Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 7, No. 3, PP. 5-15, Autumn 2022
DOI: 10.22112/JWWSE.2022.273333.1263

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هفتم، شماره ۳، صفحات ۵-۱۵، پاییز ۱۴۰۱

Research Paper

Using Multi-Criteria Decision Making Methods in Selecting the Appropriate Location of a Wastewater Treatment Plant, Case Study: Farouj City Wastewater Treatment Plant

Seyyed Amir Saeedi[1], Farhad Khamchin Moghaddam[2*] and Seyyed Naser Bashi Azghadi[3]

1- M.Sc. Student, Water and Hydraulic Structures Engineering, Islamic Azad University of Mashhad, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.
3- Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.
*Corresponding Author, Email: khamchinmoghadam.f@gmail.com

Received: 25/05/2021
Revised: 01/12/2021
Accepted: 30/12/2021
© IWWA

Abstract

One of the important issues along with water shortage and demand in cities is the issue of wastewater disposal and treatment. When it comes to wastewater and its treatment, the first thing that comes to mind is the discussion of the environment and its protection from pollution because wastewater is always a major polluting parameter in human and natural environment The construction of a wastewater treatment plant is a civil-environmental activity whose main purpose is the proper and hygienic disposal of wastewater, which, if neglected, will have irreparable consequences. The first effective step for the construction of these facilities is to identify their suitable location, which is done by considering various factors and criteria. For this purpose, multi-criteria decision making (MCDM) methods have been used. Here, according to the existing conditions, hierarchical decision making (AHP) and Delphi (delphi) decision methods have been selected to solve the problem. In this research, Farooj city, which is one of the cities of North Khorasan province, was studied for the construction of a wastewater treatment plant.

Keywords: Delphi, Hierarchical Analysis, Location, Wastewater Treatment Plant.

مقاله پژوهشی

استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در انتخاب موقعیت مناسب تصفیه‌خانه فاضلاب، مطالعه موردی: تصفیه‌خانه شهر فاروج

سید امیر سعیدی[۱]، فرهاد خام چین مقدم[۲*] و سید ناصر باشی ازغدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.
۲- استادیارگروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، موسسه آموزش عالی آزاد خاوران، مشهد، ایران
*نویسنده مسئول، ایمیل: khamchinmoghadam.f@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۹/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۹
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

یکی از مسائل مهم در کنار کمبود و تقاضای آب در شهرها، مسئله دفع فاضلاب و تصفیه آن است. زمانی که از فاضلاب و تصفیه آن سخن به میان می‌آید، اولین موضوعی که در ذهن تداعی می‌کند بحث محیط‌زیست و حفظ آن از آلوده شدن است؛ چراکه فاضلاب خام همواره به‌عنوان یک آلاینده اصلی در محیط‌های انسانی و طبیعی مطرح بوده است. احداث تصفیه‌خانه فاضلاب یک فعالیت عمرانی-محیط‌زیستی است که هدف اصلی آن دفع صحیح و بهداشتی فاضلاب‌های تولیدی است و در صورت بی‌توجهی، عواقب جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت. اولین گام مؤثر برای احداث این تأسیسات، شناسایی مکان مناسب احداث آن‌ها است که معمولا با در نظر گرفتن عوامل و معیارهای مختلفی صورت می‌گیرد. اهمیت و دامنه اثر این معیارها در تعیین مکان نهایی تصفیه‌خانه فاضلاب تأثیرگذار است. برای این منظور می‌توان از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) استفاده کرد. در تحقیق حاضر معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در شهرستان فاروج استان خراسان شمالی براساس روش دلفی تعیین می‌شود. مطابق با نظر خبرگان معیارهای اقتصادی-اجتماعی، محیط‌زیستی، زمین‌شناسی و فنی و تکنولوژی و زیرمعیارهای آن‌ها با روش AHP وزن‌دهی شده است. در تحلیل آماری این بررسی‌ها از نرم‌افزار SPSS و Expert Choice استفاده شده است. درنهایت بهترین مکان برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب با درنظر گرفتن معیارهای مذکور در این شهرستان انتخاب شد.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی، تصفیه‌خانه فاضلاب، تحلیل سلسله مراتبی، دلفی.

۱- مقدمه

افزایش جمعیت شهرها و درنتیجه بالا رفتن میزان مصرف آب، سبب تولید روزافزون فاضلاب شده است که خود موجب بروز اشکالات و نارسایی‌هایی فزاینده در جوامع شهری و حتی روستایی کشورمان شده است. این اشکالات عموماً شامل مسائل بهداشتی و آلودگی محیط، به‌هم خوردن رابطه طبیعی بیلان آب و بالا آمدن سطح آب‌های زیرزمینی و آلودگی منابع مختلف پذیرنده است. با توجه به این‌که هر مترمکعب فاضلاب حدود ۴۰ مترمکعب آب را به‌شدت آلوده می‌نماید، لذا درصورتی‌که فاضلاب‌های تولیدی جمع‌آوری و تصفیه نشوند، منبع آلودگی عظیمی خواهد بود (حافظی و همکاران، ۱۳۸۶). امروزه پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌عنوان یک منبع جدید و دائمی برای برخی مصارف موردتوجه کارشناسان قرارگرفته است. درمجموع می‌توان گفت که تصفیه فاضلاب در مناطق شهری و صنعتی ضمن حفظ پاکیزگی محیط‌زیست، باعث بهره‌برداری مؤثر از پساب تصفیه‌شده، می‌شود. در همین راستا، یکی از ملزومات بازیافت اصولی، مکان‌یابی محل مناسب برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب است. با توجه به مباحث مطرح‌شده، شهر فاروج که در این تحقیق موردبررسی قرار می‌گیرد از این امر مستثنا نبوده و با توجه به روند افزایشی تلفات آب، محدودیت‌های توپوگرافی منطقه‌ای و محدودیت‌های سرزمینی اعم از کمبود زمین برای تخصیص به تصفیه‌خانه فاضلاب، بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی، افزایش جمعیت، لزوم اجرای یک طرح مقرون‌به‌صرفه و نیز مکان‌یابی درست ایستگاه‌های تصفیه‌خانه را در آن حائز اهمیت کرده است. علاوه‌بر آن به‌دلیل شرایط اقلیمی، کمبود بارندگی و کمبود منابع آبی در شهرستان فاروج، لزوم استفاده از پساب تصفیه‌شده دوچندان است. در همین راستا، اولین گام مؤثر برای ایجاد تصفیه‌خانه فاضلاب، شناسایی مناطق مناسب برای احداث آن است که ضرورت این تحقیق را مشخص می‌نماید.

