



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Evaluation of Residential Waste Disposal Sites: From Planning to Practice (Case Study: Saqqez County)

Mehrnoosh Ghadimi^{1*} | Abbas Derakhshan² | Kamyar Emami³ | Mohammadali Kiani⁴

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, University of Tehran, Iran. E-mail: ghadimi@ut.ac.ir

2. Department of Physical Geography, University of Tehran, Iran. E-mail: abbas.darakhshan@ut.ac.ir

3. Department of Physical Geography, University of Tehran, Iran. E-mail: emami.kamyar@ut.ac.ir

4. Department of Political Geography, University of Tehran, Iran. E-mail: keyani@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received: 26 May 2026

Revised: 21 July 2026

Accepted: 18 July 2026

Published: 28 August 2026

Keywords:

Aquifer vulnerability,
Multi-criteria decision analysis,
MCDA,
Landfilling,
Karst,
PIPRECIA.

ABSTRACT

Objective: Given the high vulnerability of aquifers and the pronounced geological heterogeneity of karst environments, optimal waste management in such regions represents one of the most challenging areas of environmental planning. This study aimed to identify suitable landfill sites in the karst terrain of Saqqez County using an integrated Geographic Information System (GIS) and PIPRECIA multi-criteria decision-making approach.

Materials and Methods: A total of thirteen influential criteria, encompassing geomorphological, hydrogeological, geological, and anthropogenic factors, were identified and standardized using fuzzy membership functions to ensure comparability. Criterion weighting was performed using the PIPRECIA method, which minimizes cognitive bias and reduces the complexity of pairwise comparisons while yielding stable and reliable weights. The resulting weighted layers were integrated within a GIS environment using a Weighted Overlay approach. Model validation was conducted using 30 independent ground control points collected via GPS.

Results: The weighting analysis indicated that karst development (0.1693), lithology (0.1210), and distance from faults (0.0923) exert the greatest influence on landfill suitability, highlighting the dominant role of subsurface structural controls in environmental vulnerability. The final suitability map revealed that highly suitable and suitable zones collectively cover 761 hectares (17.2%), while moderately suitable areas account for 475 hectares (10.7%). In contrast, unsuitable and highly unsuitable zones dominate the study area, covering 3,190 hectares (72.1%).

Conclusion: The proposed approach provides a robust decision-support tool for reducing uncertainty in karst terrains of Iran. The findings demonstrate that landfill siting in Saqqez without adequate consideration of seismotectonic conditions, karstification processes, and hydrogeological characteristics may result in rapid and irreversible contamination of aquifers.

Cite this article: Ghadimi, M.; Derakhshan, A.; Emami, K. & Kiani, M. (2026). Evaluation of Residential Waste Disposal Sites: From Planning to Practice (Case Study: Saqqez County). *Environmental Hazards Management*, 13 (2), 95-112. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.415280.939>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.415280.939>

Introduction

Municipal and industrial solid waste represents one of the major sources of environmental pollution and ecosystem degradation worldwide (Hejazi & Zangeneh-Tabar, 2025). Rapid urbanization, population growth, and changing consumption patterns have significantly increased waste generation rates, creating substantial challenges for sustainable environmental management and urban planning (Wu et al., 2015). Consequently, effective waste management has become a critical responsibility for local authorities, requiring considerable financial and technical resources for waste collection, transportation, treatment, and final disposal (Saghaei et al., 2023).

Among the available waste management strategies, sanitary landfilling remains one of the most widely applied methods for final waste disposal.

Karst aquifers are characterized by high permeability, extensive fracture networks, sinkholes, and well-developed underground drainage systems, making them highly susceptible to contamination. Pollutants introduced into karst terrains can rapidly migrate through subsurface conduits and fractures, resulting in widespread and often irreversible groundwater degradation. Previous investigations have highlighted the significant influence of karstification processes on groundwater vulnerability and water-resource hazards. For instance, Ghadimi et al. demonstrated that karst aquifers in western Iran exhibit high susceptibility to contamination due to their hydrogeological characteristics and rapid groundwater flow pathways (Ghadimi et al., 2023). Similarly, Ghadimi et al. reported that karstification significantly affects water-resource hazard management and groundwater quality through changes in the physicochemical properties of water (Ghadimi et al., 2022).

In addition to hydrogeological factors, geomorphological and climatic conditions play important roles in environmental suitability assessments. Ghadimi et al. showed that morphometric characteristics significantly influence flood generation processes and the spatial distribution of environmental hazards within watersheds (Ghadimi et al., 2023). Moreover, Ghadimi et al. demonstrated that climate-induced variations in snowline elevation can substantially affect hydrological processes, water availability, and groundwater recharge patterns in the Zagros Mountains (Ghadimi et al., 2019). These findings emphasize the necessity of integrating geological, hydrogeological, geomorphological, and climatic factors when evaluating suitable locations for waste disposal in environmentally sensitive mountainous and karstic regions. Saqqez County, located in the northwestern part of Kurdistan Province, Iran, is characterized by extensive karst formations, active tectonic structures, complex geological settings, and rugged topography. These characteristics increase the environmental risks associated with improper waste disposal and necessitate a comprehensive site-selection framework. Therefore, this study aims to identify suitable landfill locations within the karst environment of Saqqez County using Pivot Pairwise Relative Criteria Importance Assessment (PIPRECIA) approach. The proposed framework seeks to support environmentally sustainable waste management while minimizing potential threats to groundwater resources and ecosystem integrity.

Method

In the present study, a Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) approach was employed to assign weights to the effective criteria. One of the recent methods in this field is the PIPRECIA model, introduced by Stanujkic et al. (2017). This model simplifies the weighting process by relying on less complex pairwise comparisons and the selection of a pivot criterion, thereby reducing both the length and potential errors of the weighting procedure.

Results

The weighting results obtained through the PIPRECIA model revealed that karst development (0.1693), lithology (0.1210), and distance from faults (0.0923) are the most influential factors governing landfill suitability in Saqqez County. The dominance of these criteria highlights the critical role of hydrogeological conditions and geological structures in determining environmental vulnerability within karst terrains.

These findings are consistent with previous studies conducted in western Iran. Ghadimi et al. demonstrated that karst aquifers exhibit high vulnerability to contamination due to the presence of extensive fracture networks and rapid subsurface flow systems, which facilitate pollutant transport and reduce the natural attenuation capacity of aquifers (Ghadimi et al., 2024). Likewise, Ghadimi et al. emphasized that karstification processes significantly influence groundwater quality and water-resource hazards, underscoring the importance of considering karst development in environmental planning and waste-management strategies (Ghadimi et al., 2022).

The spatial distribution of suitable and unsuitable zones also reflects the influence of topographic and geomorphological conditions. Large areas of southern Saqqez County were classified as unsuitable due to steep slopes and rugged terrain, whereas relatively gentle slopes in the northern and central parts exhibited higher suitability. Similar observations were reported by Ghadimi et al., who

identified morphometric characteristics as key determinants of environmental hazards and watershed behavior (Ghadimi et al., 2024).

Furthermore, climatic variability may indirectly affect landfill suitability through its influence on hydrological processes and groundwater recharge (Ghadimi et al., 2019).

The final suitability map indicated that less than 5% of the study area falls within the suitable and highly suitable classes, whereas more than 70% is categorized as highly unsuitable.

Conclusions

These findings suggest that establishing a waste disposal facility in Saqqez without rigorous monitoring of seismotectonic activity, karstification processes, and hydrogeological conditions may result in rapid aquifer contamination. This study presents an integrated, data-driven framework and demonstrates that the GIS–PIPRECIA approach is an effective and transferable method for landfill site selection in karst environments. Accordingly, it can provide a robust foundation for environmental policy development and waste management planning in comparable regions.

Ethical Considerations

The authors have adhered to ethical principles in the conduct and publication of this research, and this is confirmed by all of them.

Author Contributions

The contributions of the authors to this research are as follows: First author: Supervision, editing, reviewing, result verification, and overall review of the article.

Second, third, and fourth authors: Data collection and analysis, conducting the research, and drafting the initial manuscript.

Funding

This article received no financial support.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Plagiarism Check

A plagiarism check was conducted using the Irandoc system, showing a similarity rate of 1%.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to all participants in this research.



شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۸-۲۴۲۳

مدیریت مخاطرات محیطی

سایت نشریه: <https://jhsci.ut.ac.ir>



انتشارات دانشگاه تهران

ارزیابی محل دفن پسماندهای منطقه مسکونی از برنامه ریزی تا عمل (مطالعه موردی: شهرستان سقز)

مهرنوش قدیمی^{۱*} | عباس درخشان^۲ | کامیار امامی^۳ | محمدعلی کیانی^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: ghadimi@ut.ac.ir
۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: abbas.darakhshan@ut.ac.ir
۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: emami.kamyar@ut.ac.ir
۴. گروه جغرافیای سیاسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: keyani@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۶

کلیدواژه:

آسیب پذیری آبخوان،

تحلیل چندمعیاره،

دفن پسماند،

کارست،

PIPRECIA.

هدف: مدیریت بهینه پسماند در نواحی کارستی به دلیل آسیب پذیری زیاد آبخوان ها، ناهمگنی شدید زمین شناسی و افزایش حساسیت این محیط ها به مخاطرات طبیعی و انسان زاد، یکی از چالش برانگیزترین حوزه های برنامه ریزی محیط زیست محسوب می شود. بر این اساس، این پژوهش با هدف شناسایی پهنه های مناسب دفن پسماند در محیط کارستی شهرستان سقز و با استفاده از رویکرد تلفیقی GIS و مدل تصمیم گیری چندمعیاره پیرشیا^۱ انجام گرفت.

مواد و روش ها: برای ارزیابی جامع محیط، سیزده معیار اثرگذار شامل پارامترهای ژئومورفولوژیک، هیدروژئولوژیک، زمین شناسی و انسانی استخراج و با استفاده از توابع عضویت فازی استانداردسازی شدند. به منظور وزن دهی، مدل پیرشیا به کار گرفته شد که با کاهش خطای شناختی و ساده سازی مقایسه های زوجی، وزن های معتبر و پایدار ارائه می دهد. در نهایت لایه های وزن دار شده در محیط GIS با روش همپوشانی وزنی^۲ تلفیق شدند. به منظور اعتبارسنجی نقشه نهایی، تعداد ۳۰ نقطه کنترل زمینی مستقل با استفاده از GPS برداشت و سپس ماتریس درهم ریختگی تشکیل شد.

