



Spatial Analysis and Macro-Zoning for Optimal Wastewater Treatment Plant Siting in GIS (Case Study: Isfahan)

Yasaman Forouzandeh Shahraki¹ , Ali Dehnavi² , Ramtin Moeini^{3*}

1. PhD. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

3. Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran (Corresponding Author) r.moeini@eng.ui.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.578789.3545>

Original Paper

Abstract

Nowadays, water management through the use of non-conventional water resources has gained attention as a means of reducing pressure on local natural water resources. One of the most widely used non-conventional water resources is treated wastewater, or effluent, which has been the subject of numerous studies, and whose benefits are recognized worldwide. In the process of effluent utilization, the location of the wastewater treatment plant is of great importance. To determine the most suitable sites for WWTP construction, large-scale zoning of suitable and restricted areas based on various effective criteria is essential. In this study, after examining the criteria required for zoning, suitable and restricted areas for WWTP construction in Isfahan were identified by defining the most important siting criteria in GIS software. For this purpose, nine constraint criteria were used, including slope, rivers, the 25-year floodplain, faults, power transmission lines, transportation networks, protected areas, urban and rural residential areas, and population centers. The results showed that 612.90 km² (39.13%) of the total study area was suitable for WWTP construction, whereas 953.55 km² (60.89%) was restricted. The results also indicated the significant influence of population centers and urban and rural residential areas on the spatial suitability pattern. The highest percentages of restricted land were associated with population density (45.67%), urban areas (34.65%), and population centers (29.09%). In contrast, the lowest shares of restricted land were associated with minor roads (0.25%), protected areas (0.65%), and power transmission lines (0.91%). The final spatial suitability map showed that one of the existing WWTPs is located within a restricted area.

Keywords:

Macro-Zoning,
Location Criteria,
Wastewater Treatment
Plant, GIS, Boolean
Logic.



Received: July 23, 2025
Revised: Sep. 15, 2025
Accepted: Oct. 15, 2025

To cite this article:

Forouzandeh Shahraki, Y., Dehnavi, A., Moeini, R., 2026. Spatial analysis and macro-zoning for optimal wastewater treatment plant siting in GIS (case study: Isfahan). *Water and Wastewater*, 36(5), 43-63. <https://doi.org/10.22093/wwj.2026.578789.3545>.

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

Nowadays, sustainable water management and the utilization of unconventional water resources, particularly treated wastewater, have become essential strategies to mitigate water scarcity (Buonocore et al., 2018). Identifying the optimal location for wastewater treatment plants¹ is a critical step in maximizing the efficiency of effluent reuse and minimizing environmental, social, and economic costs. Proper siting requires a comprehensive evaluation of various spatial criteria to separate suitable (feasible) areas from unsuitable (restricted) zones. Despite the importance of WWTP siting, the rapid expansion of urban areas and population growth frequently lead to spatial conflicts between residential zones and existing facilities.

Many studies for WWTP siting used different criteria such as slope, distance from river, faults, power transmission lines, protected areas, transport network, urban areas, population density (Neshastegar et al., 2011; Falah et al., 2013; Mansouri et al., 2013; Ghalenoei, 2023; Awawdeh et al., 2024; Thangarasu et al., 2025).

In the current research, given that zoning for treatment plant construction is highly region-specific, nine main influential criteria were identified. By employing the map overlay method in GIS software, feasible and restricted zones for establishing WWTPs in Isfahan-a major metropolis in the country-were determined. Then, the locations of existing WWTPs within these zones were evaluated. The resulting zones can be utilized in future studies to pinpoint optimized locations. Notably, unlike some previous studies, the present research incorporates most of the necessary criteria for WWTP siting into the zoning process, based on the framework outlined in Publication No. 129-3.

2. Methodology

In this research, land suitability analysis was conducted using GIS software based on the Boolean method. Boolean logic is a widely used technique for determining feasible and restricted areas in the site selection process of infrastructure facilities (Cheng and Thompson, 2016). It operates on binary logic, meaning each spatial layer is divided into two categories: feasible (value 1) and restricted (value 0) based on predefined criteria.

Nine spatial criteria were selected for the macro-zoning of WWTPs: 1) point elevation network (slope), 2) rivers, 3) 25-year flood zones, 4) faults, 5) power transmission lines, 6)

transportation networks, 7) protected areas, 8) urban and rural residential areas, and 9) population density or land use. Spatial data layers were collected from relevant organizations and processed in GIS in vector or raster formats.

Since a direct slope layer was unavailable, it was generated using the region's point elevation network. Buffer zones were established for each restriction criterion based on Iranian standards and previous studies. For instance, buffers for rivers, protected areas, urban residential areas, and population centers were set at 500, 1000, 2500, and 1500 meters, respectively. Buffers for freeways, main roads, and secondary roads were defined as 76, 45, and 35 meters, while power transmission lines had a 50-meter buffer. All input layers were transformed into raster formats and reclassified using the "Reclassify" tool in GIS based on the defined allowable limits. Finally, the reclassified layers were combined using the "AND" logical operator in the Raster Calculator. In this process, only cells with a value of 1 in all layers remained as suitable areas.

3. Discussion and results

By applying the acceptable buffer zones for each criterion in GIS, the suitable and restricted areas for constructing a WWTP were determined. Based on the calculations performed on the classified raster layers, the total study area encompasses approximately 1566 km², the restricted area comprises 953.55 km² (60.89%), while the suitable area covers only 612.90 km² (39.13%). The suitable and restricted area were presented in Fig. 1. The significant percentage of unsuitable areas indicates that a large portion of the land lacks the necessary conditions for WWTP

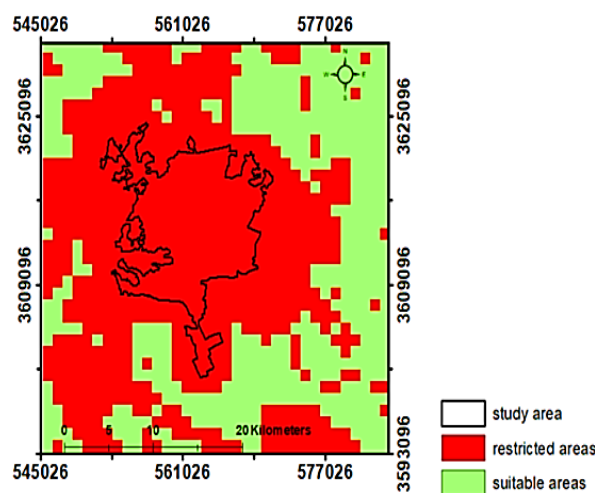


Fig. 1. Final suitability map from the Boolean overlay method

¹ Wastewater Treatment Plants (WWTPs)



establishment due to spatial constraints and was thus eliminated in the initial zoning stage. Analyzing the impact of various criteria demonstrated that freeways, main and secondary roads, faults, power transmission lines, and protected areas created a very high percentage of spatial suitability. Over 98.5% of the lands affected by these criteria fell into the suitable category. Conversely, population-related criteria imposed the highest level of restriction on the region. Limitations associated with population density (45.67%), urban residential areas (34.65%), and population centers (29.09%) played the most significant role in reducing spatial suitability. Other criteria, such as secondary roads (0.25%), protected areas (0.65%), and power transmission lines (0.91%), had a much smaller share in creating restrictions.

Furthermore, overlaying the current locations of existing WWTPs on the spatial suitability map revealed that the South Isfahan WWTP is currently located in an unsuitable zone based on the siting criteria and allowed buffers defined in this study. Two other existing WWTPs are currently on the border of suitable and unsuitable zones, which may soon fall into the unsuitable area due to the rapid expansion of settlements.

4. Conclusions

Land suitability analysis using GIS software and the Boolean method, as one of the most common site selection approaches, was conducted to delineate suitable zones for WWTP construction in Isfahan. The Boolean method applies binary classification to raster layers, converting each layer based on predefined criteria into two categories, where unsuitable areas are coded as zero and suitable areas as one. Finally, all spatial layers were combined using the Boolean AND operator and different buffer zones to produce the final suitability map. This map classifies the study area into two categories, suitable and unsuitable, and identifies candidate locations within the suitable class.

In this approach, the correct selection of parameters and criteria influencing WWTP siting plays a decisive role in reducing spatial conflicts and environmental impacts. These criteria should be defined based on the study objectives, scale, required level of accuracy, local conditions, the degree of influence of each factor, and the

adequacy and availability of data. Neglecting any of these factors can lead to serious and irreversible damage to a city. Key criteria include land use, topography, geology, distance from residential areas, and accessibility to transportation networks, which are commonly considered as major factors in most studies.

In this study, spatial data layers including rivers, faults, the 25-year flood zoning, road networks, urban and rural residential areas, population centers, power transmission lines, protected areas, and digital elevation data were analyzed to identify permissible locations for WWTP construction. All selected criteria were implemented in GIS as constraint layers. The results showed that out of the total study area of 1,566 km² around Isfahan, 39.13% (approximately 612.90 km²) is suitable and 60.89% (approximately 953.55 km²) is unsuitable. The analysis of criteria influence revealed that population-related constraints, particularly urban and rural residential areas and population centers, had the greatest impact on reducing spatial suitability, while other factors such as minor roads, protected areas, power transmission lines, major roads, highways, and faults had a smaller contribution.

Furthermore, the evaluation of existing WWTP locations showed that one facility (South Isfahan WWTP) is located within unsuitable zones, while other plants are situated at the boundary between suitable and unsuitable areas. This situation is associated with negative environmental impacts, including odor emissions and spatial incompatibility with surrounding settlements. These findings highlight the need to revise siting policies, improve buffer zone management, and utilize GIS-based tools for sustainable urban wastewater infrastructure planning in Isfahan. The identified suitable zones can serve as a basis for future studies aimed at optimizing centralized and decentralized WWTP locations, considering construction costs, treatment processes, raw wastewater transfer costs, and treated effluent reuse options. Additionally, it is recommended that future research apply fuzzy logic and multi-criteria decision-making approaches to provide a more detailed evaluation and ranking of suitable areas, enabling continuous modeling of spatial potential variations across buffer distances.





