

Uncertainty Analysis of Spatial Accessibility to General Hospitals in Isfahan City Based on the Three-Step Floating Catchment Area (3SFCA) Method

Hasan Atashgahi¹ , Babak Mirbagheri²  , Alireza Shakiba³, Ali Akbar Matkan⁴ 

1. Center for Remote Sensing and GIS Research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Email: h_atashgahi@sbu.ac.ir

2. (Corresponding Author) Center for Remote Sensing and GIS Research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Email: b_mirbagheri@sbu.ac.ir

3. Center for Remote Sensing and GIS Research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Email: a-shakiba@sbu.ac.ir

4. Center for Remote Sensing and GIS Research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Email: a-matkan@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

5 July 2025

Revised:

9 October 2025

Accepted:

18 November 2025

Available online:

22 December 2025

Keywords:

Spatial Accessibility,
3SFCA,
Distance Decay
Function,
Catchment size,
Uncertainty,
Hospital Services,
Isfahan City.

ABSTRACT

The Three-Step Floating Catchment Area (3SFCA) method is a widely used approach for evaluating spatial accessibility to services, incorporating two critical parameters: catchment size and distance decay function. However, variations in these parameters can introduce significant uncertainty into accessibility estimates. This study investigates the extent of uncertainty in spatial accessibility to general hospitals in Isfahan by applying the 3SFCA method. Accessibility uncertainty was assessed using the coefficient of variation (CV), derived from the mean and standard deviation of accessibility scores. To evaluate the impact of parameter variability, catchment sizes were randomly varied, from a minimum of 5 minutes to the maximum observed travel time between each census block and the farthest hospital, and different distance decay functions were applied. Using 100 Monte Carlo simulations, uncertainty was calculated for each census block under four types of distance decay functions as kernel, cumulative, exponential, and Gaussian. A Hot Spot Analysis was conducted to identify statistically significant clusters of high and low uncertainty. The kernel function produced the most stable results. Spatially, clusters of high uncertainty were concentrated in the eastern and southeastern districts of Isfahan, while areas with low uncertainty were primarily located in the central and southwestern parts of the city. Overall, regions with lower accessibility to general hospitals were found to exhibit greater levels of uncertainty.

Cite this article: Atashgahi, H., Mirbagheri, B., Shakiba, A., & Matkan, A. A. (2025). Uncertainty Analysis of Spatial Accessibility to General Hospitals in Isfahan City Based on the Three-Step Floating Catchment Area (3SFCA) Method. *Geographical Urban Planning Research Quarterly*, 13 (4), 83-97.
<http://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2025.389238.2030>



© The Author (s)

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Assessing spatial accessibility to healthcare services is a fundamental concern in urban and regional planning, particularly where equitable access is directly tied to public health outcomes and social justice. Among various approaches developed to evaluate accessibility, the Three-Step Floating Catchment Area (3SFCA) method has emerged as one of the most comprehensive and widely applied techniques. The 3SFCA method relies on two key parameters as catchment size and distance decay function. While these inputs provide a more realistic representation of how people access healthcare services compared with traditional methods, they are inherently uncertain. Variability in catchment size, which indicates the travel time or distance that individuals are willing or able to cover, along with the selection of various distance decay functions, illustrates how service utility diminishes with distance and can significantly affect the resulting accessibility estimates. Consequently, results derived from the 3SFCA method may be subject to uncertainty, which, if left unexamined, can reduce the reliability of research findings and their usefulness for evidence-based policymaking.

This study quantifies and analyzes the uncertainty associated with spatial accessibility to general hospitals in Isfahan City, Iran, using the 3SFCA method. Monte Carlo simulations were employed to introduce random variations in catchment size and to apply multiple distance decay functions, capturing a realistic spectrum of possible conditions. By using the coefficient of variation (CV) as a statistical measure, the research not only evaluates accessibility but also assesses the degree of confidence in those estimates. The novelty of this study lies in explicitly quantifying uncertainty, an aspect often overlooked in similar research despite its significant implications for urban health equity and spatial planning.

Methodology

This research integrates demographic, infrastructural, and spatial datasets. Population distribution data at the census

block-level were obtained for Isfahan city, while information on 23 public hospitals, including the number of active beds represented the supply side. The street network was derived from OpenStreetMap (OSM) to calculate travel times between demand and supply points, ensuring that accessibility estimates reflect real transportation conditions rather than simple Euclidean distances. The 3SFCA method was implemented through three sequential steps. First, catchment areas were delineated around each census block based on travel time thresholds. To account for variability, catchment sizes were randomly varied from a minimum of five minutes, representing the shortest plausible travel time, to the maximum observed travel time between each block and the farthest hospital. Second, supply-to-demand ratios were computed for each hospital within its catchment area by dividing available active beds by the population of surrounding census blocks. Third, accessibility scores for each demand block were calculated by aggregating these supply-to-demand ratios while applying different distance decay functions: Gaussian, kernel, exponential, and cumulative, each representing distinct assumptions about how accessibility decreases with distance. Specifically, the Gaussian function models a nonlinear decline, the kernel function follows a parabolic trend, the exponential function decreases rapidly at short distances, and the cumulative function represents a linear decline.

Monte Carlo simulations were then conducted to capture uncertainty systematically. A total of 100 simulation runs were performed, each generating a unique configuration of catchment sizes and decay function. For each block, the coefficient of variation was computed by dividing the standard deviation of accessibility scores by their mean, quantifying the relative variability of accessibility estimates. In addition, Hot Spot analysis using the Getis-Ord G_i^* statistic was applied to the CV values to identify spatial clusters of significantly high or low uncertainty across the city.

Results and discussion

Among the four tested distance decay functions, the kernel function demonstrated the lowest uncertainty, with an average CV of 60.68, indicating relatively stable accessibility estimates. In contrast, the exponential function showed the highest level of uncertainty. The central areas of Isfahan exhibited higher accessibility and lower uncertainty, whereas peripheral zones, particularly in the eastern and southeastern districts, showed lower accessibility and higher uncertainty. Hot Spot analysis revealed clusters of high uncertainty in the eastern and southeastern parts of the city, mainly due to the sparse distribution of hospitals. Conversely, clusters of low uncertainty were observed in the central and southwestern areas, where hospital density is greater. Correlation analysis confirmed an inverse relationship between accessibility and uncertainty, indicating that areas with lower accessibility tend to exhibit greater variability.

Conclusion

This study demonstrates the significant influence of input parameters on spatial accessibility analysis using the 3SFCA method. Among the tested distance decay functions, the kernel function proved to be the most reliable in minimizing uncertainty.

Areas characterized by high uncertainty in Isfahan corresponded to lower hospital density and limited accessibility. Future research should evaluate the impact of establishing new hospitals on both accessibility and uncertainty, particularly in underserved districts.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not for profit sectors.

Author Contribution

Hassan Atashgah: Data curation, Visualization, Methodology, Drafting.

Babak Mirbagheri: Methodology, Editing, Supervision, Validation.

Alireza Shakiba: Methodology, Editing, Supervision, Validation,

Ali Akbar Matkan: Methodology, Editing, Supervision, Validation.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the valuable guidance and constructive feedback provided by scientific consultants who contributed to the completion of this study.

