University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: https://ije.ut.ac.ir

Online ISSN: 2423-6101

Assessment of Karst Ecohydrology and Groundwater Recharge Potential in the Dorfak Forest Area, Northern Iran

Behzad Khodaei,[1] Rahim Bagheri, [*2] Somayeh Zarei,[3]

1. Ph.D. student in Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; Email: khodai.behz@gmail.com
2. Associate Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; Email: rahim.bagheri86@gmail.com & r.bagheri@shahroodut.ac.ir
3. Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; Email: s.zarei@shahroodut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 23 January 2026
Revised 15 February 2026
Accepted 28 February 2026
Available online 21 March 2026

Keywords:
Karst Ecohydrology,
Recharge,
Hydrogeology,
GIS,
Dorfak Forest.

ABSTRACT

Objective
Groundwater recharge in karst aquifers of carbonate formations plays a fundamental role in supplying freshwater resources and sustaining water-dependent ecosystems. From a karst ecohydrology perspective, this process results from complex interactions among hydrogeological characteristics, structural features, vegetation cover, and climatic conditions. The Dorfak karst-forested area in Gilan Province, characterized by humid climate and complex topography, represents a typical example of ecohydrological systems where groundwater recharge is strongly influenced by lithology, fracture networks, soil type, forest cover, and climatic variables.

Methods
In this study, a modified APLIS model was employed to assess groundwater recharge potential in this heterogeneous environment, incorporating not only classical parameters but also ecohydrological variables including vegetation cover, drainage density, fracture density, slope aspect, precipitation, and temperature. Spatial layers were prepared using GIS and remote sensing data and weighted through the Analytic Hierarchy Process (AHP). Subsequently, the final recharge potential map was generated using weighted overlay analysis.

Results
Results indicate that 30.4% of the area exhibits moderate recharge potential (annual recharge rate of 40-42%), while low (38-40%) and high (42-44%) recharge potential areas comprise 23.1% and 22.4% of the region, respectively. Very high (exceeding 44%) and very low (less than 38%) recharge potential zones account for 14.6% and 9.5% of the study area, respectively. Analysis of results reveals a strong correlation between recharge distribution and lithology, with karstic limestones demonstrating the highest recharge potential. Annual recharge volume in this region, considering the mean annual precipitation of 762 mm, and average recharge rate of 42%, is estimated at approximately 163 Mm^3/y.

Conclusions
This study demonstrates that the modified APLIS approach, combined with AHP and GIS, provides an efficient model for analyzing karst ecohydrology and assessing groundwater recharge in humid, forested karst environments. The findings can serve as a reliable basis for sustainable water resource management, protection of karst springs, determination of water quality and quantity protection zones, and land-use planning in forested areas.

Cite this article: Khodaei, B., Bagheri, R., Zarei, S (2026). Assessment of Karst Ecohydrology and Groundwater Recharge Potential in the Dorfak Forest Area, Northern Iran. *Journal of Ecohydrology*, *13*(1), 1124-1144. https://doi.org/10.22059/ije.2026.409955.1905

© Behzad Khodaei, Rahim Bagheri, Somayeh Zarei

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ije.2026.409955.1905

Extended Abstract

Introduction

Karst aquifers are vital freshwater sources globally, supplying about one-quarter of the world's population. These aquifers exhibit complex hydrogeological behavior due to high permeability, dissolution conduits, and structural heterogeneities, making recharge estimation a major challenge in karst hydrogeology and ecohydrology. The recharge process is highly variable and controlled by multiple interacting factors including lithology, fracture networks, soil properties, topography, vegetation cover, and climatic conditions. In Iran, extensive carbonate units in the Alborz and Zagros mountains require comprehensive understanding of karst hydrogeology, particularly in humid, forested regions such as the Dafak karst-forested area in Gilan Province. This region experiences abundant precipitation, steep slopes, and dense forest cover, creating a complex ecohydrological system where groundwater recharge patterns are strongly dependent on local conditions. The APLIS model (Altitude, Slope, Lithology, Infiltration, Soil), originally developed by Andreo et al. (2008), is a widely used method for evaluating recharge potential in carbonate aquifers. However, modified versions incorporating additional variables such as forest cover, temperature, fracture density, drainage density, slope aspect, and precipitation intensity improve estimation accuracy in humid and forested environments. This study aims to: (1) assess the ecohydrological characteristics of the Dafak karst-forested area, (2) evaluate groundwater recharge potential using a modified APLIS approach integrated with AHP weighting and GIS analysis, and (3) quantify the annual groundwater recharge volume.

Method and Sampling Procedures

The study area is located in Gilan Province, southeastern Sefidrud River basin, covering approximately 510 km² of karstic formations. Elevation ranges from 73 to 2711 m above sea level, with mean annual precipitation of 762 mm. A modified APLIS approach was employed incorporating ten parameters affecting groundwater recharge. Digital Elevation Model (DEM) with 12.5 m resolution was used to derive elevation, slope, and aspect layers. Lithological units were classified from 1:100,000 geological maps into 18 classes based on permeability and karstification potential. Soil types were classified as Alfisols, Mollisols, and Inceptisols based on infiltration capacity. Infiltration-related parameters included: drainage density derived from DEM stream networks, fracture density extracted from Landsat 9 imagery and geological maps, precipitation interpolated from four meteorological stations using IDW method, temperature estimated using elevation-temperature regression, and vegetation cover quantified through NDVI from Landsat 9 imagery. Parameter weights were determined using Analytic Hierarchy Process (AHP) with pairwise comparisons in Expert Choice software. Weighted layers were integrated in GIS using Weighted Overlay analysis to generate the final recharge potential map, classified into five categories: very low (<38%), low (38-40%), moderate (40-42%), high (42-44%), and very high (>44%). Annual recharge volume was calculated using mean recharge rate, total area, and mean precipitation.

Results

The modified APLIS model results indicate that 30.4% of the study area falls within moderate recharge potential, representing the largest proportion. Low and high recharge potential areas comprise 23.1% and 22.4% respectively. Very high and very low recharge zones account for 14.6% and 9.5% of the area. Strong correlation exists between recharge distribution and lithology. Karstic limestone units (JK_1, K_{1-1}) in southern and central parts consistently display very high to high recharge rates. Coarse alluvial deposits also exhibit elevated recharge potential. Mixed carbonate-marl units show moderate to high recharge, while low-permeability shale, marl, and volcanic units correspond to low and very low recharge zones. AHP weighting yielded consistency ratio of 0.07 with lithology receiving highest weight (0.25), followed by precipitation (0.15), fracture density (0.12), and vegetation cover (0.10). The mean annual

recharge rate was calculated as approximately 42%, resulting in estimated annual groundwater recharge volume of 163 million cubic meters.

Conclusions

This study demonstrates that the modified APLIS approach, combined with AHP weighting and GIS integration, provides an efficient framework for assessing groundwater recharge in humid, forested karst environments. Spatial distribution of recharge potential is primarily controlled by lithology, with karstified limestone units exhibiting highest recharge rates. Ecohydrological parameters including vegetation cover, temperature, and fracture density significantly influence recharge patterns and should be incorporated in karst assessments, particularly in forested environments. The estimated annual recharge volume of 163 million m^3 provides critical input for regional water balance assessments and sustainable groundwater management. The methodological framework can be applied to other humid, forested karst regions where conventional APLIS models may prove inadequate.

Funding

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

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to appreciate the continuous support of Shahrood University of Technology in this research.

مجله اکوهیدرولوژی
انتشارات دانشگاه تهران
شاپای الکترونیکی: ۶۱۰۱-۲۴۲۳
سایت نشریه: https://ije.ut.ac.ir

ارزیابی اکوهیدرولوژی کارست و پتانسیل تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی در منطقهٔ جنگلی درفک، شمال ایران

بهزاد خدایی[۱]، رحیم باقری[۲*]، سمیه زارعی[۳]

۱. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: khodai.behz@gmail.com
۲. دانشیار، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: rahim.bagheri86@gmail.com و r.bagheri@shahroodut.ac.ir
۳. استادیار، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: s.zarei@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:
اکوهیدرولوژی کارست،
تغذیه،
هیدروژئولوژی،
سامانهٔ جغرافیایی،
جنگل درفک

چکیده

هدف

تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی سازندهای کربناته نقش اساسی در تأمین منابع آب شیرین و پایداری اکوسیستم‌های وابسته به آب دارد. از دیدگاه اکوهیدرولوژی کارست، این فرایند حاصل تعامل پیچیده میان ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی، ساختاری، پوشش گیاهی و شرایط اقلیمی است. منطقهٔ کارستی ـ جنگلی درفک در استان گیلان، با اقلیم مرطوب و توپوگرافی پیچیده، نمونه‌ای شاخص از سامانه‌های اکوهیدرولوژیکی است که در آن تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی به‌شدت تحت تأثیر سنگ‌شناسی، شبکهٔ شکستگی‌ها، نوع خاک، پوشش جنگلی و متغیرهای اقلیمی قرار دارد.

روش پژوهش

در این مطالعه، به منظور ارزیابی پتانسیل تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی در این محیط ناهمگن، از مدل اصلاح‌شدهٔ APLIS استفاده شده است که علاوه بر پارامترهای کلاسیک، متغیرهای مرتبط با اکوهیدرولوژی شامل پوشش گیاهی، تراکم زهکشی، تراکم شکستگی، جهت شیب، بارندگی و دما را نیز در بر می‌گیرد. لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از داده‌های GIS و سنجش از دور تهیه و از طریق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) وزن‌دهی شدند.

یافته‌ها

نتایج نشان می‌دهد ۳۰/۴ درصد از منطقه دارای پتانسیل تغذیهٔ متوسط (نرخ تغذیهٔ سالانه ۴۰-۴۲ درصد) است، در حالی که مناطق با پتانسیل تغذیهٔ کم (۳۸-۴۰ درصد) و زیاد (۴۲-۴۴ درصد) به‌ترتیب ۲۳/۱ و ۲۲/۴ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شوند. همچنین، پهنه‌های دارای پتانسیل تغذیهٔ بسیار زیاد (بیش از ۴۴ درصد) و بسیار کم (کمتر از ۳۸ درصد) به‌ترتیب ۱۴/۶ و ۹/۵ درصد از محدودهٔ مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. سنگ‌آهک‌های کارستی بالاترین پتانسیل تغذیه را نشان می‌دهند. حجم تغذیهٔ سالانه با توجه به میانگین بارندگی سالانه ۷۶۲ میلی‌متر و نرخ تغذیه ۴۲ درصد، حدود ۱۶۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد رویکرد اصلاح‌شده APLIS، در ترکیب با AHP و GIS، مدلی کارآمد برای تحلیل اکوهیدرولوژی و ارزیابی تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی در محیط‌های کارستی مرطوب و جنگلی فراهم می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی قابل اعتماد برای مدیریت پایدار منابع آب، حفاظت از چشمه‌های کارستی، تعیین حریم کیفی و کمی منابع آب، و برنامه‌ریزی کاربری اراضی در مناطق جنگلی ارائه دهد.