پهنه‌بندی و تحلیل مکانی به‌عنوان پیش‌نیاز مکان‌یابی بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب در GIS (مطالعه موردی: اصفهان)

یاسمن فروزنده شهرکی^۱، علی دهنوی^۲، رامتین معینی^{۳*}

۱- دانشجوی دکترای مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) r.moeini@eng.ui.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.578789.3545>

مقاله پژوهشی

چکیده

واژه‌های کلیدی:
پهنه‌بندی، معیارهای
مکان‌یابی، تصفیه‌خانه
فاضلاب، نرم‌افزار GIS،
بولین



دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱

اصلاح: ۱۴۰۴/۷/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۳

امروزه مدیریت آب با استفاده از منابع آب غیرمتعارف برای کاهش فشار بر منابع آب طبیعی محلی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از گسترده‌ترین منابع آب غیرمتعارف، فاضلاب تصفیه شده یا پساب است که موضوع تحقیقاتی مختلفی بوده و مزایای آن به‌طور جهانی شناخته شده است. در فرایند استفاده از پساب، محل احداث تصفیه‌خانه فاضلاب اهمیت فراوانی دارد. برای تعیین مکان‌های بهینه برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب، پهنه‌بندی کلان مناطق مجاز و غیرمجاز بر اساس معیارهای مختلف مؤثر اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش ضمن بررسی معیارهای لازم در پهنه‌بندی، نواحی مجاز و غیرمجاز برای ساخت تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر اصفهان با تعریف مهم‌ترین معیارهای مکان‌یابی در نرم‌افزار GIS تعیین شد. برای این هدف از ۹ معیار محدودیت شامل وضعیت توپوگرافی، رودخانه‌ها، پهنه‌بندی سیل ۲۵ ساله، گسل‌ها، خطوط انتقال نیرو، شبکه حمل‌ونقل، مناطق حفاظت شده، مناطق مسکونی شهری و روستایی و نقاط جمعیتی استفاده شد. نتایج نشان داد که از کل مساحت منطقه مورد مطالعه، حدود ۶۱۲/۹۰ کیلومتر مربع (۳۹/۱۳ درصد) برای ساخت تصفیه‌خانه فاضلاب مناسب و ۹۵۳/۵۵ کیلومتر مربع (۶۰/۸۹ درصد) نامناسب است. همچنین نتایج بیانگر تأثیر قابل توجه محدودیت‌های نقاط جمعیتی و مناطق مسکونی شهری و روستایی بر الگوی تناسب مکانی بود. بیشترین درصد اراضی نامناسب مربوط به تراکم جمعیت (۴۵/۶۷ درصد)، مناطق شهری (۳۴/۶۵ درصد) و مراکز جمعیتی (۲۹/۰۹ درصد) است. در مقابل، کمترین سهم اراضی نامناسب مربوط به راه‌های فرعی (۰/۲۵ درصد) مناطق حفاظت شده (۰/۶۵ درصد) و سپس خطوط انتقال نیرو (۰/۹۱ درصد) است. بر اساس نتایج پهنه‌بندی، مکان فعلی یکی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود در پهنه غیرمجاز قرار گرفته است.

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

فروزنده شهرکی، ی.، دهنوی، ع.، معینی، ر.، ۱۴۰۴، پهنه‌بندی و تحلیل مکانی به‌عنوان پیش‌نیاز مکان‌یابی بهینه

تصفیه‌خانه فاضلاب در GIS (مطالعه موردی: اصفهان). آب و فاضلاب. ۳۶ (۵)، ۴۳-۶۳.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.578789.3545>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

بررسی شرایط هیدرولوژیکی و منابع آب طی سال‌های اخیر، نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب و رو به بحران در این منابع است. از عوامل تأثیرگذار در این پدیده، قطعاً استفاده بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی است. بررسی روند مصرف آب در سال‌های گذشته و پیش‌بینی‌های انجام شده از نیاز آبی در سال‌های آینده، چشم‌انداز نامطلوبی از عدم تناسب بین تقاضا و منابع آب کشور در آینده نزدیک ترسیم می‌کند (Mahzoun, 2021, Asadi et al., 2022).

به‌منظور حفظ منابع آب برای آینده و نیز حفظ محیط‌زیست، اصلاح الگوی مصرف و تغییر کاربری‌های پرمصرف به کم‌مصرف باید در اولویت قرار گیرد. در کنار موارد مطرح شده، برنامه‌ریزی برای شناسایی و استفاده از منابع آبی نامتعارف جدید، مانند استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده شهری و روستایی و آب خاکستری که تا حدی به تعدیل کمبود آب کمک خواهد کرد نیز می‌تواند مورد توجه باشد (Buonocore et al., 2018, Fahad et al., 2019, Hussain et al., 2019, Batisha, 2020, Ungureanu et al., 2020, Chen et al., 2021).

مدیریت فاضلاب در شهرها مخصوصاً شهرهای بزرگ، مسائل و هزینه‌های زیادی را در پی دارد. برای مثال می‌توان به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مدیریت غیر صحیح فاضلاب (از جمله رهاسازی مواد آلوده در محیط‌زیست، آلودگی منابع آبی و آلودگی هوا)، هزینه‌های زیاد طراحی و اجرای شبکه و خط انتقال فاضلاب، هزینه‌های ساخت و راهبردی تصفیه‌خانه که اهمیت ویژه‌ای دارند، اشاره کرد. در این راستا یکی از مراحل اصلی در مدیریت نهایی فاضلاب خام، تعیین مکان مناسب تصفیه‌خانه فاضلاب با هدف تصفیه و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی آن است که اهمیت زیادی دارد (Ruiz-Rosa et al., 2016, Chen et al., 2018, Rezaei et al., 2019, Akbarzadeh et al., 2023).

برای تعیین مکان‌های بهینه برای ساخت تصفیه‌خانه با روش‌های بهینه‌سازی، نیاز به پهنه‌بندی کلان مناطق مجاز و غیرمجاز در منطقه مورد مطالعه است. سازمان برنامه و بودجه طی نشریه شماره ۳-۱۲۹، معیارهای اصلی مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری را به شرح ۱۲ عامل بیان کرده که در جدول ۱ درج شده است (Plan and Budget Organization of Iran, 2024).

معیارهای ارائه شده در این نشریه، اساس انتخاب محل ساخت تصفیه‌خانه فاضلاب در ایران است که می‌تواند برای پهنه‌بندی محدوده طرح با هدف شناسایی مناطق مجاز از مناطق غیرمجاز استفاده شود. این معیارها تفاوت چندانی نیز با معیارهای به‌کاررفته در مطالعات مختلف ملی و بین‌المللی ندارند. در ادامه، معیارهای مختلف استفاده شده برای مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متمرکز و غیرمتمرکز توسط مراجع مختلف بررسی و ارائه شده که مهم‌ترین آن‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است.

در زمینه تحقیقات ملی، نشاسته‌گر و همکاران با تلفیق GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب غیرمتمرکز در تهران را انجام دادند. در این پژوهش بر نقش تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز در کاهش هزینه‌های انتقال فاضلاب تأکید شد (Neshastegar et al., 2011).

منصوری و همکاران نیز با استفاده از GIS، تحلیل سلسله مراتبی^۱ و روش شباهت به‌گزینه ایده‌آل با استفاده از تکنیک TOPSIS^۲، پهنه‌های مناسب احداث تصفیه‌خانه فاضلاب در شهرستان فلاورجان را شناسایی و رتبه‌بندی کردند (Mansouri et al., 2013).

فلاح و همکاران با بررسی معیارهای مؤثر بر مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در جزیره قشم، اهمیت معیارهای توپوگرافی، اختلاف ارتفاع و کاربری اراضی را نشان دادند (Falah et al., 2013).

همچنین صداقتی و طالب‌خواه با ارزیابی مکان تصفیه‌خانه فاضلاب شهر بجنورد، وضعیت توپوگرافی و اختلاف ارتفاع نسبت به شهر را از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب معرفی کردند (Sedaghati and Talebkah, 2018).

شاهمرادی و پورامرایی نیز با استفاده از مدل تناسب اراضی، پهنه‌های مناسب احداث تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر کوه‌دشت را تعیین کرده و معیارهای توپوگرافی، نوع شبکه جمع‌آوری فاضلاب و مسائل اجتماعی را از معیارهای اصلی مکان‌یابی دانستند (Shahmoradi and Pouramraei, 2021).

¹ Analytic Hierarchy Process (AHP)

² Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)



جدول ۱- معیارهای به کار رفته در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در مطالعات مختلف

Table 1. Criteria used for wastewater treatment plant siting in various studies

Number	References	Criteria
	(Plan and Budget Organization of Iran, 2024) (Falah et al., 2013) (Mansouri et al., 2013) (Neshastegar et al., 2011) (Shahmoradi and Pourmraei, 2021) (Sedaghati and Talebkah, 2018) (Zhao et al., 2009) (Deepa and Krishnaveni, 2012) (Anagnostopoulos and Vavatsikos, 2012) (Seker and Yucel, 2017) (Hama et al., 2019) (Nigusse et al., 2020) (Liu et al., 2022) (Awawdeh et al., 2024) (Thangarasu et al., 2025)	
1	Land use	* * * * *
2	Topography condition	* * * * *
3	Buffer distance from residential areas (urban and rural)	* * * * *
4	Geology (rock and soil characteristics)	* * * * *
5	Transportation network	* * * * *
6	Elevation difference relative to the city	* * * * *
7	Vegetation cover	* * * * *
8	River buffer zone	* * * * *
9	Groundwater buffer zone	* * * * *
10	Buffer distance from wells and qanats	* * * * *
11	Protected areas buffer zone	* * * * *
12	Population density	* * * * *
13	Buffer distance from power transmission lines	* * * * *
14	Wastewater reuse	* * * * *
15	Wind direction	* * * * *
16	Fault buffer zone	* * * * *
17	Seasonal stream (wadi) buffer zone	* * * * *
18	Flood protection	* * * * *
19	Distance from existing wastewater treatment plants	* * * * *
20	Type of treatment process	* * * * *
21	Distance from main sewer network pipelines	* * * * *
22	Elevation relative to sewer network outlet	* * * * *
23	Ecological factors	* * * * *
24	Land cost, construction cost, and land accessibility	* * * * *
25	Receiving waters	* * * * *
26	Social factors	* * * * *
27	Water resources	* * * * *
28	Construction of residual sludge conveyance network	* * * * *



نیگوس و همکاران در پژوهشی با هدف مدیریت پایدار فاضلاب شهر مکه در اتیوپی^۴ آفریقا، معیارهای آب‌های زیرزمینی، ارتفاع، هیدروژئولوژی و وضعیت توپوگرافی را تأثیرگذارترین عوامل در انتخاب محل احداث حوضچه‌های تثبیت معرفی کردند (Nigusse et al., 2020).

لیو و همکاران، یک مدل چند معیاره با ترکیب GIS، سنجش از دور و روش AHP در استان جیلین^۵ در چین توسعه دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که در بین معیارهای مکان‌یابی شاخص‌های فاصله از جاده، وضعیت توپوگرافی زمین و جهت باد غالب در مقایسه با پوشش شبکه، تأثیر کمی بر انتخاب مکان داشته است (Liu et al., 2022).

آواده و همکاران با انجام پهنبندی در شهرستان بنی‌کنانه^۶ در اردن، عوامل ارتفاع، وضعیت توپوگرافی و عمق آب زیرزمینی را مهم‌ترین معیارهای مؤثر در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب معرفی کردند (Awawdeh et al., 2024).

تی‌تانگراسو و همکاران با ترکیب یادگیری ماشین، سنجش از دور و GIS، مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب را برای کومباتور جنوبی^۷ در هند انجام دادند. بر اساس نتایج، مناطق دارای ارتفاع کم، توپوگرافی ملایم و زمین کافی به عنوان مناسب‌ترین پهنه‌های احداث تصفیه‌خانه فاضلاب تعیین شدند (Thangarasu et al., 2025).