مطالعه مکان‌یابی به‌صورت رسمی، با مطالعه (Weber et al. 1929) با عنوان بررسی مکان‌یابی صنعتی بر روی چگونگی تعیین مکان یک منبع برای کمینه‌سازی فاصله بین آن و تعداد متقاضی، در دانشگاه شیکاگو شروع شد. مطالعات Hakimi (1964) به‌صورت رسمی‌تر با تلاش برای مکان‌یابی مراکز انتخاب راه مناسب در شبکه ارتباطی و ایستگاه‌های پلیس در جاده‌ها ادامه یافت. از اواسط سال ۱۹۶۰ مسئله مکان‌یابی به‌صورت مطالعاتی رشد کرد. Owen et al. (1998) اشاره کردند که تا این زمان اکثر مسائل اساسی مکان‌یابی منابع و مراکز قالب ایستا و پویا، فرمول‌سازی شده است. Sener et al. (2006) در تحقیقی محل دفن پسماند در حومه یکی از شهرهای آمریکا را تعیین کردند. Dursun (2015) تحقیق جامعی بر مبنای پیدا کردن معیارهای دخیل در مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب با استفاده از روش‌های چند متغیره (MCDM)انجام داد. Macuada (2016) از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای توسعه یک مدل تصمیم‌گیری چند معیاره جدید بر مبنای قضاوت‌های کارشناسانه برای ارزیابی معیارهای دخیل در سیستم تصفیه‌خانه آب و تصفیه‌خانه فاضلاب یک منطقه شهری در کشور شیلی ارائه داد. Abdalla and El Khidir (2017) بهترین مکان تصفیه‌خانه فاضلاب را با استفاده از نرم‌افزار RS و GIS و تحلیل چندمعیاره MCA در کشور سودان پیشنهاد داد.

در ایران، بحث مکان‌یابی از طریق تلفیق سامانه‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با کمک GIS توسط پرهیزکار (۱۳۷۶) تحت عنوان مکان‌گزینی مراکز خدمات شهری مطرح شد. شریفی و همکاران (۱۳۸۶) یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری بر مبنای مدل‌های ارزیابی مکانی چند متغیره برای مکان‌یابی محل دفن پسماندها ارائه نمودند. ناصری و همکاران (۱۳۸۶) در قالب یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی و براساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مکان مناسب دفن پسماندهای ویژه را در بین شهرهای فامنین و قهاوند مکان‌یابی نمودند. هم‌چنین در تحقیق حافظی و همکاران (۱۳۸۶) مکان‌یابی دفن پسماندهای ویژه در استان خراسان رضوی با استفاده از معیارهای مناسب در طی دو مرحله با استفاده از GIS و روش وزن‌دهی ساده انجام‌شده و نهایتاً مکان‌های مستعد معرفی‌شده‌اند. نشاسته‌گر و همکاران (۱۳۸۸)، با استفاده از تلفیق GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی مناسب‌ترین مکان برای احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب غیرمتمرکز را انتخاب کردند. Shahmoradi and Isalou (2013) با استفاده از منطق فازی و روش چندمعیاره (MCDM) توانستند بهترین مکان احداث تصفیه‌خانه فاضلاب را در شهر سنندج مشخص کنند. Moghaddas et al. (2013) در منطقه فلاورجان استان اصفهان با استفاده از تلفیق نرم‌افزار GIS و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) توانستند به یک چهارچوب امتیازبندی معیارها و زیرمعیارها برای احداث سایت تصفیه‌خانه فاضلاب برسند که درنهایت نتایج آن با روش‌های TOPSIS و EIA مقایسه شد. Hadipour et al. (2016) از یک مدل MCDM مبتنی بر AHP به‌منظور یافتن بهترین گزینه برای استفاده از فاضلاب در ایران به کار گرفته‌شده است.

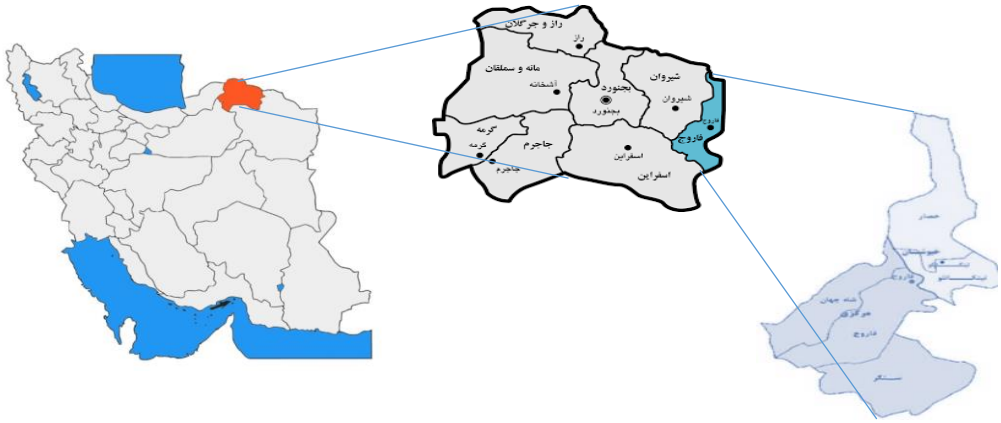
در این تحقیق با استفاده از روش دلفی با نظر خبرگان

معیارهای اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی، زمین‌شناسی و فنی-تکنولوژی بررسی شده و زیرمعیارهای مربوط به آن با روش AHP وزن‌دهی می‌شود. در نهایت با فزار SPSS و Expert Choice بهترین مکان تصفیه‌خانه فاضلاب انتخاب می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

شهرستان فاروج یکی از شهرستان‌های استان خراسان شمالی است که فاصله این شهر تا بجنورد یک‌صد کیلومتر و تا مشهد یک‌صد و هفتادوپنج کیلومتر است. رودخانه‌های اترک، اسفجیر، دربند و رود استاد از این شهر می‌گذرند. این شهر در تراز ارتفاعی ۱۱۸۱ تا ۱۱۹۹ متر بوده و جهت کلی شیب شهر از شرق به غرب و از جنوب به شمال است. جمعیت شهر فاروج تا سال ۱۴۲۰ حدود ۱۷۱۵۴ نفر پیش‌بینی‌شده است. شهر فاروج در حاشیه جاده اصلی مشهد-بجنورد قرار داشته و همه‌ساله گردشگران و زائران زیادی از این مسیر عبور می‌کنند؛ لذا عدم اثرگذاری محل تصفیه‌خانه بر موقعیت توریستی این شهر باید موردتوجه واقع شود (حافظی و همکاران، ۱۳۸۶). شکل ۱ موقعیت جغرافیای شهر فاروج را در ایران نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۲- روش تحقیق

مکان‌یابی فرایندی است که به ارزیابی محیط فیزیکی تأمین‌کننده شرایط و پشتیبانی از فعالیت‌های انسانی می‌پردازد. مکان‌یابی بهینه سعی دارد با قانونمند کردن شاخص‌ها و عوامل تأثیرگذار در تصمیم‌گیری و یافتن راه‌کارهای منطقی، تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان را در انتخاب مکان‌های مناسب برای انجام فعالیت‌ها یاری رساند. این عملیات بدون درنظر گرفتن روابط مکانی و ژئومتریک فضا نتایج نامناسبی به دنبال خواهد داشت (Shahmoradi and Isalou, 2013).