تحلیل عدم قطعیت دسترسی مکانی به بیمارستان‌های عمومی شهر اصفهان بر اساس روش حوزه نفوذ شناور سه مرحله‌ای (3SFCA)

حسن آتشگاهی^۱، بابک میرباقری^۲✉، علیرضا شکبیا^۳، علی اکبر متکان^۴

۱- مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: h_atashgahi@sbu.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: b_mirbagheri@sbu.ac.ir

۳- مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a-shakiba@sbu.ac.ir

۴- مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a-matkan@sbu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
روش حوزه نفوذ شناور سه مرحله‌ای (3SFCA) یکی از روش‌های پیشرفته در سنجش دسترسی مکانی به خدمات است. این روش دارای دو ورودی شعاع حوزه نفوذ و تابع افت فاصله است که تنوع در مقادیر و تفاوت در انواع این ورودی‌ها می‌تواند از عوامل عدم قطعیت در مقادیر دسترسی به دست‌آمده باشد. هدف پژوهش حاضر، تحلیل عدم قطعیت دسترسی مکانی به بیمارستان‌های عمومی شهر اصفهان به روش 3SFCA است. عدم قطعیت، بر پایه میانگین و انحراف معیار مقادیر دسترسی و با استفاده از شاخص ضریب تغییرات و با اعمال تغییرات تصادفی در شعاع حوزه نفوذ و انتخاب نوع توابع افت فاصله به دست‌آمده آمد. مقادیر شعاع حوزه نفوذ بین حداقل ۵ دقیقه تا حداکثر فاصله زمانی بین هر بلوک جمعیتی و دورترین بیمارستان نسبت به همان بلوک تعیین و عدم قطعیت برای هر بلوک، با انجام ۱۰۰ مرتبه شبیه‌سازی مونت کارلو و به‌کارگیری توابع افت فاصله کرنل، تجمعی، نمایی و گوسی اندازه‌گیری شد. به‌منظور تحلیل فضایی خوشه‌های معنی‌دار دارای عدم قطعیت بالا و پایین دسترسی نیز از تحلیل Hot Spot استفاده گردید. نتایج پژوهش نشان داد تابع کرنل کمترین عدم قطعیت دسترسی را داشته و خوشه‌های با عدم قطعیت بالا عمدتاً در شرق و جنوب شرق و خوشه‌های با عدم قطعیت پایین در مرکز و جنوب غربی شهر اصفهان دیده می‌شوند. همچنین، مناطق با دسترسی پایین به بیمارستان‌های عمومی، عدم قطعیت بیشتری دارند.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷
	تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱
	واژگان کلیدی: حوزه نفوذ شناور سه مرحله‌ای (3SFCA)، تابع افت فاصله، شعاع حوزه نفوذ، عدم قطعیت، شهر اصفهان.

استناد: آتشگاهی، حسن؛ میرباقری، بابک؛ شکبیا، علیرضا و متکان، علی اکبر. (۱۴۰۴). تحلیل عدم قطعیت دسترسی مکانی به بیمارستان‌های عمومی شهر

اصفهان بر اساس روش حوزه نفوذ شناور سه مرحله‌ای (3SFCA). پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، ۱۳ (۴)، ۹۷-۸۳.

<http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.393204.2054>

مقدمه

دسترسی به خدماتی مانند آموزش، شغل، بهداشت و درمان بخش مهمی از زندگی انسان است و از پایه‌های عدالت اجتماعی به شمار می‌رود. مراکز درمانی نیز به‌طور مستقیم بر سلامت فرد و جامعه اثر دارند و در شهرها نقش حیاتی‌تری پیدا می‌کنند. روش‌های اولیه سنجش دسترسی که عمدتاً بر فاصله مستقیم یا نسبت ساده عرضه به جمعیت تکیه داشتند، توان تحلیل دقیق مکانی را نداشتند (Guagliardo, 2004). با توسعه ابزارهای تحلیل مکانی و افزایش نیاز به توزیع عادلانه خدمات، رویکردهای پیشرفته‌تری مانند روش‌های حوزه نفوذ شناور^۱ و نسخه‌های دو مرحله‌ای (2SFCA^۲) و سه مرحله‌ای آن (3SFCA^۳) معرفی شد.

در مطالعات مختلف، از جمله پژوهش‌های صادقی نیارکی و همکاران (۱۴۰۱) و غلامی و همکاران (۱۴۰۱)، روش 2SFCA برای سنجش دسترسی شهری و درمانی به‌کاررفته است. همچنین، احتمال تمایل بیشتر متقاضیان به خدمات نزدیک‌تر، مبنای توسعه روش 3SFCA گردید (ندیران و همکاران، ۱۴۰۱). از روش 3SFCA نیز در مطالعات مختلف برای سنجش دسترسی مراکز عرضه استفاده شده است، از جمله در پژوهش قربانی (۱۴۰۱) برای ارزیابی دسترسی به پارک‌ها و در مطالعات هوایلین^۴ و همکاران (۲۰۲۳) و یانگ^۵ و همکاران (۲۰۲۳) برای تحلیل نابرابری دسترسی به فضاهای سبز و پناهگاه‌ها.

با وجود کارآمدی این روش‌ها، اغلب تحقیقات بر توسعه مدل‌ها تمرکز داشته و موضوعاتی مانند عدم قطعیت ناشی از تغییر پارامترهای ورودی کمتر موردبررسی قرار گرفته است. عدم قطعیت، که نشان‌دهنده دامنه ناآگاهی یا عدم اطمینان در اندازه‌گیری‌هاست (Rowe, 1994) و به محدوده‌ای اشاره دارد که در آن، مقدار واقعی ممکن است قرار داشته باشد، بدون آن‌که به‌طور قطعی مشخص باشد (Foody & Atkinson, 2002). عدم قطعیت می‌تواند بر نتایج دسترسی تأثیرگذار باشد و از طریق تحلیل کمی و نقشه‌سازی قابل ارزیابی است (Korporaal et al., 2020). بحث عدم قطعیت در روش 2SFCA در تحقیقاتی نظیر (Chen & Jia, 2019) که اثر انواع توابع افت فاصله و شعاع‌های متفاوت را بررسی کردند و (Jinwoo & Goldberg, 2022) که با شبیه‌سازی مونت کارلو^۶ عدم قطعیت دسترسی به تخت‌های ICU را تحلیل نمودند، موردبررسی قرار گرفته است.

از آنجایی که روش 3SFCA نیز به پارامترهای کلیدی همچون شعاع حوزه نفوذ^۸ و تابع افت فاصله^۹ وابسته است، تغییر این ورودی‌ها می‌تواند به نتایج متفاوت و در نتیجه ضرورت تحلیل عدم قطعیت منجر شود. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر سنجش دسترسی مکانی به بیمارستان‌های عمومی شهر اصفهان با روش 3SFCA و ارزیابی عدم قطعیت ناشی از تغییر شعاع حوزه نفوذ و توابع افت فاصله با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مونت کارلو است، رویکردی که بر اساس بررسی‌های صورت گرفته تاکنون در تحقیقات مشابه موردتوجه قرار نگرفته است.

1. Floating Catchment Area
2. Two Step Floating Catchment Area
3. Three Step Floating Catchment Area
4. Huilin
5. Yang
6. Uncertainty
7. Monte Carlo simulation
8. Catchment size
9. Distance decay function

مبانی نظری

یکی از رویکردهای سنتی در شناسایی مناطق محروم از خدمات سلامت، روش تعیین مناطق دارای کمبود نیروی متخصص سلامت^۱ (HPSAs) است. این رویکرد با محاسبه نسبت جمعیت به پزشک در نواحی از پیش تعریف‌شده، مناطق کم برخوردار را شناسایی می‌کند (Ricketts et al., 2007). با وجود سادگی، فرض دسترسی برابر درون ناحیه و عدم مراجعه به مناطق مجاور، موجب انتقاد به این روش شده است (Luo & Qi, 2009). در دهه‌های اخیر موج جدیدی از توسعه نظریه‌های دسترسی مبتنی بر مکان، حول روش FCA آغاز شده است (Chen & Jia, 2019). مبنای روش حوزه نفوذ شناور، مدل جاذبه^۲ است که تعامل عرضه و تقاضا را با کاهش اثر فاصله توضیح می‌دهد. یکی از روش‌های مبتنی بر حوزه نفوذ شناور، روش 2SFCA است (Yang et al., 2006). 2SFCA یک روش مکان محور برای سنجش دسترسی است و به توزیع بهینه خدمات کمک می‌کند (Linggui et al., 2022).

تحقیقات متعدد برای ارتقای روش 2SFCA منجر به معرفی روش حوزه نفوذ شناور دو مرحله‌ای توسعه‌یافته (E2SFCA^۳) شد که مسئله دسترسی برابر داخل حوزه نفوذ را با اعمال وزن‌های فاصله‌ای اصلاح می‌کند (Jing et al., 2018). این روش‌ها به دلیل در نظر گرفتن هم‌زمان ظرفیت عرضه، تقاضا و فاصله جغرافیایی، به‌عنوان جایگزینی واقع‌بینانه برای روش‌های اولیه و سنتی در نظر گرفته شدند.