نتایج: نتایج وزن دهی نشان داد که توسعه کارست (۰/۱۶۹۳)، لیتولوژی (۰/۱۲۱۰) و فاصله از گسل ها (۰/۰۹۲۳) بیشترین سهم را در تعیین ایمنی دفن پسماند دارند؛ امری که نقش سلطه گرانه فرایندهای زیرسطحی و ساختاری را در آسیب پذیری منطقه تأیید می کند. نقشه نهایی تناسب دفن پسماند نشان داد که پهنه های بسیار مناسب و مناسب در مجموع ۷۶۱ هکتار (معادل ۱۷/۲ درصد) و پهنه با تناسب متوسط ۴۷۵ هکتار (۱۰/۷ درصد) را به خود اختصاص دادند و در مقابل، مجموع پهنه های نامناسب و بسیار نامناسب با ۳۱۹۰ هکتار (معادل ۷۲/۱ درصد)، وسیع ترین طبقات را تشکیل می دهند.

نتیجه گیری: چارچوب تلفیقی GIS-PIPRECIA ارائه شده نشان می دهد که استقرار محل دفن پسماند در سقز، بدون پایش دقیق شرایط لرزه زمین ساختی، کارست زایی و ویژگی های هیدروژئولوژیک، با خطر آلودگی سریع و جبران ناپذیر آبخوان ها همراه است. پیشنهاد می شود که در پژوهش های آتی، با تلفیق داده های پایش کیفی آب های زیرزمینی و مدل های پیش بینی انتقال آلاینده، پایداری بلندمدت مکان های پیشنهادی دفن پسماند ارزیابی شود. این رویکرد نه تنها ابزاری کارآمد برای کاهش خطا و عدم قطعیت در تصمیم گیری های مکانی در مناطق کارستی ایران است، بلکه به عنوان مدلی تعمیم پذیر، می تواند مبنای علمی برای تدوین سیاست های مکان یابی دفن پسماند در بقیه نواحی کارستی و مناطق دارای ویژگی های زمین شناسی، ژئومورفولوژیک و هیدروژئولوژیک مشابه فراهم سازد.

استناد: قدیمی، مهرنوش؛ درخشان، عباس؛ امامی، کامیار و کیانی، محمدعلی (۱۴۰۵). ارزیابی محل دفن پسماندهای منطقه مسکونی از برنامه ریزی تا عمل (مطالعه موردی: شهرستان سقز). مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۳ (۲)، ۹۵-۱۱۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.415280.939>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.415280.939>



1. PIPRECIA
2. Weighted Overlay

مقدمه

یکی از عوامل اصلی آلودگی و تخریب محیط زیست، زباله‌ها و پسماندهای خانگی و صنعتی هستند (حجازی و زنگنه‌تبار، ۱۴۰۴)؛ به‌طوری که روند افزایشی تولید زباله در طی سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم برنامه‌ریزان شهری و حامیان محیط زیست مطرح شده است (وو و همکاران، ۲۰۲۵). مدیریت پسماند شهری از مباحث مهم در مدیریت خدمات شهری بوده و هزینه زیادی برای متولیان جمع‌آوری و دفن آن در پی داشته است (سقای، قرنی و پارسا، ۱۴۰۲) یکی از روش‌های رایج برای دفع پسماندها، دفن در محل مناسب است.

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که حتی دفن گاه‌هایی که مطابق استانداردهای متداول طراحی شده‌اند، در محیط‌های کارستی ممکن است به‌دلیل وجود حفره‌های زیرسطحی، فرو چاله‌ها^۱ و مسیرهای جریان ترجیحی، کارایی لازم را برای جلوگیری از نشت شیرابه نداشته باشند (پادوان، بورلی و فورت، ۲۰۲۱). از سوی دیگر، آبخوان‌های کارستی سهم بزرگی در تأمین آب شرب جمعیت جهانی دارند و در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، تنها منبع قابل اتکای آب محسوب می‌شوند. بر همین اساس، حفاظت از این آبخوان‌ها به‌عنوان یک اولویت راهبردی در سیاست‌های محیط زیستی مطرح شده و بر اجتناب از استقرار فعالیت‌های پرخطر در این مناطق تأکید شده است (گولدشایر و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که پژوهش‌های متعددی در ایران (حجازی و زنگنه‌تبار، ۱۴۰۴؛ رضاپور و دیمه‌ور، ۱۴۰۳؛ چابوک و همکاران ۲۰۱۶؛ عثمان و همکاران ۲۰۲۱) به مکان‌یابی دفن پسماند با تلفیق GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP و فازی پرداخته‌اند. بررسی منابع نشان می‌دهد که در پژوهش‌های داخلی تاکنون از مدل پیرشیا برای مکان‌یابی دفن پسماند در محیط‌های کارستی استفاده نشده است. از این‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در کاربرد این مدل برای کاهش خطای شناختی و ارائه وزنی پایدارتر در فرایند مکان‌یابی دفن پسماند است. با توجه به مباحث یادشده، پژوهش حاضر با هدف به‌کارگیری رویکرد تلفیقی بیان‌شده برای شناسایی پهنه‌های مناسب دفن پسماند در محیط کارستی در شهرستان سقز در استان کردستان انجام گرفت. این شهرستان افزون‌بر داشتن جمعیت زیاد و روند رو به رشد تولید زباله، از نظر هیدروژئولوژیکی شرایط خاصی دارد. وجود واحدهای کارستی، آبخوان‌های سطحی، رودخانه‌ها و نیز مجاورت مراکز شهری و روستایی، حساسیت انتخاب محل دفن را دوچندان می‌سازد (شهابی و همکاران ۲۰۱۲). نوآوری اصلی این پژوهش در به‌کارگیری همزمان مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره پیرشیا و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای مکان‌یابی محل دفن پسماند در یک محیط کارستی حساس و پیچیده است. برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که از روش‌های متداول وزن‌دهی مانند AHP استفاده کرده‌اند، مدل پیرشیا با کاهش تعداد مقایسه‌ها، کاهش خطای شناختی کارشناسان و افزایش پایداری وزن‌ها، امکان ارزیابی دقیق‌تر معیارهای مؤثر را فراهم کرده است.

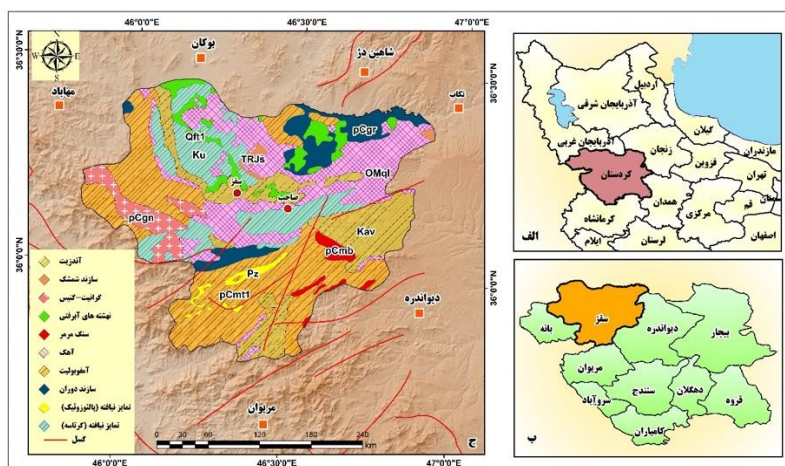
معرفی منطقه پژوهش

شهرستان سقز در شمال غرب استان کردستان واقع شده و یکی از شهرهای مهم غرب ایران به شمار می‌رود. این شهرستان به‌دلیل موقعیت ارتباطی خود در مسیر شهرهای بوکان، بانه و سنندج اهمیت راهبردی دارد. اقلیم منطقه اغلب سرد و نیمه‌مرطوب است و زمستان‌های طولانی همراه با بارش برف و باران (۴۵۰ میلی‌متر) از ویژگی‌های اصلی آن محسوب می‌شود (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۴). این شرایط اقلیمی تأثیر مستقیمی بر الگوهای هیدروژئولوژیکی و مدیریت منابع آب منطقه دارد.

مواد و روش‌ها

مواد

داده‌های پژوهش حاضر که برای تولید لایه‌های مدنظر استفاده شدند در جدول ۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۱. منطقه پژوهش: الف) موقعیت استان کردستان؛ ب) جایگاه شهرستان سقز در استان؛ ج) واحدهای زمین‌شناسی شهرستان سقز

جدول ۱. داده‌های استفاده‌شده در پژوهش

منبع	فرمت	داده
USGS	TIFF	تصویر ماهواره لندست - OLI: اکتبر ۲۰۲۴
Earth data	TIFF	DEM با قدرت تفکیک ۳۰ متر
OSM	SHP	لایه جاده‌های اصلی سقز
سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی	JPG	نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰
سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی	SHP	لایه گسل‌های سقز
OSM	SHP	نقاط شهری و روستای

روش تحقیق

روش تجزیه و تحلیل (وزن‌دهی و اولویت‌بندی معیارهای مؤثر)

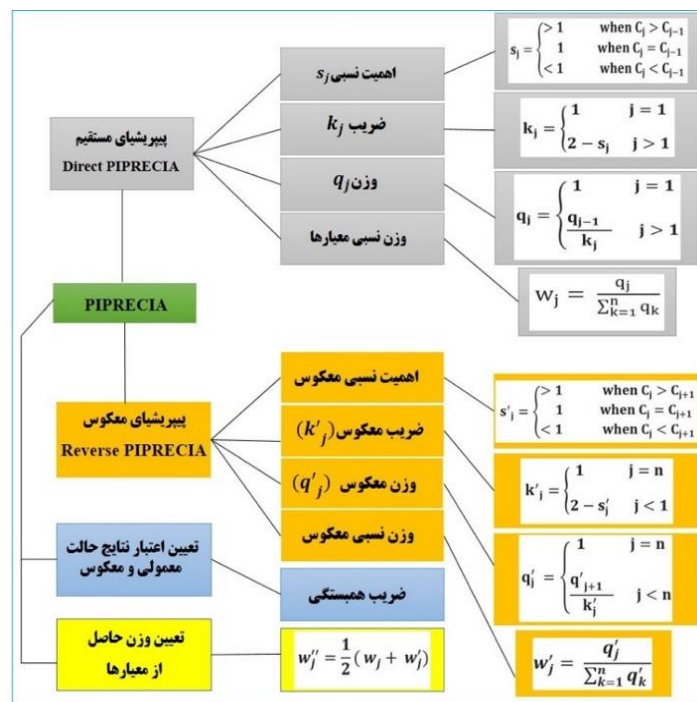
در این پژوهش، از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان بستر اصلی تحلیل‌های مکانی و تلفیق داده‌ها استفاده شد. به منظور پیاده‌سازی تحلیل‌ها، از نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۸ برای پردازش، استانداردسازی و همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی استفاده شد. لایه‌های اطلاعاتی شامل داده‌های توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، شیب، جهت شیب، شبکه آبراهه‌ها، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، گسل‌ها و فاصله از عوارض انسانی مانند جاده‌ها و سکونتگاه‌هاست که از منابع معتبر سازمانی و تصاویر سنجنش از دور استخراج شدند. پیش‌پردازش داده‌ها شامل تصحیح، یکسان‌سازی سیستم مختصات و تبدیل داده‌های خام به لایه‌های تحلیل‌پذیر در محیط GIS است. سپس با استفاده از ابزارهای Spatial Analyst، معیارها کمی‌سازی و به لایه‌های رستری استاندارد تبدیل شدند. در ادامه، همه لایه‌ها پس از نرمال‌سازی، وارد فرایند همپوشانی وزنی شدند تا نقشه نهایی تناسب مکان تولید شود. در بخش تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای وزن‌دهی معیارهای مؤثر از روش پیرشیا استفاده شد (استانوجکیک و همکاران، ۲۰۱۷). این روش با کاهش تعداد مقایسه‌های زوجی و استفاده از یک معیار مرجع، ضمن کاهش خطای شناختی، فرایند وزن‌دهی را ساده‌تر و پایدارتر می‌کند. برخلاف روش‌هایی مانند AHP که نیازمند مقایسه‌های گسترده بین همه معیارها هستند، در پیرشیا معیارها نسبت به یک معیار محوری ارزیابی می‌شوند که این امر کارایی روش را در مسائل با تعداد زیاد معیار افزایش می‌دهد. در این پژوهش، ترکیب GIS و پیرشیا امکان تحلیل همزمان روابط فضایی و اهمیت نسبی معیارها را فراهم می‌کند و سبب تولید نقشه‌ای جامع و قابل اعتماد برای مکان‌یابی محل دفن پسماند می‌شود.