تحقیق حاضر در دو مرحله سازمان‌یافته است. در مرحله اول عوامل تعیین‌کننده بر تصمیم‌گیری مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاضلاب با استفاده از تکنیک دلفی شناسایی و مورد پایش قرارگرفتند و در مرحله دوم با استفاده از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی (AHP) وزن این عوامل محاسبه و برخی عوامل مؤثر در مکان‌یابی بهترین مکان برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب انتخاب شدند. سپس با استفاده از سیستم جغرافیایی GIS، ترکیب اوزان هریک از معیارها به‌صورت کمی و مکانی و با روی هم‌اندازی لایه‌ها انجام پذیرفت. مجموع این دو فرآیند یک چارچوب برای انتخاب مناسب‌ترین مکان برای احداث تصفیه‌خانه در شهر فاروج را ایجاد نموده است.

آنالیز تصمیم‌گیری چند معیاره در برابر مسائلی که تصمیم‌گیرنده با مقدار زیادی از اطلاعات و داده‌های پیچیده مکانی روبه‌رو است می‌تواند مورداستفاده واقع شود. اساس این روش برمبنای تقسیم مسائل تصمیم‌گیری به دیگر اجزای قابل‌فهم خردتر و سپس آنالیز هر بخش به‌طور جداگانه خواهد بود. در پایان نیز با تلفیق همه بخش‌ها در یک حالت منطقی گزینه برتر به‌عنوان جواب تصمیم‌گیری شناسایی می‌شود. با توجه به گوناگونی فاکتورهای مکانی ذکرشده در امر تصمیم‌گیری، در این مطالعه از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سامانه تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی استفاده‌شده است.

۲-۲-۱- مرحله اول، پایش معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در مکان‌یابی تصفیه‌خانه بر اساس روش دلفی

در گام نخست از مطالعات حاضر، برای دستیابی و اجماع نظرات اندیشمندان و مطالعات پیشین در خصوص فاکتورها و عوامل مؤثر در مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه با استفاده از تکنیک دلفی استفاده شده است. روش دلفی در تحلیل و استفاده از داده‌ها برای پاسخگویی به سؤال تحقیق از هر دو روش کمی و کیفی

استفاده می‌نماید. علاوه‌بر این به‌منظور جمع‌بندی و توصیف نظرات اعضای پانل و تعیین پارامترهای مرکزی و پراکندگی داده‌ها از روش‌های آمار توصیفی به‌کار گرفته شد، سپس با استفاده از نرم‌افزار SPSS و به کمک آلفای کرونباخ، پایایی پرسش‌نامه‌های دلفی موردسنجش و ارزیابی قرارگرفته است.

برای افزایش پایایی روش دلفی و افزایش کیفیت پژوهش به رهنمودهایی دقت و توجه کافی شده که عبارت‌اند از: کاربرد روش برای موضوع یا مشکلی خاص، انتخاب پاسخگویان و تخصص‌هایشان، طراحی پرسشنامه و اجرای آن، بازخورد از پاسخگویان و ایجاد سطحی از اجماع. مشهورترین ضریب اعتبار از طریق یک‌بار اجرای آزمون توسط کرونباخ ارائه‌شده است که به ضریب آلفای کرونباخ معروف است. این روش برای محاسبه هماهنگی درونی ابزار اندازه‌گیری ازجمله پرسشنامه به‌کار می‌رود. در این ابزار پاسخ هر سؤال می‌تواند مقادیر عددی مختلف را اختیار کند. ازجمله خصوصیات این ضریب، معدل همه ضرایب همبستگی است که با دونیمه کردن تست به طرق مختلف به‌دست می‌آید. این خاصیت مشکل تصادفی بودن سؤال‌های هر نیمه را حل می‌کند. ضریب آلفا، ضریب دقیق همسانی تمام‌مقیاس یا تست را در اختیار می‌گذارد. فرمول محاسبه‌ی آلفای کرونباخ به شرح رابطه (۱) است.

$$\alpha = \left(\frac{n}{n-1}\right) \times \left(1 - \frac{\sum s_i^2}{s_t^2}\right) \qquad (۱)$$

که S_i^2: واریانس نمرات هر زیرمجموعه و S_t^2: واریانس کل هستند.

معمولاً آلفای کمتر از ۰/۶ پایایی ضعیف، ۰/۶ تا ۰/۸ قابل‌قبول و بالاتر از ۰/۸ نشان‌دهنده پایایی بالا است. بدیهی است که هرچه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد بهتر است. در این تحقیق پس از جمع‌آوری داده‌ها از نمونه اولیه، داده‌ها وارد نرم‌افزار SPSS شد و ضریب آلفای کرونباخ محاسبه شد. در پرسش‌نامه دور نهایی دلفی، مقدار آلفا برابر ۰/۸۹۲ است که از مقدار ۰/۸ بزرگ‌تر است. معیارها و زیر معیارهای شناسایی‌شده برای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه بر پایه روش دلفی شناسایی شد که به شرح جدول ۱ قابل دسته‌بندی است.

جدول ۱- عوامل با پایایی قابل‌قبول در ارزیابی آزمون آلفای کرونباخ

معیار	زیر معیار	تعداد نمونه	تعداد سؤال‌ها	مقدار آلفای کرونباخ
ارزیابی فنی	طول خط انتقال	۲۰	۱	۰/۸۵۴
	وجود مسیل	۲۰	۱	۰/۹۰
	سیل گیر بودن محل پیشنهادی	۲۰	۱	۰/۹۳
	وجود موانع طبیعی و انسان‌ساخت	۲۰	۱	۰/۹۰
عوامل اقتصادی-اجتماعی	وجود راه‌های دسترسی و امکانات زیر بنایی	۲۰	۱	۰/۹۳
	تملک زمین	۲۰	۱	۰/۹۰
	هزینه اجرا و بهره‌برداری	۷	۱	۰/۹۵
	توجه به مسائل میراث فرهنگی	۲۰	۱	۰/۹۳
عوامل زمین‌شناسی (جغرافیایی)	شیب زمین و جنس خاک	۲۰	۱	۰/۹۰
	جهت باد	۲۰	۱	۰/۹۳
	زلزله‌خیزی منطقه	۲۰	۱	۰/۹۰
	عمق آب‌های زیرزمینی	۲۰	۱	۰/۹۳
عوامل محیط‌زیستی	پوشش گیاهی و جانوری	۲۰	۱	۰/۸۹
	فاضلاب خروجی تصفیه نشده	۷	۱	۰/۹۵
	زیبایی منظر	۲۰	۱	۰/۹۳

۲-۲-۲- مرحله دوم: طراحی چارچوب تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین مکان برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب فاروج

