Original Article

Site Selection of Hezar-Masjed Mountain Water Transmission Tunnel Using by the Analytic Hierarchy Process, and Shannon Entropy

Sara Kiani[1*] and Majid Dashti Barmaki[2]

Affiliation

1. Dep. of Geography Geomorphology, Kharazmi University, Tehran, Iran
2. Sahel Omid Iranian Consulting Engineers, Tehran, Iran

ABSTRACT

Introduction: In recent years, the digging of water transmission tunnels has faced various risks such as squeezing potential, hydrogeological risks, environmental effects, gas risks, and sensitivity analysis of construction costs, which has multiplied the importance of the correct site locating of these structures. However, selecting the tunnel route using modern methods of weighting the effective criteria and zoning in the geographic information system has been neglected.

Materials and Methods: In the current study, the site selection of the Hezar-Masjed water transmission tunnel using the Analytic Hierarchy Process, and Shannon Entropy as a part of the water transfer project from the Hezar-Masjed mountains to Mashhad city, has been discussed. Accordingly, five components including social hazards, structural geology, hydrogeology, topography, and economic criteria have been considered. In the first step, the two criteria of distance from villages and distance from water sources, regardless of their discharge, were considered as criteria involved with the social dimension. Based on this, it is suggested the tunnel excavation at distances far from these two criteria. The second criterion of studies is assigned to geology and tectonics. Accordingly, due to the high-risk potential of tunnel excavation, the construction of these structures in a high density of faults is not recommended. Hydrogeological studies as the third criterion influencing factors, water inflow into the tunnel, or influencing factors, drying of surrounding water resources from tunnel excavation are important. Therefore, the catchment area of springs in the study area is mentioned as a hydrogeological criterion. In terms of topography, the topographic map of the study area was used to obtain the tunnel overburden thickness map. In this criterion, excavation in less overburden thickness provides more optimal conditions. Finally, the tunnel excavation near the water delivery point, Mashhad - Charmshahr Refinery No. 3, the economic criterion, was considered. Therefore, a criterion called the distance from the tunnel exit portal to the water delivery point has been proposed as the economic criterion of the project. The thematic map of stated criteria was prepared and classified in the ArcMap environment. Scoring the classes in each criterion was done using The Analytic Hierarchy Process. Finally, the weighting of the effective criteria in tunnel site selection was done by the Shannon's entropy method. The prioritization of the effective criteria on the site selection of the Hezar-Masjed water transfer tunnel shows that the distance from the springs is more important than other criteria. So, although the distance from the village is not considered an important factor compared to other criteria, the existence of the spring will complicate the situation due to its importance for the livelihood of the residents, and this means that the distance or proximity to the village cannot be an independent factor for the tunnel route. In the second criterion, the distance from the fault has special importance due to its direct effect on the stability of the structure. Other criteria are in intermediate importance conditions. Finally, by combining the prepared maps, the zoning of suitable areas for tunnel excavation, as well as the three main priorities of the proposed tunnel axis via engineering judgment, have been presented.

Results and Discussion: The results show that the northwestern part of the study area is not suitable for drilling and it will cause risks. Therefore, the excavation priority is assigned to the middle and eastern part of the study area. More precisely, drilling priority is assigned to the middle areas because the points are closer to the water delivery site, closer to Mashhad city in the west of the study area. The results show that the best option to transfer water from the northern limb to the southern limb of the Hezar-Masjed mountains is to build an 8732-meter-long tunnel around Chenarsukhteh village, the central part of the study area, and a route closer to the water delivery point. It should be noted that after the site selection of the tunnel route and before its excavation, it is necessary to carry out comprehensive studies of hydrogeology, engineering geology, and geology through field visits, drilling boreholes, and related tests along the route.

Conclusion: This study shows that the use of multi-criteria approaches and advanced zoning technologies can help to improve the decision-making process in large infrastructure projects.

Kew words: Risks, Weighting, Excavation preference, Water delivery point, Engineering judgment.

Citation:
Kiani, S., Dashti Barmaki, M., Site Selection of Hezar-Masjed Mountain Water Transmission Tunnel Using by the Analytic Hierarchy Process, and Shannon Entropy, Iran J Remote Sens GIS. 17(1):171-192.

* Corresponding Author: kiani@khu.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.48308/gisj.2024.236085.1222
Received: 2024.06.22
Accepted: 2024.08.19

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقاله پژوهشی

جایابی تونل انتقال آب رشته‌کوه هزارمسجد با واکاوی سلسله‌مراتبی و آنتروپی شانون

سارا کیانی[1*] و مجید دشتی برمکی[2]

سمت

۱. گروه ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲. شرکت مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: در سال‌های اخیر، حفر تونل‌های انتقال آب با مخاطرات گوناگونی همانند پتانسیل مچاله‌شوندگی، مخاطرات هیدروژئولوژیکی، تأثیرات زیست‌محیطی، مخاطرات وجود گاز و تحلیل حساسیت هزینه‌های ساخت روبه‌رو بوده که اهمیت جایابی صحیح این سازه‌ها را دوچندان کرده است. اما تعیین محل حفر تونل، با استفاده از روش‌های نوین وزن‌دهی به معیارهای اثرگذار و پهنه‌بندی در سیستم اطلاعات جغرافیایی، مغفول مانده است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، با تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی، تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی شانون، به جایابی تونل انتقال آب هزارمسجد که بخشی از پروژهٔ انتقال آب از ارتفاعات هزارمسجد به شهر مشهد را تشکیل می‌دهد، پرداخته شده است. بر این اساس، مؤلفه‌های گوناگونی شامل پنج بعد مخاطرات اجتماعی، زمین‌شناسی ساختاری، هیدروژئولوژی، توپوگرافی و بعد اقتصادی در نظر گرفته شده است. در گام اول، دو معیار فاصله از روستاها و فاصله از منابع آبی، بدون توجه به آب‌دهی‌شان، به‌منزلهٔ معیارهای درگیر با بعد اجتماعی در نظر گرفته شدند. بر این اساس، حفر تونل در فاصله‌های دورتر از این دو معیار پیشنهاد می‌شود. بعد دوم مطالعات به زمین‌شناسی و زمین‌ساخت تعلق گرفته است. بر این مبنا، ساخت چنین سازه‌هایی در تراکم بالای گسل‌ها مخاطراتی را درپی خواهد داشت و پیشنهاد نمی‌شود. مطالعات هیدروژئولوژی با عنوان بعد سوم به‌لحاظ عوامل تأثیرگذار، ورود آب به تونل، و یا تأثیرپذیر، خشک شدن منابع آبی پیرامون حفاری تونل حائز اهمیت است. ازاین‌رو، در این مطالعه، از حوضهٔ آبگیر چشمه‌های پرآب محدودهٔ مطالعاتی با عنوان معیار هیدروژئولوژی یاد شده است. در بعد توپوگرافی، از نقشهٔ توپوگرافی محدودهٔ مطالعاتی به‌منظور استحصال نقشهٔ ضخامت روبارهٔ تونل استفاده شد. با توجه به این معیار، حفاری در ضخامت کمتر روباره شرایط بهینه‌تری فراهم می‌آورد. درنَهایت، گزینهٔ حفر تونل در نقاط نزدیک به محل تحویل آب، در تصفیه‌خانهٔ شمارهٔ ۳ مشهد- چرمشهر به‌منزلهٔ معیار اقتصادی در نظر گرفته شد. بنابراین معیاری با عنوان فاصلهٔ خروجی تونل تا محل تحویل آب با عنوان بعد اقتصادی طرح مطرح شده است. نقشهٔ موضوعی هریک از معیارهای بیان‌شده در محیط ArcMap تهیه و طبقه‌بندی شد. طبقات واقع‌در هر معیار، با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، امتیازدهی شد. درنَهایت، برای وزن‌دهی به معیارهای مؤثر در جایابی تونل، از روش آنتروپی شانون استفاده شد. اولویت‌بندی معیارهای مؤثر در جایابی تونل انتقال آب هزارمسجد نشان می‌دهد که پارامتری مانند فاصله از چشمه‌ها مهم‌تر از سایر معیارهاست. درواقع، اگرچه فاصله از روستا به‌منزلهٔ عامل مهم در قیاس با سایر معیارها محسوب نمی‌شود، وجود چشمه به‌علت اهمیت معیشتی برای ساکنان، شرایط را بغرنج خواهد کرد و این بدان‌معنی است که دوری یا نزدیکی به روستا نمی‌تواند عامل مستقلی برای جایابی حفر تونل در نظر گرفته شود. در ردهٔ دوم، معیار فاصله از گسل به‌سبب اثر مستقیم در پایداری سازه، اهمیت ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. سایر معیارها در شرایط حد واسط اهمیت قرار دارند. درنَهایت، با تلفیق نقشه‌های تهیه‌شده، پهنه‌بندی مناطق مناسب حفر تونل به‌علاوهٔ سه اولویت اصلی محور تونل پیشنهادی، ازطریق قضاوت مهندسی مطرح شده است.