استناد: خدائی، بهزاد؛ باقری، رحیم؛ زارعی، سمیه (۱۴۰۵). ارزیابی اکوهیدرولوژی کارست و پتانسیل تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی در منطقهٔ جنگلی درفک، شمال ایران. *مجلهٔ اکوهیدرولوژی*، ۱۳(۱)، ۱۱۲۴ ـ ۱۱۴۴.
https://doi.org/10.22059/ije.2026.409955.1905
ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.
© بهزاد خدائی، رحیم باقری، سمیه زارعی.

مقدمه

آبخوان‌های کارستی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین جهان هستند و حدود یک‌چهارم جمعیت زمین به طور مستقیم از آن‌ها بهره‌مند می‌شوند. این آبخوان‌ها به دلیل نفوذپذیری بالا، وجود مجاری انحلالی و ناهمگنی‌های ساختاری، رفتار پیچیده‌ای دارند و برآورد نرخ تغذیه در آن‌ها یکی از چالش‌های اصلی هیدروژئولوژی و اکوهیدرولوژی کارست محسوب می‌شود (بوناچی[1] و آندریک[2]، ۲۰۱۵). پیچیدگی‌هایی مانند تغییرات لیتولوژی، توسعهٔ گسستگی‌ها، ضخامت و ویژگی‌های خاک، و تفاوت‌های توپوگرافی باعث می‌شود که فرایند تغذیه در سیستم‌های کارستی به‌شدت متغیر و وابسته به شرایط محلی باشد. در ایران نیز به دلیل گستردگی واحدهای کربناته در البرز و زاگرس، شناخت رفتار هیدروژئولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی پهنه‌های کارستی اهمیت ویژه‌ای دارد (رئیسی[3] و کوثر[4]، ۱۹۹۷؛ باقری، میرحسنی و جعفری، ۲۰۲۲؛ کرمی، باقری و رحیمی، ۲۰۱۶). این اهمیت در مناطق مرطوب و جنگلی مانند پهنهٔ کارستی - جنگلی درفک در استان گیلان که تحت تأثیر بارش‌های فراوان، شیب‌های تند و پوشش جنگلی انبوه است بیشتر می‌شود. برای ارزیابی وضعیت اکوهیدرولوژی و پتانسیل تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی در چنین محیط‌های ناهمگن، استفاده از مدل‌هایی که بتوانند ناهمگونی‌های کارستی را در قالب شاخص‌های کمی و قابل‌پردازش مدل‌سازی کنند، ضروری است (باقری، میرحسنی و جعفری، ۲۰۲۲).

مطالعات اکوهیدرولوژی کارست به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد این محیط اهمیت ویژه‌ای دارند. بوناچی و همکاران (۲۰۰۹) چارچوب مفهومی اکوهیدرولوژی کارست را ارائه کردند که بر تعامل مستقیم جریان و ذخیرهٔ آب زیرزمینی و آب سطحی و تأثیر آن بر توزیع زیستگاه‌ها تأکید دارد. در کارست، ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی با محیط‌های همگن متفاوت است و سازندهای زیرسطحی مانند epikarst و نواحی vadose نقش کلیدی در گردش آب و حفظ گونه‌های کمیاب دارند. این یافته‌ها بر ضرورت استفاده از رویکردهای منطقه‌ای و مدل‌سازی دقیق برای ارزیابی وضعیت اکوهیدرولوژی و پتانسیل تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی در محیط‌های کارستی تأکید می‌کنند. در میان روش‌های مختلف ارزیابی اکوهیدرولوژی و تغذیهٔ کارست نظیر روش‌های هیدروژئولوژیکی، شیمیایی، ردیابی و روش‌های دورسنجی - سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل سیستم اطلاعات جغرافیایی APLIS (Altitude, Slope, Lithology, Infiltration, Soil) به دلیل سادگی، قابلیت به‌کارگیری در مقیاس حوضه‌ای، و توانایی تلفیق عوامل کلیدی مؤثر بر نفوذ و تغذیه، یکی از روش‌های رایج ارزیابی پتانسیل تغذیه در محیط‌های کارستی به شمار می‌رود. این مدل که نخستین‌بار توسط آندرو[5] و همکاران (۲۰۰۸) برای کارست‌های اسپانیا ارائه شد، با امتیازدهی وزنی به پنج پارامتر ارتفاع، شیب، لیتولوژی، نفوذ و خاک، نقشه‌ای از پتانسیل تغذیه تهیه می‌کند. با این‌حال، نسخه‌های اصلاح‌شده APLIS با بازنگری وزن پارامترها و افزودن متغیرهایی مانند پوشش جنگلی، دما، تراکم شکستگی، تراکم آبراهه، جهت شیب و شدت بارندگی (ارامونی[6]، المساری[7] و طاهر[8]، ۲۰۲۲؛ تاموری[9]، ۲۰۲۴) دقت برآورد را به‌ویژه در محیط‌های مرطوب و جنگلی افزایش می‌دهند.

پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی نشان داده‌اند ترکیب نسخه‌های اصلاح‌شده APLIS با روش‌های وزن‌دهی چندمعیاره مانند AHP و TOPSIS و ابزارهای GIS و سنجش از دور، توانایی استخراج دقیق پهنه‌های تغذیه را افزایش می‌دهد (اسپینوزا[10] و همکاران، ۲۰۱۴؛ زارعی[11] و جوادی پیربازاری، ۱۳۹۵؛ انتظاری[12] و همکاران، ۲۰۲۰؛ عالم[13] و همکاران، ۲۰۱۷؛ عالم، اسماعیل‌زاده سوده‌جانی[14]

1. Bonacci
2. Andric
3. Raeisi
4. Kowsar
5. Andreo
6. Errahmouni
7. El Messari
8. Taher
9. Tadmouri
10. Espinoza
11. Zaree
12. Javadi Pirbazari
13. Alem
14. Esmaeilzadeh Soudejani

و فلاحی[1]، ۲۰۲۱). برای مثال، اسپینوزا و همکاران (۲۰۱۴) در آبخوان کارستی آمازوناس پرو نشان دادند نسخهٔ اصلاح‌شدهٔ APLIS سازگاری بیشتری با شرایط لیتولوژیک و اقلیمی مناطق مرتفع دارد و در مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی نتایج واقع‌گرایانه‌تری تولید می‌کند. همچنین، پژوهش‌هایی مانند داکتر[2] و همکاران (۲۲۰۶) و جیر[3] و همکاران (۲۰۰۸) نیز بیان کرده‌اند که استفاده از داده‌های زمانی چشمه‌ها، هیدروگراف‌ها و تحلیل‌های خطی و غیرخطی می‌تواند محدودیت‌های ساده‌سازی مدل‌ها را کاهش داده و درک دقیق‌تری از الگوهای تغذیه ارائه دهد. در میان پژوهش‌های داخلی نیز، مطالعهٔ معتمدی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۷) از جامع‌ترین نمونه‌هاست که در آن پتانسیل نفوذ آب زیرزمینی در حوضهٔ آبریز روئین اسفراین با استفاده از سه مدل AHP، APLIS و APLIS اصلاح‌شده ارزیابی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل APLIS اصلاح‌شده با ضریب همبستگی ۰/۸۵ دقیق‌ترین تخمین را ارائه می‌دهد و پهنه‌های دارای بیشترین پتانسیل نفوذ عمدتاً با سازندهای آهکی ـ دولومیتی و مناطق با تراکم زهکشی کم تطابق دارند. مدل APLIS اصلاح‌شده ایشان با دقت زیادی قادر به شناسایی پهنه‌های دارای بیشترین پتانسیل نفوذ و تغذیه است. پژوهش‌های دیگر در ایران، از جمله مطالعات انجام‌شده در کارست‌های شمال خراسان، مشهد و جوانرود کرمانشاه (زارعی و جوادی پیربازاری، ۱۳۹۵؛ عالم و همکاران، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۱؛ باقری، میرحسنی و جعفری، ۲۰۲۲؛ کرمی، باقری و رحیمی، ۲۰۱۶)، نشان داده‌اند ترکیب مدل APLIS با GIS و سنجش از دور می‌تواند دقت استخراج پهنه‌های تغذیه را افزایش دهد و نسخه‌های اصلاح‌شده مدل عملکرد بهتری نسبت به نسخهٔ پایه دارند.

با توجه به ناهمگنی شدید آبخوان‌های کارستی و پیچیدگی فرایند تغذیه در محیط‌های مرطوب و جنگلی، به‌ویژه در پهنهٔ کارستی - جنگلی درفک استان گیلان، ارزیابی اکوهیدرولوژی و تعیین پهنه‌های مستعد تغذیهٔ آب زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است (باقری، میرحسنی و جعفری، ۲۰۲۲). هم‌زمانی بارش‌های فراوان، شیب‌های تند، توسعهٔ اپی‌کارست و پوشش جنگلی انبوه در این منطقه، الگوی نفوذ و تغذیه را به‌شدت وابسته به شرایط محلی می‌کند و استفاده از رویکردهای کمی و مکانی‌محور را ضروری می‌سازد. در این راستا، تلفیق نسخه‌های اصلاح‌شدهٔ مدل APLIS با ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی، داده‌های اقلیمی و زمین‌شناسی و تحلیل‌های میدانی، چارچوبی علمی و کارآمد برای ارزیابی وضعیت اکوهیدرولوژی و پهنه‌بندی پتانسیل تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی در منطقه فراهم می‌کند. با توجه به اینکه در این منطقه و دیگر مناطق جنگلی در کشور مطالعهٔ کارست و تعیین تغذیه به آبخوان‌های کارستی جنگلی به طور جامع کار نشده است، لذا هدف از انجام این تحقیق ارزیابی پارامترهای مؤثر بر تغذیه و تعیین مقدار تغذیه به آبخوان کارستی منطقهٔ جنگلی درفک است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی قابل اعتماد برای مدیریت پایدار منابع آب، حفاظت از چشمه‌های کارستی و برنامه‌ریزی کاربری اراضی در شمال ایران به منظور تعیین حوضه‌های آبگیر و حریم کمی و کیفی منابع مختلف ارائه دهد.

روش‌شناسی پژوهش

معرفی محدودهٔ مطالعاتی

محدودهٔ مطالعاتی درفک در استان گیلان و در بخش جنوب شرقی حوضهٔ آبریز اصلی سفیدرود، در محدودهٔ آستانه ـ کوچصفهان واقع شده است. این ناحیه به عنوان یکی از پهنه‌های کوهستانی شاخص گیلان، شامل ارتفاعات برجسته‌ای همچون کوه درفک است که در میان شهرهای رشت، سیاهکل، رودبار و دیلمان قرار دارد. از نظر اقلیمی، این ارتفاعات کارستی به دلیل موقعیت مرتفع و دوری از کانون‌های آلودگی، تحت تأثیر آلودگی‌های انسانی کمتری قرار می‌گیرند و از اهمیت جالب توجهی برخوردارند. افزون بر این، تغییرات مکانی و زمانی بارش و شیب‌های تند توپوگرافی، موجب افزایش حساسیت منطقه نسبت به تغییرات نرخ تغذیهٔ آبخوان می‌شود. محدوده از نظر زمین‌شناسی شامل مجموعه‌ای متنوع از واحدهای سنگی از تریاس تا کواترنر است که هر یک نقش ویژه‌ای در ساختار هیدروژئولوژیکی منطقه ایفا می‌کنند (شکل ۱). واحدهای آهکی کارست‌زای منطقه شامل سازند لار (واحد JK_1)، آهک‌های کرتاسه زیرین (واحد K_{1-1})، سنگ‌آهک‌های مارنی کرتاسه بالایی (واحد K_{2-1}) و واحدهای آهکی Kc هستند.