در مجموع معیارهای بررسی شده در پژوهش‌ها در حوزه پهنبندی و مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب و متناسب با شرایط خاص هر منطقه بیانگر آن است که به طور کلی برخی از معیارها از جمله کاربری اراضی، وضعیت توپوگرافی، زمین‌شناسی، فاصله از مناطق مسکونی و شبکه حمل‌ونقل برای مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب ضروری بوده و در اکثر پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. ولی، برخی از معیارها متناسب و با توجه به شرایط پژوهش و مطالعه موردی اهمیت کمتری دارند و در نتیجه، در تصمیم‌گیری از بررسی این معیارها صرف‌نظر شده است. برای نمونه، مناطقی که رودخانه وجود ندارد، معیار حریم از رودخانه مفهوم و کاربردی

قلعه‌نوئی به بررسی عوامل مؤثر در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در مشهد پرداخت و معیارهای زیست‌محیطی، زمین‌شناسی، هواشناسی و اقتصادی را به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها معرفی کرد (Ghalenoei, 2023).

تابش و همکاران با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، تأثیر پارامترهای کیفی و محیطی مؤثر را در جانمایی شبکه جمع‌آوری فاضلاب بررسی و ارزیابی کردند که این معیارها در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب نیز اثر دارند (Tabesh et al., 2025).

در زمینه تحقیقات بین‌المللی، ژائو و همکاران با استفاده از GIS و روش ارزیابی سازگاری با محیط‌زیست^۱، مکان بهینه تصفیه‌خانه‌ها و خروجی‌های فاضلاب را بر اساس معیارهای اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی در چین تعیین کردند (Zhao et al., 2009).

دیپا و کریشناونی نیز با بهره‌گیری از GIS، پهنه‌های مناسب احداث تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز فاضلاب را در هند شناسایی و رتبه‌بندی کردند (Deepa and Krishnaveni, 2012).

آناگنوستوپولوس و واواتسیکوس، یک رویکرد تحلیل سلسله مراتبی فازی مکانی^۲ را به‌منظور رتبه‌بندی مکان‌های کاندید برای اجرای سیستم‌های طبیعی تصفیه فاضلاب در شمال شرقی یونان ارائه کردند (Anagnostopoulos and Vavatsikos, 2012).

سکر و یوسل با تلفیق GIS و AHP، مکان‌های مناسب احداث تصفیه‌خانه فاضلاب شهری را در ساریوگلان^۳ در ترکیه رتبه‌بندی کردند. معیارهای ارتفاع، فاصله تا منطقه شهری، تغییر مالکیت زمین و نزدیکی به شبکه حمل‌ونقل به عنوان مهم‌ترین عوامل در مکان‌یابی معرفی شدند (Seker and Yucel, 2017).

حاما و همکاران با بهره‌گیری از GIS و روش AHP، مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز فاضلاب را با هدف آبیاری فضای سبز در شهر سلیمانیه عراق انجام دادند. نتایج نشان داد که در میان معیارهای مؤثر، مساحت بیشترین و وضعیت توپوگرافی کمترین وزن را به خود اختصاص داده است (Hama et al., 2019).

¹ Eco-Suitability Evaluation

² Spatial Fuzzy Analytic Hierarchy Process (SFAHP)

³ Sarioglan

⁴ Mekelle in Ethiopia

⁵ Jilin

⁶ Bani Kinanah District (BKD) of Jordan

⁷ Coimbatore South



تعیین شده در پهنه شدنی می‌تواند در مطالعات بعدی برای تعیین مکان‌های پهنه احداث تصفیه‌خانه فاضلاب استفاده شود. به بیان دقیق‌تر پهنه مجاز حاصل از این پژوهش، یک ساختار داده‌ای مینا را ایجاد می‌کند. از این رو، خروجی این پژوهش می‌تواند مستقیماً به عنوان ماتریس ورودی و فضای جستجوی اولیه در مدل‌های جامع بهینه‌سازی آینده برای تعیین دقیق مکان‌های پهنه استفاده شود.

۲- روش کار

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

شهر اصفهان (سومین شهر بزرگ ایران، بعد از تهران و مشهد) و زمین‌های اطراف آن به عنوان محدوده مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب شد. شهر اصفهان یکی از شهرهای استان اصفهان در فلات مرکزی ایران با آب و هوای خشک قرار گرفته است (شکل ۱).

به دلیل شهرنشینی این شهر با تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی با تنش فزاینده آبی مواجه است. طبق آمار بلندمدت (۱۹۵۱-۲۰۱۸) میانگین روزانه دمای هوا برحسب ایستگاه هواشناسی ۱۶/۵ درجه سلسیوس است. همچنین میانگین بارش سالانه حدود ۱۲۵ میلی‌متر، کمتر از میانگین بارش کشور (حدود ۲۵۰ میلی‌متر) است که نشان‌دهنده اقلیم خشک و نیمه‌خشک و افزایش آسیب‌پذیری در برابر کمبود آب است (Bagheri, 2019). بنابراین، تصفیه و بازچرخانی پایدار فاضلاب به یکی از اولویت‌های راهبردی مدیریت منابع آب شهری در این منطقه تبدیل شده است. بر اساس آخرین سرشماری، جمعیت شهر حدود ۲/۱ میلیون نفر است (Isfahan Province Management and Planning Organization, 2021).

محدوده پژوهش حدود ۱۵۶۶ کیلومتر مربع در زون شماره ۳۹ شمالی (WGS84) بود که بین مختصات شرقی ۵۴۵۰۲۶ تا ۵۸۳۱۹۳ متر و شمالی ۳۵۹۳۰۹۶ تا ۳۶۳۲۸۷۰ متر قرار داشت. برای مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، محدوده ساخت تصفیه‌خانه در نواری با فاصله ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ متری از شهر پیشنهاد شد (Hydrotech, 1978). دلیل انتخاب این مکان‌ها معمولاً با در نظر گرفتن زمین در دسترس و هزینه‌های خریداری آن و همچنین هزینه‌های انتقال فاضلاب جمع‌آوری شده از شهر بود. در

ندارد. از سوی دیگر، معیار فاصله از شهر از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی با اهمیت است. به علت بوی نامطبوع فاضلاب در برخی از فرایندهای تصفیه، محل تصفیه‌خانه باید از نواحی مسکونی دور باشد. در عین حال، فاصله بیش از اندازه از نواحی مسکونی، افزایش هزینه‌های انتقال فاضلاب را به همراه دارد. همچنین، معیار کاربری اراضی به‌منظور تهیه نقشه کاربری زمین و بررسی کاربری‌های مجاز برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب و نیز استفاده‌های بعدی از پساب (مثلاً در کشاورزی و یا آبیاری فضای سبز) اهمیت دارد. علاوه بر این، با روش روی هم‌گذاری نقشه هر یک از عوامل یاد شده، می‌توان پهنه شدنی (مناسب و مجاز) و نشدنی (نامناسب و غیرمجاز) برای احداث یا عدم احداث تصفیه‌خانه را تعیین کرد تا بتوان مکان یا مکان‌های مناسب در پهنه شدنی را نیز با روش‌های بهینه‌سازی مشخص کرد. بنابراین، پهنه‌بندی به عنوان پیش‌نیاز روش‌های بهینه‌سازی برای مکان‌یابی محل احداث تصفیه‌خانه فاضلاب اهمیت زیادی دارد. به همین دلیل، در این پژوهش سعی شد با جزئیات کافی به آن پرداخته شود. شهر اصفهان به عنوان یکی از مناطق دارای تنش آبی در کشور، با چالش‌های جدی در تأمین منابع آب برای مصارف مختلف مواجه است. در این راستا، استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده برای بخش‌های مختلف مصرف، به عنوان راهکاری مؤثر در مدیریت منابع آب، اهمیت ویژه‌ای دارد. تحقق این هدف، مستلزم پهنه‌بندی و مکان‌یابی مناسب و اصولی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است. بنابراین، پهنه‌بندی اراضی مجاز و غیرمجاز برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب، نقش کلیدی در افزایش کارایی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از پساب ایفا می‌کند.

با توجه به اینکه پهنه‌بندی برای احداث تصفیه‌خانه در هر منطقه‌ای کاملاً متفاوت با منطقه دیگر است، در این پژوهش ۹ معیار اصلی اثرگذار در تعیین پهنه‌بندی مدنظر قرار گرفت. سپس با استفاده از روش روی هم‌گذاری نقشه آن‌ها در نرم‌افزار GIS، پهنه شدنی و نشدنی برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر اصفهان به عنوان یک کلان‌شهر بزرگ کشور تعیین شد. در ادامه مکان تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود در این پهنه‌ها بررسی شد.

لازم به ذکر است که در این پژوهش، اکثر معیارهای لازم برای مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب بر اساس چارچوب ارائه شده در نشریه ۳-۱۲۹ در فرایند پهنه‌بندی لحاظ شدند. مکان‌های مجاز



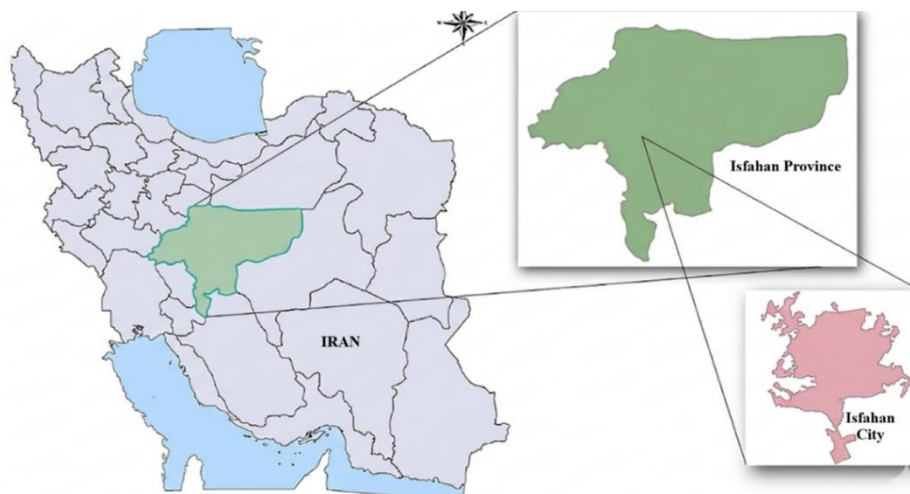


Fig. 1. Location of the study area in Isfahan, Iran

شکل ۱- مطالعه موردی اصفهان، ایران

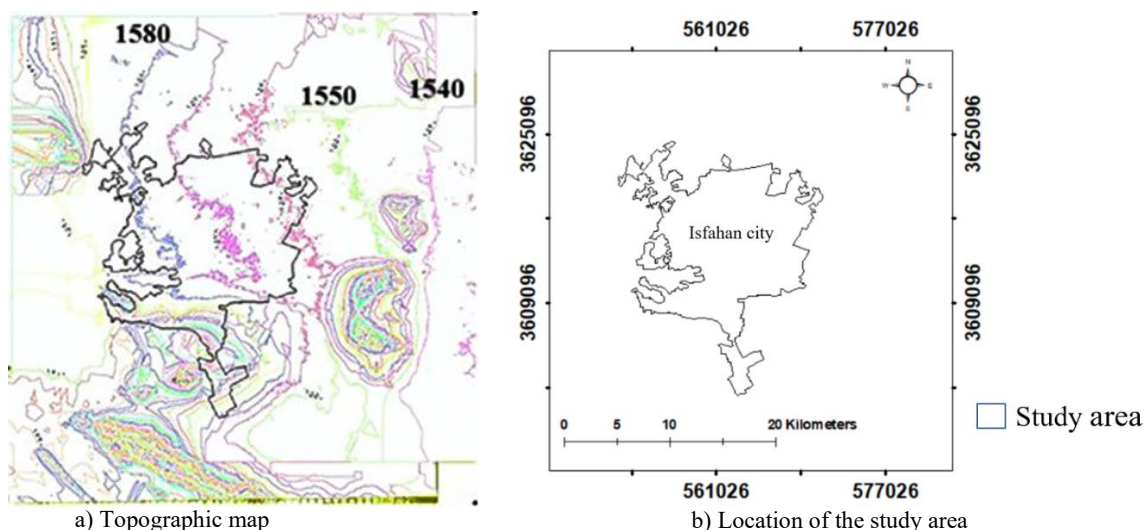


Fig. 2. a) Topographic map of Isfahan city and b) Study area including Isfahan city and surrounding lands