همچنین در دنیای واقعی، افراد معمولاً خدمات نزدیک‌تر را ترجیح می‌دهند، بر همین اساس، روش 3SFCA طراحی شد (ندیران و همکاران، ۱۴۰۱) تا با اختصاص وزن انتخابی^۴، احتمال دریافت خدمات از نقاط عرضه نزدیک‌تر به نقطه تقاضا افزایش یابد. در این میان توابع افت فاصله نقش مهمی در تعیین سهم عرضه‌کنندگان در روش 3SFCA دارند. انواع مختلفی از توابع افت فاصله وجود دارد که می‌توانند برای مدل‌سازی این کاهش سهم استفاده شوند. روابط (۱) تا (۴) مهم‌ترین توابع افت فاصله در روش‌های FCA را نشان می‌دهند (Chen & Jia, 2019):

$$f(d) = e^{(-d^2/\beta)}$$

رابطه (۱) (تابع گوسی)^۵

$$f(d) = 0.75 * [1 - (d/d_0)^2]$$

رابطه (۲) (تابع کرنل)^۶

$$f(d) = e^{(-\beta d)}$$

رابطه (۳) (تابع نمایی)^۷

رابطه (۴) (تابع تجمعی)^۸

$$f(d) = 1 - d/d_0$$

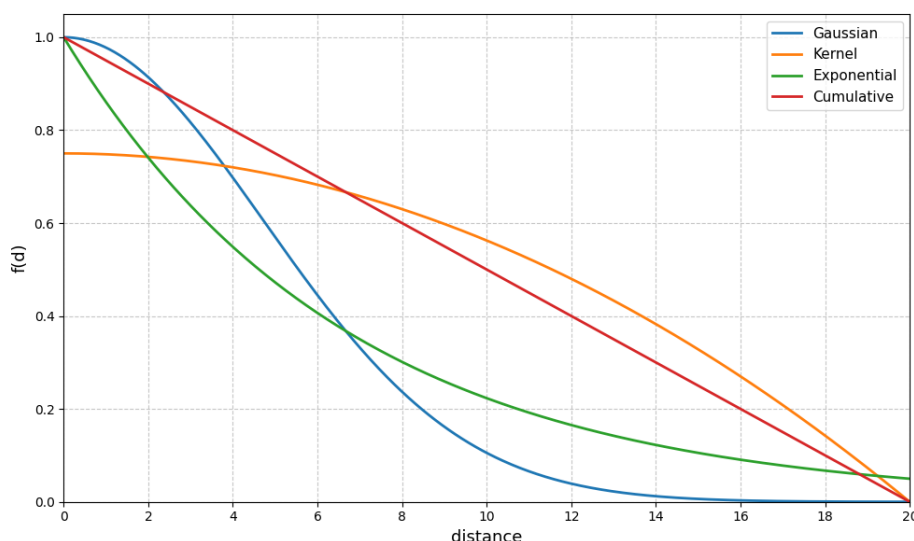
در روابط ارائه‌شده پارامتر d به‌عنوان یک ورودی کلیدی برای محاسبه در توابع افت فاصله می‌باشد و بیانگر فاصله مکانی یا زمانی بین مراکز عرضه و تقاضا است که با استفاده از ماتریس OD محاسبه می‌گردد. پارامتر d_0 نشان‌دهنده حداکثر فاصله‌ای (زمانی) است که دسترسی در آن فاصله محاسبه قرار می‌گیرد. در واقع d_0 نشان‌دهنده شعاع حوزه نفوذ در محاسبه دسترسی می‌باشد و پارامتر β یا ضریب اصطکاک نشان‌دهنده نرخ کاهش اثر عرضه خدمات با افزایش فاصله است و بر اساس روابط (۵) و (۶) به ترتیب برای توابع گوسی و نمایی محاسبه می‌شود:

1. Health Professional Shortage Areas
2. Gravity model
3. Enhanced Two Step Floating Catchment Area
4. Selection weight
5. Gaussian
6. Kernel
7. Exponential
8. Cumulative

$$\beta = - \frac{d_0^2}{\ln 0.01} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\beta = - \frac{\ln 0.01}{d_0} \quad \text{رابطه (۶)}$$

شکل (۱) نیز نمودار توابع افت فاصله مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. نمودار توابع افت فاصله گوسی، کرنل، نمایی و تجمعی

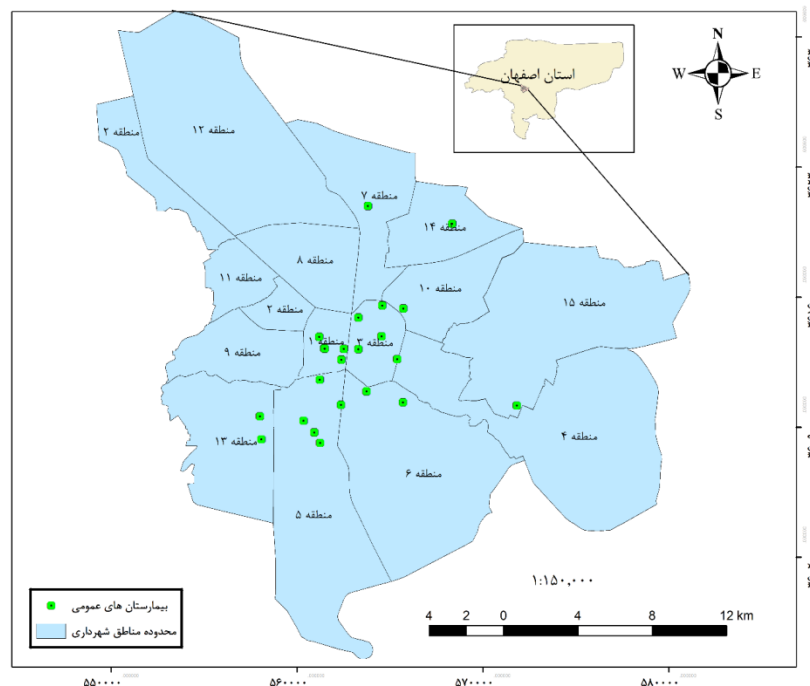
شعاع حوزه نفوذ یکی دیگر از پارامترهای کلیدی 3SFCA است و محدوده‌ای را مشخص می‌کند که یک مرکز می‌تواند خدمات ارائه دهد (Subal et al., 2021). تاکنون رویکردهای متفاوتی در تعیین شعاع حوزه نفوذ مطرح شده است؛ به عنوان نمونه، در انگلستان شعاع ۶۰ دقیقه (Bauer & Groneberg, 2016) و در برخی مطالعات بر اساس استاندارد وزارت بهداشت و خدمات انسانی آمریکا (DHHS^۱) شعاع ۳۰ دقیقه به عنوان زمان سفر در نظر گرفته می‌شود (Luo & Whippo, 2012).

محدوده مورد مطالعه

شهر اصفهان به عنوان منطقه مورد مطالعه این پژوهش در شمال غرب شهرستان اصفهان با مساحت حدود ۵۵۴ کیلومتر مربع قرار داشته و دارای ۱۵ منطقه شهرداری است. جمعیت این شهر در سال ۱۳۹۵ برابر با ۲۲۴۳۲۴۹ میلیون نفر بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵)^۲. با توجه به جمعیت بالا و گستردگی شهر، وجود بیمارستان‌ها و دسترسی آسان به آن‌ها برای ارائه خدمات بهداشتی و درمانی به شهروندان حیاتی است. تعداد بیمارستان‌های عمومی شهر اصفهان ۲۳ و تعداد کل تخت‌های بیمارستانی در این بیمارستان‌ها ۴،۹۴۱ است (نیک افراز و همکاران، ۱۳۹۸). شکل (۲) نقشه مناطق ۱۵ گانه شهر اصفهان به همراه توزیع مکانی بیمارستان‌های عمومی در سطح شهر را نمایش می‌دهد.