اجرا شامل چهار گام اصلی است: در گام اول پیرشیای مستقیم محاسبه می‌شود. در این گام پس از تعیین معیار محوری معیارهای دیگر نسبت به معیار قبلی خود در مقیاس ۱ تا ۲ با گام‌هایی ارزش‌گذاری می‌شوند؛ بنابراین اولین معیار، وزنی دریافت نمی‌کند. در گام دوم برای افزایش دقت و پایداری وزن‌ها، پیرشیای معکوس به شکل اجرای فرایند ارزش‌گذاری از آخرین معیار

به سمت اولین معیار تکرار می شود. این گام نیز در چهار مرحله انجام می گیرد و بر اساس آن آخرین معیار فاقد وزن خواهد بود. در گام سوم، اعتبار وزن های به دست آمده از دو گام قبلی ارزیابی می شود. در این بخش با استفاده از ضریب همبستگی اعتبار نتایج حالت معمولی و معکوس بررسی می شود. هرچه ضریب همبستگی به ۱ نزدیک تر باشد، نشان از اعتبار بیشتر نتایج دارد. در پژوهش حاضر ضریب همبستگی عدد ۰/۹ به دست آمد. در آخرین گام وزن معیار اصلی در وزن به دست آمده هر زیرمعیار ضرب می شود و وزن نهایی هر زیرمعیار در معیار مربوط به دست می آید (شکل ۲).

در این پژوهش، از دو رویکرد پیرشیای مستقیم و پیرشیای معکوس برای افزایش دقت و پایداری وزن دهی معیارها استفاده شد. در روش مستقیم، معیارها بر اساس میزان اهمیت از دید تصمیم گیرنده نسبت به یک معیار مرجع ارزیابی می شود و فرایند وزن دهی از بالا به پایین انجام می گیرد. در مقابل، در روش معکوس، همین مقایسه ها به صورت وارونه و از پایین به بالا صورت می گیرد تا اثر سوگیری ذهنی و ترتیب ارائه معیارها کاهش یابد.

ترکیب این دو رویکرد سبب می شود که نتایج نهایی وزن دهی از نظر آماری پایدارتر و از نظر شناختی کم خطا تر باشد، زیرا خطاهای احتمالی ناشی از جهت مقایسه و ترتیب معیارها تعدیل می شوند. از این رو، استفاده همزمان از پیرشیای مستقیم و معکوس در این پژوهش به منظور افزایش قابلیت اعتماد نتایج و کاهش عدم قطعیت در فرایند تصمیم گیری صورت می گیرد.



شکل ۲. مراحل به کارگیری مدل PIPRECIA (استوانویچ و همکاران، ۲۰۱۷)

روش و ملاحظات استانداردسازی معیارهای مؤثر در ارزیابی محل دفن پسماند

برای استانداردسازی معیارهای مؤثر، از توابع عضویت فازی استفاده شد. بر اساس ملاحظات صاحب نظران و استانداردهای ارائه شده در جدول ۲، یک تابع عضویت تعریف شد. برای معیارهایی مانند شیب، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه که دارای آستانه های مشخص هستند، از توابع نزولی و صعودی با دامنه های عددی مبتنی بر مراجع معتبر استفاده شد. برای معیارهای زمین شناسی و توسعه کارست نیز که ماهیت کیفی دارند، ارزش گذاری بر اساس طبقات نفوذپذیری و حساسیت انجام گرفت. همه لایه ها در محیط GIS به سلول هایی با ابعاد ۳۰×۳۰ متر تبدیل و مقادیر آنها بین صفر و ۱ نرمال سازی شد.

جدول ۲. استانداردها و ملاحظات مربوط به وزن دهی لایه‌ها

ردیف	معیار	ملاحظات	منبع
۱	شیب	در مناطق کارستی، شیب افزون بر کنترل رواناب سطحی، تعیین کننده شدت نفوذ به درزها و شکاف‌های سنگ آهک است و شیب کمتر از ۲ درصد، سبب ماندگاری آب و افزایش نفوذ شیرابه به حفره‌های کارستی می‌شود و شیب بسیار زیاد بیش از ۱۵ درصد نیز فرسایش را افزایش می‌دهد و خطر انتقال سریع آلاینده‌ها به دره‌ها و چشمه‌های کارستی را تقویت می‌کند. بنابراین مناسب‌ترین شیب برای دفن زباله در محیط‌های کارستی شیب متوسط (۵ تا ۱۰ درصد) است که ضمن داشتن زهکشی نسبی، نفوذ سریع شیرابه را کاهش می‌دهد.	فورد و ویلیامز (۲۰۰۷): گوتیرز و همکاران (۲۰۱۴)
۲	جهت شیب	جهت شیب، تعیین کننده تابش خورشیدی و میکروکلیمای محلی است و بر دما، رطوبت خاک و پوشش گیاهی تأثیر مستقیم دارد. در نیمکره شمالی دامنه‌های شمال‌رو مرطوب‌ترند که سبب افزایش نفوذ شیرابه به حفره‌ها می‌شود و دامنه‌های جنوب‌رو خشک‌ترند و نفوذپذیری کمتری دارند، بنابراین احتمال آلودگی کارست کمتر است. دامنه‌های شرق‌رو و غرب‌رو شرایط میانه دارند و بسته به اقلیم محلی می‌توانند تیخیر یا نفوذ متفاوتی ایجاد کنند. بنابراین جهت شیب باید همراه با لایه‌های کارستی مثل تراکم دولاین و چشمه‌ها تحلیل شود تا مکان دفن ایمن انتخاب شود. در مناطق کارستی دامنه‌های شمال‌رو به دلیل رطوبت زیاد و افزایش نفوذ شیرابه نامناسب‌ترین مناطق اند.	بیلیر و همکاران (۲۰۲۱) گوتیرز و همکاران (۲۰۱۴) الخارجی و همکاران (۲۰۲۳) فورد و ویلیامز (۲۰۰۷) رزلر و همکاران (۲۰۱۸)
۳	ارتفاع	ارتفاع در کارست تأثیر مهم و به نسبت پیچیده‌ای دارد، زیرا تعیین کننده جایگاه نقطه نسبت به حوزه‌های تغذیه و تخلیه سیستم کارستی است؛ ارتفاع‌های خیلی زیاد، به‌طور معمول نواحی تغذیه‌کننده‌اند و نفوذپذیری عمقی بیشتری دارند و می‌توانند آلاینده‌ها را به سرعت به شبکه کانالی/غارری منتقل کنند و ارتفاع‌های خیلی کم به‌طور معمول نزدیک خروجی‌ها (چشمه‌ها، دره‌ها، دولاین‌ها) قرار دارند که احتمال تماس مستقیم شیرابه با منابع آب را زیاد می‌کند.	فورد و ویلیامز (۲۰۰۷) چن و همکاران (۲۰۱۸)
۴	جهت دید	جهت دید، ابزاری حیاتی برای مکان‌یابی دفن زباله است که نواحی قابل مشاهده از سکونتگاه‌ها و جاده‌های اصلی را مشخص می‌کند و کمک می‌کند سایت‌ها از دید مستقیم این نقاط حساس پنهان باشند. دفن زباله در دید مستقیم اثرهای منفی بصری و ناراضیاتی اجتماع را افزایش می‌دهد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تلفیق تحلیل جهت دید با بقیه معیارهای محیطی و کارستی، مانند فاصله از منابع آب و حساسیت زمین‌شناسی، می‌تواند تصمیم‌گیری بهینه را تقویت کند.	صالح و همکاران (۲۰۱۷)
۵	فاصله از آبراهه	رعایت فاصله مناسب برای حفظ کیفیت منابع آبی و جلوگیری از آلودگی‌های محیط زیستی ضروری است. در بسیاری از پژوهش‌ها، فاصله حداقل ۵۰۰ متر از رودخانه‌ها به عنوان یک معیار حفاظتی پیشنهاد شده است. نواحی دارای فاصله‌های کمتر از ۵۰۰ متر از رودخانه‌ها نواحی نامناسب و نواحی دارای فاصله‌های بیشتر از ۱۰۰۰ متر نواحی مناسب در نظر گرفته می‌شوند.	خرم و همکاران (۲۰۱۵)
۶	فاصله از جاده اصلی	فاصله از جاده‌های اصلی، در مکان‌یابی دفن زباله اهمیت زیادی دارد، زیرا نزدیکی زیاد سبب مشکلات بهداشتی، آلودگی بصری و ناراضیاتی اجتماعی شده و فاصله بسیار زیاد موجب افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و مصرف سوخت می‌شود. در مناطق کارستی این اهمیت بیشتر است، زیرا می‌تواند با لرزش و آلودگی سطحی به نفوذ سریع‌تر آلاینده‌ها در شکستگی‌ها و حفره‌های کارست منجر شود. بنابراین فاصله بهینه باید انتخاب شود تا هم دسترسی مناسب حفظ شود و هم پیامدهای منفی کاهش یابد. در تحلیل فازی، فواصل کمتر از ۵۰۰ متر نامناسب، فواصل بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر حدوسط و فواصل بیش از ۱۰۰۰ متر مناسب تلقی می‌شوند.	عبدالحسن و همکاران (۲۰۱۹)
۷	انتحای شیب	در سطوح مقعر، آب باران و رواناب سطحی تمایل به تجمع دارند و این امر در مناطق کارستی می‌تواند موجب افزایش نفوذ شیرابه به حفره‌ها و شکستگی‌های زیرزمینی و در نتیجه آلودگی سفره‌های آب شود. در مقابل، سطوح محدب آب را به سمت بیرون هدایت می‌کنند و بیشتر موجب رواناب سطحی می‌شوند و در نتیجه احتمال آلودگی مستقیم آب‌های زیرزمینی کمتر خواهد بود. از این‌رو، مناطق دارای انتحای مقعر مکان نامناسب دفن زباله در نظر گرفته می‌شوند، درحالی که مناطق محدب مناسب‌تر ارزیابی می‌شوند.	سنسوی و کارا (۲۰۱۴)
۸	پوشش گیاهی	در پژوهشی در اقلیم کردستان عراق، با استفاده از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) نشان داده شد که نواحی دارای پوشش گیاهی زیاد، برای دفن زباله نامناسب‌اند؛ این مناطق به عنوان منابع طبیعی و کشاورزی باید از آلودگی حفظ شوند. در پژوهشی دیگر در عربستان سعودی، پوشش گیاهی یکی از معیارهای اصلی در تحلیل چندمعیاره برای مکان‌یابی دفن زباله در نظر گرفته شد؛ به‌طوری که نواحی دارای پوشش گیاهی زیاد به دلیل اهمیت کشاورزی، مناطق نامناسب برای دفن زباله شناسایی شدند.	الخارجی و همکاران (۲۰۲۳) عثمان و همکاران (۲۰۲۱)
۹	فاصله از نقاط شهری و روستایی	فاصله از نقاط شهری و روستایی یکی از معیارهای مهم در مکان‌یابی دفن زباله است و اثر مهمی در کاهش مخاطرات بهداشتی و اجتماعی دارد. مکان دفن زباله باید در فاصله‌ای مناسب از سکونتگاه‌ها قرار گیرد تا از انتشار بو، آلودگی و ناراضیاتی عمومی جلوگیری شود. مناطق نزدیک به شهرها و روستاها نامناسب و مناطقی با فاصله کافی مناسب در نظر گرفته می‌شوند.	عثمان و همکاران (۲۰۲۱)
۱۰	توسعه کارست	نتایج پژوهش‌های مودی در عراق نشان داده است که مناطق دارای سنگ بستر رس و مارن به دلیل نفوذپذیری کم و قابلیت ایزوله‌کنندگی، گزینه‌های مناسبی برای دفن زباله محسوب می‌شوند، درحالی که سنگ‌های کربناته و کارستی مانند آهک‌ها و دولومیت‌ها به دلیل وجود تخلخل ثانویه و شبکه‌های انحلالی شرایط بسیار نامناسبی دارند. شکستگی‌ها و گسل‌ها در هر نوع سازند زمین‌شناسی به عنوان مسیر ترجیحی برای نفوذ شیرابه عمل می‌کنند و احتمال آلودگی آبخوان‌ها را افزایش می‌دهند. فاصله کم از گسل، افزون‌بر خطر ناپایداری زمین سبب افزایش احتمال نفوذ آلودگی به آبخوان‌های کارستی و انتشار وسیع آن در سطح منطقه می‌شود. در محیط‌های کارستی، این خطر چندبرابر است؛ زیرا شبکه گسل‌ها با شکستگی‌های ثانویه مرتبط هستند و آلاینده‌ها را به سرعت به منابع آب آشامیدنی انتقال می‌دهد. بنابراین استانداردهای بین‌المللی مدیریت پسماند توصیه می‌کنند که محل دفن زباله دست‌کم چند کیلومتر از گسل‌های فعال فاصله داشته باشد تا از انتشار آلودگی و خطرهای ژئوتکنیکی جلوگیری شود.	چابوک و همکاران (۲۰۱۶) کرسیک و استوانویچ (۲۰۰۹)
۱۱	زمین‌شناسی، لیتولوژی و فاصله از گسل	در زمینه ارزیابی خطر آلودگی ناشی از دفن زباله در کارست، تحقیقات اخیر تأکید دارند که هرچه توسعه کارست بیشتر باشد، پتانسیل نفوذ سریع شیرابه به آب‌های زیرزمینی افزایش می‌یابد و این سبب می‌شود که آن نواحی از نظر تناسب دفن زباله نامناسب تلقی شوند (در مقابل، نواحی با توسعه کارست کم یا ضعیف مسیرهای هیدرولیکی زیرسطحی محدودتری دارند که ممکن است مناطق کم‌ریسک‌تر برای نفوذ آلاینده‌ها شناخته شوند و بنابراین گزینه‌های مطلوب‌تری برای دفن پسماند فراهم آورند).	لینز و همکاران (۲۰۲۵) مای و همکاران (۲۰۲۴)