نتایج و بحث: نتایج نشان می‌دهد که بخش شمال‌غرب محدودهٔ مطالعاتی برای حفاری مناسب نیست و مخاطراتی درپی خواهد داشت. بنابراین ارجحیت حفاری به بخش میانی و شرقی محدودهٔ مطالعاتی اختصاص می‌یابد. به‌طور دقیق‌تر، اولویت حفاری به مناطق میانی اختصاص یافته است زیرا نقاط نزدیک‌تر به محل تحویل آب به شهر مشهد، در غرب محدودهٔ مطالعاتی، نزدیک‌ترند. براساس نتایج، بهترین گزینهٔ انتقال آب از یال شمالی به جنوبی کوه‌های هزارمسجد، احداث تونلی به‌طول ۸۷۳۲ متر در حوالی روستای چنارسوخته و مسیری نزدیک‌تر به محل تحویل آب است. شایان ذکر است که پس‌از جایابی مسیر حفر تونل تا پیش‌از حفاری آن، باید مطالعات جامع هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناختی مهندسی و زمین‌شناختی ازطریق بازدیدهای صحرایی، حفاری گمانه در مسیر و آزمایشات مربوط به آن انجام شود.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از رویکردهای چندمعیاره و تکنولوژی‌های پیشرفتهٔ پهنه‌بندی می‌تواند به بهبود فرایند تصمیم‌گیری در پروژه‌های بزرگ زیربنایی کمک کند.

واژه‌های کلیدی: مخاطرات، وزن‌دهی، ارجحیت حفاری، محل تحویل آب، قضاوت مهندسی.

استناد: *کیانی، س.، دشتی برمکی، م.، جایابی تونل انتقال آب رشته‌کوه هزارمسجد با واکاوی سلسله‌مراتبی و آنتروپی شانون، نشریه سنجش از دور و GIS ایران. سال ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴: ۱۷۱-۱۹۲.*

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kiani@khu.ac.ir

شناسه دیجیتال مقالات: https://doi.org/10.48308/gisj.2024.236085.1222

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱- مقدمه

امروزه ایجاد فضاهای زیرزمینی با هدف انتقال آب، موسوم به تونل‌های انتقال آب مکانیزه، توسعهٔ چشمگیری یافته است به‌طوری که روش‌های حفاری مکانیزه با دستگاه حفاری تونل یا TBM[1] در افزایش سرعت، کیفیت و ایمنی پروژه‌های زیرزمینی تأثیر فزاینده‌ای گذاشته است. اما با وجود مزایا و محسنات یادشده، چنین عملیاتی در همهٔ بخش‌های درگیر در پروژه، تحت تأثیر ریسک قرار دارد و ممکن است مخاطرات بسیاری را دربربگیرد (Wagner, 2006). ازاین‌رو عدم‌قطعیت‌های بی‌شماری طراحی سازه‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. درواقع، به‌دلیل وجود شرایط زمین‌شناختی و هیدرولیکی گوناگون در مسیر تونل‌ها، همواره مشکلات و چالش‌های متفاوتی به وجود می‌آید که از آنها با عنوان مخاطرات تونل‌سازی یاد می‌شود. ازطرفی، جایابی مسیر حفر تونل ازجملهٔ مسائل درگیر با چنین مخاطراتی درابتدای هر پروژه است و باید گزارش‌های اولیهٔ مخاطرات، در این زمینه، تهیه شود.

مخاطرات تونل‌های انتقال آب را از جنبه‌های گوناگونی می‌توان بررسی کرد و بسیاری از محققان به این کار پرداخته‌اند که ازجمله می‌توان به پتانسیل مچاله‌شوندگی[2] (Abbasi Shastanroudi et al., 2013; Sun et al., 2018; Arora et al., 2021)، مخاطرات هیدروژئولوژیکی (You et al., 2005; Wagner, 2006)، آثار زیست‌محیطی (Zangi Drestani, 2019; Rahman, 2022)، مخاطرات ناشی از وجود گاز (Mirmehrabi et al., 2015; Yang et al., 2022)، تحلیل حساسیت هزینه‌های ساخت (Sayadi & Amiri, 2006; Paraskevopoulou & Benardos, 2013) و مواردی از این دست (Mohammadi et al., 2023) اشاره کرد. بنابراین مطالعات متفاوت زیرسطحی در محیط‌های سنگی نشان از توجه محققان گوناگون به این پدیده و پیشنهاد راهکارهای متنوع برای مقابله با آن دارد (Cui et al., 2015; Wang et al., 2019; Ma et al., 2020; Zheng & He, 2021). چنین مطالعاتی مستلزم صرف زمان و هزینهٔ چشمگیر بابت آزمایش‌های گوناگون و تحلیل‌های وابسته به آنهاست. بنابراین بیان راهکارهای سریع، مورد اتکا و نوین در جایابی چنین سازه‌هایی بیش‌ازپیش احساس می‌شود. ازاین‌رو مسئلهٔ اصلی، در این پژوهش، تعیین محل حفر تونل با استفاده از معیارهای سطحی و کم‌هزینه است. بدین‌منظور سیستم اطلاعات جغرافیایی هم‌گام با روش‌های گوناگون وزن‌دهی، مانند سیستم تصمیم‌گیری تحلیل سلسله‌مراتبی AHP[3] (Shao et al., 2020)، مدل دلفی[4] (Hwang & Lin, 1987) و آنتروپی شانون[5] (Lin, 1991) که روش‌هایی کم‌هزینه و زمان‌صرفه‌جو محسوب می‌شوند، از معروف‌ترین مدل‌ها برای استفاده هستند. مدل‌هایی همچون AHP و منطق فازی از روش‌های به‌کاررفته در بسیاری از مطالعات پهنه‌بندی است (Yamani et al., 2013; Kiani, & Fatholahzadeh, 2019; Pourakbari et al., 2020; Saffari et al., 2019; Gholi Nataj Malekshah et al., 2021; Mohammad Doust & Shamsnia, 2023). روش آنتروپی شانون نیز، در پهنه‌بندی زمین‌لغزش، مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است (Shekari Badi et al., 2022; Amir Ahmadi et al., 2017; Feyzolahpour et al., 2021; Hanifi nia & Abghari, 2021). به‌رغم آنکه مطالعات گوناگونی درزَمینهٔ مخاطرات تونل انجام شده است و به آنها اشاره کردیم، به‌جز در تعدادی از آنها (Dilhani et al., 2018; Xue et al., 2021)، روشی جامع که ابعاد گوناگون مخاطرات تونل و مسیریابی بهینهٔ آن را دربربگیرد، مطرح نشده است. بنابراین محققان تصمیم گرفتند بهترین مسیر حفر تونل را با استفاده از تلفیق روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی- آنتروپی شانون و با توجه به ابعاد گوناگون مخاطرات درزَمینهٔ عملیات حفاری تونل،