شکل ۲- (a) نقشه توپوگرافی شهر اصفهان و (b) محدوده مورد مطالعه شامل شهر اصفهان و زمین‌های اطراف

شکل مشخص شده است. با توجه به این که شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب به صورت ثقلی طراحی و ساخته می‌شود، انتظار می‌رود مناطق شرق اصفهان پتانسیل بیشتری برای احداث تصفیه‌خانه داشته باشند. شایان ذکر است که در سایر نواحی ممکن است برای انتقال فاضلاب اجبار به استفاده از سیستم تحت فشار و اضافه شدن هزینه‌های پمپاژ باشد که در تعریف مدل بهینه‌سازی مکان‌یابی تصفیه‌خانه باید منظور شود. بنابراین، در این پژوهش و برای افزایش شانس یافتن مکان‌های بهینه ساخت تصفیه‌خانه

این پژوهش نواری حدود ۳۰ درصد بزرگتر از ۵۰۰۰ متر، تقریباً برابر ۶۵۰۰ متر اطراف شهر اصفهان مدنظر قرار گرفت تا در مطالعات بعدی مکان‌یابی به منظور مکان‌یابی بهینه تصفیه‌خانه، امکان انتخاب بیشتری فراهم شود.

بر اساس نقشه توپوگرافی شهر اصفهان (شکل ۲-ا)، شهر اصفهان به طور کلی شیبی از غرب به سمت شرق دارد. در این شکل خطوط رنگی بیانگر منحنی‌های میزان (نقاط هم ارتفاع) است. در شکل ۲-ب همچنین محدوده شهر اصفهان با خطوط مشکی رنگ در



ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری اولیه در مکان‌یابی تأسیسات مختلف محسوب می‌شود (Shahabi et al., 2014).

در این پژوهش، از روش بولین برای تلفیق لایه‌های مکانی مختلف به شرح زیر استفاده شد تا نواحی نهایی پهنه شدنی برای احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شناسایی شوند. همچنین معیارهای مکانی مؤثر بر پهنه‌بندی احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شامل (۱) شبکه ارتفاع نقاطی^۲، (۲) رودخانه‌ها، (۳) پهنه‌بندی سیل ۲۵ ساله، (۴) گسل‌ها، (۵) خطوط انتقال نیرو، (۶) شبکه حمل‌ونقل، (۷) مناطق حفاظت شده، (۸) مناطق مسکونی شهری و روستایی، (۹) تراکم جمعیتی یا کاربری اراضی انتخاب شدند. لایه‌های داده‌های مکانی موردنیاز برای اجرای روش بولین از سازمان‌ها و ارگان‌های مختلف از جمله سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری اصفهان (فاوا)، دانشگاه اصفهان و معاونت برنامه‌ریزی و توسعه نیروی انسانی شهرداری اصفهان گردآوری و به‌صورت برداری یا رستری در محیط GIS پردازش شدند.

یکی از معیارهای موردنیاز در تعیین پهنه شدنی وضعیت توپوگرافی منطقه است. از آنجا که لایه وضعیت توپوگرافی در دسترس نبود، با استفاده از لایه اطلاعاتی شبکه ارتفاع نقاطی منطقه، لایه وضعیت توپوگرافی ساخته شد. شبکه ارتفاع نقاطی یک نقشه رقومی رستری بوده که حاوی اطلاعات مختصات و رقوم ارتفاعی (X,Y,Z) برای هر مکان با یک اندازه سلولی مشخص است. در لایه شبکه ارتفاع نقاطی ناهمواری‌های سطح زمین محدوده مورد مطالعه به وسیله یک شبکه سلولی نمایش داده شده و هر سلول دارای مقدار ارتفاع مشخص است. لایه اطلاعاتی شبکه ارتفاع نقاطی شهر اصفهان در شکل ۳-ا ارائه شده است. نرم‌افزار GIS با میانگین‌گیری تغییرات ارتفاع در راستای محورهای X و Y، وضعیت توپوگرافی هر سلول از شبکه ارتفاع نقاطی منطقه را محاسبه می‌کند. لایه وضعیت توپوگرافی ساخته شده منطقه مورد مطالعه در شکل ۳-ب ارائه شده است.

عوارض مکانی دارای حریم مشخص هستند و ساخت تصفیه‌خانه فاضلاب در فاصله‌ای کمتر از حریم تعیین شده برای این عوارض ممنوع است. برای تعیین تمام مکان‌های کاندید یا

فاضلاب با روش انتقال ثقلی، نوار مجاز در ضلع شرقی اصفهان ۲ برابر در نظر گرفته شد و حداقل تا فاصله حدود ۱۳ هزار متری از شهر را پوشش داده و پتانسیل ساخت تصفیه‌خانه در آن بررسی شد (نواحی سفیدرنگ در شکل). لازم به ذکر است در شکل ۲-ب، کادر مستطیلی دور نقشه بیانگر محدوده مطالعه شامل شهر اصفهان و اراضی پیرامونی آن است که مرز شهر اصفهان با خط مرزی سیاه نمایش داده شده است.

۲-۲- کاربرد روش بولین^۱ در تعیین پهنه شدنی و نشدنی

در پهنه‌بندی مکانی، GIS به‌عنوان ابزاری کلیدی برای تحلیل، تلفیق و نمایش لایه‌های مختلف اطلاعات مکانی به‌کار گرفته می‌شود (Khoshoei et al., 2025). در این پژوهش تحلیل تناسب اراضی بر پایه سامانه اطلاعات جغرافیایی با استفاده از نرم‌افزار GIS انجام شد. در میان روش‌های گوناگون توسعه‌یافته برای مکان‌یابی در محیط GIS، روش بولین به‌عنوان یکی از پرکاربردترین تکنیک‌ها برای تعیین نواحی پهنه شدنی و نشدنی در فرایند مکان‌یابی تأسیسات زیربنایی شناخته می‌شود (Cheng and Thompson, 2016).

روش بولین به صورت مطلق پهنه شدنی و نشدنی را مشخص می‌کند. در این روش تمام معیارها به صورت محدودیت عمل کرده و خروجی روش به صورت قطعی (شدنی یا نشدنی) تعیین می‌شود. این روش بر پایه منطق دودویی^۲ عمل می‌کند، به این معنا که هر لایه مکانی، بر اساس معیارهای از پیش تعیین شده به دو طبقه شدنی و نشدنی تقسیم می‌شود. مقدار سلول‌های مناطق شدنی و نشدنی به ترتیب برابر یک و صفر است. لازم به ذکر است اهمیت معیارهای مختلف یکسان در نظر گرفته شده است. ابتدا در این روش باید هر یک از لایه‌های ورودی در محیط ArcGIS بر اساس حدود مجاز تعریف شده باز طبقه‌بندی شوند. سپس این لایه‌ها به‌گونه‌ای با هم ترکیب می‌شوند که فقط سلول‌هایی که در تمام لایه‌ها مقدار یک را دارند حفظ و سایر سلول‌ها حذف می‌شوند (Cheng and Thompson, 2016). روش بولین به‌دلیل سادگی، شفافیت منطق و قابلیت ترکیب مستقیم لایه‌های محدودکننده،

³ Digital Elevation Model (DEM)

¹ Boolean

² Binary Logic



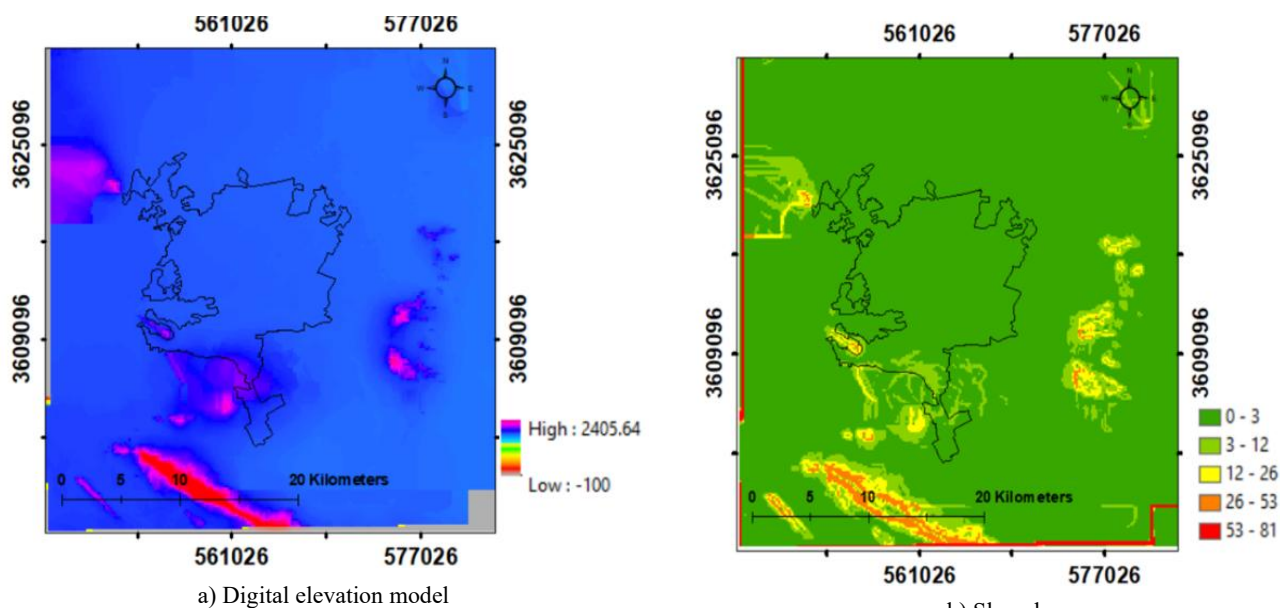


Fig. 3. a) Digital elevation model and b) Slope layer percentage in the study area

شکل ۳- (a) شبکه ارتفاع نقاطی و (b) درصد لایه شیب در محدوده مورد مطالعه

به‌منظور مقایسه معیارها برای مکان‌یابی باید تمام معیارها به فرمت لایه‌های رستری در نرم‌افزار GIS تبدیل شوند. با تعریف فاصله اقلیدسی از بردار، لایه‌های رستری ساخته شوند. هر سلول از لایه‌های رستری فاصله از عارضه را نمایش می‌دهد (به طوری که سلول به سلول فاصله از لایه بردار افزایش می‌یابد). لایه‌های برداری و لایه‌های رستری ساخته شده برای معیارهای مکان‌یابی در شکل ۴ ارائه شده است. در هر ردیف، نقشه سمت چپ نمایش رستری و نقشه سمت راست نمایش برداری همان معیار است. هر یک از لایه‌های ورودی ابتدا با استفاده از ابزار Reclassify در محیط GIS بر اساس حدود مجاز تعریف شده باز طبقه‌بندی شد. سپس، لایه‌های باز طبقه‌بندی شده با استفاده از عملگر منطقی "AND" در ابزار Raster Calculator ترکیب شدند. در این فرایند تنها سلول‌هایی که در تمامی لایه‌ها مقدار یک دارند، به‌عنوان مناطق مناسب باقی مانده و سایر سلول‌ها حذف شدند. خروجی نهایی این روش، یک نقشه نهایی تناسب مکانی با دو کلاس شامل مناطق شدنی (کلاس یک) و مناطق نشدنی (کلاس صفر) است. به عبارت دیگر هر سلول از نقشه نهایی برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب مناسب یا نامناسب تشخیص داده می‌شود (Cheng and Thompson, 2016).