روش ارزیابی میزان صحت طبقه‌بندی

به منظور ارزیابی کمی و اعتبارسنجی صحت نقشه نهایی پهنه‌بندی، ۳۰ نقطه کنترل زمینی مستقل با استفاده از GPS برداشت شد. این نقاط با رعایت قابلیت دسترسی میدانی و به گونه‌ای انتخاب شدند که نماینده آماری مناسبی از هر سه طبقه نقشه (مناسب و بسیار مناسب، متوسط، و نامناسب و بسیار نامناسب) باشند و به‌ازای هر طبقه، ۱۰ نقطه کنترل برداشت شد. در مرحله بعد، لایه نقاط روی نقشه پهنه‌بندی نهایی بارگذاری شد و مقدار پیکسل متناظر با موقعیت هر نقطه، با استفاده از ابزار نمونه‌برداری استخراج شد. با مقایسه مقادیر استخراج‌شده از نقشه با مقادیر مشاهداتی زمینی، ماتریس درهم‌ریختگی^۱ تشکیل شد. بر اساس این ماتریس، شاخص‌های دقت شامل دقت کلی^۲ و ضریب کاپای وزنی خطی^۳ محاسبه شدند.

نتایج و بحث

استانداردسازی عوامل مؤثر در ارزیابی محل مؤثر دفن پسماند

تحلیل نقشه‌های ارزش‌گذاری شده معیارهای مؤثر در مکان‌یابی محل دفن پسماند در شهرستان سقز نشان می‌دهد که الگوی فضایی مناسب بودن اراضی در سطح منطقه، تابعی از برهم‌کنش شرایط طبیعی منطقه و الگوی استقرار سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌هاست. نتایج ارزش‌گذاری فازی معیارها بیانگر آن است که پهنه‌های مناسب و نامناسب در سطح شهرستان به‌صورت یکنواخت توزیع نشده‌اند و در بسیاری از موارد، الگوی مشاهده‌شده در نقشه‌ها با ویژگی‌های محیطی و ساختار فضایی منطقه سقز همخوانی زیادی دارد. تحلیل نقشه شیب نشان می‌دهد که بخش بزرگی از محدوده شهرستان سقز به‌ویژه در نیمه جنوبی منطقه در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار گرفته است، درحالی که پهنه‌های مناسب‌تر اغلب در بخش‌های شمالی و تا حدودی مرکزی پراکنده شده‌اند. در این نقشه، توزیع فضایی به‌گونه‌ای است که بخش‌های جنوب غربی و جنوب شرقی محدوده نیز در زمره پهنه‌های دارای محدودیت بیشتر قرار می‌گیرند و در بخش‌های شمالی و تا حدودی شمال شرقی محدوده، طبقات مناسب و بسیار مناسب گسترده‌تری دارند. این الگو با ساختار ناهمواری‌های منطقه ارتباط مستقیمی دارد. شهرستان سقز در قلمرو کوهستانی زاگرس واقع شده و بسیاری از بخش‌های جنوبی آن شامل ارتفاعات و دامنه‌های به‌نسبت پرشیب است. در نقشه جهت شیب، پهنه‌های مناسب بیشتر در بخش‌های مرکزی، شمالی و تا حدودی شرقی محدوده گسترش یافته‌اند و در برخی قسمت‌های جنوب غربی و بخش‌هایی از جنوب محدوده، طبقات متوسط یا در مواردی نامناسب مشاهده می‌شود (شکل ۳). پراکندگی گسترده طبقات مناسب در این نقشه تا حد زیادی با تنوع جهت دامنه‌ها در ساختار ناهموار منطقه مرتبط است. نقشه ارتفاع نیز الگوی فضایی مشخصی را در سطح شهرستان نشان می‌دهد. در این نقشه بخش بزرگی از محدوده در طبقه متوسط جای گرفته است و نواحی مرتفع‌تر به‌ویژه در پیرامون محدوده پژوهش، در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار دارند. از نظر الگوی فضایی، ارتفاعات واقع در بخش‌های جنوبی، جنوب غربی و تا حدی غربی محدوده، بیشتر در طبقات محدودکننده سطح‌بندی شده‌اند. در مقابل، بخش‌های مرکزی و قسمت‌هایی از شمال و شمال شرقی محدوده، اغلب در طبقات متوسط تا مناسب توزیع شده‌اند. تحلیل نقشه جهت دید نیز بیانگر تفاوت‌های فضایی در میزان رؤیت‌پذیر بودن بخش‌های مختلف منطقه است (شکل ۳). در این نقشه برخی از نواحی در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب جای داده شده‌اند، درحالی که پهنه‌هایی با میزان دید کمتر در طبقات مناسب‌تر دیده می‌شوند. با توجه به ساختار توپوگرافی شهرستان سقز، بسیاری از ارتفاعات و دامنه‌های برجسته، میدان دید گسترده‌ای به محیط اطراف دارند و در نقشه تولیدشده نیز این نواحی به‌عنوان پهنه‌های محدودکننده مشخص شده‌اند. در مقابل، دره‌ها و نواحی پست‌تر که به‌دلیل قرارگیری در میان ارتفاعات از دید مستقیم کمتری برخوردارند، در طبقات مناسب‌تر استقرار یافته‌اند؛ بنابراین الگوی مشاهده‌شده در نقشه جهت دید تا حد زیادی با ساختار توپوگرافی و پراکنش ارتفاعات در سطح شهرستان سقز همخوانی دارد. نتایج حاصل از نقشه فاصله از جاده‌های اصلی نیز الگوی فضایی آشکاری را نشان می‌دهد. در این نقشه، نوارهایی از طبقات نامناسب و بسیار نامناسب در امتداد محورهای ارتباطی اصلی شهرستان قابل