1. Department of Health and Human Services

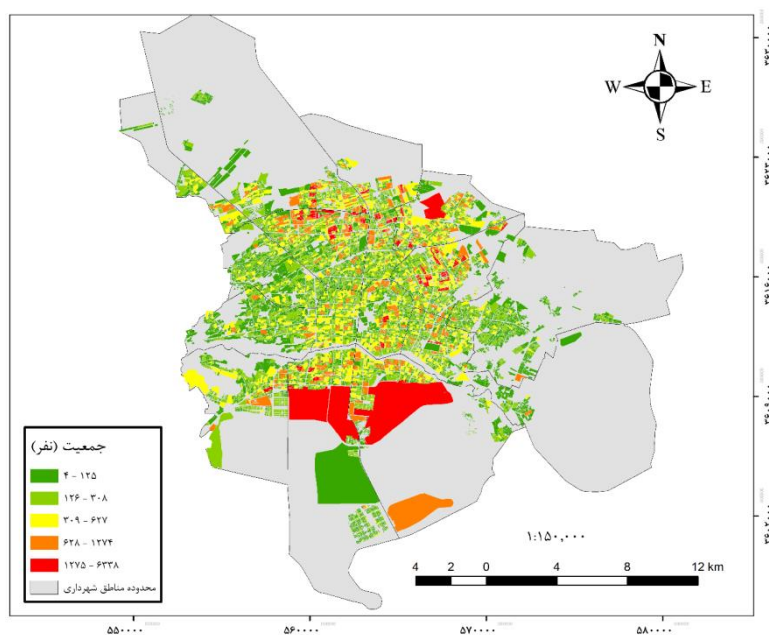
2. <https://amar.org.ir>



شکل ۲. مناطق ۱۵ گانه و توزیع بیمارستان‌های عمومی شهر اصفهان

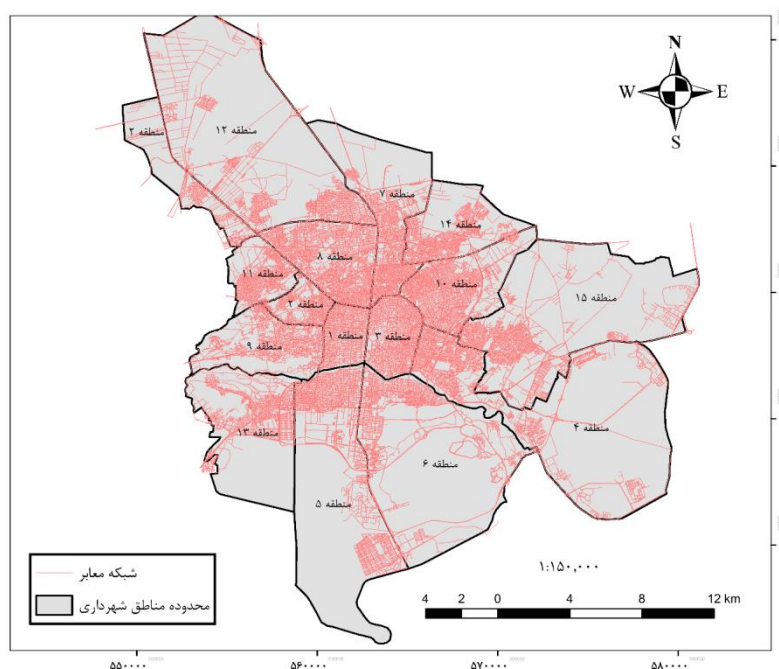
روش پژوهش

در این پژوهش پس از آماده‌سازی داده‌ها، ماتریس OD (بلوک‌های جمعیتی-مراکز درمانی) تولید شد. سپس برای تحلیل عدم قطعیت روش 3SFCA، از چهار تابع افت فاصله و مقادیر مختلف شعاع حوزه نفوذ استفاده شد. با اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ۱۰۰ تکرار، اثر تغییرات شعاع دسترسی بر عدم قطعیت دسترسی محاسبه و نقشه‌های مربوطه تولید گردید. در پایان نیز تحلیل HotSpot برای شناسایی خوشه‌های مکانی با عدم قطعیت بالا و پایین انجام گرفت. در این پژوهش بیمارستان‌های عمومی شهر اصفهان به‌عنوان ارائه‌دهندگان خدمات بهداشتی و تعداد تخت‌های فعال بیمارستانی، به‌عنوان داده‌های عرضه، مطابق با تحقیق (نیک افراز و همکاران، ۱۳۹۸) در نظر گرفته شده است. بلوک‌های جمعیتی شهر اصفهان بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران نیز به‌عنوان داده عرضه استفاده شدند (شکل ۳).



شکل ۳. جمعیت بلوک‌های آماری شهر اصفهان

همچنین داده‌های مربوط به شبکه معابر اصفهان از وبسایت^۱ OSM دریافت و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و تحلیل شبکه^۲ و ماتریس مبدا-مقصد (OD)^۳، وضعیت شبکه از لحاظ قوانین توپولوژی و مسیرهای یک‌طرفه و دوطرفه مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴) نقشه شبکه معابر در شهر اصفهان را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. شبکه معابر شهر اصفهان

1. Open Street Map
2. Network Analysis
3. Origin-Destination

روش 3SFCA

روش 3SFCA شامل سه مرحله اصلی است:

مرحله اول: تعیین حوزه نفوذ بلوک‌های جمعیتی

با استفاده از تحلیل شبکه، برای هر بلوک جمعیتی محدوده‌ای بر اساس آستانه مسافت یا زمان تعیین و مراکز عرضه داخل آن شناسایی می‌شود. سپس محدوده‌های تعیین شده جستجو می‌گردند و وزن انتخابی با رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$G_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{k \in \{dist_{ik} < d_0\}} T_{ik}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن G_{ij} وزن انتخابی بین موقعیت مکانی i و مرکز عرضه j ، $dist_{ik}$ فاصله (زمان) سفر از موقعیت مکانی i به هر مرکز عرضه k ، d_0 شعاع حوزه نفوذ و T_{ij} و T_{ik} وزن اختصاص داده شده برای مراکز عرضه j و k می‌باشند. وزن انتخابی برابر با ۱ خواهد شد اگر در حوزه تعیین شده فقط یک مرکز عرضه قرار داشته باشد و در صورت وجود مراکز عرضه دیگر وزن انتخابی کاهش پیدا خواهد کرد (Sternberg et al., 2012).

مرحله دوم: تعیین حوزه نفوذ مراکز عرضه و تعیین نسبت عرضه به تقاضا

مشابه مرحله اول، این بار برای مراکز عرضه حوزه نفوذ مشخص شده و نسبت عرضه به تقاضا با رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$R_j = S_j / (\sum G_{ij} f(d) P_K) \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این رابطه S_j میزان عرضه در موقعیت j ، G_{ij} وزن انتخابی محاسبه شده در مرحله اول، $f(d)$ تابع افت فاصله و P_K میزان جمعیت در ناحیه k می‌باشد و R_j نسبت عرضه به تقاضا در موقعیت j است.

مرحله سوم: محاسبه عدد دسترسی مکانی در موقعیت i

طبق رابطه (۹) دسترسی مکانی در روش 3SFCA محاسبه می‌شود. بر اساس این رابطه از مجموع حاصل ضرب نسبت عرضه به تقاضا (R_j) در وزن انتخابی (G_{ij}) و $f(d)$ (تابع افت فاصله) عدد دسترسی مکانی (A_i) در موقعیت i محاسبه می‌گردد (Sternberg et al., 2012).

$$A_i = \sum R_j G_{ij} f(d) \quad \text{رابطه (۹)}$$

شبیه‌سازی مونت کارلو

در دنیای واقعی شعاع حوزه نفوذ ثابت نیست و بسته به موقعیت متقاضیان، عرضه‌کنندگان، شبکه حمل‌ونقل و ترجیحات متقاضیان تغییر می‌کند، که این امر موجب ایجاد عدم قطعیت در روش 3SFCA می‌شود. در واقع عدم قطعیت در محاسبه دسترسی توسط این روش به دلیل دشواری در تعیین دقیق مقدار شعاع حوزه نفوذ که وضعیت واقعی را منعکس کند به همراه وجود تنوع در توابع افت فاصله به وجود می‌آید. شبیه‌سازی مونت کارلو فرآیند تولید ورودی‌های تصادفی برای محاسبه خروجی‌های چندگانه و بررسی تأثیر پارامترهای غیرقطعی بر نتایج است (Barbu & Zhu, 2020; Chopin & Papaspiliopoulos, 2020).