مکان‌هایی که ممنوعیتی برای ساخت تصفیه‌خانه ندارند (پهنه شدنی)، حریم مشخصی از معیارهای لایه محدودیت‌ها بر اساس آیین‌نامه‌های ایران به شرح زیر تعریف شد. حریم عوارض رودخانه، مناطق حفاظت شده، مناطق مسکونی شهری و مناطق جمعیتی بر اساس محدودیت‌های درج شده در آیین‌نامه قوانین، مقررات، ضوابط و استانداردهای محیط‌زیست انسانی به ترتیب برابر ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۱۵۰۰ متر لحاظ شد (Shaeri and Rahmati, 2012).

حریم خطوط شبکه حمل‌ونقل به تفکیک نوع راه آزادراه، راه اصلی و راه فرعی طبق آیین‌نامه مشخصات فنی عمومی راهداری (نشریه شماره ۲۸۰) به ترتیب برابر ۴۵، ۷۶ و ۳۵ متر تعیین شد (Management and Planning Organization of Iran, 2004). حریم خطوط انتقال نیرو (خطوط انتقال برق) طبق آیین‌نامه وزارت نیرو ۵۰ متر لحاظ شد (Ministry of Energy, no date). حریم سایر عوارض گسل و وضعیت توپوگرافی بر اساس مطالعات سایر پژوهشگران تعیین شد (Falah et al., 2013, Mansouri et al., 2018). حریم عوارض در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در مراجع مختلف در جدول ۲ خلاصه شده است.



جدول ۲- حریم عوارض در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب بر مبنای روش بولین

Table 2. Buffer zones of features in wastewater treatment plant siting based on the Boolean method

References	Criteria	(Sedaghati and Talebkah, 2018)	(Mansouri et al., 2013)	(Falah et al., 2013)	(Sedaghati and Talebkah, 2018)	(Zhao et al., 2009)	(Abdalla and EL Khidir, 2017)	(Nigusse et al., 2020)	(Liu et al., 2022)	(Zhou et al., 2022)	Current study
	Topography (%)	—	<15	<15	<15	<15	<15	10	<10	<21	<15
	Distance from main rivers (m)	500	300-1000	200	300-1000	—	1500	1000	100	50	500
	Distance from secondary rivers (m)	—	50	—	50	—	—	—	—	—	—
	Distance from population centers (m)	1500	—	1000	—	—	—	1000	—	—	1500
	Distance from urban residential areas (m)	2000-2500	1000	—	3000	300	1000	—	200	300	2000-2500
	Distance from rural residential areas (m)	1500	300	—	500	—	—	—	—	—	1500
	Distance from main roads	—	500	200	500	—	500	1000	100	50	76-120
	Distance from secondary roads	—	50	—	200	—	—	—	—	—	15-45
	Distance from power transmission lines (m)	—	—	200	50	—	—	—	—	—	50
	Distance from protected areas (m)	1000	—	500	500	1000	—	—	—	—	1000
	Distance from floodplain zones (m)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×
	Distance from major and active faults (m)	—	300	3000	300	—	—	—	—	—	300
	Distance from minor faults (m)	—	100	—	100	—	—	—	—	—	—
	Distance from wells (m)	250	300	—	300	—	—	—	—	—	—

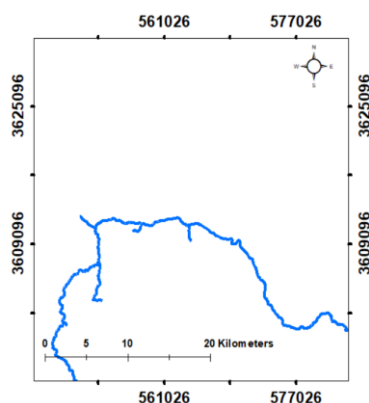
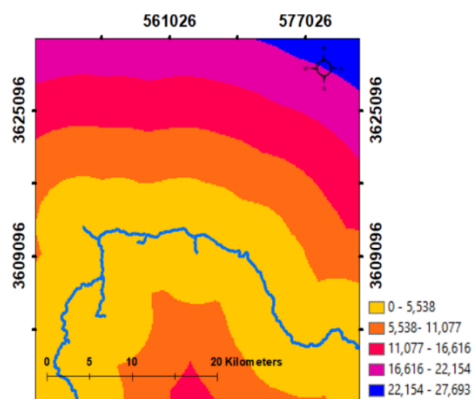
۳- نتایج و بحث

با اعمال حریم قابل قبول برای تک‌تک معیارها در نرم‌افزار GIS، پهنه شدنی و نشدنی برای ساخت تصفیه‌خانه فاضلاب به ترتیب تحت عنوان کلاس یک یا شدنی و کلاس صفر یا نشدنی برای هر معیار مشخص شد. نتایج طبقه‌بندی در شکل ۵ ارائه شده است.

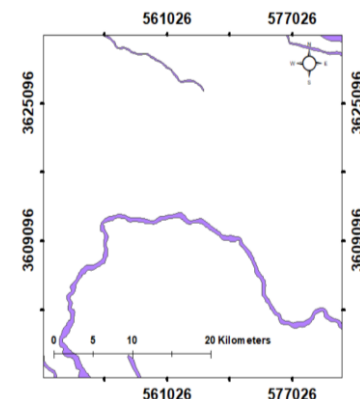
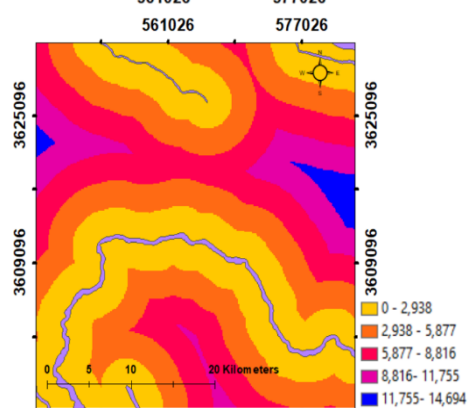
پس از تلفیق و هم‌پوشانی لایه‌های مذکور بر اساس عملگر منطقی "AND" در روش بولین، پهنه شدنی یا مناسب (کلاس یک) و پهنه نشدنی یا نامناسب (کلاس صفر) برای ساخت تصفیه‌خانه فاضلاب در ناحیه مورد مطالعه شناسایی شدند. نقشه نهایی تناسب مکانی برای مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در

شکل ۶ ارائه شده که در آن پهنه‌های مناسب با رنگ سبز و پهنه‌های نامناسب با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند. این مرحله با هدف تعیین محدوده‌هایی انجام شد که معیارهای پایه‌ای مکان‌یابی را برآورده می‌کنند. نواحی مناسب حاصل از این مرحله، پهنه شدنی را مشخص می‌سازند که در درون آن، مکان‌های بهینه می‌توانند در مراحل و مطالعات بعدی و از طریق تعریف معیارهای بیشتر در تحلیل‌های بهینه‌سازی و یا تصمیم‌گیری چند معیاره انتخاب شوند. بر اساس محاسبات انجام شده بر روی لایه رستری، نتایج حاصل از لایه طبقه‌بندی شده، تعداد سلول‌ها، مساحت هر کلاس (حاصل ضرب تعداد سلول در مساحت سلول) و سهم نسبی

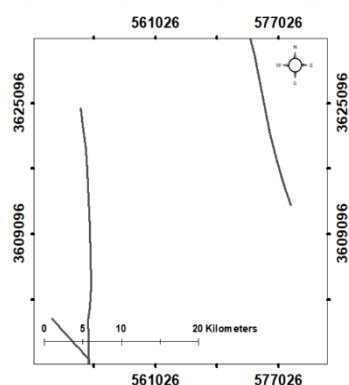
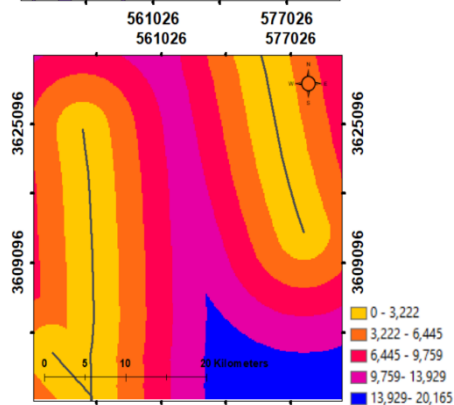




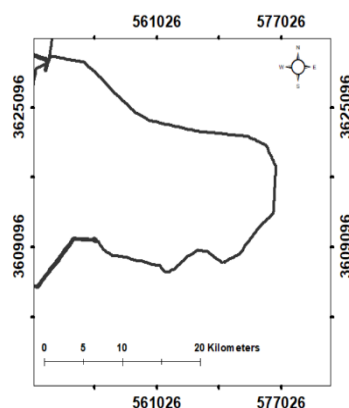
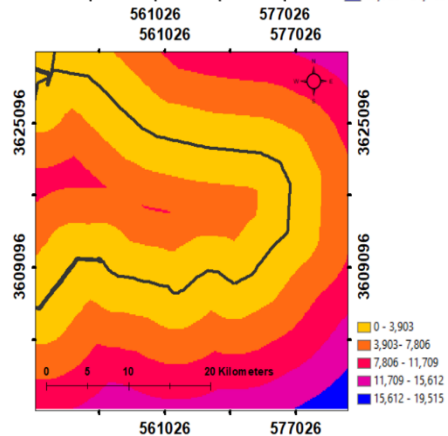
a) River