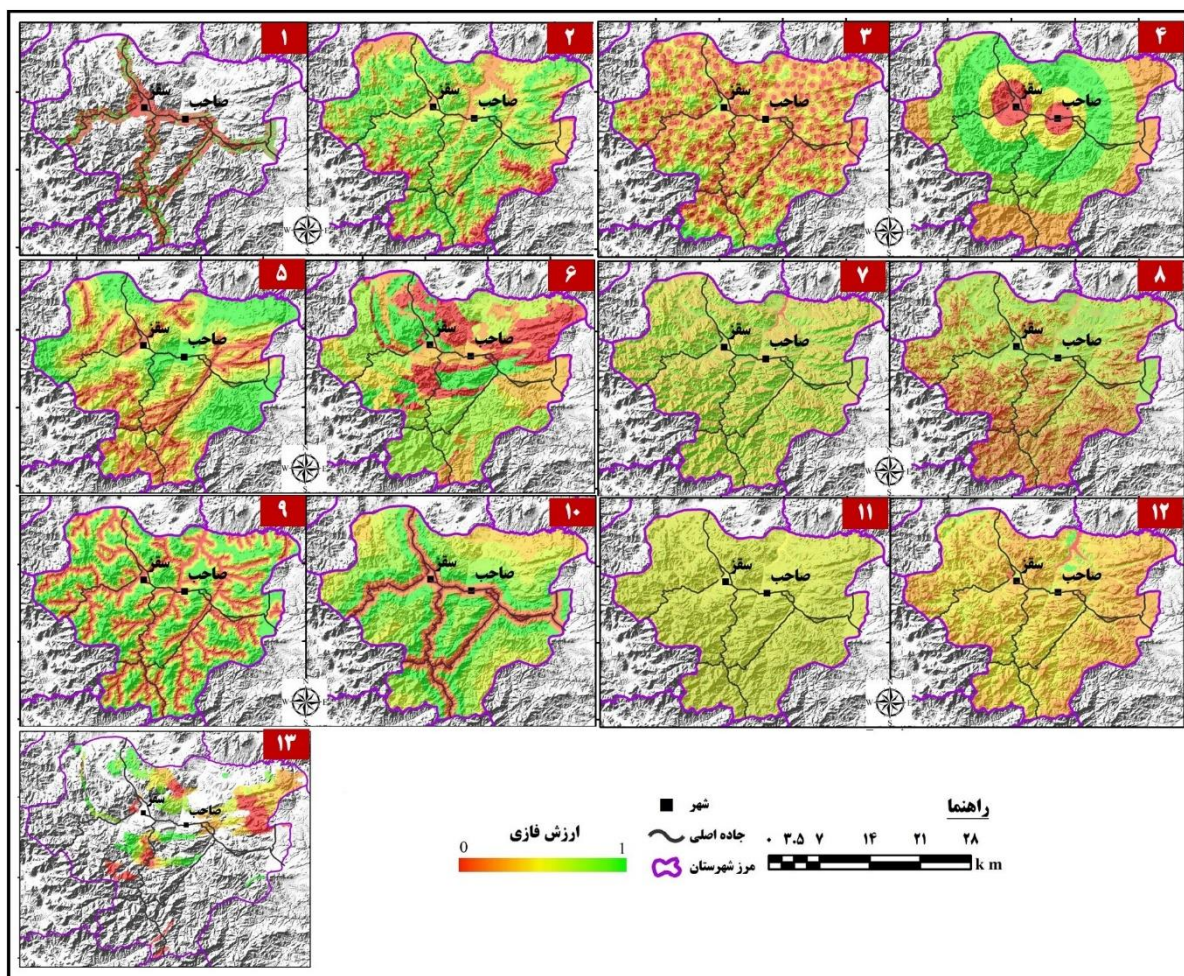
1. Confusion Matrix

2. Overall Accuracy

3. Linear Weighted Kappa

مشاهده است و با افزایش فاصله از این مسیرها، شرایط به سمت طبقات مناسب‌تر تغییر می‌کند (شکل ۳). از نظر الگوی فضایی، این پهنه‌های محدودکننده، بیشتر در بخش‌های مرکزی و تا حدودی غربی محدوده که مسیرهای اصلی ارتباطی از آنها عبور می‌کند متمرکز شده‌اند و با فاصله گرفتن به سمت بخش‌های شمالی، شرقی و جنوب شرقی محدوده، طبقات مناسب‌تر گسترش بیشتری پیدا می‌کنند. شبکه راه‌های اصلی در شهرستان سقز، اغلب در امتداد دره‌ها و مسیرهای طبیعی عبور در میان ارتفاعات شکل گرفته است و در نقشه تولیدشده نیز همین ساختار خطی در امتداد جاده‌ها دیده می‌شود. در نقشه مربوط به آبراهه‌ها نیز رابطه روشنی میان الگوی فضایی شبکه زهکشی و طبقات مناسب بودن اراضی دیده می‌شود. نواحی مجاور رودخانه‌ها و مسیرهای آبراهه در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار گرفته‌اند و با فاصله گرفتن از این شبکه، طبقات مناسب و بسیار مناسب گسترش یافته‌اند. از نظر الگوی فضایی، دره‌های اصلی که اغلب در بخش‌های مرکزی و تا حدودی غربی و جنوب غربی محدوده امتداد دارند بیشتر در طبقات محدودکننده متمرکز شده‌اند، درحالی که نواحی مرتفع‌تر و دورتر از مسیر جریان آب در بخش‌هایی از شمال، شمال شرقی و شرق محدوده در طبقات مناسب‌تر دیده می‌شوند. در شهرستان سقز به دلیل شرایط توپوگرافی کوهستانی و وجود دره‌های متعدد، شبکه‌ای به نسبت متراکم از آبراهه‌های فصلی و دائمی در سطح منطقه شکل گرفته است. در نقشه حاصل نیز همین شبکه به صورت نوارهایی از طبقات محدودکننده در امتداد دره‌ها و مسیرهای جریان آب قابل شناسایی است. در نقشه پوشش گیاهی نیز پراکنش متفاوت طبقات مناسب بودن اراضی در سطح منطقه مشاهده می‌شود. در این نقشه، بخش‌هایی از منطقه که دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر هستند، در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب جای گرفته‌اند و نواحی با پوشش گیاهی محدودتر در طبقات مناسب‌تر پراکنش دارند. از نظر الگوی فضایی، دامنه‌ها و ارتفاعات واقع در بخش‌های غربی، جنوب غربی و تا حدودی جنوبی محدوده که پوشش گیاهی طبیعی گسترده‌تری دارند، بیشتر در طبقات محدودکننده متمرکز یافته‌اند و بخش‌هایی از نواحی مرکزی و شرقی محدوده که تراکم پوشش گیاهی در آنها کمتر است در طبقات مناسب‌تر جای گرفته‌اند. در شهرستان سقز بخش‌هایی از اراضی شامل مراتع و پوشش‌های طبیعی به نسبت متراکم است که بیشتر در دامنه‌ها و ارتفاعات قرار دارند و در نقشه تولیدشده نیز همین نواحی در طبقات محدودکننده قرار گرفته‌اند. نتایج نقشه انحنا نیز بیانگر تفاوت‌های فضایی در شکل ناهمواری‌های منطقه است. در این نقشه بخش وسیعی از منطقه در طبقه متوسط قرار گرفته است و تنها در برخی نواحی شرایط مناسب‌تر یا نامناسب‌تر مشاهده می‌شود (شکل ۳). بر اساس نقشه فاصله از شهر، پهنه‌های واقع در پیرامون شهر سقز اغلب در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب دسته‌بندی می‌شوند و با افزایش فاصله از محدوده شهری، شرایط به تدریج به سمت طبقات مناسب و بسیار مناسب تغییر می‌کند. از نظر الگوی فضایی، بخش مرکزی محدوده که محل استقرار شهر سقز است و همچنین نواحی نزدیک به آن در طبقات محدودکننده قرار گرفته و با حرکت به سمت بخش‌های شمالی، شرقی و جنوب شرقی محدوده، طبقات مناسب‌تر به تدریج گسترش می‌یابند. تمرکز طبقات محدودکننده در اطراف شهر در نقشه به دست آمده نشان می‌دهد که بخش مرکزی شهرستان از منظر این معیار دچار محدودیت بیشتری است. در نقشه فاصله از روستا نیز پهنه‌های دارای فاصله کم از سکونتگاه‌های روستایی در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار گرفته‌اند و با افزایش فاصله از این سکونتگاه‌ها، طبقات مناسب و بسیار مناسب گسترش پیدا کرده‌اند. از نظر الگوی فضایی، در بخش‌هایی از محدوده که تراکم روستاها بیشتر است، به ویژه در برخی نواحی مرکزی و غربی، پهنه‌های محدودکننده بیشتری دیده می‌شود، درحالی که در بخش‌هایی از شمال شرقی و شرق محدوده که فاصله از سکونتگاه‌های روستایی بیشتر است، طبقات مناسب‌تر گسترش یافته‌اند. در محدوده شهرستان سقز تنوع زیادی از واحدهای زمین‌شناسی وجود دارد و حضور سازندهای آهکی در برخی بخش‌ها موجب شده است که این نواحی در نقشه در طبقات محدودکننده جای گیرند، در مقابل سازندهای سنگی متراکم‌تر در برخی بخش‌های دیگر شرایط مناسب‌تری ایجاد کرده‌اند. در نقشه گسل نیز الگوی فضایی مشخصی از پهنه‌های محدودکننده مشاهده می‌شود. در این نقشه نواحی واقع در مجاورت گسل‌ها اغلب در طبقات نامناسب دسته‌بندی شده‌اند و با افزایش فاصله از این ساختارهای زمین‌ساختی، طبقات مناسب و بسیار مناسب گسترش یافته‌اند (شکل ۴). از نظر الگوی فضایی، در برخی بخش‌های غربی و جنوب غربی محدوده که خطوط گسلی عبور می‌کنند، نوارهایی از طبقات محدودکننده مشاهده می‌شود، درحالی که در بخش‌هایی از شمال و شمال شرقی محدوده که فاصله بیشتری از این ساختارها دارند، طبقات مناسب‌تر گسترش یافته‌اند.

شهرستان سقز در محدوده‌ای از زاگرس قرار دارد که تحت تأثیر ساختارهای زمین‌ساختی متعددی است و سیستم‌های گسلی متعددی در سطح منطقه وجود دارد. این ساختارها در نقشه نیز به صورت پهنه‌های محدودکننده قابل شناسایی‌اند. در نقشه توسعه کارست نیز الگوی فضایی مشخصی مشاهده می‌شود؛ در این نقشه بخش‌هایی از منطقه که دارای توسعه کارستی هستند در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار گرفته‌اند و در مقابل، نواحی فاقد این پدیده در طبقات مناسب‌تر دیده می‌شوند. از نظر الگوی فضایی، برخی بخش‌های غربی و جنوب غربی محدوده که گسترش سازندهای آهکی در آنها بیشتر است در طبقات محدودکننده قرار گرفته‌اند، درحالی که در بخش‌هایی از مرکز و شمال شرقی محدوده که توسعه کارست کمتر است، طبقات مناسب‌تر مشاهده می‌شود (شکل ۴).