1. Fallahi
2. Doctor
3. Geyer

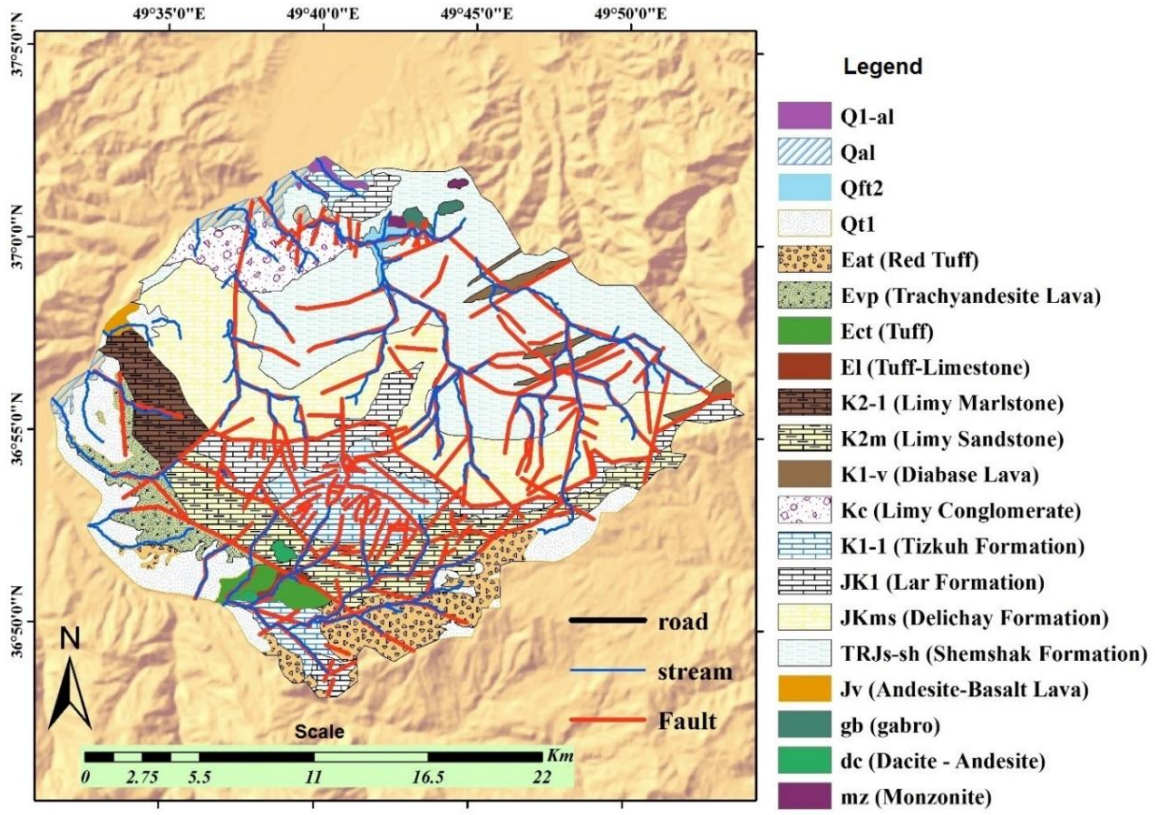
واحد JK_1 عمدتاً از آهک‌های متوسط تا ضخیم‌لایه و توده‌ای تشکیل شده و به دلیل ضخامت لایه‌ها، خلوص نسبی آهک و توسعهٔ شکستگی‌ها، استعداد مناسبی برای نفوذپذیری ثانویه و کارستی شدن دارد. واحد K_{1-1} (سازند تیزکوه) شامل آهک‌های بیومیکریتی ضخیم‌لایه با تخلخل زیستی و بین‌دانه‌ای بالاست و توسعهٔ گستردهٔ شکل‌های انحلالی، این واحد را به مهم‌ترین پهنهٔ تغذیهٔ مستقیم آبخوان تبدیل کرده است. واحد K_{2-1} متشکل از سنگ‌آهک‌ها و سنگ‌آهک‌های مارنی نازک‌لایه بوده که به دلیل حضور مارن، نفوذپذیری اولیه کمتری دارد، اما شکستگی‌ها امکان نفوذ ثانویه را فراهم می‌کنند. واحدهای Kc نیز به دلیل ترکیب لیتولوژیکی مناسب و گسترش شکستگی‌ها، نقش مؤثری در توسعهٔ کارست و هدایت جریان زیرسطحی دارند. در کنار این واحدهای آهکی، سازندهای با نفوذپذیری پایین‌تر شامل مارن‌ها، شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های واحدهای TRJs-sh، JKms و K_2m در گسترهٔ وسیعی حضور دارند که با عبور محدود آب از میان لایه‌ها، نقش سدکننده دارند و الگوی نفوذ، تمرکز رواناب و مسیر جریان زیرسطحی را کنترل می‌کنند. در بخش‌هایی از کوه درفک و نواحی مجاور، سنگ‌های ولکانیکی شامل توف‌ها و گدازه‌های آندزیتی ـ بازالتی (K_2v، Evp، Jv و Pglv) رخنمون دارند که اگرچه نفوذپذیری اولیه کمی دارند، اما شکستگی‌های توسعه‌یافته می‌تواند آن‌ها را به آبخوان‌های شکاف‌دار با نقش تغذیهٔ متوسط تبدیل کند. در پایین‌دست و نواحی دشت، رسوبات آبرفتی کواترنری (Qal، Qt_1، Qft_2) با دانه‌بندی درشت و تخلخل بالا گسترده شده‌اند و بیشترین سهم را در تغذیهٔ مستقیم آبخوان ایفا می‌کنند. ترکیب این واحدها (از آهک‌های کارستی بسیار تراوا تا سنگ‌های کم‌نفوذ شیل و مارن) چارچوب اصلی رفتار هیدروژئولوژیکی منطقه را شکل داده و تعیین‌کنندهٔ الگوی تغذیه، جریان و ذخیره‌سازی آب در محیط کارست - جنگلی درفک است.

روش انجام مطالعه

برآورد میزان تغذیهٔ آبخوان‌های کارستی، به دلیل وجود هم‌زمان محیط‌های متخلخل و مجاری انحلالی با رفتار هیدرودینامیکی متفاوت، از چالش‌برانگیزترین مراحل تحلیل چرخهٔ هیدرولوژیک محسوب می‌شود. در این راستا، بهره‌گیری از روش‌های تلفیقی مبتنی بر سامانهٔ اطلاعات مکانی (GIS) و داده‌های سنجش‌ازدور که امکان پردازش و مدیریت حجم بالایی از اطلاعات را فراهم می‌کند، ضروری است. در این پژوهش، برای پهنه‌بندی پتانسیل تغذیهٔ آبخوان‌های کارستی، از الگوریتم APLIS اصلاح‌شده (Modified APLIS) استفاده شد. این مدل با ترکیب معیارهای محیطی و زمین‌شناختی و تعیین وزن آن‌ها به وسیلهٔ روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، امکان شناسایی مناطق مستعد نفوذ آب باران را فراهم می‌سازد.

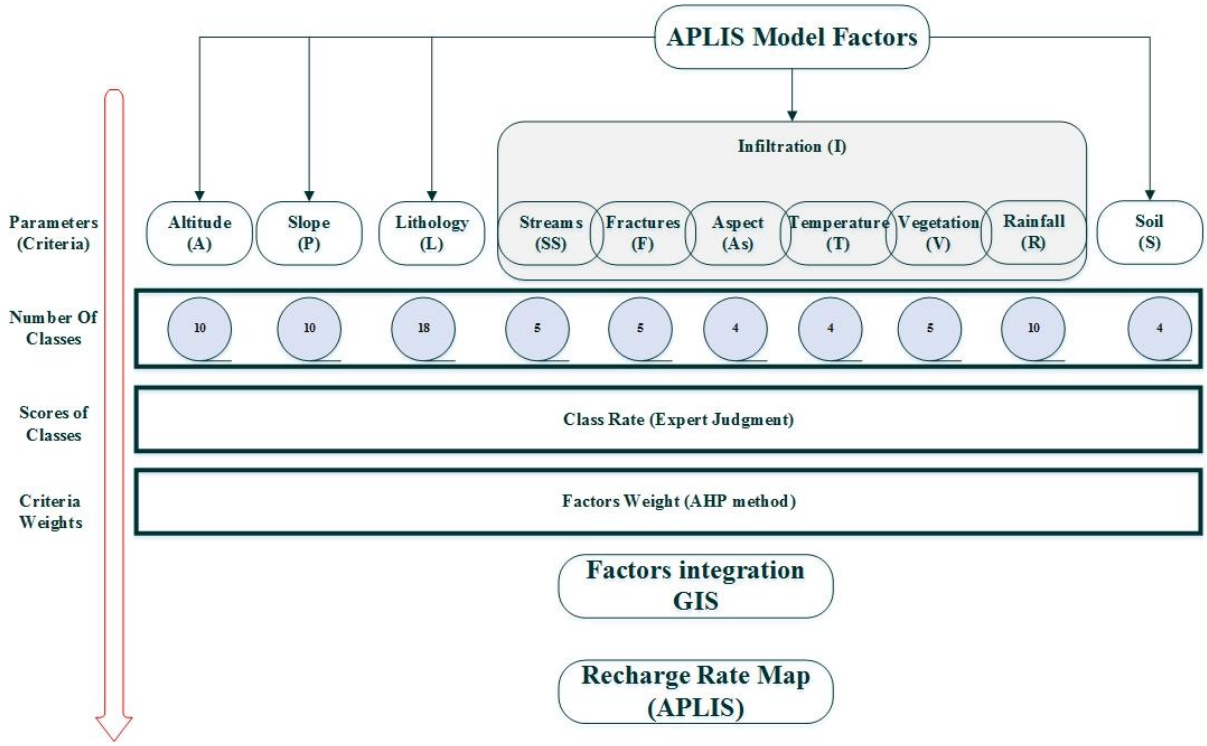
تهیه و پردازش لایه‌های اطلاعاتی

برای اجرای مدل APLIS، مجموعه‌ای از لایه‌های مکانی که بر فرایند نفوذ آب تأثیرگذار هستند، تهیه و طبقه‌بندی شده است. روند نمای اجرای APLIS در شکل ۲ نمایش داده شده است. این پارامترها شامل ارتفاع، شیب و جهت شیب، سنگ‌شناسی، جنس خاک و درجهٔ نفوذ آب (شامل تراکم آبراهه‌ها، تراکم خطواره‌ها و ساختارهای خطی، بارش، دما و پوشش گیاهی) می‌شوند. مرحلهٔ بعد از ایجاد لایه‌های اطلاعاتی، ترکیب لایه‌های ایجادشده است.