در این پژوهش، ۱۰۰ شبیه‌سازی برای هر یک از چهار تابع افت فاصله انجام شد، شعاع حوزه نفوذ در هر تکرار به صورت تصادفی بین حداقل ۵ دقیقه تا حداکثر فاصله بلوک تا دورترین بیمارستان انتخاب شد. سپس برای هر بلوک،

میانگین و انحراف معیار محاسبه و ضریب تغییرات برای تعیین میزان عدم قطعیت و تولید نقشه‌های مرتبط استخراج گردید. این روش امکان بررسی طیف گسترده‌ای از شرایط ممکن و اثرات آن بر دسترسی به خدمات را فراهم می‌کند.

محاسبه شاخص ضریب تغییرات (CV)

برای هر بلوک، دسترسی محاسبه شده در ۱۰۰ شبیه‌سازی 3SFCA متفاوت است؛ بنابراین در این پژوهش ضریب تغییرات به‌عنوان شاخص استاندارد سنجش عدم قطعیت استفاده شد. ضریب تغییرات بالا نشان‌دهنده نوسانات بیشتر میزان دسترسی نسبت به میانگین و در نتیجه تأثیر بیشتر تغییر تابع افت فاصله و شعاع حوزه نفوذ است و با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$CV_i = (\sigma_{Ai} / \mu_{Ai}) * 100 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن μ_{Ai} و σ_{Ai} به ترتیب میانگین و انحراف معیار دسترسی بلوک i ام حاصل از ۱۰۰ شبیه‌سازی مونت‌کارلو هستند.

تحلیل Hot Spot

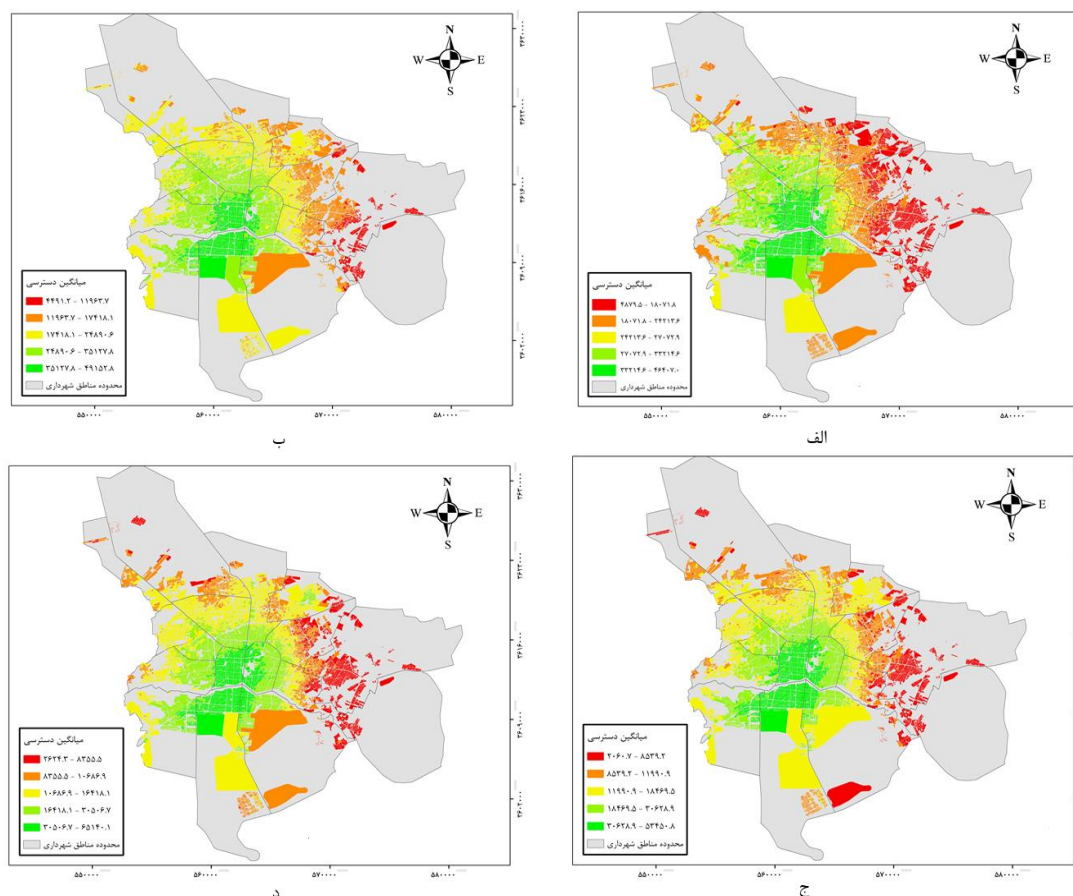
تحلیل Hot Spot یک روش آمار مکانی برای شناسایی نواحی با مقادیر بالا و پایین یک متغیر نسبت به همسایگان است. بر اساس این تحلیل، خوشه‌های مکانی داغ و سرد معنادار از نظر آماری شناسایی می‌شوند (Gettis & Ord, 1992). در این مطالعه، با استفاده از آماره G_i^* خوشه‌های مکانی با عدم قطعیت بالا و پایین در بلوک‌های شهری اصفهان شناسایی شدند. رابطه (۱۱) نحوه محاسبه آماره G_i^* برای بلوک i ام را نمایش می‌دهد.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که در آن وزن مکانی w_{ij} بر اساس معکوس فاصله Manhattan تعیین شده و متغیر x_j نشان‌دهنده مقدار عدم قطعیت در بلوک j است. $\bar{X}$ میانگین مقادیر متغیر x در کل منطقه و S مقدار انحراف استاندارد آن است. n نیز تعداد کل بلوک‌های شهری می‌باشد.

یافته‌ها

در پژوهش حاضر برای هر بلوک جمعیتی، دسترسی مکانی در ۱۰۰ شبیه‌سازی (بین ۵ دقیقه تا بیشترین فاصله زمانی بلوک تا دورترین بیمارستان) و بر اساس چهار تابع افت فاصله به روش SFCA^۳ محاسبه شد. سپس میانگین و انحراف معیار این مقادیر برای هر بلوک به‌دست‌آمده آمد. نقشه میانگین دسترسی مکانی به مراکز درمانی به ازای توابع افت فاصله در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵. نقشه میانگین دسترسی برای هر بلوک جمعیتی به ازای توابع افت فاصله، تابع کرنل (الف)، تابع تجمعی (ب)، تابع گوسی (ج) و تابع نمایی (د)