شکل ۳. لایه‌های استاندارد شده معیارهای مؤثر: ۱. جهت دید؛ ۲. ارتفاع؛ ۳. فاصله از نقاط روستایی؛ ۴. فاصله از نقاط شهری؛ ۵. فاصله از گسل؛ ۶. لیتولوژی؛ ۷. جهت شیب؛ ۸. شیب؛ ۹. فاصله از آبراهه؛ ۱۰. فاصله از جاده اصلی؛ ۱۱. انحنای شیب؛ ۱۲. پوشش گیاهی؛ ۱۳. توسعه کارست.

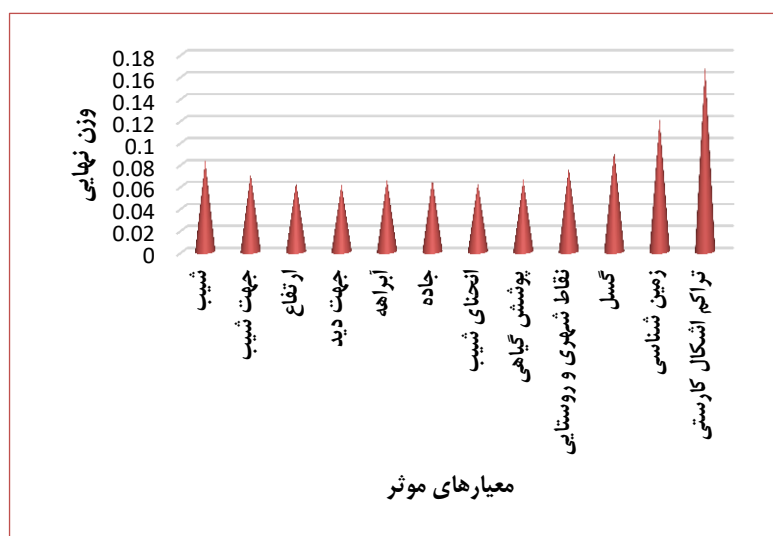
ارزیابی و رتبه‌بندی معیارهای مؤثر در ارزیابی مکان دفن پسماند با استفاده از مدل وزن‌دهی پیرشیا

نتایج حاصل از اجرای مدل پیرشیا برای تعیین وزن نسبی و ارزش معیارهای مؤثر (شکل ۴) در مکان‌یابی محل دفن پسماند نشان می‌دهد که ساختار وزن‌دهی دارای تمرکز خوبی در میان چند معیار اصلی است. بر اساس مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱، معیار توسعه کارست با وزن ۰/۱۶۹۳ در بالاترین سطح اهمیت قرار گرفته است. پس از آن، معیار زمین‌شناسی با وزن ۰/۱۲۱۰ و معیار گسل با وزن ۰/۰۹۲۳ در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. معیار ارتفاع (۰/۰۶۳۳)، انحنای شیب (۰/۰۶۲۹) و در نهایت جهت دید

(۰/۰۶۱۳) کمترین اهمیت را به خود اختصاص داده‌اند. بخش اصلی اهمیت تصمیم‌گیری در میان چند معیار اولیه متمرکز شده است، به‌گونه‌ای که وزن معیار نخست حدود هشت برابر کم‌اهمیت‌ترین معیار است.

جدول ۳. ارزش‌گذاری و رتبه‌بندی معیارهای مؤثر در دفن زباله بر اساس مدل پیرشیا

معیار اصلی	محاسبه وزن و رتبه نهایی		Reverse PIPRECIA					Direct PIPRECIA				
	رتبه نهایی	وزن نهایی	rank	wj	qj	kj	sj	rank	wj	qj	kj	sj
شیب	۴	۰/۸۳۲	۴	۰/۰۹۰۲۲۲	۰/۸۱۷۵۶۱	۰/۸۵	۱/۱۵	۴	۰/۰۷۶۲	۱	۱	-
جهت شیب	۶	۰/۰۷۱۵	۶	۰/۰۷۶۶۸۹	۰/۶۹۴۹۲۷	۰/۸۸	۱/۱۲	۶	۰/۶۶۲۳۸	۰/۸۶۹۵۶۵	۱/۱۵	۰/۸۵
ارتفاع	۹	۰/۰۶۳۳	۱۱	۰/۰۶۷۴۸۶	۰/۶۱۱۵۳۶	۱/۰۲	۰/۹۸	۷	۰/۰۵۹۱۴۱	۰/۷۷۶۳۹۸	۱/۱۲	۰/۸۸
جهت دید	۱۱	۰/۰۶۱۳	۱۰	۰/۰۶۸۸۳۶	۰/۶۲۳۷۶۶	۱/۱	۰/۹	۱۱	۰/۰۵۳۷۶۴	۰/۷۰۵۸۱۶	۱/۱	۰/۹
فاصله از آبراهه	۷	۰/۰۶۶۲	۷	۰/۰۷۵۷۲	۰/۶۸۶۱۴۳	1	1	۹	۰/۰۵۶۵۹۴	۰/۷۴۲۹۶۴	۰/۹۵	۱/۰۵
فاصله از جاده	۷	۰/۰۶۶۲	۷	۰/۰۷۵۷۲	۰/۶۸۶۱۴۳	۰/۹۵	۱/۰۵	۹	۰/۰۵۶۵۹۴	۰/۷۴۲۹۶۴	۱	۱
انحنای شیب	۱۰	۰/۰۶۲۹	۹	۰/۰۷۱۹۳۴	۰/۶۵۱۸۳۶	۱/۰۵	۰/۹۵	۱۰	۰/۰۵۳۸۹۹	۰/۷۰۷۵۸۵	۱/۰۵	۰/۹۵
پوشش گیاهی	۸	۰/۰۶۶۱	۸	۰/۰۷۵۵۳	۰/۶۸۴۴۲۸	۱/۱۵	۰/۸۵	۸	۰/۰۵۶۷۳۶	۰/۷۴۴۸۲۶	۰/۹۵	۱/۰۵
فاصله از نقاط	۵	۰/۰۷۶۸	۵	۰/۰۸۶۸۶	۰/۷۸۷۰۹۲	۱/۱	۰/۹	۵	۰/۰۶۶۷۴۸	۰/۸۷۶۲۶۶	۰/۸۵	۱/۱۵
گسل	۳	۰/۰۹۳۳	۳	۰/۰۹۵۵۴۶	۰/۸۶۵۸۰۱	۱/۱	۰/۹	۳	۰/۰۸۸۹۹۷	۱/۱۶۸۳۵۵	۰/۷۵	۱/۲۵
زمین‌شناسی	۲	۰/۱۲۱۰	۲	۰/۱۰۵۱۰۱	۰/۹۵۲۳۸۱	۱/۰۵	۰/۹۵	۲	۰/۱۳۶۹۱۹	۱/۷۹۷۴۶۹	۰/۶۵	۱/۳۵
تراکم اشکال	۱	۰/۱۶۹۳	۱	۰/۱۱۰۳۵۶	۱	۱	-	۱	۰/۲۲۸۱۹۸	۲/۹۹۵۷۸۲	۰/۶	۱/۴

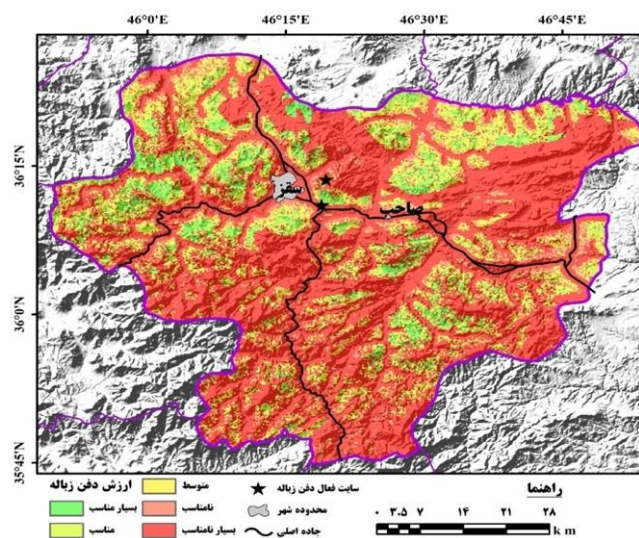


شکل ۴. ارزش معیارهای مؤثر در دفن زباله بر اساس مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره پیرشیا

سطح‌بندی و ارزیابی نهایی محدوده از نظر امکان دفن پسماند

خروجی نهایی نشان می‌دهد که تنها بخش محدودی از اراضی، توان بالقوه لازم برای استقرار محل دفن را داراست. کمترین گستره، مربوط به پهنه‌های بسیار مناسب با مساحت ۲۷۴ هکتار است. این نواحی به‌صورت لکه‌های مجزا و محدود در بخش‌هایی از منطقه ظاهر شده‌اند که مجموعه‌ای از شرایط محیطی پایدار در آنها همزمان برقرار است. این پهنه‌ها بیشتر در مناطقی که توسعه کارست در آنها حداقل بوده، ساختار زمین‌شناسی پایداری دارند و فاصله مکانی مناسبی از عناصر حساس محیطی مانند آبراهه‌ها و بافت‌های سکونت حفظ شده است. پهنه‌های مناسب با مساحت ۴۸۷ هکتار اغلب در نواحی میانی منطقه و بخش‌هایی از عرصه‌های پیرامونی شهر پراکنده‌اند. این نواحی از نظر اغلب معیارهای هیدرولوژیکی، ژئومورفیک و انسانی در آستانه قابل

قبول قرار گرفته‌اند و در ارزیابی مکانی، به‌عنوان گزینه‌های قابل بررسی در مراحل بعدی قابل طرح هستند. طبقه تناسب متوسط با مساحت ۴۷۵ هکتار، الگوی پراکنشی گذارگونه دارد و اغلب در حاشیه پهنه‌های مناسب و در مناطقی مشاهده می‌شود که تنها بخشی از معیارها در سطح قابل قبول قرار دارند. این نواحی به دلیل برخی محدودیت‌های محیطی مانند تغییرات ناگهانی توپوگرافی، پیچیدگی‌های لیتولوژیک یا فاصله نه‌چندان زیاد از آبراهه‌ها، نیازمند پژوهش‌های تکمیلی قبل از هر گونه تصمیم‌گیری اجرایی هستند. پهنه‌های نامناسب با مساحت ۲۴۸ هکتار، به‌صورت پراکنده در بخش‌هایی از منطقه گسترش یافته‌اند که محدودیت‌های محیطی با شدت متوسط بر آنها حاکم است. این پهنه‌ها اغلب تحت تأثیر شیب به‌نسبت زیاد، مجاورت با کاربری‌های حساس، تراکم نسبی آبراهه‌ها و شرایط هیدروژئولوژیکی نامطلوب قرار دارند و از این‌رو برای استقرار محل دفن پسماند مناسب ارزیابی نشدند. در مقابل، پهنه بسیار نامناسب با مساحت ۲۹۴۲ هکتار، گسترده‌ترین طبقه را تشکیل داده است و بیشتر در بخش‌های مرکزی، شمالی و جنوب شرقی شهرستان پراکنش دارد. غلبه این طبقه بیانگر آن است که ویژگی‌های ذاتی منطقه، از جمله توسعه گسترده سازه‌های کارستی، نفوذپذیری زیاد واحدهای آهکی، تراکم شکستگی‌ها، شبکه زهکشی فعال و مجاورت با گسل‌ها، تأثیر مهمی در کاهش قابلیت استقرار محل دفن پسماند داشته‌اند. بنابراین، الگوی نهایی تناسب به‌طور مستقیم از شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی منطقه تبعیت کرده و سبب شده است که تنها بخش محدودی از اراضی دارای قابلیت مناسب برای دفن پسماند باشد، درحالی که بخش اعظم شهرستان در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار دارد (شکل ۵). بنابراین انتخاب مکان دفن پسماند در این شهرستان نیازمند رویکردی مبتنی بر دقت زیاد، ارزیابی‌های میدانی تکمیلی و در نظر گرفتن الزامات محیط زیستی مرتبط با مناطق کارستی است. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند مبنای علمی برای مدیریت پسماند و تعیین سیاست‌های مکانی پایدار باشد.