1. Tunnel Boring Machine
2. Squeezing
3. Analytic Hierarchy Process
4. Delphi Method
5. Shannon Entropy

بیان کنند. در این زمینه، مسیر بهینه مسیری است که کمترین مخاطرات زمین‌شناسی ساختاری و هیدروژئولوژی، زیست‌محیطی، اقتصادی و نیز اجتماعی را داشته باشد. رعایت حریم مناطق روستایی، مناطق حفاظت‌شده و منابع آبی، مانند چشمه‌ها، ازجمله الزامات در حیطهٔ مخاطرات اجتماعی در حفاری تونل‌های انتقال آب است. در میان مخاطرات زمین‌شناسی ساختاری و هیدروژئولوژی نیز، می‌توان به معیارهایی نظیر محل گسل و ضخامت تودهٔ سنگ، همچنین حوضهٔ آبگیر چشمه‌های پرآب اشاره کرد. درنهایت، عامل فاصله تا محل تحویل آب به‌منزلهٔ شاخصی اقتصادی، از اهمیت بسیاری برخوردار است.

مطالعات منابع آبی در ارتفاعات هزارمسجد، ازسوی محققان گوناگون، بیانگر اهمیت این منطقه است. عشقی و ثروتی[1] (۲۰۰۴) ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مناظر کارستی در حوضهٔ آبریز کارده در شرق زون کپه‌داغ و نقش مناظر کارستی در زهکشی آب‌ها و انتقال هرزآب‌ها به درون سیستم هیدرولوژیکی را شناسایی کردند. اهمیت این حوضه به این دلیل است که تودهٔ کارستی آن از نوع کارست‌های مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی است و در پایین‌دست حوضه، پنج حلقه چاه آهکی در آبخوان کارست، به‌منظور تأمین آب آشامیدنی شهر مشهد، حفر شده است. همچنین آب‌های سطحی حوضه پشت سد کارده تجمع می‌یابد و برای شرب در غرب مشهد، از آن بهره‌برداری می‌شود. یوسفی سنگانی[2] و همکاران (۲۰۱۴) پتانسیل منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه در سازندهای کربناته، در بخش شمالی کوه‌های هزارمسجد را شناسایی و ارزیابی کردند. به عقیدهٔ آنها، محدودهٔ دارای پتانسیل بالا بیشتر در یال‌های شمالی و پلانژ تاقدیس‌ها قرار گرفته است. از بین دو سازند کارستی تیرگان و مزدوران، تیرگان پتانسیل بیشتری دارد. رضایی عارفی و همکاران[3] (۲۰۱۹) اشکال کارستی حوضهٔ کلات را براساس مدل‌های سویجیک، والتهام، کماتینا و هراک، شناسایی و طبقه‌بندی کردند. از دید آنها، شکل‌های کارستی این حوضه تنوع بسیاری دارد و انواع کارن‌ها، دولین‌ها، دره‌های کارستی و چشمه‌های کارستی را شامل می‌شود. مطالعهٔ شکل‌های کارستی حوضهٔ کلات مشخص کرد که این شکل‌ها، براساس طبقه‌بندی سویجیک در ردیف کارست‌های انتقالی، براساس طبقه‌بندی والتهام و فوکس در ردیف کارست‌های جوان، براساس طبقه‌بندی کماتینا در ردیف کارست‌های ناودیسی و براساس طبقه‌بندی هراک در ردیف کارست‌های کوه‌زایی قرار می‌گیرند. اهمیت منابع آبی هزارمسجد در شمال‌شرق ایران در مطالعهٔ کیانی[4] و همکاران (۲۰۲۲) بررسی شده است. به نظر آنها، شاخص برداشت آب در کشور ترکمنستان، طی پنجاه سال گذشته، رشد روزافزونی داشته است. با توجه به قانون ممنوعیت برداشت آب از آبخوان‌ها در داخل کشور، این نگرانی وجود دارد که منابع مشترک آبی ازسوی کشور همسایه استفاده شود. ازاین‌رو انتقال آب از ارتفاعات شمال‌شرق کشور ــ ارتفاعات هزارمسجد ــ در اولویت طرح‌های آبی کشور قرار گرفته است. انتقال آب از این ارتفاعات یکی از گزینه‌های اصلی تأمین آب مشهد و ازجملهٔ طرح‌های مهم آبی در کشور محسوب می‌شود. براساس طرح اولیه، طول مسیر این پروژه ۱۸۹ کیلومتر است که حدود ۸ کیلومتر آن تونل آبی و مابقی خط انتقال است. همچنین ظرفیت پیش‌بینی‌شدهٔ قابل‌انتقال ازطریق تونل برابر با ۵ مترمکعب برآورد شده است. مطالعهٔ حاضر، با هدف تعیین بهترین مسیر زیرزمینی انتقال آب از یال شمالی به جنوبی کوه‌های هزارمسجد و با استفاده از تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و آنتروپی شانون براساس سیستم اطلاعات جغرافیایی، برای تعیین محل مناسب حفر تونل انجام شده است. در این مطالعه، مسیر بهینهٔ حفاری تونل در راستای عمود بر محور این ارتفاعات، به‌روش پهنه‌بندی و با استفاده از عوامل

1. Eshghi & Servati
2. Yousefi Sangani
3. Rezaei Arefi
4. Kiani

گوناگونی همچون فاصله از مناطق روستایی، فاصله از چشمه‌ها، تراکم گسل‌ها، فاصله تا محل تحویل آب، ارتفاع روبارهٔ تونل و حوضهٔ آبگیر چشمه‌های پرآب پیشنهاد شده است.

استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و ترکیب آن با فنّاوری‌های پیشرفته و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[1]، برای بهبود دقت و کارآیی در انتخاب مسیر تونل، ازجمله نوآوری‌های تحقیق پیش روست. در این تحقیق، مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، مانند تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی شانون، برای ارزیابی و وزن‌دهی به معیارهای گوناگون مکان‌یابی تونل به کار رفته است. ادغام سیستم اطلاعات جغرافیایی با مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌منظور تحلیل داده‌های مکانی و غیرمکانی، به مهندسان این امکان را می‌دهد که معیارهای متفاوتی مانند توپوگرافی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی و مسائل زیست‌محیطی را هم‌زمان بررسی کنند و بهینه‌ترین مسیر را برگزینند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی محدودهٔ مطالعاتی

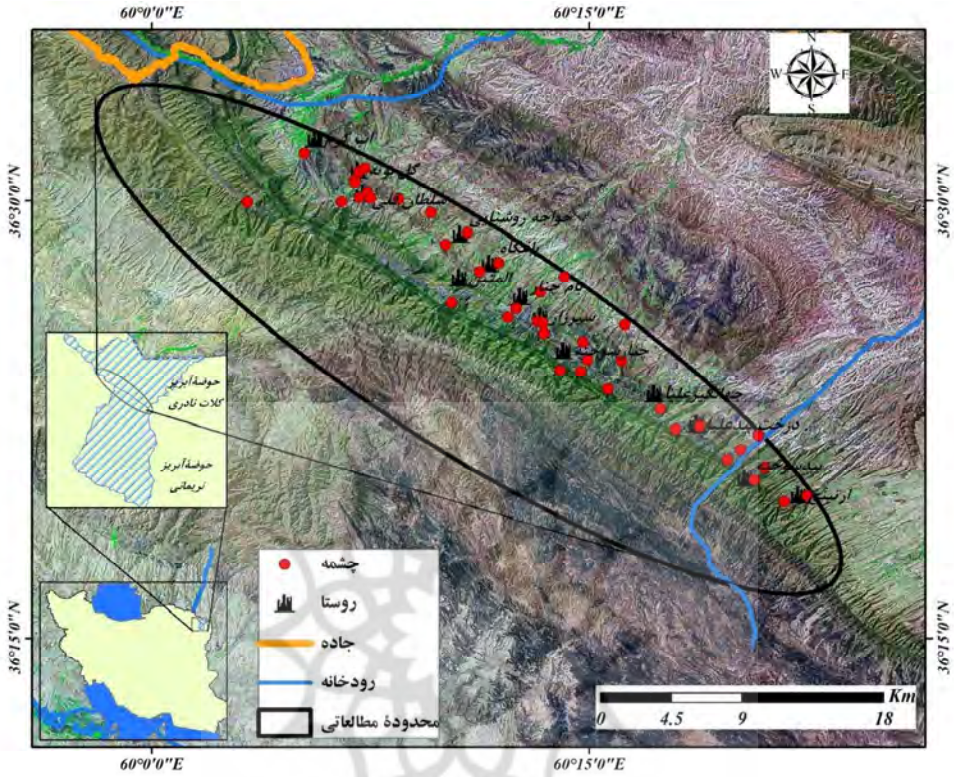
تونل انتقال آب هزارمسجد به منظور تأمین آب شرب شهر مشهد از منابع آب‌های مرزی شمال‌شرق، با طول پیشنهادی هشت کیلومتر در مناطق کوهستانی شمال شهرستان میامی، بخشی از پروژهٔ خط انتقال آب از ارتفاعات هزارمسجد به‌طول ۱۸۹ کیلومتر است. موقعیت پیشنهادی این تونل در ارتفاعات هزارمسجد ــ رشته‌کوه بزنگان ــ و دو محدودهٔ مطالعاتی کلات نادری و نریمانی از محدوده‌های مطالعاتی زیرحوضهٔ درجهٔ دوم قره‌قوم، حد فاصل طول جغرافیایی ′۵۸ °۵۹ تا ′۲۳ °۶۰ شرقی و عرض جغرافیایی ′۱۵ °۳۶ تا ′۳۴ °۳۶ شمالی خواهد بود (شکل ۱). اقلیم غالب منطقه نیمه‌خشک است و اقلیم خشک، از نوع بیابانی، نیمی از حوضهٔ آبریز را پوشش می‌دهد. ضمناً تودهٔ هوای مدیترانه‌ای و گستره‌های مرطوب ارتفاعی نیز کمتر از ۱۰٪ حوضهٔ آبریز را دربرمی‌گیرد و توده‌های هوای قاره‌ای قطبی و توده‌های هوای قاره‌ای منجمدِ منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نزولات جَوّی اغلب به‌صورت باران است و میانگین بارندگی منطقه حدود ۱۸۰ میلی‌متر است (Kiani et al., 2022).

ازنظر زمین‌شناختی، این منطقه جزئی از حوضهٔ رسوبی کپه‌داغ است که به‌صورت باریکهٔ طویلی در شمال خراسان واقع شده و ادامهٔ بخش شمالی آن در ترکمنستان قرار دارد. حد جنوبی کپه‌داغ به بینالود می‌رسد و حد شمالی آن گسل عشق‌آباد ــ ترکمنستان است. این زون پس‌از کوه‌زایی سیمیرین پیشین، یعنی هنگامی‌که ظاهراً تصادم و برخورد بین ایران و توران خاتمه یافته، به‌صورت حوضهٔ رسوبی درآمده است (Aghanabati, 2004). ازنظر حوضهٔ رسوبی، کپه‌داغ وضعیت تقریباً مشابهی با حوضهٔ رسوبی زاگرس دارد. همچنین چین‌خوردگی‌های این ناحیه که از چین‌های نامتقارن است، شباهت بسیاری به زاگرس دارد و مانند آن، از آخرین حرکات کوه‌زایی آلپ نتیجه شده است. روند کلی چین‌ها شمال‌غرب- جنوب‌شرق است. سن طبقات رسوبی این ناحیه ژوراسیک تحتانی تا کواترنر است و ضخامت آنها به ۵۰۰۰ متر می‌رسد.

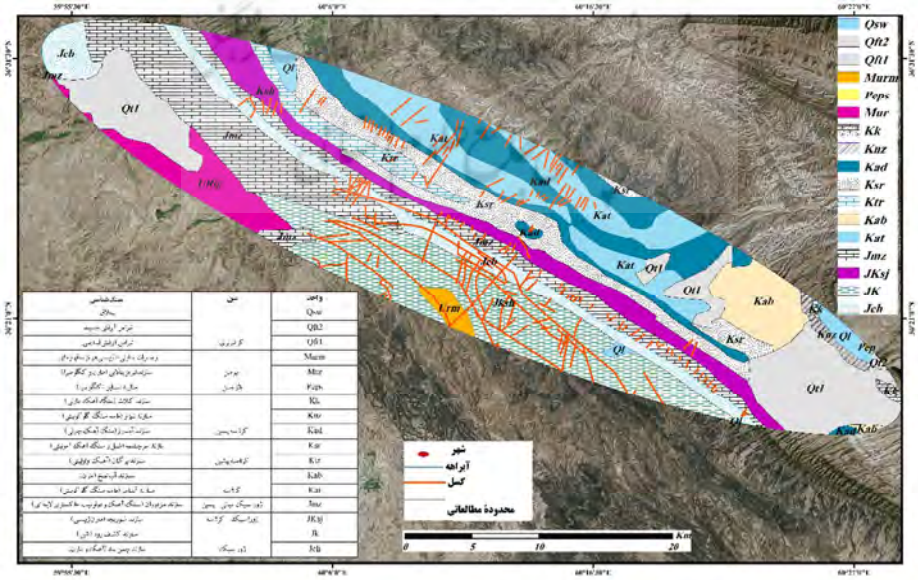
به‌طورکلی در این ناحیه پانزده سازند تشخیص داده می‌شود که به‌ترتیب، از قدیم به جدید، عبارت است از (Aghanabati, 2004) (شکل ۲): سازندهای کشف‌رود Jk، شوریجه JKsj، چمن‌بید Jch و مزدوران Jmz از ماسه‌سنگ، شیل، سنگ‌آهک، دولومیت و مارن تشکیل شده و سن آنها معادل ژوراسیک است. سازندهای کرتاسه شامل تیرگان Ktr، سرچشمه Ksr، آب‌دراز kad، آیتامیر Kat، آب‌تلخ Kab، نیزار Knz و کلات Kk می‌شود که از سنگ‌های آهکی، مارن، کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل و مقادیر ناچیزی ژیپس تشکیل شده‌اند. رسوبات پالئوسن- میوسن از کنگلومرا ــ سازند پستلیق Peps، ماسه‌سنگ و شیل‌های قرمزرنگ، Mur و Murm ــ تشکیل شده است. تراس‌های رودخانه‌ای عصر حاضر ــ Qft1، Qft2 و