فرآیند تصمیم‌گیری، انتخاب یک گزینه از میان گزینه‌های موجود برای حل یک مسئله مشخص است. برای پاسخ به مسئله پیچیده‌ای نظیر انتخاب بهترین مکان برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب نیاز به یک روش تصمیم‌گیری با ویژگی‌های خاصی است. با توجه به معیارهای مختلفی که در فرآیند مکان‌یابی بیان شد نیاز به یک مدل تصمیم‌گیری چند معیاره، کاملاً احساس می‌شود. هم‌چنین باید توجه داشت که بعضی از معیارها کاملاً متعارض هستند و تنها با استفاده از یک روش مناسب می‌توان این تعارض‌ها را کنترل کرد. لذا ارائه یک شیوه موفق که بتواند تمام معیارهای مؤثر در مکان‌یابی را درنظر بگیرد ضروری است. این عوامل شامل دودسته عوامل ملموس ازجمله ارزیابی فنی، عوامل محیط‌زیستی و عوامل زمین‌شناسی و جغرافیایی و عوامل ناملموس ازجمله عوامل اقتصادی و اجتماعی است. فرآیند

تصمیم‌گیری باید واضح، دارای گام‌های پیوسته متوالی و دربرگیرنده نتایج کلی باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- پیاده‌سازی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در پارامترهای مکان‌یابی تصفیه‌خانه

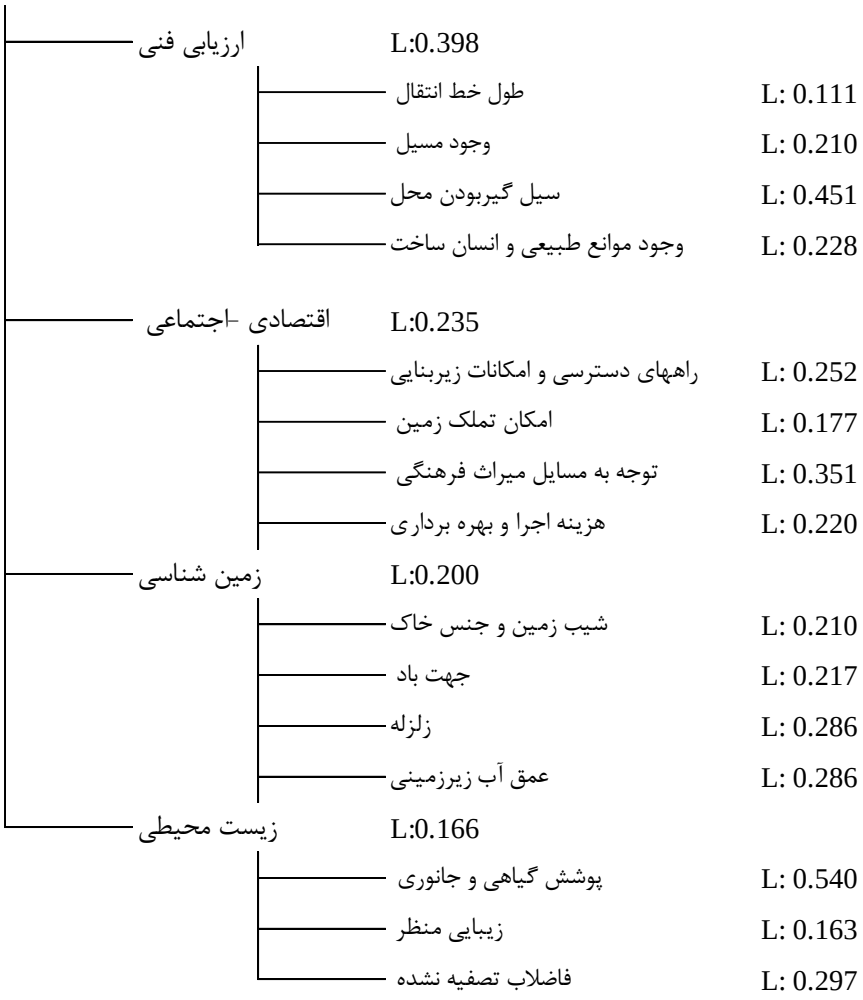
در اولین گام، ساختار سلسله مراتبی مربوط به موضوع مشخص شد که شامل هدف، معیارها و زیر معیارهایی است که برای رسیدن به هدف تأثیرگذار هستند. این مرحله، مهم‌ترین مرحله از تحلیل سلسله مراتبی AHP است و بدون درنظر گرفتن ضرایب اهمیت و امتیاز گزینه‌ها نشان داده می‌شود. هر یک از معیارها به چند زیرمعیار برحسب ماهیت معیارها تقسیم‌شده‌اند و بدین ترتیب ۳ سطر (به‌جز سطر گزینه‌ها) شامل هدف، معیارها، زیر معیارها در سلسله‌مراتب تحلیلی به شرح شکل ۲ جای گرفته‌اند.

شکل ۲- درخت تصمیم در ارزیابی نهایی گزینه‌ها در ساختار سلسله‌مراتب مدل AHP در فرآیند مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج

۳-۲- طراحی جداول مقایسات زوجی

هدف از انجام مرحله دوم، تعیین اوزان معیارهای نهایی مرحله اول و انتخاب اوزان عوامل مؤثر (اولویت‌بندی آن‌ها) و تأثیر آن‌ها در انتخاب بهترین گزینه برای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه است. بدین منظور با استفاده از درخت تصمیم نهایی تحقیق جداول مقایسات زوجی تهیه شد. با توجه به تعداد زیاد معیارها و زیرمعیارها (۴ معیار کلی و ۱۵ زیر معیار) و درنظر گرفتن حداقل تعداد مقایسات زوجی موردنیاز، به‌جای پرسش‌های معمولی از جداول ماتریس، برای مقایسات زوجی استفاده شد. در طراحی جدول مقایسات زوجی از موارد مشابه در سایر تحقیقات و نظرات اساتید استفاده‌شده است. بعد از طراحی نمونه اولیه جداول مقایسات زوجی و ارائه آن به گروه تحقیق و جمع‌آوری نظرات اصلاحی آن‌ها، مشکلات موجود برای تکمیل این جدول‌ها برطرف شد. درنهایت به دلیل ساختار خاص این جدول‌ها و منطق حاکم بر آن، نیاز بود که محقق هنگام تکمیل جدول مقایسات زوجی، در کنار کارشناسان حضورداشته و ضمن تشریح آن، کلیه موارد برای تکمیل آن را آموزش داده و هرگونه سؤال و ابهام را رفع کند. در پایان با ورود امتیازات جمع‌بندی شده در نرم‌افزار Expert

Choice محاسبات تحلیل سلسله مراتبی AHP انجام شد. شکل ۳ درخت تصمیم‌گیری در تحلیل را نشان می‌دهد. در ادامه امتیازات به‌دست‌آمده در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، به‌صورت کمی و مکانی در نرم‌افزار GIS و به‌عنوان وزن لایه‌ها وارد شد و سپس تحلیل مکانی و کمی زیر معیارها در GIS انجام شد.