شکل ۵. پهنه‌بندی محل مناسب دفن زباله

پژوهش‌های متعددی که با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام گرفته‌اند، نشان می‌دهند که پهنه‌های دارای تناسب زیاد برای استقرار محل دفن پسماند، به‌طور معمول سهم کمی از کل محدوده‌های تحت بررسی را به خود اختصاص می‌دهند (اسکندری، همایی و محمودی ۲۰۱۲). این الگو با نتایج پژوهش حاضر همخوانی کامل دارد، به‌گونه‌ای که در شهرستان سقز نیز پهنه‌های بسیار مناسب و مناسب بخش کوچکی از مساحت کل منطقه را شامل می‌شوند و اراضی نامناسب و بسیار نامناسب غالب هستند. یافته‌های این تحقیق همچنین با نتایج پژوهش‌ها در مناطق دارای شرایط زمین‌شناسی حساس، به‌ویژه نواحی کارستی، تطابق زیادی نشان می‌دهد. شر و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهش‌های خود تأکید کرده‌اند که توسعه سازه‌های آهکی و کارستی به دلیل نفوذپذیری زیاد و ارتباط مستقیم با منابع آب زیرزمینی، از مهم‌ترین محدودیت‌ها در مکان‌یابی محل دفن پسماند محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر نیز توسعه کارست و ویژگی‌های لیتولوژیکی

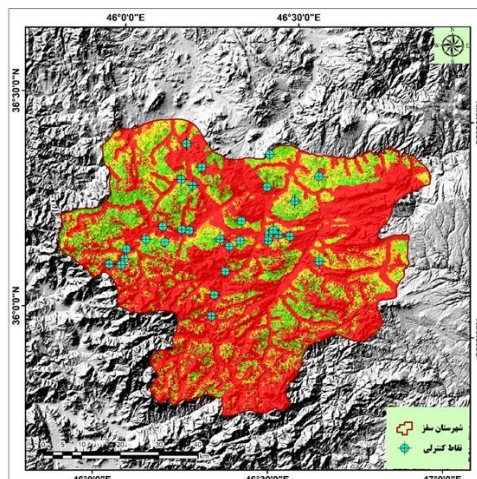
منطقه، اثر اساسی در کاهش تناسب بخش وسیعی از اراضی شهرستان سقز داشته و موجب گسترش پهنه‌های بسیار نامناسب شده است. از منظر ژئومورفولوژیکی، نتایج این پژوهش با یافته‌های پژوهش‌های انجام‌گرفته در مناطق کوهستانی و دارای ناهمواری شدید همسو است. کونتوس، کمیلیس و حالواداکیس (۲۰۰۵) و یشیناکار و ستین (۲۰۰۵) نشان داده‌اند که شیب‌های زیاد، پیچیدگی توپوگرافی و تراکم آبراهه‌ها موجب محدود شدن شدید گزینه‌های مناسب برای دفن پسماند می‌شود. افزون بر این، نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌هایی که بر تأثیر معیارهای زمین‌شناسی و ساختاری در مکان‌یابی دفن پسماند تأکید دارند نیز تطابق دارد. اسکندری، همایی و محمودی (۲۰۱۵) و معین‌الدینی و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده‌اند که لیتولوژی و مجاورت با گسل‌ها از عوامل مهم در کاهش ایمنی زیست‌محیطی محل‌های دفن هستند. در شهرستان سقز نیز همپوشانی پهنه‌های نامناسب و بسیار نامناسب با واحدهای زمین‌شناسی حساس و مناطق متأثر از ساختارهای تکتونیکی، این تأثیر را تأیید می‌کند. مقایسه یافته‌های این پژوهش با پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد که الگوی فضایی تناسب دفن پسماند در شهرستان سقز از منطق محیطی مشابهی با بسیاری از مناطق دارای شرایط طبیعی پیچیده پیروی می‌کند. غلبه پهنه‌های نامناسب و بسیار نامناسب، مؤید آن است که فرایند مکان‌یابی محل دفن پسماند باید مبتنی بر ارزیابی‌های دقیق مکانی و در نظر گرفتن همزمان محدودیت‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی باشد.

ارزیابی صحت طبقه‌بندی و درجه قطعیت نقشه پهنه‌بندی

در طبقه متوسط، از مجموع ۱۰ نقطه برداشت‌شده، ۹ نقطه به‌درستی در این طبقه جای گرفته و تنها ۱ نقطه به طبقه‌های مناسب و بسیار مناسب نسبت داده شده است. این جابه‌جایی اندک نشان‌دهنده شباهت نسبی پارامترهای این دو طبقه در برخی زیرمعیارهاست که اغلب در مرزهای انتقالی بین طبقات رخ می‌دهد. برای طبقه‌های مناسب و بسیار مناسب نیز ۸ نقطه از ۱۰ نقطه صحیح تشخیص داده شده و دو نقطه باقی‌مانده در طبقه متوسط قرار گرفته‌اند. نقاطی که به اشتباه در طبقه متوسط افتاده‌اند، اغلب در مجاورت مرزهای میانی قرار داشته‌اند که این موضوع در همه مدل‌های قطعی و احتمالی پهنه‌بندی امری طبیعی محسوب می‌شود. بر اساس جمع‌بندی ماتریس خطا، از مجموع ۳۰ نقطه کنترل زمینی، ۲۷ نقطه (معادل ۹۰ درصد از کل نقاط) با طبقه‌بندی نهایی نقشه انطباق کامل داشته‌اند. مقادیر ۰/۸۵ برای کاپای غیروزی و ۰/۹۱ برای ضریب کاپای وزنی به‌وضوح تأیید می‌کند که روش‌های به‌کاررفته در پهنه‌بندی، توانسته‌اند الگوی پراکنش مکانی طبقات را به‌درستی تشخیص دهند و خطای سیستماتیک زیادی در ساختار مدل وجود ندارد. با تجمیع نتایج حاصل از دقت کلی ۹۰ درصد و ضرایب کاپای وزنی (۰/۹۱) و غیر وزنی (۰/۸۵)، می‌توان نتیجه گرفت که نقشه نهایی پهنه‌بندی محل دفن پسماند از استحکام آماری زیاد و صحت مکانی مطلوبی برخوردار است (شکل ۶ و جدول ۴).

جدول ۴. ماتریس خطای صحت‌سنجی نقشه پهنه‌بندی

پهنه تناسب	نامناسب و بسیار نامناسب	متوسط	مناسب و بسیار مناسب	مجموع سطر
مناسب و بسیار مناسب	۰	۲	۸	۱۰
متوسط	۰	۹	۱	۱۰
نامناسب و بسیار نامناسب	۱۰	۰	۰	۱۰
مجموع ستون	۱۰	۱۱	۹	۳۰



شکل ۶. پراکندگی نقطه کنترلی برداشت‌شده در محدوده پیمایش شده

با توجه به یافته‌های این پژوهش، مدل تلفیقی GIS-PIPRECIA توانسته است با دقت خوبی پهنه‌های نامناسب و مناسب دفن پسماند را در شهرستان سقز تفکیک کند. بر اساس نتایج وزن‌دهی، معیارهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیک (توسعه کارست، لیتولوژی و گسل) بیشترین وزن را دارند که با نتایج پژوهش‌های چابوک و همکاران (۲۰۱۶) و اوت‌من و همکاران (۲۰۲۱) در مناطق کارستی عراق همخوانی کامل دارد. همچنین وزن زیاد معیار گسل در این پژوهش، مؤید نظر کرسیک و استوانوویچ (۲۰۰۹) است که بر تأثیر گسل‌ها به‌عنوان مسیرهای ترجیحی برای نفوذ شیرابه تأکید کرده‌اند. از طرفی در برخی پژوهش‌های پیشین و پژوهش‌های انجام‌گرفته در مناطق غیرکارستی، معیارهایی مانند فاصله از شهر و جاده وزن بیشتری داشته‌اند. اما در شهرستان سقز، به‌دلیل گسترش وسیع سازندهای کربناته، تراکم زیاد آبراهه‌ها و توسعه کارست، عوامل طبیعی بر عوامل انسانی غلبه دارند. این موضوع توضیح می‌دهد که چرا بیش از ۶۶ درصد از منطقه در طبقه بسیار نامناسب قرار گرفته است. همپوشانی سه عامل سازندهای آهکی با نفوذپذیری زیاد، تراکم گسل‌ها و شیب‌های تند در بخش‌های مرکزی و جنوبی، مهم‌ترین دلایل محدودیت شدید اراضی برای دفن پسماند است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس یافته‌های پژوهش، خروجی مدل پیرشیا نشان داد که در محیط‌های کارستی، کنترل فرایندهای زیرسطحی و زمین‌شناسی بر بقیه عوامل، از جمله معیارهای انسانی و بصری، اولویت دارد. تلفیق وزنی معیارها در GIS نشان داد که پهنه‌های مناسب برای دفن پسماند بسیار محدودند و اغلب به بخش‌هایی از نواحی شمالی و شرقی محدوده با لیتولوژی مقاوم‌تر و فاصله از گسل‌های فعال اختصاص دارند. در مقابل، گستره وسیعی از منطقه به‌دلیل توسعه کارست، تراکم آبراهه‌ها و ناهمواری‌های توپوگرافی، در طبقه بسیار نامناسب قرار گرفته‌اند و برای دفن پسماند فاقد ایمنی زیست‌محیطی لازم هستند. با توجه به نتایج تحقیق می‌توان گفت رویکرد تلفیقی GIS-PIPRECIA که پیشینه‌ای در زمینه موضوع پژوهش حاضر را نشان نمی‌دهد، نه تنها وزن‌دهی معیارها را با خطای شناختی کمتر ممکن ساخته، بلکه نقشه‌ای با جزئیات دقیق برای مدیریت منطقه‌ای ارائه داده است و همچنین می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی برای برنامه‌ریزی مدیریت پایدار پسماند در شهرستان سقز استفاده شود و الگوی مطالعه برای دیگر مناطق کارستی کشور باشد. پیشنهاد می‌شود پیش از هر گونه اقدام اجرایی، پهنه‌های بسیار مناسب شناسایی‌شده در این پژوهش، تحت بررسی‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی تکمیلی قرار گیرند.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در اجرا و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نحوه مشارکت نویسندگان در اجرای این پژوهش به صورت زیر است:
نویسنده اول: راهنمایی، ویرایش، بازبینی، کنترل نتایج، بازبینی کلی مقاله
نویسنده های دوم، سوم و چهارم: جمع آوری و تحلیل داده ها، اجرای تحقیق، تألیف نسخه اولیه.