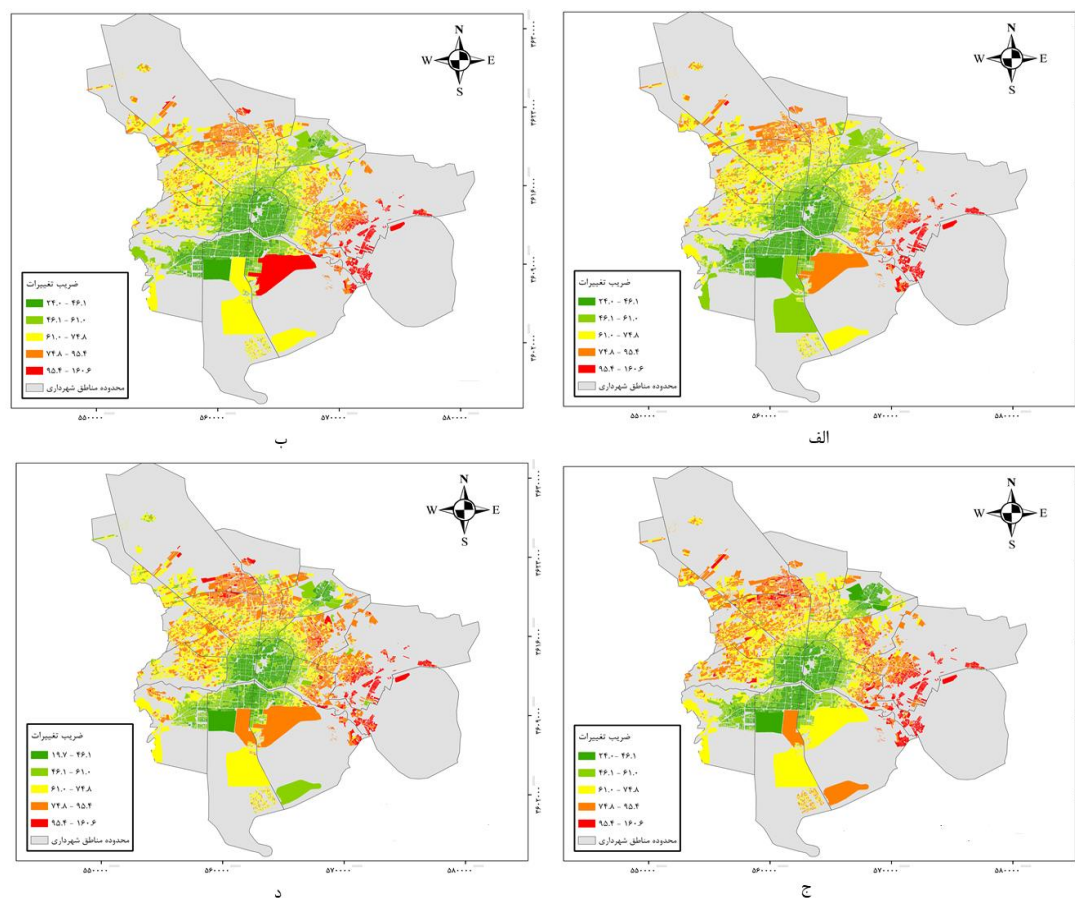
همچنین جدول (۱) میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات میزان دسترسی به ازای توابع مختلف افت فاصله را نشان می‌دهد.

جدول ۱. میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات میزان دسترسی به ازای توابع مختلف افت فاصله

ردیف	تابع افت فاصله	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
۱	کرنل	24886.2	15101.1	60.68
۲	تجمعی	23374.0	14629.2	62.58
۳	نمایی	16779.0	11285.9	67.26
۴	گوسی	17791.0	12377.2	69.57

در شکل (۶) نیز نقشه ضریب تغییرات دسترسی بلوک‌های جمعیتی به ازای توابع مختلف افت فاصله نمایش داده شده و در جدول (۲) ضریب همبستگی پیرسون^۱ میان متوسط دسترسی و عدم قطعیت به ازای توابع مختلف افت فاصله ارائه شده است.

1. Pearson Correlation Coefficient

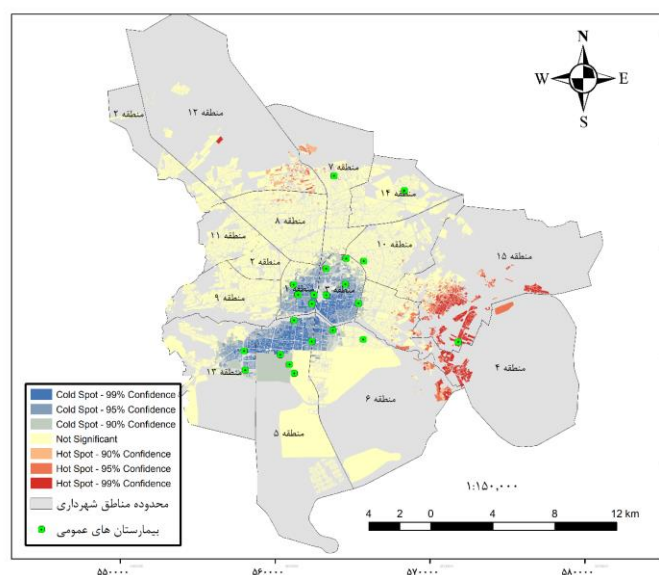


شکل ۶. نقشه عدم قطعیت مبتنی بر ضریب تغییرات دسترسی برای هر بلوک جمعیتی به ازای توابع مختلف افت فاصله، تابع کرنل (الف)، تابع تجمعی (ب)، تابع گوسی (ج) و تابع‌نمایی (د)

جدول ۲. ضریب همبستگی میان متوسط دسترسی و عدم قطعیت به ازای توابع مختلف افت فاصله

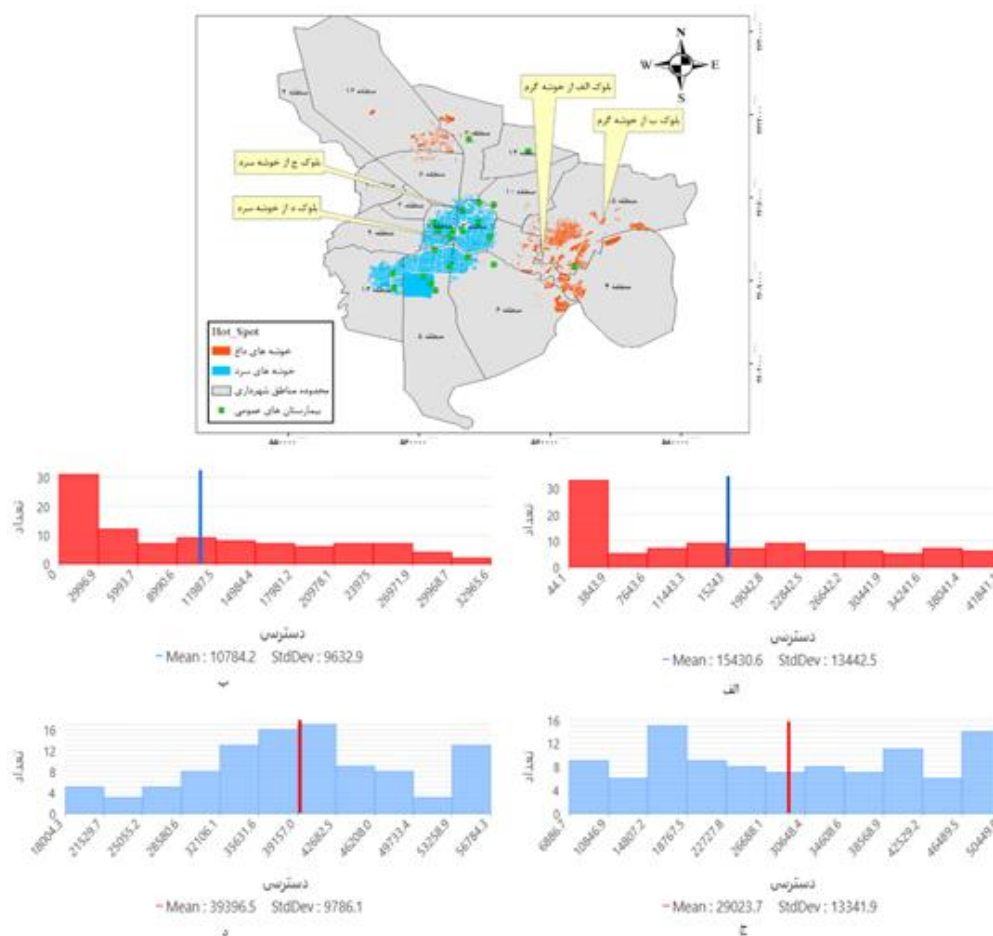
ردیف	تابع افت فاصله	ضریب همبستگی	p-value
۱	کرنل	-0.76	<0.01
۲	تجمعی	- 0.79	<0.01
۳	نمایی	-0.77	<0.01
۴	گوسی	-0.77	<0.01

در این پژوهش، بر پایه مقادیر ضریب تغییرات هر بلوک، نقشه خوشه‌های داغ و سرد جهت نمایش الگوی مکانی عدم قطعیت دسترسی در شهر اصفهان تهیه گردید. با توجه به اینکه تابع افت فاصله کرنل کمترین میزان عدم قطعیت را دارا بود، خروجی آن برای تحلیل Hot Spot انتخاب شد. شکل (۷) نقشه خوشه‌های با عدم قطعیت بالا و پایین (خوشه‌های داغ و سرد) را به همراه سطوح معنی‌داری مشخص شده (۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪) نشان می‌دهد، بلوک‌های Not Significant فاقد الگوی خوشه‌بندی معنی‌دار از نظر آماری هستند.