b) 25 Year floodplain



c) Faults



d) Power transmission lines

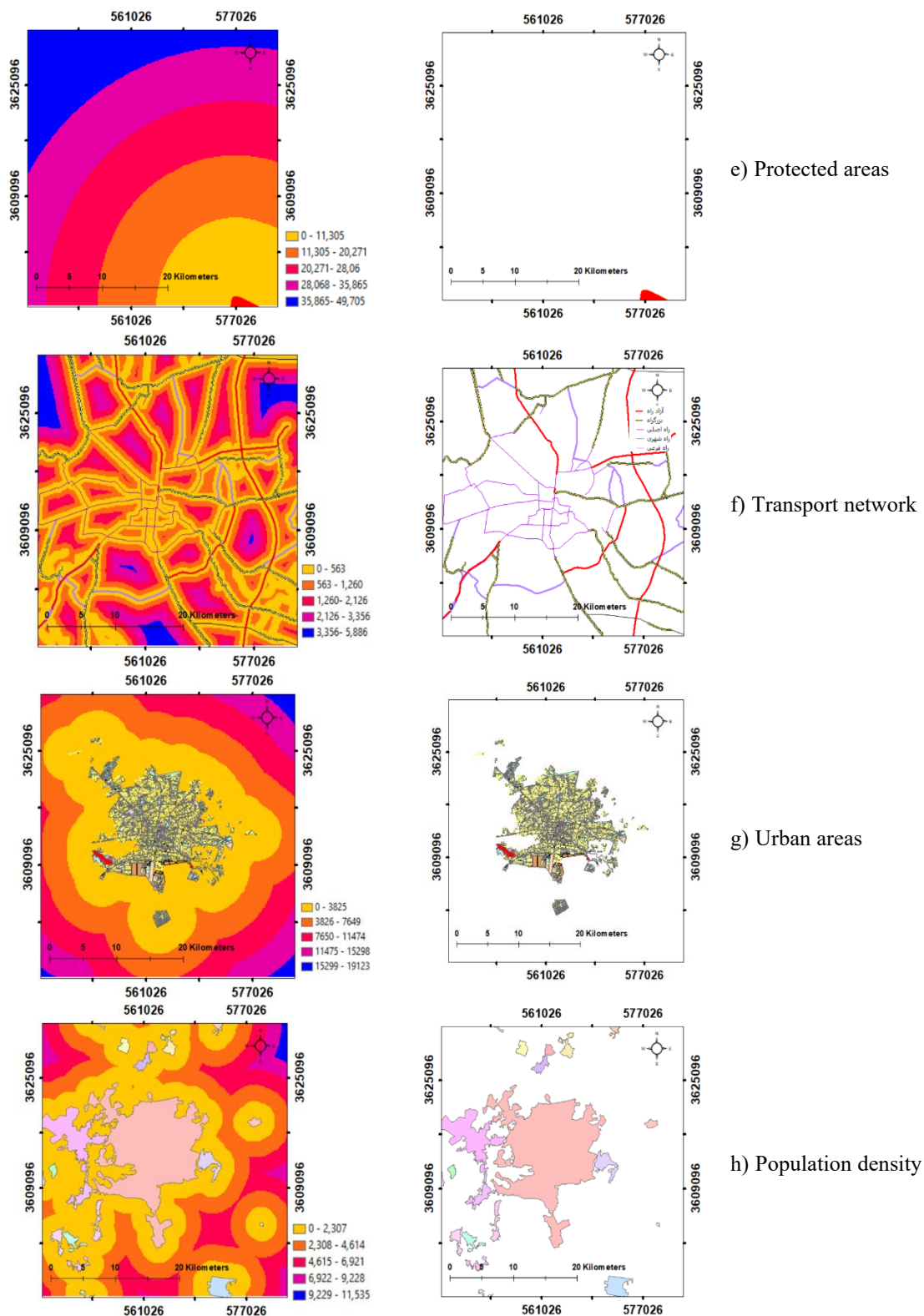


Fig. 4. Raster and vector maps of spatial criteria used for locating wastewater treatment plants in the study area

شکل ۴- نقشه‌های رستری و برداری معیارهای مکانی در مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در محدوده مطالعه



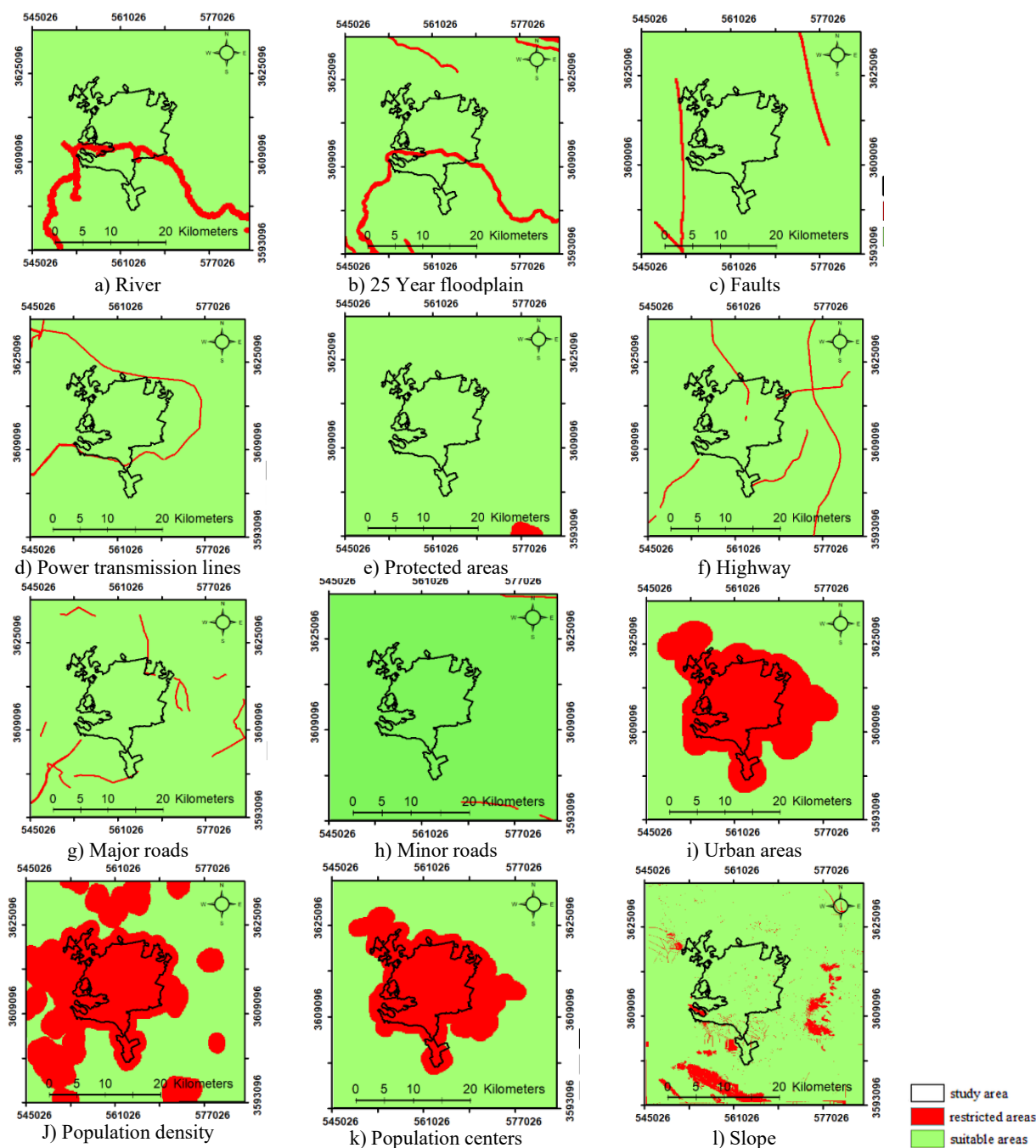


Fig. 5. Thematic maps used in the location suitability analysis

شکل ۵- نقشه‌های موضوعی مورد استفاده در تحلیل تناسب مکانی

تصفیه فاضلاب مورد استفاده در ایران تعیین شد تا تناسب مکانی از نظر تأمین زمین احداث تصفیه‌خانه به‌صورت واقع‌بینانه ارزیابی شود (ابعاد هر پیکسل ۱۲۴ هکتار). برای این اساس و از مجموع مساحت کل منطقه مطالعه (حدود ۱۵۶۶ کیلومتر مربع)، پهنه نامناسب با ۷۶۷ سلول و مساحت ۹۵۳/۵۵ کیلومتر مربع معادل

پهنه‌های مناسب و نامناسب در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که هر سلول در این پژوهش نمایانگر یک پیکسل از شبکه رستری با ابعاد ثابت بوده که به عنوان واحد پایه تحلیل مکانی در محاسبات پهنه‌بندی استفاده شد. ابعاد این پیکسل‌ها بر اساس حداکثر مساحت موردنیاز فرایندهای متداول



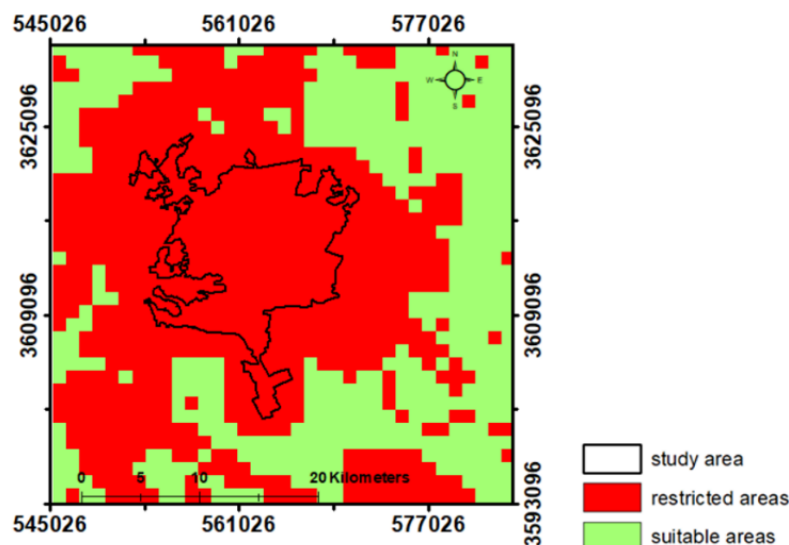


Fig. 6. Final suitability map from the Boolean overlay method

شکل ۶- نقشه نهایی تناسب مکانی برای مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بر اساس روش هم‌پوشانی بولین

جدول ۳- سلول‌ها، مساحت و سهم پهنه‌های مناسب و نامناسب در نقشه تناسب مکانی

Table 3. Cells, area, and proportion of suitable and restricted zones in the spatial suitability map

Class zone	Class zone	Number of cells	Area (km ²)	Share (%)
0	Restricted	767	953.55	60.89
1	Suitable	493	612.90	39.13

زیست‌محیطی مانند انتشار بوی نامطبوع و سایر آثار نامطلوب فضایی، به یک چالش اساسی برای سکونتگاه‌های پیرامونی و کیفیت زیست ساکنان تبدیل شده است. افزایش جمعیت و شدت ساخت‌وسازهای شهری در سال‌های اخیر موجب نفوذ سکونتگاه‌های مسکونی به حریم تصفیه‌خانه‌ها و آشکار شدن ناسازگاری مکانی آن‌ها شده است. این موضوع ضرورت بازنگری در مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یا مدیریت حریم این تأسیسات را نشان می‌دهد.

علاوه بر نمایش پهنه‌های شدنی (با رنگ سبز) در شکل ۷، به‌منظور ارائه نمونه‌ای از موقعیت‌های قابل استقرار، دو نقطه از داخل این مناطق استخراج شد. به طور مشخص، نقاطی با مختصات ۵۴۵۹۳۰، ۳۶۲۶۱۷۷ متر و ۵۸۰۶۱۷، ۳۶۲۳۴۷۸ متر به ترتیب در شمال شرقی و در شمال غربی پهنه شدنی قرار دارند و به‌عنوان نقاط کاندید برای استقرار تصفیه‌خانه فاضلاب به مدل بهینه‌سازی معرفی می‌شوند.