1. MCDM

Qsw ــ به‌صورت دگرشیب در بالای رسوبات نام‌برده رسوب کرده‌اند. به‌طورکلی هیچ‌گونه فعالیتی ماگمایی در زون کپه‌داغ مشاهده نشده است؛ بنابراین گسترش سنگ‌های دگرگونی در این منطقه بسیار کم بوده ولی، با حرکت به‌سمت جنوب کپه‌داغ، فعالیت‌های ماگمایی کم‌وبیش مشاهده می‌شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدودهٔ مطالعاتی

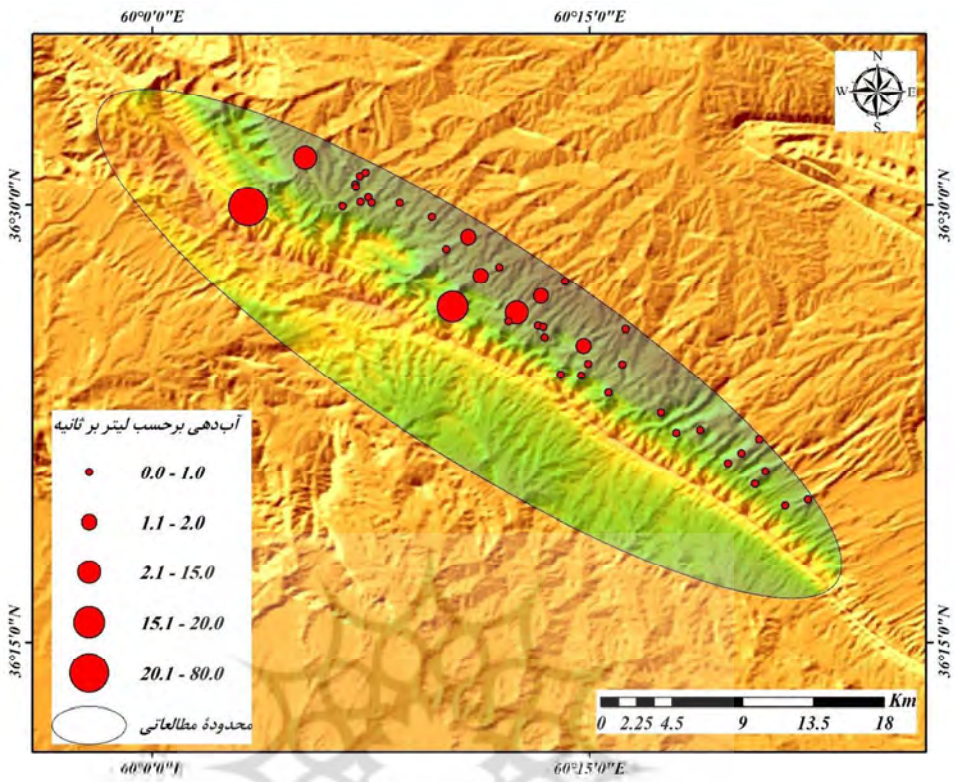


شکل ۲. نقشهٔ زمین‌شناسی محدودهٔ مطالعاتی

ازنظر هیدروژئولوژیکی و براساس بازدید انجام‌شده، در گسترهٔ طرح، آبخوان آبرفتی شایان توجهی وجود ندارد و بیشتر منطقه از سازندهای سخت تشکیل شده است. منابع آبی خروجی از این سازندها اغلب چشمه‌های با آب‌دهی نسبتاً کم است که با توجه به پهنهٔ سازندهای غیرآهکی در محدوده، چنین مواردی انتظار می‌رود. بر این اساس، در محدودهٔ مطالعاتی، ۴۱ دهنه چشمه با آب‌دهی‌های متفاوت قرار دارد (شکل ۳) که در دورهٔ آماربرداری (Iran Ministry of Energy, 2018)، ۳۳ دهنه آب‌دهی کمتر از یک لیتر بر ثانیه و شش دهنه آب‌دهی کمتر از پانزده لیتر بر ثانیه داشته‌اند. چشمه‌های المتین، با آب‌دهی شانزده لیتر بر ثانیه و آبگرم، با آب‌دهی هشتاد لیتر بر ثانیه، از چشمه‌های پرآب محدودهٔ مطالعاتی به شمار می‌روند (جدول ۱) (Iran Ministry of Energy, 2021).

جدول ۱. مشخصات چشمه‌های منتخب مسیر تونل هزارمسجد در حریم ده‌کیلومتری از محور تونل (Iran Ministry of Energy, 2021)

ردیف	نام چشمه	UTMx	UTMy	آب‌دهی متوسط (لیتر بر ثانیه)
1	سیرزار	251146	4034630	0
2	چشمهٔ چاه محمد	251091	4035272	0/1
3	شرشری	250831	4035362	0/5
4	گلابی	251905	4032239	2/5
5	چهارباغ	253131	4034021	1/5
6	چهارباغ بالا	252485	4033661	0
7	خنک	249318	4035676	0/5
8	پشت‌بست	252960	4032140	0/5
9	چشمهٔ روستای بام‌چنار	249757	4036231	3/5
10	قلعه	253330	4032890	0/5
11	قمر	251040	4037260	1/5
12	بلبل تو بالا	254316	4031004	0/2
13	بلبل تو پایین	255069	4032796	0/2
14	بلبل تو پایین ۲	254951	4032470	0
15	سلطان	252290	4038145	0/5
16	سفید	255297	4035032	0/2
17	سفیدـ چپ	255082	4035051	0
18	سفیدـ راست	255079	4035051	0
19	تک‌جعفر	254407	4037450	1/5
20	المتین	246481	4036700	16
21	قلعه	248955	4039135	0
22	باغ‌گاه	247975	4038638	2
23	کاریز	256589	4037761	0/2
24	روستای جهانگیر	256962	4029660	0/1
25	خنک	254613	4039949	0
26	کال پرنده	254851	4040099	0/01
27	چشمهٔ بالاروستا	246262	4040386	0/2
28	چشمهٔ روستای خواجه‌روشنایی	247419	4041109	2
29	کال پس‌خانه	257726	4028365	0/5
30	چشمهٔ سفید	249246	4041878	0/4
31	روستای درخت بیدبالا	258949	4028513	0
32	اورنگ علی‌بیک	254517	4043217	0
33	جغرتین	245582	4042426	0/01
34	روستای کلاتهٔ آقابیک	256449	4042396	0/2
35	چشمهٔ آبگرم اصلی ۱	236202	4043374	2/4
36	چشمهٔ آبگرم اصلی ۲	236194	4043373	1/9