شکل ۷. نقشه خوشه‌های گرم و سرد عدم قطعیت مبتنی بر ضریب تغییرات دسترسی

شکل (۸) نیز توزیع فراوانی دسترسی در بلوک‌هایی از خوشه‌های داغ و سرد را نمایش می‌دهد.



شکل ۸. توزیع فراوانی مقادیر دسترسی بلوک‌های نمونه، بلوک الف از خوشه گرم (الف)، بلوک ب از خوشه گرم (ب)، بلوک ج از خوشه سرد (ج)، بلوک د از خوشه سرد (د)

بحث

نقشه میانگین دسترسی برای هر بلوک جمعیتی (شکل ۵) نشان می‌دهد که میانگین دسترسی در مناطق مرکزی اصفهان بالاتر و در حواشی شهر و مناطق شرقی پایین‌ترین است که این نتایج به میزان قابل‌توجهی با نتایج تحقیق غلامی و همکاران (۱۴۰۱) همخوانی دارد. همچنین تابع افت فاصله کرنل کمترین میزان دسترسی را در مناطق شرقی شهر نشان می‌دهد. نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد تابع افت فاصله کرنل با میانگین انحراف معیار 15101.1، میانگین دسترسی 24886.2 و میانگین ضریب تغییرات 60.68، کمترین عدم قطعیت را دارد و نسبت به تغییرات شعاع حوزه نفوذ پایدارتر است، درحالی‌که تابع افت فاصله گوسی بیشترین عدم قطعیت را نشان می‌دهد و تابع‌نمایی در رتبه بعدی قرار دارد. این در حالی است که در تحقیق (Chen & Jia, 2019)، ضریب تغییرات دسترسی محاسبه‌شده با روش 2SFCA و تابع‌نمایی، بیشترین اختلاف را با سایر توابع افت فاصله مشابه با تحقیق حاضر، دارا می‌باشد.

همچنین با توجه به شکل (۶) ضریب تغییرات کمتر در مناطق مرکزی و جنوب غربی اصفهان مشاهده می‌شود و مناطق نزدیک به حواشی شهر، به‌ویژه جنوب و شرق، دارای بیشترین نوسان در مقادیر دسترسی هستند. در توابع گوسی و نمایی، بخش‌های شمال و شمال غرب شهر نیز عدم قطعیت بیشتری دارند. ضرایب همبستگی در جدول (۲) نیز نشان داد بین میانگین دسترسی و عدم قطعیت، رابطه‌ای معکوس و معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد (با توجه به مقادیر p -value کمتر از ۰.۰۱) وجود دارد. به‌طورکلی با افزایش دسترسی، عدم قطعیت کاهش می‌یابد، بنابراین مناطق حاشیه‌ای شهر بیشترین عدم قطعیت را دارند. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود خوشه‌های با عدم قطعیت بالا (لکه‌های داغ) عمدتاً در شرق و جنوب شرق شهر اصفهان و در محدوده مناطق شهرداری ۴، ۶ و ۱۵ متمرکز هستند، این مناطق به دلیل کمبود بیمارستان و فاصله زیاد بلوک‌ها از مراکز درمانی، دسترسی پایین‌تری دارند. درحالی‌که خوشه‌های با عدم قطعیت پایین (لکه‌های سرد) در نواحی مرکزی و جنوب غربی شهر و در محدوده مناطق شهرداری ۱، ۳، ۵، ۶ و ۱۳ دیده می‌شوند. این مناطق از تراکم و سطح دسترسی بالا به بیمارستان‌ها برخوردارند.

با توجه به شکل (۸) در خوشه‌های داغ، هیستوگرام‌ها چولگی به سمت راست دارند (شکل ۸، الف و ب). علت افزایش ضریب تغییرات در این خوشه‌ها را می‌توان به وجود تعداد قابل‌توجهی از مقادیر پایین دسترسی نسبت داد که منجر به کاهش میانگین دسترسی و متعاقباً افزایش ضریب تغییرات شده است. این امر ناشی از فاصله زیاد بلوک‌ها تا بیمارستان‌ها و احتمال بالای عدم اضافه شدن مراکز جدید در شبیه‌سازی‌هاست، ضمن اینکه وجود مقادیر دسترسی بالا در تعدادی از شبیه‌سازی‌ها منجر به بالا رفتن انحراف معیار نیز شده است. در مقابل، در خوشه‌های سرد (شکل ۸، ج و د)، به دلیل تراکم بالای بیمارستان‌ها در مناطق مرکزی شهر، با افزایش شعاع دسترسی، حتی در شعاع‌های کم نیز مقدار دسترسی افزایش‌یافته و چولگی که در هیستوگرام خوشه‌های داغ مشاهده می‌گردد، در این خوشه‌ها وجود ندارد. لذا با توجه به کاهش واریانس، مقدار ضریب تغییرات نیز کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد این تفاوت در الگوی توزیع، نقش اصلی را در تفاوت سطح عدم قطعیت میان خوشه‌های داغ و سرد ایفا می‌کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با مدنظر قرار دادن نقش دسترسی مکانی به بیمارستان‌های عمومی شهر اصفهان در ارتقای سلامت و بهره‌گیری از روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو و 3SFCA، به ارزیابی عدم قطعیت در سنجش این دسترسی پرداخته است. نتایج حاصل از ۱۰۰ تکرار شبیه‌سازی، حاکی از آن است که تابع کرنل در مقایسه با سایر توابع افت فاصله، کمترین

میزان عدم قطعیت و بیشترین پایداری را در برآورد دسترسی مکانی به بیمارستان‌ها نشان می‌دهد. تحلیل‌های مکانی، از جمله تحلیل Hot Spot نیز نشان داد مناطق مرکزی شهر از بالاترین دسترسی برخوردارند، درحالی‌که حواشی شهر، به‌ویژه مناطق شرقی اصفهان، با کمترین میزان دسترسی و بیشترین عدم قطعیت مواجه هستند. نکته حائز اهمیت این مطالعه، اثبات رابطه معکوس و معنی‌دار بین سطح دسترسی مکانی و میزان عدم قطعیت آن است. به عبارت دیگر، مناطقی که در حال حاضر از دسترسی پایین‌تری برخوردارند، بیشترین نوسان و عدم قطعیت را تجربه می‌کنند. این یافته بر اهمیت توجه ویژه به این مناطق تأکید دارد، بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، تأثیر احداث بیمارستان‌های جدید در مناطق کم برخوردار بر کاهش سطح عدم قطعیت و بهبود دسترسی مکانی مورد ارزیابی قرار گیرد. این امر گامی اساسی در جهت دستیابی به توزیع عادلانه‌تر خدمات درمانی و ارتقای سلامت عمومی شهروندان خواهد بود.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