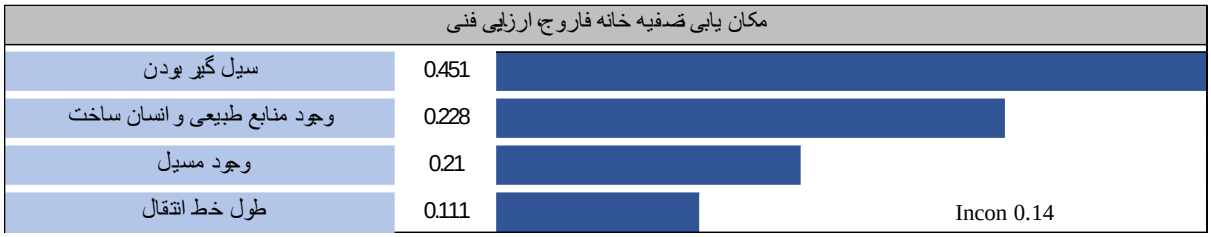
شکل ۳- نمودار درختی تحلیل سلسله مراتبی AHP در نرم‌افزار Expert Choice به‌همراه وزن‌های نهایی

براساس شکل ۴، معیار ارزیابی فنی با امتیاز ۳۹/۸٪ بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده و پس از آن مجموعه عوامل اقتصادی و اجتماعی با امتیاز ۲۳/۵٪ در جایگاه دوم قرارگرفته است. عوامل زمین‌شناسی ۲۰٪ و عوامل محیط‌زیستی با امتیاز ۱۶/۶٪ به‌ترتیب در جایگاه سوم و چهارم قرار دارند. در ادامه ماتریس‌های مقایسات زوجی معیارهای اصلی و زیرمعیارهای آن به‌شرح زیر بررسی‌شده است:

	ارزیابی فنی	اقتصادی-اجتماعی	زمین شناسی	زیست محیطی
ارزیابی فنی		200	500	100
اقتصادی-اجتماعی			300	100
زمین شناسی				400
زیست محیطی	Incon 0.42			

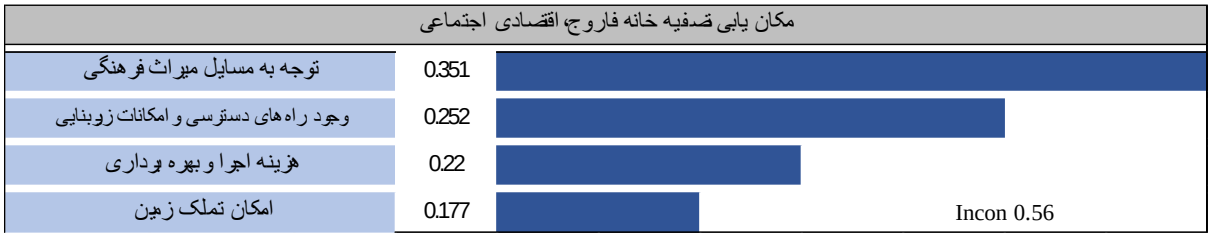
شکل ۴- ماتریس مقایسه زوجی معیارهای اصلی نسبت به هم با توجه به هدف مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب

مطابق شکل ۵، مقایسه زوجی زیرمعیارها در معیار اصلی ملاحظات فنی و تکنولوژی حاکی از برتری آیتم سیل‌گیر بودن محل با امتیاز ۴۵/۱٪ نسبت به بقیه زیرمعیارها است. هم‌چنین زیرمعیار وجود منابع طبیعی و انسانی با امتیاز ۲۲/۸٪ در درجه دوم ارجحیت مکان‌یابی قرار دارد.



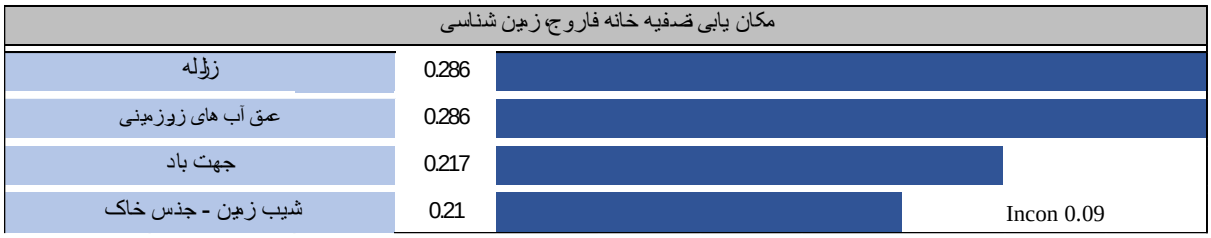
شکل ۵- نتیجه ارزیابی ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارها در معیار اصلی ملاحظات فنی و تکنولوژی

براساس شکل ۶، مقایسه زوجی زیرمعیارها در معیار اصلی عوامل اقتصادی و اجتماعی نشان می‌دهد که زیر معیار توجه به مسائل میراث فرهنگی با امتیاز ۳۵/۱٪ در بالاترین درجه ارجحیت قرار داشته و پس‌ازآن وجود راه‌های دسترسی و امکانات زیربنایی با امتیاز ۲۵/۲٪ در مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج اهمیت دارد. زیرمعیار هزینه اجرا و بهره‌برداری نیز که یکی از مهم‌ترین معیارها برای کارفرمایان است با امتیاز ۲۲٪ در ملاحظات مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاضلاب فاروج منظور شده است.



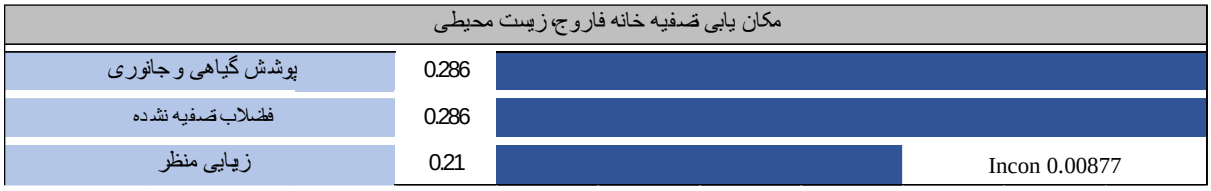
شکل ۶- نتیجه ارزیابی ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارها در معیار اصلی عوامل اقتصادی و اجتماعی

نتیجه ارزیابی ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارها در معیار اصلی عوامل زمین‌شناسی در شکل ۷ نشان می‌دهد که توجه به زیرمعیارهای زلزله و عمق آب‌های زیرزمینی با امتیاز ۲۸/۶٪ ارجحیت بالایی در مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه دارد. هم‌چنین عامل جهت باد و شیب زمین نیز با امتیازی حدود ۲۱ درصد در جایگاه دوم و سوم اهمیت قرار دارند.



شکل ۷- نتیجه ارزیابی ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارها در معیار اصلی عوامل زمین‌شناسی

شکل ۸ نشان‌دهنده اهمیت بالای توجه به پوشش گیاهی و جانوری با امتیاز ۵۴٪ در مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاضلاب فاروج است. همچنین آیتم فاضلاب خروجی تصفیه نشده و یا رهاسازی آن در طبیعت با امتیاز ۲۹/۷٪ در جایگاه دوم ارجحیت معیارهای زیست‌محیطی جای دارد.

