate the Gross Domestic Product and the Electric Power Consumption of China at Multiple Scales: A Comparison with DMSP-OLS Data. *Remote Sensing*, 6(2), 1705-1724. <https://doi.org/10.3390/rs6021705>
21. Small, C. (2021). Spatiotemporal Characterization of VIIRS Night Light. *Frontiers in Remote Sensing*, 2, 775399. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.775399>

22. Wang, L., Xu, W., Xue, X., Wang, H., Li, Z., & Wang, Y. (2024). Analysis of Spatial and Temporal Changes and Drivers of Urban Sprawl in Xinjiang Based on Integrated DMSP-OLS and NPP-VIIRS Data. *Land*, 13(5), 567. <https://doi.org/10.3390/land13050567>
23. Withanage, N. C., & Jingwei, S. (2024). Evaluating the Spatial-Temporal Dynamics of Urbanization in Prefecture Cities of China Using SNPP-VIIRS Nighttime Light Remote Sensing Data. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 11(2), 346-371. <https://doi.org/10.54287/gujasa.1466745>
24. Xu, J., & Qiang, Y. (2021). Spatial Assessment of Community Resilience from 2012 Hurricane Sandy Using Nighttime Light. *Remote Sensing*, 13(20), 4128. <https://doi.org/10.3390/rs13204128>
25. Zhang, X., & Gibson, J. (2022). Using Multi-Source Nighttime Lights Data to Proxy for County Level Economic Activity in China from 2012 to 2019. *Remote Sensing*, 14, 1282. <https://doi.org/10.3390/rs14051282>
26. Zhao, M., Cheng, W., Zhou, C., Li, M., Huang, K., & Wang, N. (2018). Assessing Spatiotemporal Characteristics of Urbanization Dynamics in Southeast Asia Using Time Series of DMSP/OLS Nighttime Light Data. *Remote Sensing*, 10(1), 47. <https://doi.org/10.3390/rs10010047>
27. Zhao, M., Zhou, Y., Li, X., Cao, W., He, C., Yu, B., Li, X., Elvidge, C. D., Cheng, W., & Zhou, C. (2019). Applications of Satellite Remote Sensing of Nighttime Light Observations: Advances, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing*, 11(17), 1971. <https://doi.org/10.3390/rs11171971>
28. Zheng, H., & Zhang, R. (2025). Identification of shrinkage patterns in Japan's four major metropolitan areas based on nighttime light and population data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 136, 104391. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104391>
29. Zheng, Q., Seto, K. C., Zhou, Y., You, S., & Weng, Q. (2023). Nighttime light remote sensing for urban applications: Progress, challenges, and prospects. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 202, 125-141. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.05.028>
30. Zhu, X., Ma, M., Yang, H., & Ge, W. (2017). Modeling the Spatiotemporal Dynamics of Gross Domestic Product in China Using Extended Temporal Coverage Nighttime Light Data. *Remote Sensing*, 9(6), 626. <https://doi.org/10.3390/rs9060626>