حامی مالی

مقاله حاضر از هیچ حمایت مالی برخوردار نبوده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

هماندجویی

هماندجویی این پژوهش توسط سامانه ایرنداک انجام گرفت که بر این اساس همانندی ۱ درصد است.

سپاسگزاری

نویسندگان از یکایک مشارکت کنندگان در این پژوهش قدردانی می کنند.

منابع

- Abdulhasan, M. J., Hanafiah, M. M., Satchet, M. S., Abdulaali, H. S., Toriman, M. E., & Al-Raad, A. A. (2019). Combining GIS, Fuzzy logic, and AHP models for solid waste disposal site selection in Nasiriyah, Iraq. *Applied Ecology & Environmental Research*, 17(3). https://doi.org/10.15666/aeer/1703_67016722
- Bilir, T. E., Fung, I. Y., & Dawson, T. E. (2021). Slope-aspect induced climate differences influence how water is exchanged between the land and atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(5), e2020JG006027. <https://doi.org/10.1029/2020JG006027>.
- Chabuk, A., Al-Ansari, N., Hussain, H. M., Knutsson, S., & Pusch, R. (2016). Landfill site selection using geographic information system and analytical hierarchy process: A case study Al-Hillah Qadhaa, Babylon, Iraq. *Waste management & research*, 34(5), 427-437. <https://doi.org/10.1177/0734242X16633778>.
- Elkhrachy, I., Alhamami, A., & Alyami, S. H. (2023). Landfill Site Selection Using Multi-Criteria Decision Analysis, Remote Sensing Data, and Geographic Information System Tools in Najran City, Saudi Arabia. *Remote Sensing*, 15(15), 3754. <https://doi.org/10.3390/rs15153754>.
- Emadeddin, S. (Somieh); Farzaneh, F.; Arkhi, S.; Sayyad-Salar, Y. (2020). Siting of urban waste disposal using the Analytic Hierarchy Process (AHP) model and an Artificial Neural Network (ANN) (Case study: Gorgan County). *Geography and Environmental Hazards*, 34, 187–250. (in persian).
- Eskandari, M., Homaei, M., & Mahmodi, S. (2012). An integrated multi criteria approach for landfill siting in a conflicting environmental, economical and socio-cultural area. *Waste Management*, 32(8), 1528–1538. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.014>.
- Eskandari, M., Homaei, M., Mahmoodi, S., Pazira, E., & Van Genuchten, M. Th. (2015). Optimizing landfill site selection by using land classification maps. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(10), 7754–7765. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4182-7>. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4182-7>.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons . <https://doi.org/10.1002/9781118684986>.
- Ghadimi, M., Keynezhad, A., & Narouei, R. (2024). The effect of karstification on water resource hazards management based on physicochemical factors of water (Case study: Valiabad–Hezarcham), Iran. *Journal of Hazard Sciences*, 10(4), 335–354. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2024.373119.819>
- Ghadimi M, Hajihasani N, Malekian A, Moghimi E. (2022). Flood potential assessment of the Kan basin using morphometric parameters. *J Range Watershed Manag*, 75(4):539–551.
- Ghadimi, M., Zangenehtabar, S., Malekian, A., & Kiani, M. (2022). Groundwater vulnerability assessment in a karst aquifer: A case study of western Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12), 12079–12092. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03956-9>.
- Ghadimi, M., Moghbel, M., Gholamnia, M., & Pellikka, P. (2019). Snow line elevation variability under the effect of climate variations in the Zagros Mountains: Case study of Oshtorankoo. *Environmental Earth Sciences*, 78(12), 348. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8348-3>.
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A. S., et al. (2020). Global distribution of karst aquifers and considerations for groundwater protection. *Hydrogeology Journal*, 28, 1661–1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02154-9>
- Gontte, A. T. (2025). Geospatial-based landfill site selection in developing countries: An in-depth review of theories, methodologies, and criteria. *International Journal of Environmental Protection and Policy*, 13(1), 14–22. <https://doi.org/10.11648/j.ijep.20251301.12>. <https://doi.org/10.11648/j.ijep.20251301.12>
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., & Jourde, H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138, 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>.
- Hamed, M. H., Dara, R. N., & Kirlas, M. C. (2024). Groundwater vulnerability assessment using a GIS-based DRASTIC method in the Erbil Dumpsite area (Kani Qirzhala), Central Erbil Basin, North Iraq. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 12(1), 16–33. <https://doi.org/10.26599/JGSE.2024.9280003>.
- Hejazi, Asadollah; Zangeneh-Tabar, Zahra. (2025). Identification of suitable areas for landfill based on environmental parameters and exclusion zones (Case study: Dalahoo County). *Scientific Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 235–251. (in persian)
- Iran Meteorological Organization 1404 (<https://www.irimo.ir/>). (in persian)
- Khorram, A., Yousefi, M., Alavi, S. A., & Farsi, J. (2015). Convenient landfill site selection by using fuzzy logic and geographic information systems: a case study in Bardaskan, East of Iran. *population*, 6, 10.
- Kontos, T. D., Komilis, D. P., & Halvadakis, C. P. (2005). Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology. *Waste Management*, 25(8), 818–832. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.04.002>.
- Kresic, N., & Stevanovic, Z. (Eds.). (2009). Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management and sustainability. *Butterworth-heinemann*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.X0001-9>.

- Leins, T., Scheller, M., Çalli, K. Ö., Ravbar, N., Mayaud, C., Petrič, M., ... & Hartmann, A. (2025). A new process-based approach for defining karst aquifer vulnerability to contamination risks under global changes. *Science of The Total Environment*, 966, 178561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178561>.
- May, M. T., Brackman, T. B., May, E. C., & Edwards, W. T. (2024). Use of electrical resistivity tomography to reduce landfill siting risks in the south-central kentucky karst. *Environmental Earth Sciences*, 83(24), 688. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11984-6>.
- Merdassi, A., Guellouh, S., Tebbi, F. Z., & Boumezrag, K. (2023). GIS-based selection of appropriate landfill sites: The case of communal grouping in Batna, Algeria. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(2), 10306–10309. <https://doi.org/10.48084/etasr.5586>.
- Moeinaddini, M., Khorasani, N., Danehkar, A., Darvishsefat, A. A., & Zienalyan, M. (2010). Siting MSW landfills using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment. *Waste Management*, 30(5), 912–920. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.015>.
- Othman, A. A., Obaid, A. K., Al-Manmi, D. A. M., Pirouei, M., Salar, S. G., Liesenberg, V., ... & Al-Attar, Z. T. (2021). Insights for landfill site selection using GIS: a case study in the Tanjero River Basin, Kurdistan Region, Iraq. *Sustainability*, 13(22), 12602. <https://doi.org/10.3390/su132212602>.
- Padovan, B., Burelli, M., Forte, E. (2021). Geophysical methods for landfill characterization in karst environments. *Near Surface Geophysics*, 19(2), 133–150. <https://doi.org/10.1002/nsg.12167>.
- Rezapour, Abbas-Ali; Dimeh-Var, Saaid. (2024). Landfill site selection using Geographic Information System (GIS) and the fuzzy overlay method (Case study: Birjand County). *Integrated Watershed Management*, No. 3, 83–104. (in persian).
- Reszler, C., Komma, J., Stadler, H., Strobl, E., & Blöschl, G. (2018). A propensity index for surface runoff on a karst plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6147–6161. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6147-2018>.
- Salleh, A. H., Ahamad, M. S. S., Yusoff, M. S., & Aziz, H. A. (2017, October). Multiple criteria landfill site selection method incorporating the NIMBY factors. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1892, No. 1, p. 130003). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.5005735>
- Şener, Ş., Şener, E., Nas, B., & Karagüzel, R. (2010). Combining AHP with GIS for landfill site selection: A case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey). *Waste Management*, 30(11), 2037–2046. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.024>
- Sensoy, H., & Kara, Ö. (2014). Slope shape effect on runoff and soil erosion under natural rainfall conditions. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 7(2), 110. <https://doi.org/10.3832/ifer0925-007>
- Seyfried, M. S., Flerchinger, G. N., Bryden, S., Link, T. E., Marks, D. G., & McNamara, J. P. (2021). Slope and aspect controls on soil climate: Field documentation and implications for large-scale simulation of critical zone processes. *Vadose Zone Journal*, 20(6), e20158. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20158>.
- Sisay, T., Teku, D., & Abebaw, E. (2025). Solid waste disposal site selection using GIS and the Analytic Hierarchy Process model: A case study conducted in Gimba Town, Northeastern Ethiopia. *Frontiers in Sustainability*, 6, 1528851. <https://doi.org/10.3389/frsus.2025.1528851>.
- Shahabi, H., Khezri, S., Ahmad, B. B., & Zabihi, H. (2012). Application of artificial neural network in prediction of municipal solid waste generation (Case study: Saqqez City in Kurdistan Province). *World Applied Sciences Journal*, 20(2), 336-343.
- Stanujkic, D., Zavadskas, E. K., Karabasevic, D., Smarandache, F., & Turskis, Z. (2017). The use of the Pivot Pairwise Relative Criteria Importance Assessment method for determining the weights of criteria. *Romanian Journal of Economic Forecasting*, 20(4), 116–133.
- Stanujkic, D., Zavadskas, E. K., Karabasevic, D., Smarandache, F., & Turskis, Z. (2017). The use of the pivot pairwise relative criteria importance assessment method for determining the weights of criteria. *Infinite Study*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1055844>
- Wu, T. H., Chen, C. Y., Huang, S. W., & Yu, T. T. (2025). An integrated decision framework for landfill mining site selection using GIS, multi-criteria analysis, and optimization models. *Socio-Economic Planning Sciences*, 99, 102220. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102220>