شکل ۱. نقشهٔ زمین‌شناسی محدودهٔ مطالعاتی درفک

برای ارزیابی مقدار تغذیه در منطقه لازم است لایه‌هایی که طبق عوامل مختلف مؤثر بر تغذیه تعیین شده‌اند را به یک مقیاس واحد تبدیل کرد. مقیاس‌بندی این لایه‌ها بر اساس نظرات کارشناسی است. لایه‌های اطلاعاتی به نسبت فواصل مساوی طبقه‌بندی می‌شوند که بیانگر این است که هر موقعیت مشخص (هر پیکسل) تا چه میزان برای تغذیه مناسب است. ارزش‌های بالاتر به گروه‌های داده می‌شود که دارای اهمیت بیشتر در تغذیه هستند. از مهم‌ترین مراحل کار، تعیین اهمیت نسبی پارامترهای مؤثر در تغذیه و وزندهی مناسب بین ۱ تا ۱۰ به هر یک از آن‌ها است. روش‌های مختلفی برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی وجود دارد، که در این تحقیق بر اساس دانش کارشناسی یا کارشناس‌محور صورت گرفته است. بنابراین در اینجا سعی شده است با استفاده از روش‌ها و اصول اولیه زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و نیز ابزار سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در تغذیه آب به آبخوان‌های کارستی منطقه تهیه و اقدام به پردازش، وزن‌دهی و همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی شده است. درنهایت با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی به‌دست‌آمده در محیط GIS میزان تغذیه منطقه محاسبه شد. در ادامه، هر یک از این پارامترها تشریح شده و طبقه‌بندی وزنی و امتیازدهی آن‌ها در قالب نقشه‌های موضوعی ارائه خواهد شد.



شکل ۲. روندنمای روش همپوشانی APLIS

الف) ارتفاع[1] (A)

ارتفاع یکی از عوامل مهم اقلیمی مؤثر بر بارش، دما و در نتیجه نرخ تغذیه است. داده‌های رقومی ارتفاع[2] (DEM) برای تولید نقشهٔ ارتفاع مورد استفاده قرار گرفتند. برای استخراج لایهٔ ارتفاع، از داده‌های مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر استفاده شده است. بر این‌اساس، در محدودهٔ درفک، ارتفاع بین ۷۳ تا ۲۷۱۱ متراز سطح آزاد دریا متغیر است.

ب) شیب[3] و جهت شیب[4] (P)

شیب با تأثیر بر سرعت جریان سطحی و زمان ماندگاری آب در خاک، نقش مهمی در تغذیه ایفا می‌کند؛ دامنه‌های تند باعث افزایش رواناب و کاهش نفوذ و تغذیه می‌شوند، در حالی که دامنه‌های ملایم و سطوح تقریباً تخت امکان نفوذ بیشتر و تغذیهٔ بالاتر را فراهم می‌کنند، و این اثر همراه با جهت شیب، الگوی فضایی تغذیه آب زیرزمینی را تعیین می‌کند. بنابراین، شیب‌های مختلف را می‌توان بر اساس درجهٔ تأثیرگذاری بر مقدار تغذیه، تقسیم‌بندی و امتیازدهی کرد. به این‌ترتیب که به شیب‌های کم، ارزش بیشتر و به شیب‌های زیاد، ارزش کمتری داده است. جهت شیب نیز با تأثیر بر میزان تابش خورشیدی و فرایندهای تبخیر - تعرق، نقش مهمی در توزیع فضایی تغذیه دارد؛ به طوری که دامنه‌های شمالی کمترین تابش و بیشترین پتانسیل تغذیه، دامنه‌های جنوبی بیشترین تابش و کمترین تغذیه، دامنه‌های شرقی و غربی پتانسیل تغذیهٔ متوسط، و سطوح تقریباً تخت ظرفیت نفوذ و تغذیهٔ نسبتاً بالایی دارند. بنابراین به دامنه‌های رو به شمال ارزش بیشتر و به دامنه‌های رو به جنوب ارزش کمتری تعلق گرفت. نقشه‌های شیب و جهت شیب در محیط نرم‌افزار ArcMap (بستهٔ نرم‌افزاری ArcGIS10.8.2) تهیه شده‌اند.

1. Altitude
2. Digital Elevation Model (DEM)
3. Slope
4. Aspect

ج) سنگ‌شناسی[1] (L)

نقشهٔ سنگ‌شناسی محدوده از نقشه‌های زمین‌شناسی جیرنده و رشت با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور). نوع سنگ، مهم‌ترین معیار در ارزیابی توسعهٔ کارست و پتانسیل تغذیه است. سازندهای آهکی و کربناته به عنوان اصلی‌ترین واحدهای کارست‌زا شناسایی شده و امتیاز بیشتری در مدل APLIS کسب کرده و سایر سازندها (درمجموع ۱۸ کلاس) امتیازهای کمتری به خود اختصاص داده‌اند. امتیاز بین ۱ تا ۱۰ متغیر است. بر این‌اساس، سازندهای آهکی و کارستی بیشترین نقش را در تغذیهٔ مستقیم و سریع آبخوان دارند و در نتیجه، بالاترین امتیاز را دریافت کرده‌اند (جدول ۱). واحدهای آهکی کرتاسه (JK1 و K1-1) به دلیل توسعهٔ شدید کارست، وجود مجاری انحلالی و ترک‌خوردگی گسترده، بیشترین قابلیت نفوذ و انتقال آب را داشته و امتیاز ۹ تا ۱۰ به آن‌ها اختصاص یافته است. پس از آن، واحدهای آبرفتی دانه‌درشت نظیر Qal و Qft2 به سبب نفوذپذیری بالا، تخلخل مؤثر زیاد و ظرفیت بالای پذیرش رواناب، امتیازهای ۶ تا ۸ گرفته‌اند. واحدهای با ترکیب آهکی ـ مارنی یا آهک‌های کم‌کارست (مانند K2m، Kc و JKms) دارای نفوذپذیری متوسط بوده و به دلیل وجود لایه‌های رسی یا سیمانی شدن نسبی، تغذیه در آن‌ها کاهش یافته و امتیاز ۴ تا ۷ برای آن‌ها در نظر گرفته شده است. در مقابل، واحدهای آتشفشانی، آذرین، مارنی، تبخیری و شیل‌دار مانند Evp، Eat، Ect، gb، Jv و TRJs-sh به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین، رفتار سدکننده، و نقش کم در تغذیه، پایین‌ترین امتیاز یعنی ۱ تا ۲ را دریافت کرده‌اند. در نهایت، واحدهای با نفوذپذیری محدود، ولی با شکستگی‌های محلی (نظیر dc) در طبقهٔ پتانسیل کم تا متوسط قرار گرفته‌اند. این امتیازدهی، مبنای تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل تغذیه و وزن‌دهی سازندها در مدل‌سازی هیدروژئولوژیکی منطقه است و امکان تفکیک دقیق پهنه‌های مستعد نفوذ، مناطق نیمه‌مستعد و پهنه‌های سدکننده را فراهم می‌کند.

جدول ۱. امتیازدهی واحدهای مختلف سنگ‌شناسی

امتیاز	ویژگی هیدروژئولوژیکی غالب	نوع	واحد سنگی
۹ ـ ۱۰	کارست توسعه‌یافته، شکستگی زیاد	آهکی کارستی	JK1,K1-1
۶–۸	نفوذپذیری و تخلخل بالا	آبرفت دانه‌درشت	Qal,Qft2
۳	نفوذپذیری کم	آبرفت ریزدانه	Q1-al, Qt1
۴–۷	نفوذپذیری متوسط	آهکی - مارنی	K2m,Kc, JKms, Kc
۳	نفوذپذیری کم	آهک توفی	El
۱–۳	نفوذپذیری بسیار کم	آتشفشانی/تبخیری	Jv,Evp,gb, dc, mz, Eat
۱	نفوذپذیری بسیار کم	شیل	TRJs-sh

د) خاک[2] (S)

ویژگی‌های خاک از جمله نوع، بافت و ضخامت، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان نفوذ دارند. انواع اصلی خاک محدودهٔ مطالعاتی در مدل APLIS شامل سه کلاس آلفوسول[3]، مولیسول[4] و اینسپتیسول[5] هستند که هر یک نفوذپذیری متفاوتی دارند. این نقشه از نقشهٔ رقومی‌شده جنس خاک، استخراج شده است. در پارامتر خاک (S) مدل APLIS، آلفیسول‌ها به دلیل وجود افق تجمع رسی و ساختار نسبتاً متراکم، نفوذپذیری کمتری دارند و مانع عبور عمقی آب می‌شوند، از این‌رو امتیاز ۳ به آن‌ها اختصاص داده شد. مولیسول‌ها با برخورداری از افق سطحی ضخیم، غنی از مادهٔ آلی و ساختار دانه‌ای مناسب، شرایط بهتری برای نفوذ فراهم می‌کنند، اما به علت ضخامت نسبتاً زیاد خاک، نفوذ عمقی آن‌ها تا حدی محدود است و بنابراین، امتیاز ۷ دریافت کردند. در مقابل، اینسپتیسول‌ها خاک‌هایی کم‌تکامل و نازک با افق‌بندی ضعیف هستند که مانع مؤثری در برابر نفوذ ایجاد نمی‌کنند و امکان انتقال سریع آب به سنگ بستر را فراهم می‌کنند؛ به همین دلیل بیشترین پتانسیل نفوذ داشته و امتیاز ۱۰ به آن‌ها داده شد.

1. Lithology
2. Soil
3. Alfisols
4. Mollisols
5. Inceptisols

هـ) نفوذ[1] (I)

لایهٔ نفوذ شامل چندین پارامتر مشتمل بر تراکم آبراهه، تراکم خطواره‌ها (درزه‌ها و شکستگی‌ها)، جهت شیب، دما، نزولات جوی و پوشش گیاهی است. برای تعیین مقدار نفوذ در آبخوان کارستی منطقهٔ مورد مطالعه، در نهایت با استفاده از درصد تغذیه محاسبه‌شدهٔ مربوط به هر رده و همچنین، مساحت مربوط به آن، مقدار نفوذ به این سفره محاسبه شده که در ادامه به آن پرداخته شده است.