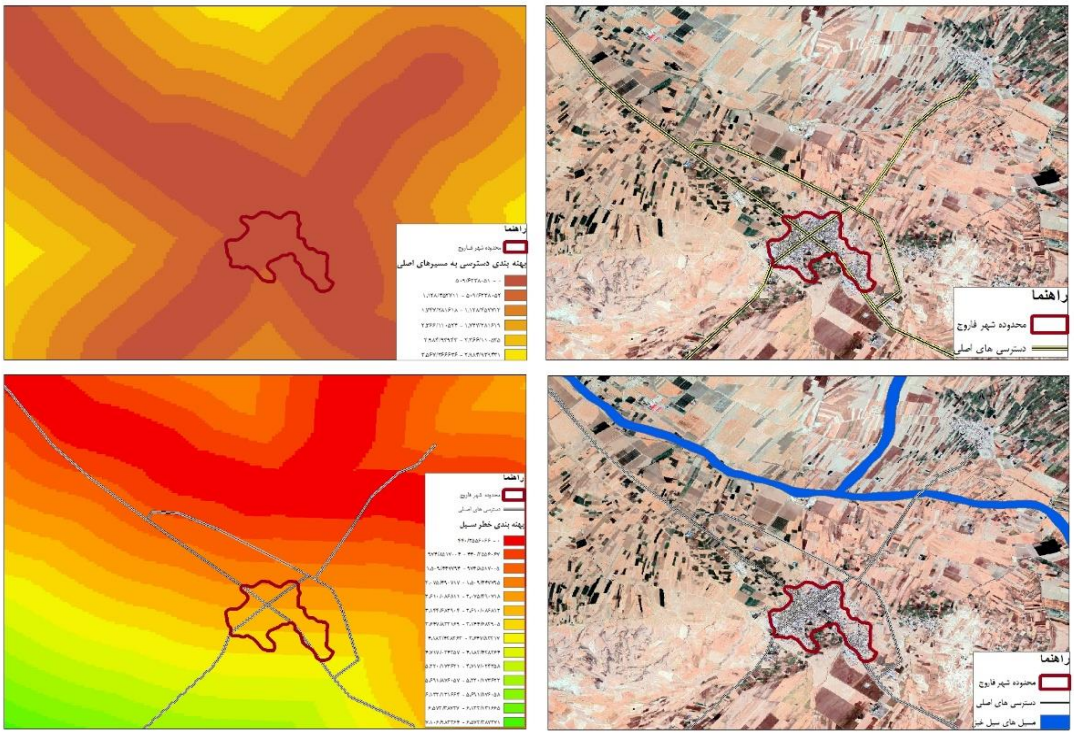


شکل ۸- نتیجه ارزیابی ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارها در معیار اصلی ملاحظات محیط‌زیستی

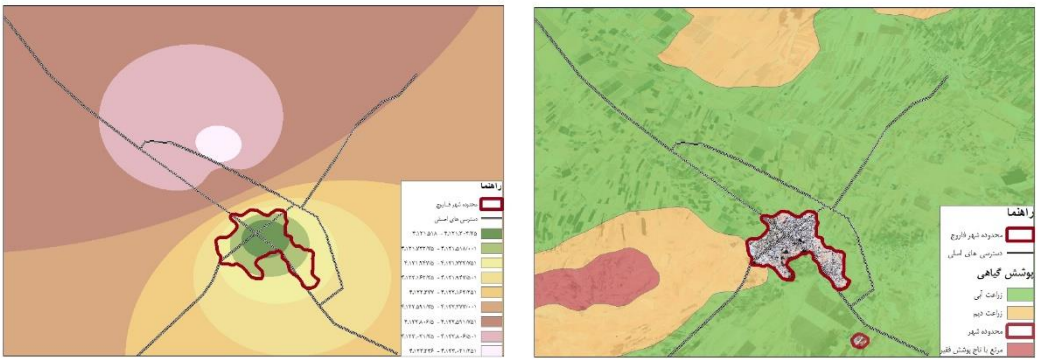
۳-۳- هم‌پوشانی لایه‌ها در محیط GIS و اولویت‌بندی اراضی

در پایان فرآیند مکان‌یابی در مدل GIS همپوشانی نقشه علاوه بر وزن‌دهی به واحدها در هر لایه اطلاعاتی، به هر لایه براساس ارزش خود و میزان تأثیرگذاری بر پهنه‌های پرخطر دارد وزن داده می‌شود. این مدل به‌دلیل وزن‌دهی به واحدهای هر نقشه انعطاف‌پذیری و دقت بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد. ضمن این‌که قادر به تفکیک به‌ترتیب اولویت‌ها براساس ضریب نهایی

به‌دست‌آمده از مدل تحلیل سلسله مراتبی AHP نیز هست. تلفیق لایه‌های اطلاعاتی بدون درنظر گرفتن اهمیت هر لایه در آنالیز مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج نمی‌تواند ارزش واقعی لایه‌های اطلاعاتی را در تلفیق دخالت دهد و واحدهای با ارزش متفاوت در یک کلاس قرار می‌گیرند. در ادامه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمونه‌هایی از اطلاعات مکانی باقابلیت کمی‌سازی در GIS براساس آن‌چه گفته شد آمده است. پس از به‌دست آوردن امتیاز نهایی هر زیرمعیار، هم‌پوشانی لایه‌های موردنظر توسط تابع Overlay در منوی Analyst tools Spatial در محیط GIS صورت می‌پذیرد.



شکل ۹- نمونه‌ای از اطلاعات مکانی کمی‌سازی شده در GIS (فرآیند مدل‌سازی مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج)

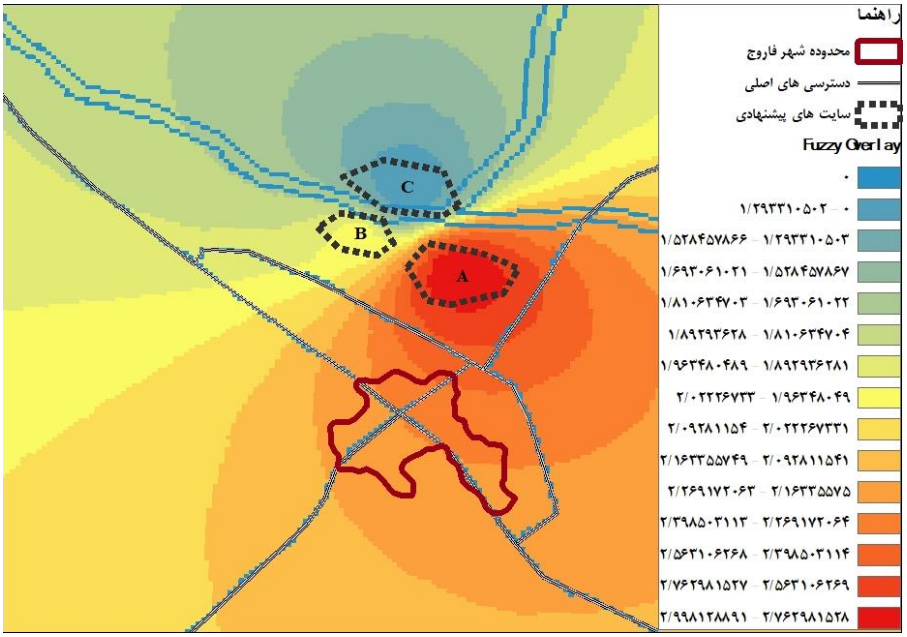


شکل ۱۰- نمونه‌ای از اطلاعات مکانی کمی سازی شده در GIS (فرآیند مدل‌سازی مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج)