۶۰/۸۹ درصد و پهنه مناسب با ۴۹۳ سلول و مساحت ۶۱۲/۹۰ کیلومتر مربع تنها ۳۹/۱۳ درصد از سطح منطقه را دربرمی‌گیرند. درصد قابل توجه پهنه‌های نامناسب نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از اراضی، به دلیل وجود محدودیت‌های مکانی، شرایط لازم برای استقرار تصفیه‌خانه فاضلاب را نداشته و به همین دلیل در مرحله نخست پهنه‌بندی حذف شده‌اند. همچنین مکان فعلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود در محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه تناسب مکانی در شکل ۷ نشان داده شده است.

بر اساس معیارهای مکان‌یابی و حریم مجاز در نظر گرفته شده در این پژوهش، مکان فعلی تصفیه‌خانه جنوب اصفهان با مختصات شرقی ۵۶۸۲۳۵ و مختصات شمالی ۳۶۰۹۲۷۰ متر در پهنه نشدنی قرار گرفت. دو تصفیه‌خانه دیگر در حال حاضر در مرز پهنه شدنی و نشدنی قرار دارند که ممکن است به زودی و با گسترش محدوده سکونتگاه‌ها، در پهنه نشدنی قرار گیرند. استقرار تصفیه‌خانه‌ها در پهنه‌های نشدنی یا غیرمجاز شهری، با ایجاد پیامدهای منفی



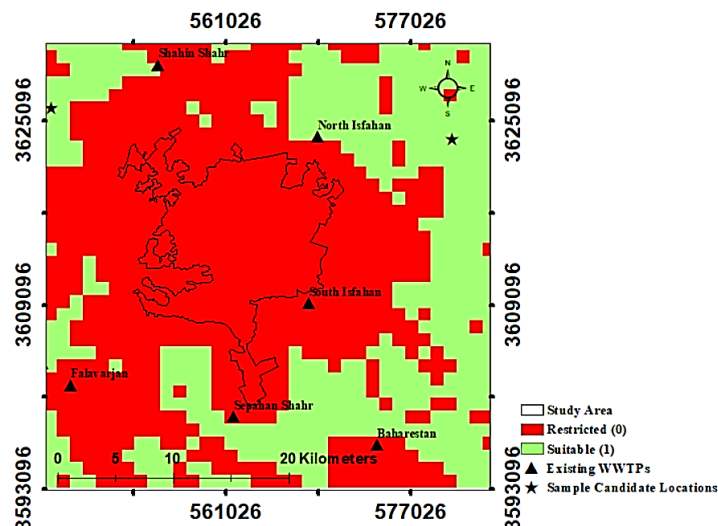


Fig. 7. Final spatial suitability map and locations of existing wastewater treatment plants

شکل ۷- نقشه نهایی تناسب مکانی و استقرار تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود

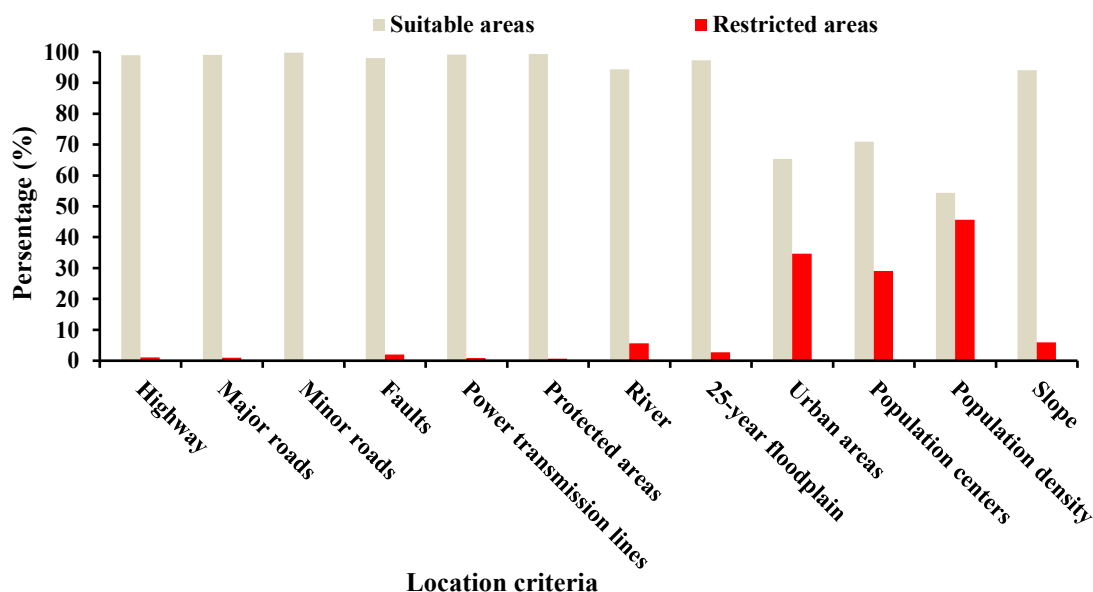


Fig. 8. Percentage distribution of land classified as suitable and restricted for each spatial criterion

شکل ۸- توزیع درصدی پهنه‌های مناسب و نامناسب برای معیارهای مکان‌یابی در ارزیابی تناسب مکانی

در شکل ۸ درصد اراضی طبقه‌بندی شده در دو پهنه شدنی و پهنه نشدنی برای هر یک از معیارهای مختلف مورد استفاده نشان داده شده است. معیارهایی مانند آزادراه‌ها، راه‌های اصلی و فرعی، گسل‌ها، خطوط انتقال نیرو و مناطق حفاظت شده، درصد بسیار بالایی از تناسب مکانی را ایجاد کرده‌اند، به‌گونه‌ای که بیش از ۹۸/۵ درصد از اراضی تحت تأثیر این معیارها در طبقه مناسب قرار گرفته و سهم نواحی محدودیت‌دار کمتر از ۱/۵ درصد بوده است. در مقابل، معیارهای مرتبط با جمعیت بیشترین میزان محدودیت را بر منطقه تحمیل کرده‌اند. معیارهایی همچون تراکم جمعیت (۴۵/۶۷ درصد)، مناطق شهری (۳۴/۶۵ درصد) و مراکز

در شکل ۸ درصد اراضی طبقه‌بندی شده در دو پهنه شدنی و پهنه نشدنی برای هر یک از معیارهای مختلف مورد استفاده نشان داده شده است. معیارهایی مانند آزادراه‌ها، راه‌های اصلی و فرعی، گسل‌ها، خطوط انتقال نیرو و مناطق حفاظت شده، درصد بسیار بالایی از تناسب مکانی را ایجاد کرده‌اند، به‌گونه‌ای که بیش از ۹۸/۵ درصد از اراضی تحت تأثیر این معیارها در طبقه مناسب قرار گرفته و سهم نواحی محدودیت‌دار کمتر از ۱/۵ درصد بوده است. در مقابل، معیارهای مرتبط با جمعیت بیشترین میزان محدودیت را بر منطقه تحمیل کرده‌اند. معیارهایی همچون تراکم جمعیت (۴۵/۶۷ درصد)، مناطق شهری (۳۴/۶۵ درصد) و مراکز



ساخت تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر اصفهان بررسی شدند. کلیه معیارهای منتخب تحلیل تناسب مکانی در محیط GIS به صورت لایه‌های محدودیتی اعمال شد. نتایج این پژوهش با استفاده از روش هم‌پوشانی بولین در محیط GIS نشان داد که از مجموع ۱۵۶۶ کیلومترمربع محدوده مورد مطالعه در اطراف شهر اصفهان، حدود ۶۱۲/۹۰ کیلومترمربع (۳۹/۱۳ درصد) برای استقرار تصفیه‌خانه فاضلاب مناسب و ۹۵۳/۵۵ کیلومترمربع (۶۰/۸۹ درصد) نامناسب و در پهنه غیرمجاز قرار دارد. بررسی تأثیر معیارهای مختلف نشان داد که محدودیت‌های مرتبط با جمعیت (۴۵/۶۷ درصد)، به‌ویژه مناطق مسکونی شهری و روستایی (۳۴/۶۵ درصد) و مراکز جمعیتی (۲۹/۰۹ درصد)، بیشترین نقش را در کاهش تناسب مکانی ایفا کرده‌اند و سایر معیارها مانند راه‌های فرعی (۰/۲۵)، مناطق حفاظت شده (۰/۶۵)، خطوط انتقال نیرو (۰/۹۱ درصد)، راه‌های اصلی (۰/۹۶ درصد)، آزادراه‌ها (۱/۰۳ درصد) و گسل‌ها (۱/۹۶ درصد) سهم کمتری در ایجاد محدودیت داشته‌اند. سهم محدودیت‌های معیارهای رودخانه و پهنه‌بندی سیل ۲۵ ساله در تولید پهنه نشدنی به ترتیب برابر ۵/۶۳ و ۲/۷۱ درصد بود.

همچنین تحلیل موقعیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود نشان داد که یکی از این تأسیسات (تصفیه‌خانه جنوب اصفهان)، در پهنه‌های غیرمجاز واقع شده و سایر تصفیه‌خانه‌ها نیز در مرز شدنی و نشدنی قرار گرفته که این امر با پیامدهای منفی زیست‌محیطی، از جمله انتشار بوی نامطبوع و ناسازگاری مکانی با سکونتگاه‌های اطراف همراه است. این یافته‌ها ضرورت بازنگری در سیاست‌های مکان‌یابی، مدیریت حریم و استفاده از ابزارهای GIS برای برنامه‌ریزی پایدار تأسیسات فاضلاب شهری اصفهان را برجسته می‌سازد. از پهنه شدنی این پژوهش می‌توان در مطالعات بعدی برای تعیین بهینه محل ساخت تصفیه‌های متمرکز و غیرمتمرکز با لحاظ هزینه‌های ساخت، نوع فرایند، هزینه‌های انتقال فاضلاب خام، هزینه‌های انتقال پساب تصفیه شده برای مصارف مختلف استفاده کرد. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، برای ارزیابی‌های کیفی و رتبه‌بندی درونی پهنه‌های مجاز به‌دست آمده، از رویکردهای منطق فازی و فرایندهای تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز استفاده شد تا تفاوت پتانسیل مکانی در فواصل مختلف از حریم‌ها به شکل طیفی مدل‌سازی شود.

جمعیتی (۲۹/۰۹ درصد) بیشترین سهم از اراضی نامناسب را به خود اختصاص داده‌اند. این دسته از محدودیت‌ها تأثیر قابل توجهی بر الگوی تناسب مکانی داشته‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

تحلیل تناسب اراضی مبتنی بر نرم‌افزار GIS با انتخاب روش بولین به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌ها در تحلیل مکان‌یابی برای تعیین پهنه‌بندی احداث تصفیه‌خانه فاضلاب برای شهر اصفهان انجام شد. روش بولین با استفاده از طبقه‌بندی دودویی، هر لایه رستری را بر اساس معیارهای مکان‌یابی از پیش تعیین شده به دو دسته تبدیل می‌کند، به‌طوری که مناطق محدود با مقدار صفر (نامناسب) و مناطق مناسب با مقدار یک (مناسب) کدگذاری می‌شوند. در نهایت، تمامی لایه‌های مکانی با استفاده از عملگر AND بولین و بر اساس حریم‌های مختلف با یکدیگر ترکیب شدند تا نقشه نهایی تناسب تولید شود.