نقشهٔ تراکم آبراهه (زهکشی)

از دیگر فاکتورهای مؤثر در مقدار تغذیه، پدیده‌های سطحی همچون آبراهه‌ها است. آبراهه‌ها در پرشیب‌ترین مناطق تشکیل می‌شوند و با ایجاد رواناب تا حدودی در تغذیهٔ آب نقش دارند و به عنوان مسیری برای عبور آب از ارتفاعات به سمت نقاطی با ارتفاعات به سمت نقاطی با ارتفاع کم محسوب می‌شوند. آبراهه‌ها در مناطق با شیب کم و یا در محل عبور گسل‌ها اهمیت بیشتری دارند، زیرا آب مدت زمان بیشتری برای تغذیه در اختیار دارد. این در مورد آبراهه‌های رده بالاتر که حجم بیشتر از آب را در زمان طولانی‌تری در اختیار دارند بیشتر است. در این مطالعه، نقشهٔ زهکشی منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر (اخذشده از سایت search.asf.alaska.edu) تهیه شده است. پس از آماده‌سازی نقشهٔ DEM، ابزار Watershed در نرم‌افزار Global Mapper برای استخراج آبراهه‌ها و delineation زیرحوضه‌های آبریز به کار گرفته شد. لایه‌های تولیدشده پس از اصلاح و یکپارچه‌سازی، مبنای تحلیل شبکهٔ زهکشی قرار گرفتند. تراکم زهکشی به عنوان شاخصی مهم برای بررسی رفتار هیدرولوژیکی حوضه استفاده شد؛ به طوری که تراکم بالای زهکشی معمولاً بیانگر رواناب بیشتر و نفوذ کمتر است، در حالی که تراکم پایین نشان‌دهندهٔ نفوذپذیری بالاتر و پتانسیل تغذیهٔ بیشتر است. با این‌حال، از دیدگاه ژئومورفولوژیکی، در سنگ‌های کربناته الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود؛ به طوری که افزایش چگالی آبراهه در محیط‌های کارستی می‌تواند با نرخ نفوذ بالاتر و توسعهٔ ساختارهای انحلالی مرتبط باشد (شبان[2] و همکاران، ۲۰۰۴) که در این مطالعه از این الگو نیز بهره گرفته شده است.

نقشهٔ تراکم خطواره

آنالیز خطواره‌ها و گسل‌ها نشان‌دهندهٔ حرکت و ذخیرهٔ آب‌زیرزمینی است و امکان تغذیه به لایه‌های زیرین را فراهم می‌کند. گسل‌ها و شکستگی‌ها به عنوان یکی از ضعف‌ها در هر منطقه بوده و امکان نفوذپذیری بالایی دارند و در اثر انحلال تشکیل معابر زیرزمینی داده و جریان آب زیرزمینی در امتداد آن‌ها شکل می‌گیرد. دقیق‌ترین روش تهیهٔ نقشهٔ خطواره‌ها روش صحرایی است، اما به دلیل کم بودن زاویهٔ دید و مشکلات ناشی از عملیات صحرایی، این موضوع مقدور نیست. نقش گسل در کنترل و انتقال آب زیرزمینی، بسته به شرایط گسل و وضعیت منطقه می‌تواند خنثی، مثبت و یا منفی باشد. گسل با ایجاد درز و شکاف و فرایند برشی شدن و افزایش خوردشدگی و تخلخل ثانویه و یا معبر ورود آب به زون کارستی، می‌تواند دارای نقش مثبت باشند. در حالی که می‌تواند در موارد زیر دارای نقش منفی باشند؛ به این‌صورت که جابه‌جایی یک لایهٔ ناتراوای عمیق در برابر لایهٔ تراوا به عنوان سد عمل می‌کند که مانع حرکت و انتقال آب می‌شود. پرشدگی شکاف گسل‌ها با مواد ناتراوای متراکم مانند کلسیت و کوارتز یا رس، در مقدار نفوذ نقش منفی پیدا می‌کند و یا ممکن است یک زون کارستی با وجود داشتن شرایط لازم به دلیل فرار آب، از طریق گسل از تغذیهٔ مناسبی برخوردار نباشد. از طرفی، گسل‌هایی با سازوکار فشارشی، مسیرهای مناسبی برای جریان و انتقال آب‌زیرزمینی نیستند.

شناسایی ساختارهای خطی شامل گسل‌ها و خطواره‌ها با استفاده از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای لندست ۹ (USGS, 2025) و نقشهٔ زمین‌شناسی انجام شد. ابتدا باند ۷ به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات لیتولوژی و رطوبت شکستگی‌ها در نرم‌افزار ILWIS تفسیر شد و برای افزایش دقت، ترکیب رنگی کاذب باندهای ۷، ۴ و ۱ تولید شد تا الگوهای خطی با وضوح بیشتری نمایان شوند. ساختارهای استخراج‌شده سپس به ArcMap منتقل و پس از یکپارچه‌سازی، حذف عوارض غیرساختاری و اصلاح هندسی، به

1. Infiltration
2. Shaban

عنوان خطواره‌های اصلی منطقه تثبیت شدند. در کنار این فرایند، گسل‌های اصلی نیز بر اساس نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جیرنده استخراج و ترسیم شد. به دلیل پوشش گیاهی متراکم و سایه‌روشن‌های شدید توپوگرافی در محدودهٔ درفک، امکان جداسازی دقیق درز و شکاف‌ها فراهم نبود؛ از این‌رو در این پژوهش تمرکز بر بررسی خطواره‌ها و گسل‌های اصلی قرار گرفت.

نقشه‌های اقلیمی (نزولات جوی و دما)

بارش یکی دیگر از عوامل مهمی است که در تغذیهٔ آب‌های کارستی یک سازند مستعد برای ذخیرهٔ آب، تأثیرگذار است. مقدار و نوع بارش جوی بسته به اقلیم و ارتفاع منطقه متفاوت است. هرچه مقدار و حجم بارش در ناحیه‌ای بیشتر باشد (با در نظر گرفتن یکسان بودن سایر شرایط)، مقدار آب نفوذکرده به درون سفرهٔ کارستی بیشتر بوده و در نتیجه، دبی خروجی از این سفره افزایش می‌یابد. نوع نزولات و شدت آن نیز در میزان تغذیه مؤثر است؛ به این‌ترتیب که بارش‌های سیل‌آسا و ناگهانی حجم زیادی رواناب تولید می‌کنند و در مقایسه با بارش‌های تدریجی و یا بارش‌های برف که فرصت بیشتری برای تغذیه دارند، اهمیت کمتری دارند. با توجه به اهمیت بارش در نفوذ آب، اقدام به تهیهٔ لایهٔ بارش شد. در این مطالعه، داده‌های چهار ایستگاه هواشناسی داخل محدوده (ایستگاه‌های توتکابن - چله بر، شاه شهیدان عمارلو، شیرکوه و شهر بیجار) برای تهیهٔ نقشهٔ بارش استفاده شد (جدول ۲). در مرحلهٔ نخست، رابطهٔ بین ارتفاع و بارش از طریق ترسیم نمودار پراکندگی بین متغیر مستقل ارتفاع و متغیر وابسته ارتفاع بررسی شد. سپس بهترین خط برازش تعیین شد و معادلهٔ رگرسیونی با ضریب تعیین قابل قبول (R^2) محاسبه شد. در این منطقه به دلیل شرایط خاص توپوگرافی البرز و موقعیت ایستگاه‌ها که توزیع مناسبی در ارتفاعات نداشتند، رابطهٔ بارش - ارتفاع ضعیف بوده و مقدار ضریب همبستگی کمی ($R^2 = 0.34$) نشان داد. افزودن یک ایستگاه کمکی خارج از محدوده نیز ضریب همبستگی را فقط تا ۰/۴۶افزایش داد؛ سایر ایستگاه‌ها در فواصل دورتری از محدودهٔ مورد مطالعه بودند که استفاده از آن‌ها می‌توانست شرایط اقلیمی متفاوتی را وارد مدل کند، بنابراین از آن‌ها صرف‌نظر شد. با توجه به ضعف رابطهٔ ارتفاع - بارش و محدودیت ایستگاه‌ها، در نهایت روش درون‌یابی IDW برای تولید نقشهٔ بارش انتخاب شد. بارش به عنوان مهم‌ترین منبع تغذیه در محیط‌های کارستی، نقش اصلی را در تعیین پتانسیل تغذیهٔ منطقه ایفا می‌کند و در منطقهٔ درفک نیز با بارش نسبتاً بالا، در صورت مناسب بودن سایر شرایط، تغذیهٔ قابل توجهی انتظار می‌رود. در این مطالعه، دما نیز به عنوان یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر تبخیر - تعرق و در نتیجه، پتانسیل تغذیهٔ آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. دماهای پایین‌تر معمولاً موجب کاهش تلفات تبخیری و افزایش تغذیه می‌شوند، در حالی که دماهای بالاتر با افزایش تبخیر - تعرق، مقدار آب قابل نفوذ به آبخوان را کاهش می‌دهند. برای تهیهٔ نقشهٔ هم‌دما (ایزوترم) منطقه، از داده‌های سه ایستگاه هواشناسی دارای دورهٔ آماری کامل (ایستگاه‌های شاه شهیدان عمارلو، شیرکوه و شهر بیجار) استفاده شد. در مرحلهٔ نخست، رابطهٔ بین ارتفاع و دما از طریق ترسیم نمودار پراکندگی بین متغیر مستقل ارتفاع و متغیر وابسته دما بررسی شد. سپس، بهترین خط برازش بر اساس روش کمترین مربعات تعیین شد و معادلهٔ رگرسیونی با ضریب همبستگی قابل قبول (R^2) محاسبه شد. با استفاده از این معادله، مقدار دما برای هر پیکسل از مدل رقومی ارتفاع (DEM) برآورد و نقشهٔ پیوسته دما تولید شد که تغییرات حرارتی منطقه را متناسب با تغییرات ارتفاع به طور واقع‌گرایانه نمایش می‌دهد. اگرچه تنها سه ایستگاه در محدودهٔ مورد مطالعه موجود بود، اما همبستگی بالای معادلهٔ دما - ارتفاع نشان‌دهندهٔ کفایت داده‌ها برای برآورد مکانی دما در منطقه است.

جدول ۲. ایستگاه‌های هواشناسی محدودهٔ مطالعاتی و مشخصات بارش و دما (دورهٔ آماری ۲۰ساله، ۱۳۸۲ ـ ۱۴۰۱)

ردیف	محدودهٔ مطالعاتی	نام ایستگاه	کد ایستگاه	ارتفاع ایستگاه	متوسط بارش سالانه (میلی‌متر)	متوسط دمای سالانه
۱	آستانه –کوچصفهان	توتکابن – چله بر	۱۷۰۴۵	۴۲۵	۵۲۳	–
۲	آستانه –کوچصفهان	شاه شهیدان عمارلو	۱۷۰۸۸	۱۸۶۸	۵۵۸	۸/۷۴
۳	آستانه –کوچصفهان	شیرکوه	۱۷۱۲۵	۴۰۱	۷۵۴	۱۶/۱
۴	آستانه –کوچصفهان	شهر بیجار	۱۷۰۵۱	۹۲	۱۲۱۵	۱۵/۸۸

پوشش گیاهی

گیاهان هم تأثیر مثبت و هم تأثیر منفی در توسعهٔ کارست دارند. فشار ریشهٔ گیاهان سبب تخریب و شکستگی سنگ‌ها و ایجاد فضای نفوذپذیر در کنار آن می‌شود. وجود برگ گیاهان هوموس خاک را افزایش می‌دهد و افزایش CO_2 حاصل از تغذیهٔ ریشه‌ها باعث افزایش اسیدیته و افزایش انحلال سنگ کربناته می‌شود. با توجه به منطقهٔ مورد مطالعه که دارای شیب زیاد و میزان بارندگی بالایی دارد یک عامل مثبت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، تراکم پوشش گیاهی مختلف را می‌توان بر اساس درجهٔ تأثیرگذاری بر تغذیه، تقسیم‌بندی و امتیازدهی کرد. به این‌ترتیب، به تراکم بالای پوشش گیاهی، ارزش بیشتری و تراکم کم پوشش گیاهی ارزش کمتری داده شده است. پوشش گیاهی نیز از طریق تأثیر بر تبخیر ـ تعرق و ایجاد ساختارهای منفذی در خاک، در فرایند نفوذ نقش دارد. شدت پوشش گیاهی با استفاده از شاخص NDVI[1] محاسبه شد. این شاخص از مهم‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های سنجش از دور برای ارزیابی پوشش گیاهی و میزان سبزینگی سطح زمین است. این شاخص بر اساس تفاوت بازتاب طیفی گیاهان سبز در دو باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز (Red) محاسبه می‌شود. گیاهان سالم به دلیل ساختار سلولی و وجود کلروفیل، نور قرمز را به‌شدت جذب و نور مادون قرمز را به‌شدت بازتاب می‌دهند؛ ویژگی‌ای که مبنای محاسبهٔ این شاخص است. فرمول NDVI به صورت زیر است (رابطهٔ ۱):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{NIR + RED} \quad (۱)$$