شکل ۳. وضعیت آب‌دهی چشمه‌ها در محدودهٔ مطالعاتی (Iran Ministry of Energy, 2021)

۳- روش تحقیق

۳-۱- تهیهٔ نقشه‌های پایه

مکان‌یابی صحیح تونل‌های انتقال آب در محیط‌های سنگی، علاوه‌بر کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری پروژه، نقش مهمی در حفاظت از محیط‌زیست و تأمین پایدار منابع آب دارد. بررسی دقیق و جامع تمامی عوامل مؤثر در مکان‌یابی این‌گونه سازه‌ها به مهندسان کمک می کند، با انتخاب بهترین مسیر و استفاده از تکنیک های مناسب، پروژه‌های انتقال آب را با موفقیت به پایان برسانند. به‌طورکلی عوامل گوناگونی در مکان‌یابی تونل‌ها مؤثرند که از آنها می‌توان به مطالعات زمین‌شناختی، شامل بررسی نوع سنگ‌ها و خواص مکانیکی آنها، همچنین ویژگی‌های ساختاری مانند گسل و شکستگی‌ها، مطالعات آب‌های زیرزمینی شامل ارزیابی سطح آب زیرزمینی، آب ورودی به تونل و احتمال خشک شدن منابع آبی پیرامون، تحلیل منابع آب سطحی مسیر تونل، پایداری شیب و فشار زمین، انتخاب روش حفاری و تعیین مواد و مصالح مناسب پشتیبان تونل اشاره کرد که هریک از این عوامل نیازمند بررسی‌های صحرایی گسترده و آزمایش‌های گوناگون تحلیلی خواهد بود. اما استفاده از روش‌های نوین، مانند دورسنجی، و تلفیق آن با سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌منزلهٔ مطالعات دفتری، پیش‌از همهٔ این عملیات یادشده، می‌تواند به بهینه‌یابی مسیر تونل یاری برساند. در این مطالعه، به‌منظور جایابی بهینهٔ حفر تونل انتقال آب هزارمسجد، به مؤلفه‌های گوناگونی توجه شده و پنج بعد آن، شامل مخاطرات اجتماعی، توپوگرافی، زمین‌شناسی ساختاری، هیدروژئولوژی و بعد اقتصادی طرح در نظر گرفته شده است. نمودار جریانی روش مطالعه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

بعد اجتماعی: در میان تأثیرات سوء حفر تونل در بعد اجتماعی، حین ساخت تونل و پس‌از آن، موارد متعددی را می‌توان متذکر شد که ازجملهٔ آنها، آلودگی هوا و صدا و اثر آن در سلامت عمومی، تخریب زیست‌محیطی مشتمل‌بر فرسایش خاک و آلودگی منابع آب، تخریب زیرساخت‌های محلی مانند جاده و تأسیسات، جابه‌جایی و تغییرات اجتماعی مثل مهاجرت اجباری و منازعات اجتماعی است. بنابراین، در این بخش، دو مؤلفهٔ فاصله از روستا و فاصله از منابع آب محلی، یعنی چشمه‌ها، به‌منزلهٔ ابعاد اجتماعی در نظر گرفته شد. محل ظهور چشمه‌ها، رد جایگاه منابع اصلی آب زیرزمینی و عاملی که با معیشت مردم سروکار دارند، از دفتر مطالعات شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران اخذ شد (Iran Ministry of Energy, 2021). موقعیت روستاها نیز از اطلس نقشه و اطلاعات مکانی استان خراسان رضوی و نقشه‌های در دست دریافت شد (National Cartographic Center of Iran, 2021). دو معیار فاصله از روستاها و فاصله از چشمه‌ها، بدون توجه به آب‌دهی‌شان، با استفاده از تابع Multiple Ring Buffer در محیط ArcMap تهیه شدند.

ابعاد زمین‌شناختی و زمین‌ساخت: حفر تونل‌های انتقال آب با چالش‌ها و ملاحظات زمین‌شناختی متعددی همراه است که از آنها می‌توان به مواردی همچون نوع و ویژگی‌های سنگ‌ها و خاک‌ها، زلزله‌خیزی، وضعیت آب زیرزمینی و آب ورودی به تونل، وضعیت گسل‌ها و شکستگی‌ها، فشارهای زمین‌شناختی شامل وزن لایه‌های بالایی، تغییرات دما، و یا تغییرات فشار آب زیرزمینی، فرسایش و رسوب‌گذاری، پایداری شیب‌ها، تهویه و گازهای زیرزمینی، پتانسیل تورم و انقباض اشاره کرد. مطالعات زمین‌شناختی جامع و دقیق، در مراحل اولیهٔ طراحی و ساخت تونل های انتقال آب، ضروری است تا این چالش‌ها شناسایی و به‌صورت مؤثر مدیریت شوند. بااین‌حال مطالعات دورسنجی و استخراج شکستگی‌ها و گسل‌ها گام مؤثری در مسیریابی تونل‌ها خواهد بود که در این مطالعه به آن پرداخته شده است. وضعیت گسل‌های محدودهٔ مطالعاتی از نقشهٔ زمین‌شناسی مزدوران، نرنگان، چهچهه، مشهد، قهقهه و کلات نادری با مقیاس ۱:۱۰۰/۰۰۰ (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 1988) دریافت، و تصاویر باند ۷ ماهوارهٔ Landsat ETM^{+} 9، تصویر سال ۲۰۲۲ برگرفته از سایت https://earthexplorer.usgs.gov/ بررسی شد و نقشهٔ تراکم آنها با استفاده از تابع تراکم در محیط ArcMap استخراج شد.

بعد توپوگرافی: در بخش ابعاد زمین‌شناختی، وزن لایهٔ بالایی از مؤلفه‌های تأثیرگذار بود که در این تحقیق، با عنوان ضخامت روباره و در بعد توپوگرافی بررسی خواهد شد. در این راستا، از نقشهٔ توپوگرافی محدودهٔ مطالعاتی برای استحصال نقشهٔ ضخامت روبارهٔ تونل استفاده شد. این مؤلفه از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ (National Cartographic Center of Iran, 2006) استخراج شده است. براساس فرضیات طرح، حفر تونل در تراز ۱۲۰۰متری از سطح دریا، به‌منزلهٔ تراز مناسب و همچنین ترازهای بالاتر از آن، با عنوان ضخامت روباره، به‌منزلهٔ معیار حفاری در نظر گرفته شده است. در این مقاله، به‌تبع، حفاری در ضخامت کمتر روباره شرایط بهینه‌تری فراهم می‌آورد.