حسن آتشگاهی: سامان‌دهی داده‌ها، مصورسازی، تدوین روش‌شناسی و اجرای پژوهش، نگارش پیش‌نویس اولیه. بابک میرباقری: تدوین روش‌شناسی، بازبینی و ویرایش مقاله، نظارت علمی و اعتبارسنجی. علیرضا شکبیا: تدوین روش‌شناسی، بازبینی و ویرایش مقاله، نظارت علمی و اعتبارسنجی. علی‌اکبر متکان: تدوین روش‌شناسی، بازبینی و ویرایش مقاله، نظارت علمی و اعتبارسنجی.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رسانده‌اند، به‌ویژه افرادی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام داده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- صابریان، جواد و منصوری، علی. (۱۳۸۸). تعیین عدم قطعیت حاصل از داده ورودی در خروجی آنالیزهای مسیریابی. *سنجش‌ازدور و جی‌آی‌اس/ایران*، ۱(۲)، ۶۳-۷۶.
- صادقی نیارکی، ابوالقاسم؛ ربیع‌پور، علی و قدوسی، مصطفی. (۱۴۰۱). ارزیابی دسترسی به کاربری‌های کلیدی بر اساس حالت سفر. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۲۶(۴)، ۱۱۳-۱۳۸. doi: 10.2022/hsm.sp.26.4.5
- غلامی، انصار؛ میرباقری، بابک؛ متکان، علی‌اکبر و شکبیا، علیرضا. (۱۴۰۲). تعیین قابلیت دسترسی به مراکز درمانی در شهر اصفهان با استفاده از روش 2SFCA. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۴(۱)، ۷۷-۹۸. doi: 10.22108/gep.2022.133178.1511
- قربانی، محمدجواد. (۱۴۰۱). *سنجش میزان دسترسی به پارک‌های شهری با استفاده از روش 3SFCA (مطالعه موردی: جنوب غرب کلان‌شهر تهران)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و GIS، به راهنمایی بابک میرباقری و علیرضا شکبیا، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- ندیران، نرمین؛ حسینی، فرهاد و قنبران، عبدالحمید. (۱۴۰۱). تحلیل تغییرات دسترسی به خدمات بیمارستانی شهر زنجان با استفاده از روش اندازه‌گیری دسترسی مکانی بالقوه در فاصله زمانی. *پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۱۰(۲)، ۲۰۵-۲۰۵.

doi:10.22059/jurbangeo.2022.331964.1593.۲۲۷

نیک افراز، حبیب‌الله؛ افشاری، کبری؛ ترکی هرچگانی، صدیقه؛ آزاده، شایان؛ قلیلی، نسیم؛ حق‌شناس، لیلا و مهرابی کوشکی، علی. (۱۳۹۸). *سالنامه آماری ۱۳۹۸*. دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی اصفهان.

References

- Bauer, J., & Groneberg, D. A. (2016). Measuring Spatial Accessibility of Health Care Providers – Introduction of a Variable Distance Decay Function within the Floating Catchment Area (FCA) Method. *PloS ONE*, 11(7): e0159148. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159148>.
- Barbu, A., & Zhu, S. C. (2020). Introduction to Monte Carlo methods. In *Monte Carlo Methods* (pp. 1-17). Springer. doi.org/10.1007/978-981-13-2971-5.
- Chen, X., & Jia, P. (2019). A Comparative Analysis of Accessibility Measures by the Two-Step Floating Catchment Area (2SFCA) method. *International Journal of Geographical Information Science*. 33(9), 1739–1758. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1591415>.
- Chopin, N., & Papaspiliopoulos, O. (2020). An Introduction to Sequential Monte Carlo. *Springer Series in Statistics*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47845-2>.
- Foody, G. M., & Atkinson, P. M. (2002). Uncertainty in Remote Sensing and GIS. *John Wiley & Sons*.
- Guagliardo, M. F. (2004). Spatial Accessibility of Primary Care: Concepts, methods and challenges. *International Journal of Health Geographics*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/1476-072X-3-3>
- Getis, A., & Ord, 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>
- Huulin, L., Qi, Y., Yan, Y., & Qingping, Z. (2023). Using an Improved 3SFCA Method to Assess Inequities Associated with Multimodal Accessibility to Green Spaces Based on Mismatches between Supply and Demand in the Metropolitan of Shanghai, China. *Sustainable Cities and Society*. 91, 104456. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104456>.
- Linggui, L., Han, L., Yi, Z., & Dian, Z. (2022). An Improved Two-Step Floating Catchment Area (2SFCA) Method for Measuring Spatial Accessibility to Elderly Care Facilities in Xi'an, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(18), 11465. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811465>.
- Luo, W., & Qi, Y. (2009). An Enhanced Two-Step Floating Catchment Area (E2SFCA) Method for Measuring Spatial Accessibility to Primary Care Physicians. *Health & Place*, 15(4), 1100-1107. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2009.06.002>.
- Luo, W., & Whippo, T. (2012). Variable Catchment Sizes for the Two-Step Floating Catchment Area (2SFCA) Method. *Health & Place*, 18(4), 789-795. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2012.04.002>.
- Jinwoo, P., & Goldberg, D. W. (2022). An Examination of the Stochastic Distribution of Spatial Accessibility to Intensive Care Unit Beds during the COVID-19 Pandemic: A Case Study of the Greater Houston Area of Texas. *geographical analysis*. 55(3), 384-398. <https://doi.org/10.1111/gean.12340>.
- Jing, L., Guangping, C., Chang, L., Bingyan, X., Xuan, S., & Siyun, C. (2018). Use of an E2SFCA Method to Measure and Analyse Spatial Accessibility to Medical Services for Elderly People in Wuhan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15(7), 1503. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071503>.
- Korporaal, M., Ruginski, I. T., & Fabrikant, S. I. (2020). Effects of uncertainty visualization on map-based decision making under time pressure. *Frontiers in Computer Science*, 2, 32. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2020.00032>.
- Ricketts, T. C., Goldsmith, L. J., Holmes, G. M., Randolph, R. M., Lee, R., Taylor, D. H., & Ostermann, J. (2007). Designating Places and Populations as Medically Underserved: A proposal for a New Approach. *Journal of Health Care for the Poor and Underserved*, 18(3), 567–589. <https://doi.org/10.1353/hpu.2007.0065>
- Rowe, W. D. (1994). Understanding Uncertainty. *Risk Analysis*, 14(5), 743–750. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1994.tb00284.x>

- Sternberg, T., Zou, B., & Wan, N. (2012). A Three-Step Floating Catchment Area Method for Analyzing Spatial Access to Health Services. *International Journal of Geographical Information Science*. 26(6), 1073-1089. <https://doi.org/10.1080/13658816.2011.624987>.
- Subal, J., Paal, P., & Krisp, J. M. (2021). Quantifying Spatial Accessibility of General Practitioners by Applying a Modified Huff Three-Step Floating Catchment Area (MH3SFCA) Method. *International Journal of Health Geographics*. 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12942-021-00263-3>.
- Yang, D., H, Goerge, R., & Mullner, R. (2006). Comparing GIS-Based Methods of Measuring Spatial Accessibility to Health Services. *Journal of medical systems*, 30(1), 23–32. <https://doi.org/10.1007/s10916-006-7400-5>.
- Gholami, A., Mirbagheri, B., Matkan, A., & Shakiba, A. (2023). Measuring Accessibility to Medical Centers in Isfahan City Using 2SFCA Method. *Geography and Environmental Planning*, 34(1), 77–98. [doi:10.22108/gep.2022.133178.1511](https://doi.org/10.22108/gep.2022.133178.1511). [In persian]
- Ghorbani, M. J. (2022). Measuring Accessibility to Urban Parks Using 3SFCA Method (Case Study: Southwest of Tehran metropolis). MSc Thesis In Remote Sensing and Geographic Information Systems. Supervisors: Babak Mirbagheri and Alireza Shakiba, Center for Remote Sensing and GIS Research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. [In Persian]
- Nadiran, N., Hoseinali, F., & Ghanbaran, A. (2022). Analyzing the Variations of Accessibility to the Hospital Services in Zanjan City Using the Method of Measuring Potential Spatial Accessibility in Period of 2006-2016. *Journal of Urban Planning Geography Research*, 10(2), 205–227. [doi:10.22059/jurbangeo.2022.331964.1593](https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2022.331964.1593). [In Persian]
- Nikafraz, H., Afshari, K., Torki Herchegani, S., Azadeh, Sh., Ghalili, N., Haqshenas, L., & Mehrabi Koushki, A. (2019). Statistical yearbook 2019. *Isfahan University of Medical Sciences and Health Services*. [In Persian]
- Saberian, J., & Mansouri, A. (2009). Determination of the Uncertainty Derived from Input Data in Path Finding Analysis Output. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 1(2), 63–76. [In Persian]
- Sadeghi Niyarki, A., Rabiepour, A., & Ghodousi, M. (2022). Evaluating Accessibility to Key Land uses Based on Travel Mode. *The Journal of Spatial Planning*, 26(4), 113–138. [doi: 10.2022/hsmssp.26.4.5](https://doi.org/10.2022/hsmssp.26.4.5). [In Persian]