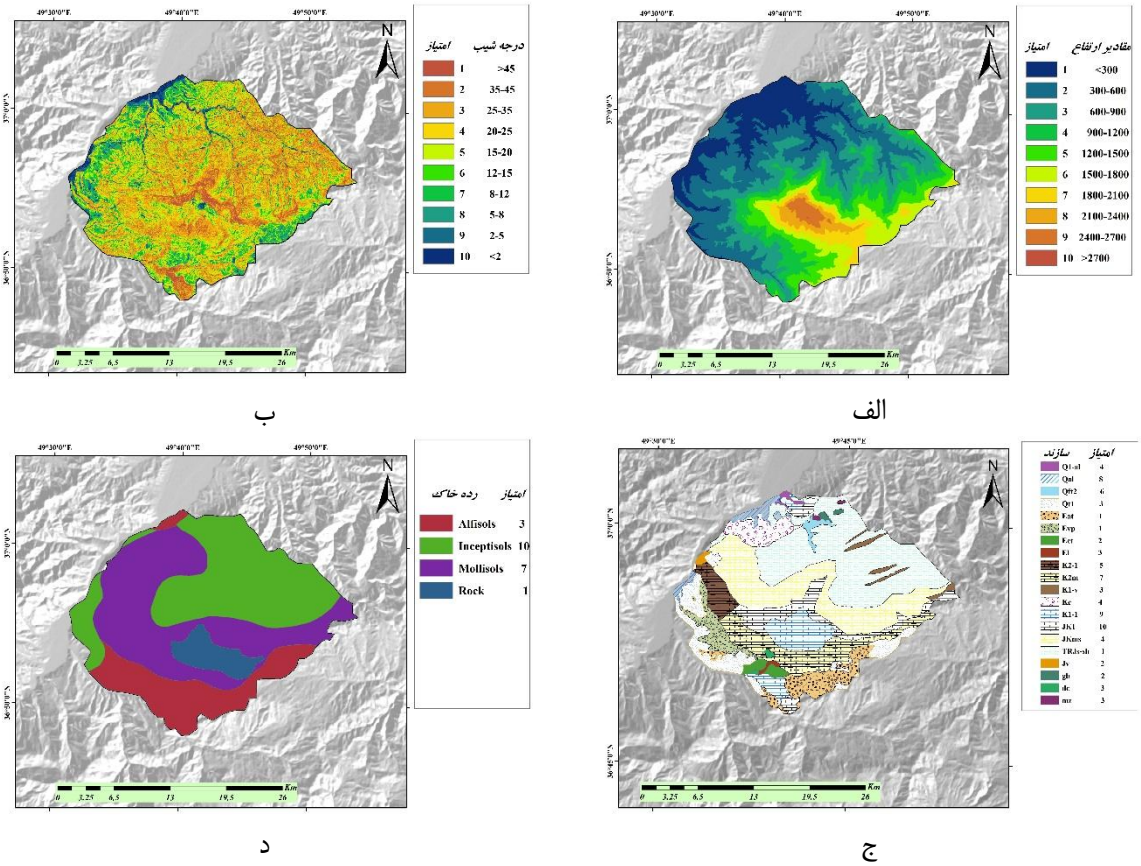
در تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ (Landsat 9 OLI) برای محاسبهٔ NDVI از باندهای زیر استفاده می‌شود:
باند ۵ (NIR) مادون قرمز نزدیک (۰/۸۵ –۰/۸۸ میکرومتر)، باند ۴ (Red) طیف قرمز (۰/۶۴ – ۰/۶۷ میکرومتر) و مقدار شاخص NDVI همواره بین ۱− و ۱+ قرار می‌گیرد.

یافته‌های پژوهش

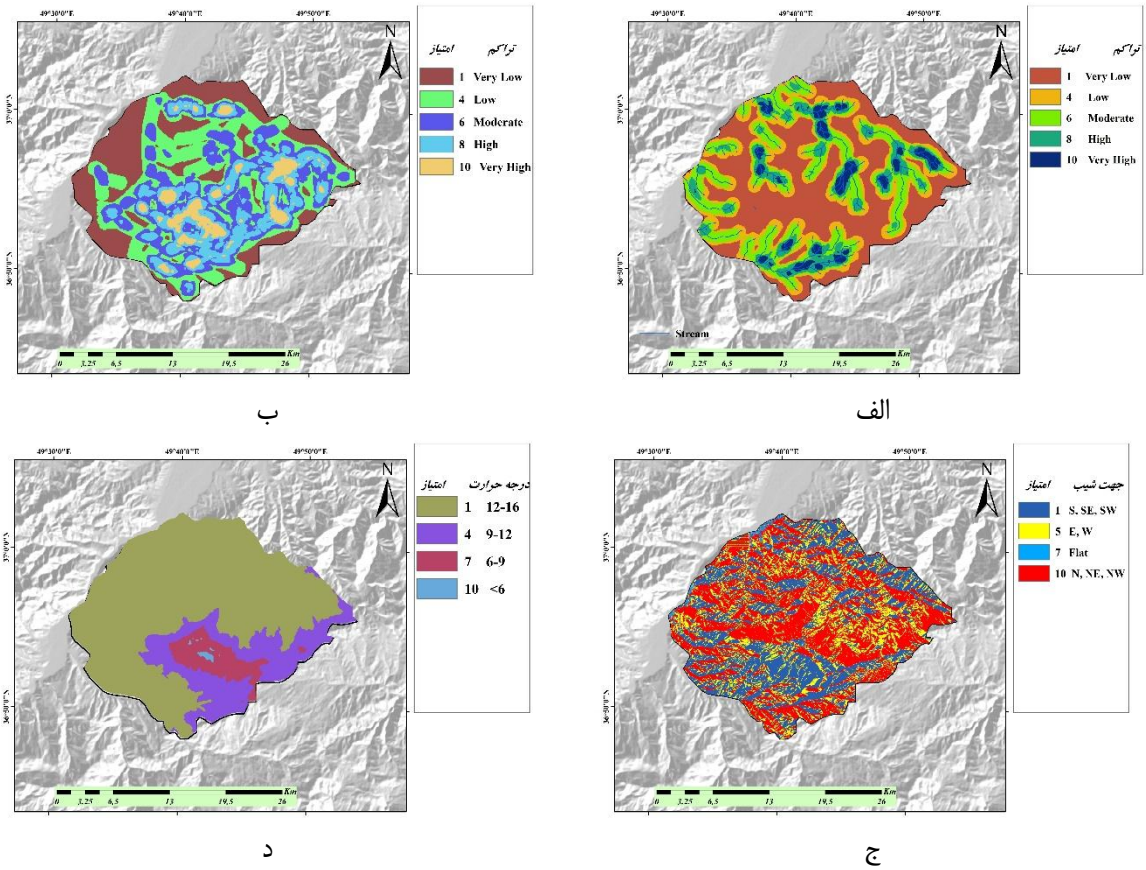
وزن‌دهی و تلفیق لایه‌ها با روش AHP

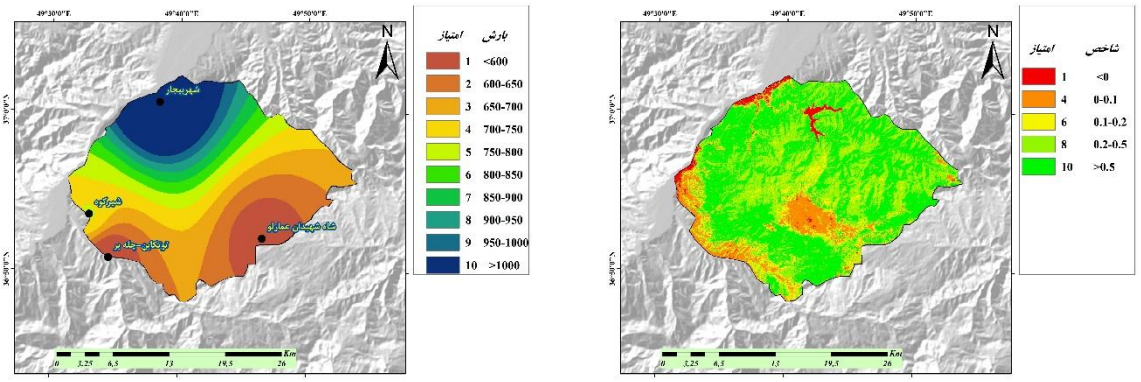
به منظور تعیین نرخ تغذیه در منطقه، لایه‌های اطلاعاتی به‌دست‌آمده مؤثر در روش APLIS شامل پارامترهای ارتفاع، شیب، سنگ‌شناسی، جنس خاک، نفوذ، تراکم خطواره، تراکم زهکشی، جهت شیب توپوگرافی، دما، تراکم پوشش گیاهی و نزولات جوی با استفاده از روش کارشناسی هم‌مقیاس شده و در محدودهٔ ۱ تا ۱۰ طبقه‌بندی شده‌اند و سپس در محیط GIS به طور جداگانه ترسیم شده‌اند (شکل‌های ۳ و ۴). پس از آماده‌سازی نقشه‌های موضوعی مربوط به ده پارامتر و اختصاص امتیاز به هر طبقه، وزن نسبی هر پارامتر بر اساس اهمیت آن در فرایند تغذیه تعیین شد. برای این‌منظور، از تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شده است؛ به طوری که ابتدا معیارها در نرم‌افزار Expert Choice به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه شده (جدول ۳) و درصد وزنی هر پارامتر محاسبه شده است (جدول ۴). در نهایت، لایه‌های وزن‌دار در محیط GIS تلفیق شده و نقشهٔ پهنه‌بندی پتانسیل تغذیهٔ کارست تهیه شد. در این مطالعه، برای همپوشانی نهایی لایه‌های موضوعی وزن‌دار و تولید نقشهٔ پهنه‌بندی پتانسیل تغذیهٔ کارست، از روش همپوشانی وزنی[2] استفاده شد. برای استفاده از روش همپوشانی، با توجه به نظر کارشناسی وزن هر لایه مشخص شد. در این روش به هر یک از رده‌های لایه‌های اطلاعاتی یک ارزش (Score) داده شده است. این وزن‌ها طوری انتخاب شده‌اند که با واقعیت‌های فیزیکی مطابقت داشته باشد. وزن هر لایه اطلاعاتی را در ارزش تک‌تک پیکسل‌های این لایه ضرب می‌کند و سپس با هم جمع و در نهایت نقشهٔ رستری به دست آمده است.