ابعاد هیدروژئولوژیکی: تونل‌های انتقال آب به ابعاد هیدروژئولوژیکی مهمی نیاز دارد که باید به دقت بررسی و مدیریت شوند. ازجملهٔ مهم‌ترین این ابعاد، می‌توان به شناسایی منابع آب زیرزمینی، سطح آب زیرزمینی و پایش آن، نفوذ آب به تونل، تأثیرات آب‌های سطحی، تغییرات در جریان آب زیرزمینی و خشک شدن چشمه‌ها، و تغییر در کیفیت آب زیرزمینی اشاره کرد. ارزیابی تمامی موارد ذکرشده مستلزم آزمایش‌های گوناگون و عملیات حفاری گمانه در مسیر تونل خواهد بود. بااین‌حال، در این مطالعه، از حوضهٔ آبگیر چشمه‌های پرآب محدودهٔ مطالعاتی با عنوان معیار هیدروژئولوژی یاد شده است که از مطالعات ابتدایی هیدروژئولوژیکی حاصل می‌شود. بر این اساس، احتیاط

حفاری در حوضهٔ آبگیر چشمه‌های بزرگ کارستی هزارمسجد به‌منزلهٔ تابعی مؤثر در نظر گرفته شده است.

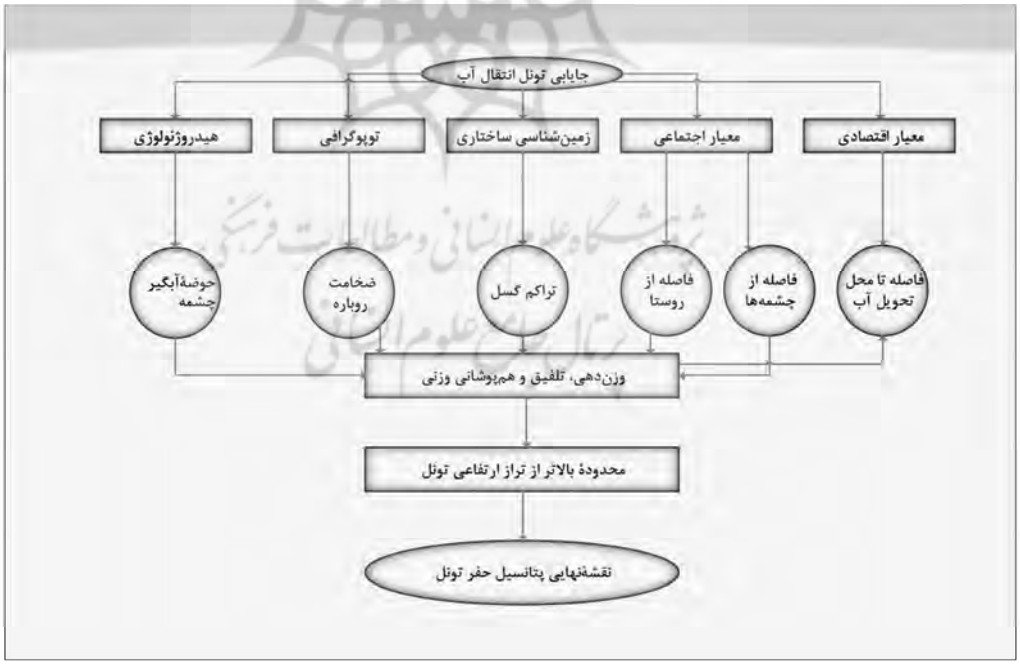
ابعاد اقتصادی: ساخت سازه‌هایی مانند تونل‌های انتقال آب، در بعد اقتصادی، از چندین جنبه اهمیت دارد؛ مانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه که شامل مطالعات اولیه و ساخت‌وساز می‌شود، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، تحلیل‌های هزینه- فایده و تأثیرات اقتصادی بلندمدت. در این میان، گزینهٔ حفر تونل در نزدیکی محل تحویل آب، یعنی تصفیه‌خانهٔ شمارهٔ ۳ مشهد- چرمشهر، معیار اقتصادی بهینه‌یابی مسیر حفر تونل در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه هدف نهایی این طرح انتقال آب از ارتفاعات هزارمسجد به شهر مشهد است، نقطه‌ای به‌منزلهٔ نقطهٔ تحویل آب در جنوب ارتفاعات در نظر گرفته شده است. بنابراین معیاری با عنوان فاصلهٔ خروجی تونل تا محل تحویل آب، به‌منزلهٔ بعد اقتصادی طرح، معین شده است.

۳-۲- وزن‌دهی به معیارها و طبقات

روش‌های متفاوتی برای تعیین وزن‌ها در مدل‌های تصمیم‌ساز وجود دارد که از آن میان، می‌توان به روش‌های عینی[1] و ذهنی[2] اشاره کرد (Yalçin & Ünlü, 2018)؛ در روش نخست، وزن‌ها فقط براساس اولویت برخاسته از نظر تصمیم‌گیران به دست می‌آید اما، در روش دوم، مدل‌های ریاضی و سنجش اطلاعات بدون انحراف ناشی از نگاه صرف به اولویت‌دهی تصمیم‌سازان به کار می‌رود (Aalianvari et al., 2012). روش‌هایی نظیر تحلیل سلسله‌مراتبی از نوع اول و مدل آنتروپی از نوع دوم این شیوه‌هاست که درادامه، تشریح می‌شود (Chu et al., 1979).

۳-۲-۱- امتیازدهی به طبقات هر معیار به‌روش تحلیل سلسله‌مراتبی

نقشه‌ها پس‌از تهیه از لایه‌های اطلاعاتی گوناگون، با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، به‌صورت نقشهٔ



شکل ۴. نمودار جریانی جایابی حفر تونل انتقال آب هزارمسجد

1. Subjective
2. Objective

معیارها طبقه‌بندی می‌شوند. ارزش‌گذاری هر معیار اشاره‌شده در بخش قبلی، با توجه به میزان اهمیت آن، با استفاده از ماتریس مقایسهٔ زوجی انجام خواهد شد. این روش از تکنیک‌های کارآمد در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره است که ساعتی[1] (۱۹۸۰) آن را مطرح کرد. بنابر این شیوه، معیارها دوبه‌دو با یکدیگر مقایسه و با تعیین اهمیت هریک، ماتریس مقایسه‌ای تعبیه می‌شود (Pourakbariet al., 2020). مقادیر ماتریس مقایسه بین ۱، با ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان، تا ۹، با شرایط کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر، متغیر خواهد بود. ماتریس صحیحی ماتریسی است که شاخص سازگاری آن بیش‌از ۹۰٪ باشد. بنابراین، در این زمینه، مقادیر شاخص سازگاری و میزان سازگاری محاسبه می‌شود. میزان سازگاری CR از تقسیم شاخص سازگاری CI بر شاخص تصادفی RI و به‌صورت رابطه (۱) به دست می‌آید (Shao et al., 2020). در روش وزن‌دهی مقایسهٔ زوجی، معیارها دوبه‌دو با یکدیگر مقایسه و اهمیت آنها، در قیاس با یکدیگر، تعیین می‌شود. سپس ماتریسی شکل می‌گیرد که ورودی آن همان وزن‌های تعیین‌شده و خروجی آن وزن‌های نسبی مربوط به معیارهاست (Malczewski, 1999)

رابطه (۱) $$CR = \frac{CI}{RI}$$

شاخص سازگاری نیز طبق رابطه (۲) به دست می‌آید.