این نقشه منطقه مطالعه را به دو کلاس شدنی و نشدنی تقسیم می‌کند و مکان‌های کاندید در کلاس شدنی شناسایی می‌شوند. در این روش انتخاب صحیح پارامترها و معیارهای مؤثر در مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش تعارضات فضایی و پیامدهای زیست‌محیطی ایفا می‌کند. انتخاب پارامترها و معیارهای مؤثر در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در هر پژوهش باید بر اساس نکاتی از قبیل هدف، مقیاس کار و دقت قابل انتظار، شرایط منطقه، میزان تأثیرگذاری هر عامل و کافی بودن و در دسترس بودن اطلاعات، تعیین شوند. بی‌توجهی به هر یک از پارامترها و معیارهای مؤثر در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب، می‌تواند باعث ایجاد خسارات جبران‌ناپذیری به یک شهر شود. برخی معیارها مانند کاربری اراضی، وضعیت توپوگرافی، ویژگی‌های زمین‌شناسی، فاصله تا مناطق مسکونی و دسترسی به شبکه حمل‌ونقل، نقش حیاتی در مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دارند و در اغلب پژوهش‌ها به‌عنوان عوامل اصلی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در این پژوهش داده‌ها شامل لایه‌های مرتبط با رودخانه‌ها، گسل‌ها، پهنه‌بندی سیل ۲۵ ساله، شبکه راه‌ها، مناطق مسکونی شهری و روستایی، نقاط جمعیتی، خطوط انتقال نیرو، مناطق حفاظت شده، شبکه ارتفاع نقاطی برای تعیین مکان‌های مجاز



۵-قدردانی

نویسندگان از دانشگاه اصفهان و سازمان فناوری اطلاعات و حمایت‌هایشان از این پژوهش قدردانی می‌کنند.
ارتباطات شهرداری اصفهان (فاوا) بابت پشتیبانی فنی و

References

- Abdalla, O. O. and El Khidir, S. O., 2017. Site selection of wastewater treatment plant using RS/GIS data and multi-criteria analysis (MCA): case study Omdurman City, Khartoum State, Sudan. *Al Neelain Journal of Geosciences*, 1(2), 94-107. [Link]
- Akbarzadeh, A. Valipour, A., Meshkati, S. M. H. and Hamnabard, N., 2023. Municipal wastewater treatment in Iran: current situation, barriers, and future policies. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 11(1), 60-71. <https://doi.org/10.34172/jaehr.2023.08>.
- Anagnostopoulos, K. and Vavatsikos, A., 2012. Site suitability analysis for natural systems for wastewater treatment with spatial fuzzy analytic hierarchy process. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(2), 125-134. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000155](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000155).
- Asadi, M., Mazaheri, M. and Abdolmanofi, N., 2022. *Analytical Review of the Current Conditions and Future Outlook of the Water Crisis in Iran*. Research Center of the Islamic Consultative Assembly, Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Awawdeh, M., Al-Rousan, Z. and Alkaraki, K., 2024. Wastewater treatment plant site selection using GIS and multicriteria decision analysis. *Arab Gulf Journal of Scientific Research*, 42(4), 1504-1517. <https://doi.org/10.1108/AGJSR-09-2023-0412>.
- Bagheri, S., 2019. *Detection of Climate Change in Isfahan City*. Isfahan Province Meteorological Department, Isfahan, Iran. (In Persian)
- Batisha, A. F., 2020. Greywater in egypt: the sustainable future of non-conventional water resources. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(28), 35428–35438. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09821-x>.
- Buonocore, E., Mellino, S., De Angelis, G., Liu, G. and Ulgiati, S., 2018. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecological Indicators*, 94(3), 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.047>.
- Chen, C. Y., Wang, S. W., Kim, H., Pan, S. Y., Fan, C. and Lin, Y. J., 2021. Non-conventional water reuse in agriculture: a circular water economy. *Water Research*, 199, 117193. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117193>.
- Chen, X., Xu, Z., Yao, L. and Ma, N., 2018. Processing technology selection for municipal sewage treatment based on a multi-objective decision model under uncertainty. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(3), 448. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030448>.
- Cheng, C. and Thompson, R. G., 2016. Application of boolean logic and GIS for determining suitable locations for temporary disaster waste management sites. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20, 78-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.011>.
- Deepa, K. and Krishnaveni, M., 2012. Suitable site selection of decentralised treatment plants using multicriteria approach in GIS. *Journal of Geographic Information System*, 4(3), 254-260. [Link]
- Fahad, A., Saphira Mohamed, R. M., Radhi, B. and Al-Sahari, M., 2019. Wastewater and its treatment techniques: an ample review. *Indian Journal of Science and Technology*, 12(25), 1-13. <https://dx.doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i25/146059>.
- Falah, M. Farajzadeh Asl, M. Vaqarfard, H. and Nik Khaslat, A., 2013. Location of wastewater treatment plant using GIS and TOPSIS technique (case study: Qeshm Island). *Geographical Quarterly of Land*, 10(37), 109-126. (In Persian). [Link]



- Ghalenoei, A., 2023. Identification of effective options in the siting of the wastewater treatment plant of Mashhad metropolis. *10th Conference on Modern Studies and Research in Civil Engineering, Architecture and Future City*, Iran. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Hama, A. R., Al-Suhili, R. H. and Ghafour, Z. J., 2019. A multi-criteria GIS model for suitability analysis of locations of decentralized wastewater treatment units: case study in Sulaimania, Iraq. *Heliyon*, 5(3), e01355. [\[Link\]](#)
- Hussain, M. I., Muscolo, A., Farooq, M. and Ahmad, W., 2019. Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. *Agricultural Water Management*, 221, 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.014>.
- Hydrotech, 1978. *A Common Dilemma Regarding Wastewater Treatment Plants: What is a Safe Distance from Homes? and is it Even Safe to Live Near One*. [\[Link\]](#)
- Isfahan Province Management & Planning Organization, 2021. *Statistical Yearbook of Isfahan Province Counties*. Tehran, Iran. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Khoshoei, M., Esteki, E. and Amini, S., 2025. Flood hazard zoning of Kashan County based on analytical hierarchy process using geographic information system. *Journal of Water and Wastewater*, 36(2), 43-62. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.521261.3491>.
- Laws and Regulations Portal of the Islamic Republic of Iran, 2015. *The Territory of Overhead Power Transmission and Distribution Lines*. Tehran, Iran. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Liu, B., Tang, J., Qu, Y., Yang, Y., Lyu, H., Dai, Y. et al., 2022. A GIS-based method for identification of blindness in former site selection of sewage treatment plants and exploration of optimal siting areas: a case study in Liao River Basin. *Water*, 14(7), 1092. <https://doi.org/10.3390/w14071092>.
- Mahzoun, A. K., 2021. *Collection of Documents Related to the National Strategic Food Security Transformation Plan: Analysis of the Country's Water Situation*. Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Management and Planning Organization of Iran, 2004. *Technical General Specifications for Road Maintenance*. Publication No. 280, Tehran, Iran. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Mansouri, Z., Moghaddas, N. H. and Dahrazma, B., 2013. Wastewater treatment plant site selection using AHP and GIS: a case study in Falavarjan, Esfahan. *Journal of Geope*, 3(2), 63-72. <https://doi.org/10.22059/jgeope.2013.36015>.
- Neshastegar, M., Tajrishy, M. and Abrishamchi, A., 2011. Siting of decentralized wastewater treatment plants in metropolitan areas using an integrated GIS-based decision-making approach (case study: Tehran). *4th Iranian Conference on Water Resources Management, Amirkabir University of Technology*, Tehran, Iran. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Nigusse, A. G. M., Adhaneom, U. G., Kahsay, G. H., Abrha, A. M., Gebre D. N. and Weldearegay, A. G., 2020. GIS application for urban domestic wastewater treatment site selection in the Northern Ethiopia, Tigray Regional State: a case study in Mekelle City. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(8), 311. [\[Link\]](#)
- Plan and Budget Organization of Iran, 2024. *Technical Guidelines for the Evaluation of Urban Wastewater Treatment Plant Designs*. Publication No.129-3, Tehran, Iran. (In Persian) [\[Link\]](#)
- Rezaei, N., Sierra-Altamiranda, A., Diaz-Elsayed, N., Charkhgard, H. and Zhang, Q., 2019. A multi-objective optimization model for decision support in water reclamation system planning. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118227>.
- Ruiz-Rosa, I., García-Rodríguez, F. J. and Mendoza-Jiménez, J., 2016. Development and application of a cost management model for wastewater treatment and reuse processes. *Journal of Cleaner Production*, 113, 299-310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.044>.



- Sedaghati, A. and Talebkhah, H., 2018. Evaluation of the location of the Bojnord wastewater treatment plant and selection of the optimal site. *Geographical Quarterly of Land*, 59, 51-70. (In Persian). [Link]
- Seker, D. Z. and Yucel, U., 2017. GIS based multi-criteria decision analysis for site selection of a wastewater treatment plant. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(1), 399-404. [Link]
- Shaeri, M. and Rahmati, A., 2012. *Human's Environmental Laws, Regulations, Criteria and Standards*. Department of the Environment. 339. Hack Pub., Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Shahabi, H., Keihanfard, S., Ahmad, B. B. and Taheri Amiri, M. J., 2014. Evaluating Boolean, AHP and WLC methods for the selection of waste landfill sites using GIS and satellite images. *Environmental Earth Sciences*, 71, 4221-4233. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2816-y>.
- Shahmoradi, B. and Pouramraei, R., 2021. Site location of municipal wastewater treatment plant using land suitability model (case study: Kouhdasht City). *Environment and Water Engineering*, 7(2), 232-242. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.271917.1507>.
- Tabesh, M., Dehnavi, O. P. and Heydarzadeh, R., 2025. Optimum design of placement and hydraulic dimensions of domestic wastewater collection network with the approach of removing the highest amount of COD and increasing DO along the route. *Journal of Water and Wastewater*, 36(2), 1-22. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503059.3477>.
- Thangarasu, T., Aldehim, G., Alruwais, N. and Kandasamy, A., 2025. Wastewater treatment plant site selection using advanced decision tree machine learning and remote sensing techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(1), 234-247. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35774-6>.
- Ungureanu, N., Vlăduț, V. and Voicu, G., 2020. Water scarcity and wastewater reuse in crop irrigation. *Sustainability*, 12(21), 9055. <https://doi.org/10.3390/su12219055>.
- Zhao, Y. W., Qin, Y., Chen, B., Zhao, X., Li, Y., Yin, X. Y. et al., 2009. GIS-based optimization for the locations of sewage treatment plants and sewage outfalls - a case study of Nansha District in Guangzhou City, China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(4), 1746-1757. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.12.016>.
- Zhou, Y., Song, Y., Li, Sh., Qin, W. and Sun, J., 2022. A location selection method for wastewater treatment plants integrating dynamic change of water ecosystem and socio-cultural indicators: a case study of Phnom Penh. *Water*, 14(22), 3637. <https://doi.org/10.3390/w14223637>.