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Weighted Overlay



شکل ۳. پارامترهای مؤثر در روش **APLIS**: پارامترهای الف) ارتفاع؛ ب) شیب؛ ج) سنگ‌شناسی؛ د) جنس خاک





ه ی

شکل ۴. پارامترهای مؤثر در روش **APLIS**: زیرپارامترهای نفوذ؛ الف) تراکم خطواره؛ ب) تراکم زهکشی؛ ج) جهت شیب توپوگرافی؛ د) دما؛ ه) تراکم پوشش گیاهی؛ ی) نزولات جوی

جدول ۳. ماتریس زوجی تحلیلی سلسله‌مراتبی

	تراکم زهکشی	تراکم گسل	جهت شیب	دما	بارندگی	پوشش گیاهی	پوشش خاک	لیتولوژی	شیب	ارتفاع
ارتفاع	۰/۵	۰/۵	۲	۰/۲۵	۰/۲	۰/۵	۳	۰/۳۳	۲	۱
شیب	۰/۵	۰/۵	۱	۰/۳۳	۰/۲	۰/۵	۲	۰/۳۳	۱	
لیتولوژی	۳	۳	۳	۲	۲	۳	۴	۱		
پوشش خاک	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۵	۰/۳۳	۰/۲	۰/۵	۱			
پوشش گیاهی	۰/۵	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۳۳	۱				
بارندگی	۲	۲	۲	۲	۱					
دما	۱	۱	۲	۱						
جهت شیب	۰/۵	۰/۵	۱							
تراکم گسل	۱	۱								
تراکم زهکشی	۱									

ضریب ناسازگاری با استفاده از λmax محاسبه شده و مقدار آن حدود ۰/۰۷ است و ماتریس معتبر است.

جدول ۴. ارزش‌دهی و وزن‌دهی به لایه‌های مختلف

لایه اطلاعاتی	تقسیم‌بندی لایه اطلاعاتی	ارزش	وزن نهایی	لایه اطلاعاتی	تقسیم‌بندی لایه اطلاعاتی	ارزش	وزن نهایی
ارتفاع (m.a.sl)	< ۳۰۰	۱	۶/۱	پوشش خاک	اینسپتیسول	۱۰	۴/۸
	۳۰۰ – ۶۰۰	۲			مولیسول	۷	
	۶۰۰ – ۹۰۰	۳			آلفوسول	۳	
	۹۰۰ – ۱۲۰۰	۴			سنگ	۱	
	۱۲۰۰ - ۱۵۰۰	۵		تراکم گسل	خیلی کم	۱	۹/۳
	۱۵۰۰ - ۱۸۰۰	۶			کم	۴	
	۱۸۰۰ - ۲۱۰۰	۷			متوسط	۶	
	۲۱۰۰ - ۲۴۰۰	۸			زیاد	۸	
	۲۴۰۰ - ۲۷۰۰	۹			خیلی زیاد	۱۰	
	> ۲۷۰۰	۱۰		تراکم زهکشی	خیلی کم	۱	۱۰
شیب	> ۳۵	۱	۵/۴		کم	۴	
	۳۵ - ۴۵	۲			متوسط	۶	
	۲۵ - ۳۵	۳			زیاد	۸	
	۲۰ - ۲۵	۴			خیلی زیاد	۱۰	
	۱۵ - ۲۰	۵		جهت شیب	جنوب، جنوب شرق، جنوب غرب	۱	۷/۴
	۱۲ - ۱۵	۶			شرق، و غرب	۵	
	۸ - ۱۲	۷			صاف	۷	

	۵ - ۸	۸			شمال، شمال شرق، شمال غرب	۱۰	
	۲ - ۵	۹			بسیار کم	۱	
	< ۲	۱۰			کم	۴	
لیتولوژی	Eat, Evp, TRJs-sh	۱		تراکم پوشش گیاهی	متوسط	۶	۸/۷
	Ect, Jv, gb, mz	۲			زیاد	۸	
	Qt1, dc, El, K1-v	۳			بسیار زیاد	۱۰	
	JKms, Kc, Q1-al	۴			< ۶۰۰	۱	
	K2-1	۵	۲۰		۶۰۰ - ۶۵۰	۲	
	Qft2	۶			۶۵۰ - ۷۰۰	۳	
	K2m	۷			۷۰۰ - ۷۵۰	۴	
	Qal	۸			۷۵۰ - ۸۰۰	۵	
	K1-1	۹		بارش	۸۰۰ - ۸۵۰	۶	۱۷
	JK1	۱۰			۸۵۰ - ۹۰۰	۷	
درجه حرارت	۱۲ - ۱۶	۱			۹۰۰ - ۹۵۰	۸	
	۹ -۱۲	۴	۱۱/۳		۹۵۰ - ۱۰۰۰	۹	
	۶ - ۹	۷			> ۱۰۰۰	۱۰	
	< ۶	۱۰					

بحث

برای تعیین مقدار درصد تغذیه در بخش‌های مختلف آبخوان منطقهٔ مورد مطالعه، هر ۱۰ لایهٔ اطلاعاتی که در مرحلهٔ قبل تهیه شده‌اند، به صورت لایه‌های اطلاعاتی رستری با پیکسل دارای اندازهٔ یکسان در قسمت Weighted overlay برنامهٔ GIS با هم تلفیق شدند. نتیجهٔ این ترکیب یک نقشهٔ رستری شد که در آن هر پیکسل دارای ارزش منحصربه‌فردی است و این ارزش نمایانگر مقدار تغذیهٔ آن پیکسل است. در این مرحله با توجه به نظر کارشناسی و مطالعات گذشته برای هر فاکتور مؤثر در میزان تغذیه جهت وزندهی به لایه‌ها، وزنی متناسب با آن لایه در میزان تغذیه در نظر گرفته شد (جدول ۴). نقشهٔ طبقه‌بندی‌شده، وضعیت مقدار تغذیه در منطقه در شکل ۵ نشان داده شده است. درصد تغذیه و مساحت هر رده از نواحی مختلف در پنج رده دسته‌بندی شده است که در جدول ۵ ارائه شده است، به طوری که درصد نرخ تغذیه در منطقهٔ مورد مطالعه از پتانسیل خیلی کم (کمتر از ۳۸ درصد)، کم (۳۸ تا ۴۰ درصد)، متوسط (۴۰ تا ۴۲ درصد)، زیاد (۴۲ تا ۴۴ درصد) و خیلی زیاد (بیشتر از ۴۴ درصد) تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل ۵)؛ که این میزان درصد تغذیه نشان‌دهندهٔ توسعه‌یافتگی کارست در این منطقه است.

نتایج مدل پهنه‌بندی پتانسیل تغذیه در منطقهٔ مورد مطالعه نشان می‌دهد بیشترین مساحت منطقه با پتانسیل متوسط (Moderate)، معادل ۳۰/۴ درصد از کل محدوده، قرار دارد. پس از آن، مناطق با پتانسیل کم (Low) و بالا (High) به‌ترتیب ۲۳/۱ درصد و ۲۲/۴ درصد از محدوده را پوشش می‌دهند. سهم مناطق با پتانسیل بسیار بالا (Very High) ۱۴/۶ درصد و مناطق با پتانسیل بسیار پایین (Very Low) تنها ۹/۵ درصد است. این توزیع نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از محدوده در دسته‌های متوسط تا بالا قرار دارد؛ بنابراین پتانسیل تغذیه در منطقه به طور نسبی مناسب است. این در حالی است که مناطق با تغذیه بسیار کم یا بسیار زیاد محدود هستند و پراکندگی نامتقارنی در سطح منطقه دارند. در میان همهٔ لایه‌های مورد بررسی، مطابقت نقشهٔ پهنه‌بندی با لیتولوژی منطقه نیز قابل توجه است. در مناطقی که واحدهای آهکی کارستی (JK_1، K_{1-1}) رخنمون دارند، به‌ویژه در جنوب و مرکز نقشه، نرخ تغذیه معمولاً در رده‌های خیلی زیاد تا زیاد قرار دارد. به‌عکس، مناطقی با سنگ‌های شیل، مارن و آتشفشانی نفوذناپذیر (Eat، Evp، Ect) در زون‌های با پتانسیل کم تا خیلی کم جای گرفته‌اند، که با شرایط هیدرولوژیکی همخوانی دارد. به طور کلی، یک رابطهٔ مثبت و واضح بین لیتولوژی و نرخ تغذیه مشاهده می‌شود؛ واحدهای آهکی کارستی بیشترین نرخ تغذیه را دارند، در حالی که سنگ‌های رسی، شیل و آتشفشانی کم‌نفوذ، نرخ تغذیهٔ بسیار پایینی نشان می‌دهند. این الگو نشان می‌دهد لیتولوژی به عنوان عامل اصلی کنترل‌کنندهٔ پتانسیل تغذیه در منطقه عمل می‌کند و نقشهٔ پهنه‌بندی با واقعیت زمین‌شناسی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی منطقه همخوانی خوبی دارد. برای درک بهتر و کمی این مطلب، از ابزار Zonal Histogram/Zonal Statistics استفاده شد؛ به

این‌صورت که نقشهٔ لیتولوژی به عنوان لایهٔ ناحیه‌ای (Zone) و نقشهٔ پهنه‌بندی پتانسیل تغذیه به عنوان لایهٔ مقدار (Value) تعریف شد. سپس مساحت و درصد هر کلاس پتانسیل در داخل هر واحد لیتولوژیک استخراج شد. نتایج نشان داد سهم کلاس‌های با پتانسیل بالا عمدتاً در واحدهای کربناته متمرکز است که بیانگر تطابق کمی و قابل قبول نقشهٔ پهنه‌بندی با شرایط زمین‌شناسی منطقه است (جدول ۶).