آن‌چه در انجام آنالیزهای به‌کار رفته در این پروژه برای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج قابل‌ذکر است؛ آن است که در نتایج حاصل از این آنالیزها، از عملگرهای منطقی دو دویی که محدوده موردمطالعه را به مناطقی با ارزش (۱) و بدون ارزش (۰) برای استقرار سایت تصفیه‌خانه استفاده‌نشده است. بلکه در این پروژه از پردازش‌های ریاضیات فازی که درجه‌های مطلوبیت محدوده‌ها را در لایه‌های مختلف درنظر می‌گیرند استفاده شده و نقشه‌های خروجی به‌صورت رنگی به نقاط مختلف درجه‌ای از مناسبت (Degree of Suitability) را نسبت داده است که مقدار آن بین صفر و یک از نقطه‌ای به نقطه دیگر، تغییر می‌نماید.

نقاط با درجه مناسبت مکانی ۱ (Spatial Suitability) مناسب‌ترین پهنه‌ها برای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج است. بدین‌ترتیب با هم‌پوشانی لایه‌ها بهترین پهنه‌ها برای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج اولویت‌گذاری می‌شود. خروجی

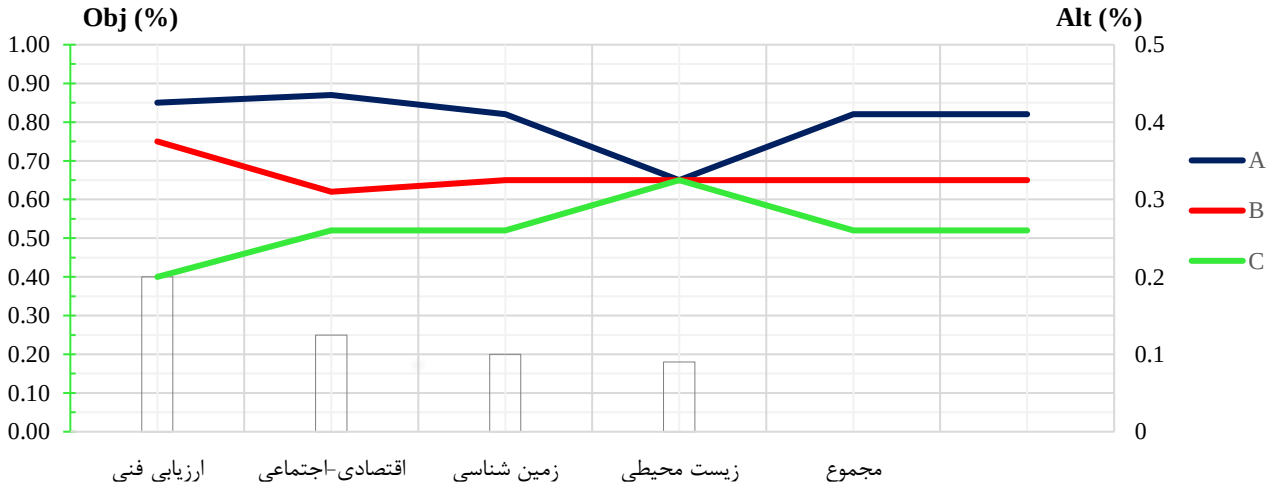
به‌دست‌آمده در تابع OVERLAY در ابتدا به‌صورت Overlay_Union است که درنهایت در سیمبولوژی به شکل POLYGON هایی که حوزه‌های همگن و مناسب‌ترین سایت‌ها برای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج تبدیل می‌شود.



شکل ۱۱- اعمال توابع OVERLAY در هم‌پوشانی داده‌ها و اجرای گام نهایی مدل‌سازی مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج

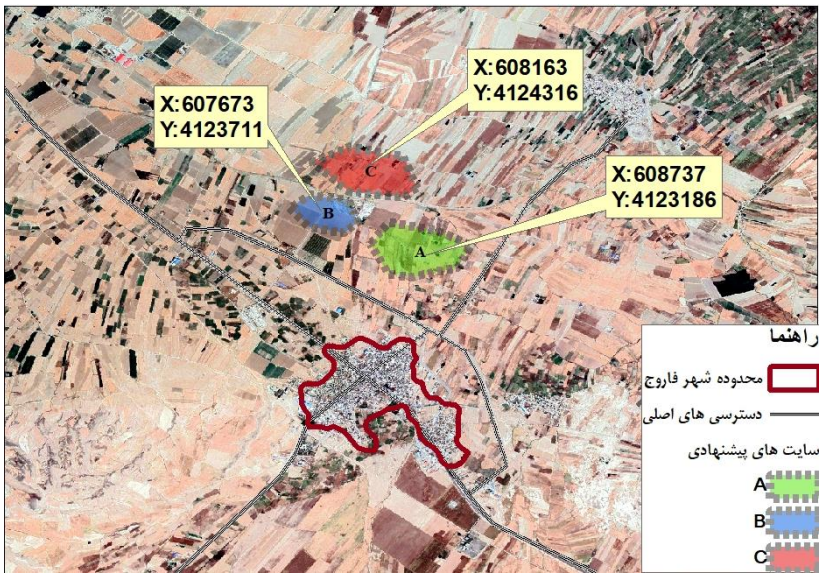
۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشهود است، هریک از گزینه‌های پیشنهادی برای احداث سایت تصفیه‌خانه فاضلاب در تمام معیارها و زیر معیارهای موردبحث، موردسنجش و پایش قرارگرفته و براساس برآیند نهایی این سنجش‌ها امتیاز نهایی هر گزینه مشخص‌شده است. سایت A در کلیه معیارهای اصلی نسبت به دو سناریوی پیشنهادی دیگر دارای برتری است. در عوامل محیط‌زیستی هر سه سایت تقریباً مشابه یکدیگر ارزیابی‌شده‌اند. پس از سایت A، سایت B نیز در ارزیابی‌ها رتبه بالایی را به‌خود اختصاص داده است. در ادامه با کمک تحلیل مکانی سازی شده معیارها سناریوی برتر انتخاب خواهد شد.