جدول ۵. درصد تغذیهٔ سالانه و مساحت هر رده

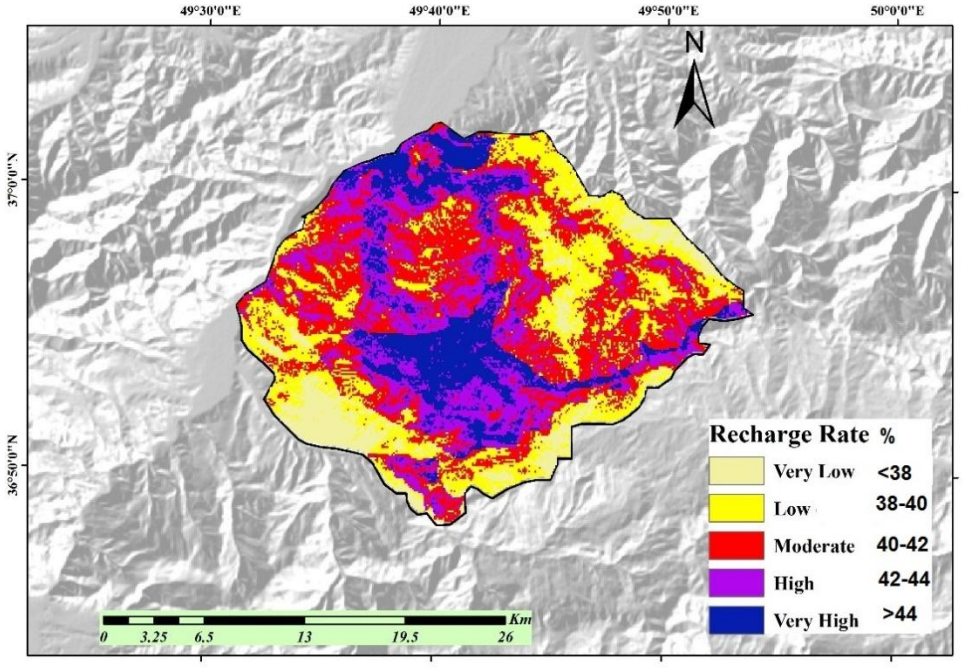
تغذیه سالانه (درصد)	مساحت (کیلومتر مربع)
< ۳۸	۴۷/۷
۴۰ _ ۳۸	۱۱۸
۴۲ _ ۴۰	۱۵۶
۴۴ _ ۴۲	۱۱۳
> ۴۴	۷۴

برای به دست آوردن میزان متوسط تغذیهٔ سالانه، ابتدا ضریب متوسط تغذیهٔ سالانه از معادلهٔ ۲ محاسبه شده و سپس با استفاده از معادلهٔ ۳، متوسط حجم تغذیهٔ سالیانه در منطقه مورد مطالعه به دست آمده است.

$$\bar{I}=\Sigma A_i.I_i/A_t \quad (۲)$$

$$V=\bar{P}\cdot\bar{I}\cdot A_t \quad (۳)$$

در معادلهٔ یادشده $\bar{I}$ متوسط میزان تغذیهٔ سالیانه، A_i مساحت هر رده، I_i میزان تغذیه هر رده، A_t مساحت کل، $\bar{P}$ میانگین کل بارندگی سالانه و Vحجم کل آب تغذیه شده به آبخوان کارستی درفک است. مساحت سازندهای کارستی رخنمون‌یافته در منطقهٔ مورد مطالعه حدوداً ۵۱۰ کیلومتر مربع، میانگین بارندگی این منطقه تقریباً ۷۶۲ میلی‌متر و درصد تغذیهٔ تعیین‌شده در بخش قبل حدوداً ۴۲ درصد است. میزان حجم تغذیه سالانه در این منطقه تقریباً ۱۶۳ میلیون متر مکعب برآورد شده است که این نتایج در ارزیابی بیلان کلی هیدروژئولوژیکی منطقه و ارائهٔ برنامه‌های مدیریتی در جهت حفظ و برداشت پایدار این منابع آبی مهم و باارزش می‌تواند کاربرد داشته باشد.



شکل ۵. نقشهٔ همپوشانی نرخ تغذیه در محدودهٔ مطالعاتی

جدول ۶. نقشهٔ مطابقت لیتولوژی و نقشهٔ نهایی نرخ تغذیه و مساحت آن‌ها

نرخ تغذیه (%)	مساحت (%)					
واحد سنگی (سازند)	TRJs-sh	Jv, Evp, gb, dc, mz, Eat	Q1-al, Qt1, El	K2m, Kc, JKms, Kc	Qal, Qft2	JK1, K1-1
Very Low (<38%)	۱۸	۲۵	۲۶	۰	۰	۰
Low (38-40%)	۳۹	۴۶	۴۳	۱۸	۴	۱
Moderate (40-42%)	۳۲	۲۰	۲۶	۵۰	۱۵	۷
High (42-44%)	۹	۸	۵	۲۶	۳۴	۳۱
Very High (>44%)	۲	۱	۰	۶	۴۸	۶۳

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از مدل APLIS اصلاح‌شده، همراه با وزن‌دهی AHP و تلفیق لایه‌ها در محیط GIS، رویکردی کارآمد و دقیق برای ارزیابی پتانسیل تغذیهٔ آب زیرزمینی در محیط‌های کارستی مرطوب و جنگلی مانند منطقهٔ درفک است. تحلیل پارامترهای مختلف شامل لیتولوژی، توپوگرافی، نفوذپذیری خاک، پوشش گیاهی، تراکم شکستگی‌ها، شبکهٔ زهکشی و شرایط اقلیمی نشان داد پراکندگی مکانی تغذیه به‌شدت تحت کنترل نوع سنگ و میزان کارستی شدن آن است. واحدهای آهکی کارستی‌شده و آبرفت‌های نفوذپذیر بیشترین پتانسیل تغذیه را نشان دادند، در حالی که واحدهای رسی، مارنی و سنگ‌های آتشفشانی کم‌نفوذ در رده‌های پایین تغذیه قرار گرفتند. محدودهٔ مطالعاتی در پنج طبقه پتانسیل تغذیه شامل خیلی کم (کمتر از ۳۸ درصد)، کم (۳۸–۴۰ درصد)، متوسط (۴۰–۴۲ درصد)، زیاد (۴۲–۴۴ درصد) و خیلی زیاد (بیشتر از ۴۴ درصد) تقسیم‌بندی شد. نقشهٔ نهایی پهنه‌بندی تغذیه نشان داد بیشترین سطح منطقه در رده‌های تغذیه متوسط تا زیاد قرار دارد و پهنه‌های با تغذیه بسیار زیاد یا بسیار کم، محدود و پراکنده هستند. این پراکنش، بیانگر توسعه‌یافتگی کارست در منطقه و نقش تعیین‌کنندهٔ عوامل زمین‌شناسی، اقلیمی و مورفولوژی در کنترل فرایندهای تغذیه است. برآورد حجم تغذیهٔ سالانه (حدود ۱۶۳ میلیون مترمکعب) می‌تواند در ارزیابی بیلان هیدروژئولوژیکی منطقه و ارائهٔ برنامه‌های مدیریتی جهت حفظ و برداشت پایدار منابع آبی کاربرد داشته باشد. به طور کلی، این مطالعه چارچوبی قابل اعتماد برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، حفاظت از چشمه‌های کارستی و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی در مناطق کارستی شمال ایران فراهم می‌کند. همچنین، روش ارائه‌شده قابلیت تعمیم به سایر نواحی کارستی مرطوب را داشته و می‌تواند مبنایی برای بهبود مدل‌سازی تغذیه در سامانه‌های پیچیده هیدروژئولوژیکی باشد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقالهٔ حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیهٔ پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از دانشگاه صنعتی شاهرود به دلیل فراهم کردن امکانات لازم طی این تحقیق تشکر می‌شود. از داوران محترم نیز به دلیل ارائهٔ نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

۱ زارعی، مهناز و جوادی پیربازاری، سامان، (۱۳۹۵)، پتانسیل‌یابی منابع آب در سازندهای کارستی با استفاده از مدل APLIS و اصلاح آن با AHP، پانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، قزوین، https://civilica.com/doc/562839

2 Alem, H., Ebrahimzade, A., Nahas, S., & Farmanie, S. (2017). Ground water recharge assessment in the karst aquifers of North Khorasan, IRAN, using APLIS. *Acta Carsologica*, 46(2-3), 283-294.

3 Alem, H., Esmaeilzadeh Soudejani, A., & Fallahi, M. (2021). Estimate the amount of ground water recharge in hard formations, case study: Mashhad, Iran. *Applied Water Science*, 11(1), 6. https://doi.org/10.1007/s13201-020-01317-w

4 Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Jiménez, P., López-Geta, J. A., & Carrasco, F. (2008). Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16(5), 911-925.

5 Bagheri, R., Mirhasani, G., Jafari, H., & Mozafari, M. (2022). Quantify karstic aquifer potential recharge zones by integrated hydrogeology and GIS approaches, Northern Iran. *Geopersia*, 12(1), 23-37.

6 Bonacci, O., & Andric, I. (2015). Karst hydrology and hydrogeology. In *Environmental Earth Sciences*. Springer.

7 Bonacci, O., Pipan, T., & Culver, D. C. (2009). A framework for karst ecohydrology. *Environmental Geology*, 56, 891-900. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1189-0

8 Doctor, D. H., Alexander, E. C., Jr., Petric, M., Kogovsek, J., Urbanc, J., Lojen, S., & Stichler, W. (2006). Quantification of karst aquifer discharge components during storm events through end-member mixing analysis using natural chemistry and stable isotopes as tracers. *Hydrogeology Journal*, 14, 1171-1191.

9 Entezari, M., Karimi, H., Gholam Heidari, H., & Jafari Aghdam, M. (2020). Estimation of groundwater recharge level in karstic aquifers using modified APLIS model. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(4), 198. https://doi.org/10.1007/s12517-020-5173-7

10 Errahmouni, A., El Messari, J. E. S., & Taher, M. (2022). Estimation of groundwater recharge using APLIS method–case study of Bokoya Massif (Central Rif, Morocco). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23.

11 Espinoza, K., Marina, M., Fortuna, J. H., & Altamirano, F. (2014). Comparison of the APLIS and modified-APLIS methods to estimate the recharge in fractured karst aquifer, Amazonas, Peru. In B. Andreo, F. Carrasco, J. Durán, P. Jiménez, & J. LaMoreaux (Eds.), *Hydrogeological and environmental investigations in karst systems* (pp. 83-90). Environmental Earth Sciences.

12 Geyer, T., Birk, S., Liedl, R., & Sauter, M. (2008). Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. *Journal of Hydrology*, 348(3-4), 452-463.

13 Karami, G. H., Bagheri, R., & Rahimi, F. (2016). Determining the groundwater potential recharge zone and karst springs catchment area: Saldoran region, western Iran. *Hydrogeology Journal*, *24*(8), 1981–1992. https://doi.org/10.1007/s10040-016-1458-z.

14 Motamedi rad, M., Goli mokhtari, L., Bahrami, S., & Zanganeh asadi, M. (2018). Assessment of infiltration potential using the AHP, APLIS and modified APLIS models (Case study: Roein Esfarayen Basin). *Quantitative Geomorphological Research*, 7(2), 117-139.

15 Raeisi, E., & Kowsar, N. (1997). Development of Shapour Cave, Southern Iran. *Journal of Cave and Karst Science*, 24(1), 27-34.

16 Shaban, A., Bou Kheir, R., Khawlie, M., Froidefond, J., & Girard, M. C. (2004). Caractérisation des facteurs morphométriques des réseaux hydrographiques correspondant aux capacités d'infiltrations des roches au Liban occidental. *Zeitschrift fur Geimorphologie*, 48(1), 79-94.

17 Tadmouri, R., Shaban, A., Baghdady, K., & Soliman, M. R. (2024). Unveiling novel APLIS model for identifying groundwater recharge zones in semi-arid regions: A case from Lebanon. *Alexandria Engineering Journal*, 97, 360-375.

18 U.S. Geological Survey. (2025). Landsat 9 surface reflectance product (Level-2), Product ID: LC09_L2SP_165035_20250527_20250529_02_T1. U.S. Department of the Interior. https://earthexplorer.usgs.gov/

19 Zaree, M., & Javadi Pirbazari, S. (2017). Ground water recharge assessment in the karst aquifers using APLIS and modify the model by AHP. In *15th Hydraulic Conference of Iran*. Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (*In Persian*)