شکل ۱۲- تجزیه و تحلیل حساسیت عملکرد معیارهای اصلی در ارتباط با گزینه‌ها

موقعیت و مختصات جغرافیایی سایت‌های پیشنهادی در شکل ۱۳ قابل‌مشاهده است. سایت انتخابی A به لحاظ خصوصیات و فاکتورهای کمی و کیفی نسبت به گزینه پیشنهادی دیگر دارای برتری بوده و هم‌چنین در برآیند مکانی‌سازی معیارها و عوامل در GIS در شکل ۱۱ نسبت به سایر پهنه‌ها از امتیاز بالاتری برخوردار بود. لذا به‌عنوان موقعیت مناسب برای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۳- مشخص کردن موقعیت پهنه‌های ارزیابی‌شده در مدل‌سازی مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاروج

پیشنهادهای پژوهش حاضر براساس تجزیه و تحلیل داده‌های حاصله از جامعه آماری (خبرگان) و به‌کارگیری مدل تحلیل سلسله مراتبی AHP در انتخاب بهترین مکان برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب فاروج صورت گرفته است. برای تغییر وضعیت موجود از یک وضعیت انفعالی به وضعیت مطلوب و تقویت نظام تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی در حوزه مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب، در چارچوب اهداف و انتظارات می‌توان راه‌کارهای مطرح شده زیر را پیشنهاد داد که اهم این راه‌کارها عبارت‌اند از:

- استفاده از دانش، تجربیات و توانمندی‌های افراد متخصص مانند اساتید دانشگاهی و هم‌چنین افراد شاغل در مجموعه ارگان‌هایی نظیر شرکت آب و فاضلاب، دفتر فنی و عمرانی فرمانداری، اداره میراث فرهنگی، سازمان حفاظت از محیط‌زیست، شهرداری و ... برای شناسایی دقیق و هدفمند عوامل داخلی (نقاط قوت و ضعف) و عوامل خارجی (تهدیدها و فرصت‌ها)؛
- تدوین نظام جامع و راهبردی برای تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری در فرآیندهای مختلف سازمانی؛
- احصا و تدوین افق و چشم‌انداز مقوله مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای شرکت‌های آب و فاضلاب و دفاتر فنی و عمرانی فرمانداری و شهرداری‌ها؛
- تدوین و ارائه برنامه عملیاتی برای اجرای برنامه مکان‌یابی تا احداث سایت تصفیه‌خانه فاضلاب آینده در مدت‌زمان مشخص و معین؛
- ایجاد فرآیند پایش مستمر فرآیندهای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه فاضلاب از پیشنهاد اولیه مطرح‌شده تا اجرای نهایی؛
- ایجاد یک مجموعه پایگاه داده‌ای مرتبط با فرآیندهای مکان‌یابی و عوامل مؤثر در این امر و ارائه گزارش‌ها و تحلیل‌های مناسب برای سطوح مختلف مدیریتی سازمان؛
- استفاده از شیوه‌ها و فناوری‌های جدید متناسب با فرآیندها در هنگام تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی برای مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه با موفقیت و بهره‌وری بیشتر؛
- ایجاد یک پایگاه دانش مناسب و کارآمد برای بهره‌گیری از نظارت خبرگان حوزه؛
- بررسی و شناسایی دقیق و هدفمند شرکت‌های صلاحیت‌دار برای عقد قرارداد مکان‌یابی؛
- استفاده از دانش و تجربیات سازمان‌های مشابه در زمینه مکان‌یابی کاربری‌های عمده و کلان‌شهری و منطقه‌ای برای کارایی و صرفه‌جویی هزینه‌ای بیشتر؛
- ایجاد یک سیستم نظام پیشنهادهای ذی‌نفعان و ذی‌نفوذان در زمینه مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه برای بهره‌مندی از نظرات مؤثر و مفید کلیه نیروهای باتجربه و فعال در این زمینه؛
- توجه به مسائل اقتصادی مکان‌یابی سایت تصفیه‌خانه؛
- به‌کارگیری توانمندی شرکت‌های مشاور برای نظارت بر فعالیت‌های مکان‌یابی؛
- تلاش برای ارتقای سطح تفکر استراتژیک مدیران و کارشناسان درگیر در امر مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در راستای ترسیم درست استراتژی‌های فعلی و هم‌چنین دورنمای جانمایی کاربری‌های شهری و منطقه هم‌سو با جهات رشد و توسعه شهر و منطقه.

۷- مراجع

آزادی، ن.، و میرحسینی، س.م.ع.، (۱۳۹۹)، "تحلیل وضعیتِ اماکن ورزشی جهت مکان‌یابی و استقرار نظام سلسله مراتبی صنفی ورزش در شهرها (نمونه موردی: شهر شیراز)"، *برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۱۰(۳۷)، ۱۷۹-۱۹۲.

پرهیزگار، ا.، (۱۳۷۶)، "ارائه الگوی مناسب مکان‌گزینی مراکز خدمات شهری با تحقیق در مدل‌ها و GIS شهری"، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

حافظی، ن.، حاجی‌زاده، ه.، شهریاری، ر.، و امانیان، م.، (۱۳۸۶)، "مکان‌یابی دفن پسماندهای ویژه استان خراسان رضوی"، *مجموعه مقالات پنجمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران*، تهران، ایران.

ناصری،خ.، زرکش، م.، و عزیزخانی، م.ج.، (۱۳۸۶)، "تلفیق MCDM و GIS در مکان‌یابی محل دفن پسماندهای ویژه با تأکید بر منابع آب"، *بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین*، تهران، ایران.

نشاسته‌گر، م.، تجریشی، م.، و ابریشم‌چی، ا.، (۱۳۸۸)، "جانمایی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در کلان‌شهرها به کمک تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS (مطالعه موردی: شهر تهران)"، *سومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد اصلاح الگوی مصرف*، تهران، ایران.

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", *Journal of Geosciences*, 1, 94-107.

Dursun, M., (2015), "An integrated approach for the evaluation of wastewater treatment alternatives", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer science (WCECS). San Francisco, USA.*

Hadipour, A., Rajaee, A., Hadipour, V., and Seidirad, S., (2016). "Multi-criteria decision-making model for wastewater reuse application: a case study from Iran", *Desalination and Water Treatment*, 57(30) 13857-13864.

Macuada, C., Alarcón, R., and Oddershede, A., (2015), "Multi-criteria assessment to automate water treatment plants using the analytical hierarchy process", *Journal for Global Business Advancement*, 8(2), 236-246.

Mansouri, Z., Moghaddas, N.H., and Dahrazma, B., (2013), "Wastewater treatment plant site selection using AHP and GIS: A case study in Falavarjan, Esfahan", *Geopersia*, 3(2), 63-72.

Şener, B., Süzen, M.L., and Doyuran, V., (2006), "Landfill site selection by using geographic information systems", *Environmental Geology*, 49(3), 376-388.

Shahmoradi, B., and Isalou, A.A., (2013), "Site selection for wastewater treatment plant using integrated fuzzy logic and multicriteria decision model: A case study in Kahak", *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 1(1), 51-61.

Owen, S., H., and Daskin, M.S., (1998), "Strategic facility location: A review", *European Journal of Operational Research*, 111(3), 423-447.

Weber, V., and Friedrich, C.J., (1929), *Alfred Weber's theory of the location of industries*, The University of Chicago Press, Chicago, Illinois.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.