رابطه (۲) $$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$$

در این معادله، λ عنصر بردار ویژه و n تعداد معیارهاست. مقدار λmax نیز از رابطه (۳) حاصل می‌شود.

رابطه (۳) $$\lambda_{max} = \frac{a \times b}{w}$$

a ستون وزن پارامترها، b سطر ماتریس ارزش‌گذاری و w وزن معیار است.

۳-۲-۲- وزن‌دهی به معیارهای گوناگون به‌روش آنتروپی شانون

آنتروپی رویکردی مدیریتی است که برای برخورد با بی‌نظمی، بی‌ثباتی، اغتشاش و عدم‌قطعیت به کار می‌رود و ازطریق آن، می‌توان مهم‌ترین معیار را از بین معیارهای مؤثر هدف تعیین کرد و متغیرهایی را که بیشترین تأثیر را در نیل به تابع هدف دارند، مشخص کرد (Yufeng & Fengxiant, 2009). این شاخص، اختلاف متوسط بین سهم گروه‌های واحد از سیستم‌ها را به‌منزلهٔ یک کل تعریف می‌کند. آنتروپی در مدل‌های حمل‌ونقل شبیه تونل‌ها، به‌صورت معیار پراکندگی سفر بین مبدأ و مقصد، به کار می‌رود (Islam & Roy, 2006). برای استفاده از این مدل، ابتدا باید ماتریس تصمیم‌گیری ایجاد شود. برای تشکیل این ماتریس تصمیم کافی است، اگر معیارها کیفی باشند، آنها را از عبارات کلامی ارزیابی هر گزینه نسبت‌به هر معیار به دست آورد و اگر معیارها کمّی باشند، عدد واقعی آن ارزیابی را بیان کرد. پس‌از آن، ماتریس تهیه‌شده ازطریق رابطه (۴) نرمال خواهد شد. آنتروپی هر شاخص نیز از رابطه (۵) به دست می‌آید. افزایش در آنتروپی شانون باعث افزایش بی‌اطمینانی و کاهش اطلاعات درمورد دانش متغیر تصادفی می‌شود. درنَهایت، برای محاسبهٔ وزن داده‌ها از روابط (۶) تا (۹) استفاده می‌شود (Naghibi et al., 2014). در این روابط، P امتیاز هر طبقه در معیار است که با روش AHP تعیین شده و Eji چگالی احتمال یا ماتریس تصمیم‌گیری است. Hj و Hjmax مقادیر آنتروپی، Sj تعداد کلاس طبقات، Ij ضریب اطلاعات و Vji وزن کلی برآیند هر معیار است. Vi نیز وزن نهایی هر معیار محسوب می‌شود.

رابطه (۴) $$Eji = \frac{P}{\sum_{ji=1}^{m} P}$$

رابطه (۵) $$H_j = -\sum_{i=1}^{Sj} Eji \times \log_2 Eji \;\; j = 1 \ldots\ldots n$$

رابطه (۶) $$H_{jmax} = \log_2 Sj \qquad Si - number\ of\ classes$$

رابطه (۷) $$I_j = \frac{Hjmax - H_j}{Hjmax} \quad I = (0-1) \quad j = 1 \ldots\ldots n$$

1. Saaty

$$V_{ji} = I_j P$$ رابطه (۸)

$$V_j = \overline{V_{ji}}$$ رابطه (۹)

۳-۳- تلفیق نقشه‌ها

درنَهایت، براساس روش هم‌پوشانی شاخص وزنی[1] در محیط ArcMap، پهنه‌بندی مسیرهای بهینهٔ حفر تونل انتقال آب در کوه‌های هزارمسجد طبق این معادله انجام می‌شود:

$$ZONING = (Q_S W_S + Q_C W_C + Q_O W_O + Q_F W_F + Q_R W_R + Q_B W_B)[A]$$ رابطه (۱۰)

در این معادله S، C، O، F ، R و B معیارهای مؤثر در حفاری تونل انتقال آب و به‌ترتیب، معادل فاصله از چشمه، حوضهٔ آبگیر چشمه، ضخامت روبارهٔ تونل، تراکم گسل، فاصله از روستا و فاصله تا محل تحویل آب‌اند. مقادیر وزنی هر معیار نیز با نماد W مشخص شده است. نقشهٔ نهایی از هم‌پوشانی وزنی این معیارها و اعمال نقشهٔ تراز تونل A به دست آمده است؛ به‌گونه‌ای که تراز ۱۲۰۰ به‌منزلهٔ ارتفاع پایهٔ حفر تونل در نظر گرفته شده و نقاط کم‌ارتفاع‌تر از آن، تونل برون‌زد خواهند داشت.

۴- بحث و نتایج

در این پژوهش، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی شامل فاصله از چشمه و روستا، تراکم گسل‌ها، حوضهٔ آبگیر چشمه‌های بزرگ و فاصله تا آنها، فاصله تا محل تحویل آب و ضخامت روبارهٔ تونل در قیاس با تراز در نظر گرفته‌شده، تهیه و به‌صورت رستر درآمد (شکل ۵).

نقشهٔ فاصله از روستاها: براساس آماربرداری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، سیزده روستا در منطقهٔ مطالعاتی وجود دارد که از این میان، چهار روستای گل‌بوته، خواجه‌روشنایی، المتین و سلطان‌قلی فاقد سکنه است. روستاهای آبگرم و باغگاه به‌ترتیب، با جمعیتی برابر با ۷۹۲ و ۱۹۹ نفر، پرجمعیت‌ترین روستاها در نیمهٔ شمالی و شمال‌غرب منطقهٔ مطالعاتی‌اند. جمعیت سایر روستاهای محدودهٔ مطالعاتی (شکل ۱) کمتر از یک‌صد نفر است؛ بنابراین سکونت ۱۳۶۹ نفر در این روستاها بیانگر اهمیت این پارامتر در جایابی تونل هزارمسجد است. ازاین‌رو نقشهٔ فاصله از روستاها به‌منزلهٔ پارامتر اثرگذار اجتماعی تهیه شد (شکل ۵).

نقشهٔ فاصله از چشمه‌ها: بررسی‌ها نشان می‌دهد، در این محدودهٔ مطالعاتی، قنات یا چاه بهره‌برداری فعالی وجود ندارد و چشمه‌ها تنها منبع آبی محسوب می‌شوند. ازنظر آب سطحی نیز، فقط یک رودخانهٔ فصلی در جنوب‌شرق منطقه، حوالی روستای بیدسوخته (شکل ۱)، وجود دارد که مصرف خاصی ندارد. بنابراین نقشهٔ فاصله از چشمه‌ها به‌منزلهٔ دیگر مؤلفهٔ اجتماعی مدنظر قرار گرفت. در این محدودهٔ مطالعاتی، ۳۶ دهنه چشمه ظهور یافته‌اند که همگی در یال شمالی تاقدیس نمایان‌اند و یال جنوبی دارای خروجی زیرزمینی خاصی نیست. با توجه به اینکه این منابع آبی تنها منبع معیشت مردم روستاها محسوب می‌شوند، فاصله از آنها به‌منزلهٔ دیگر مؤلفهٔ اجتماعی در نظر گرفته شد.

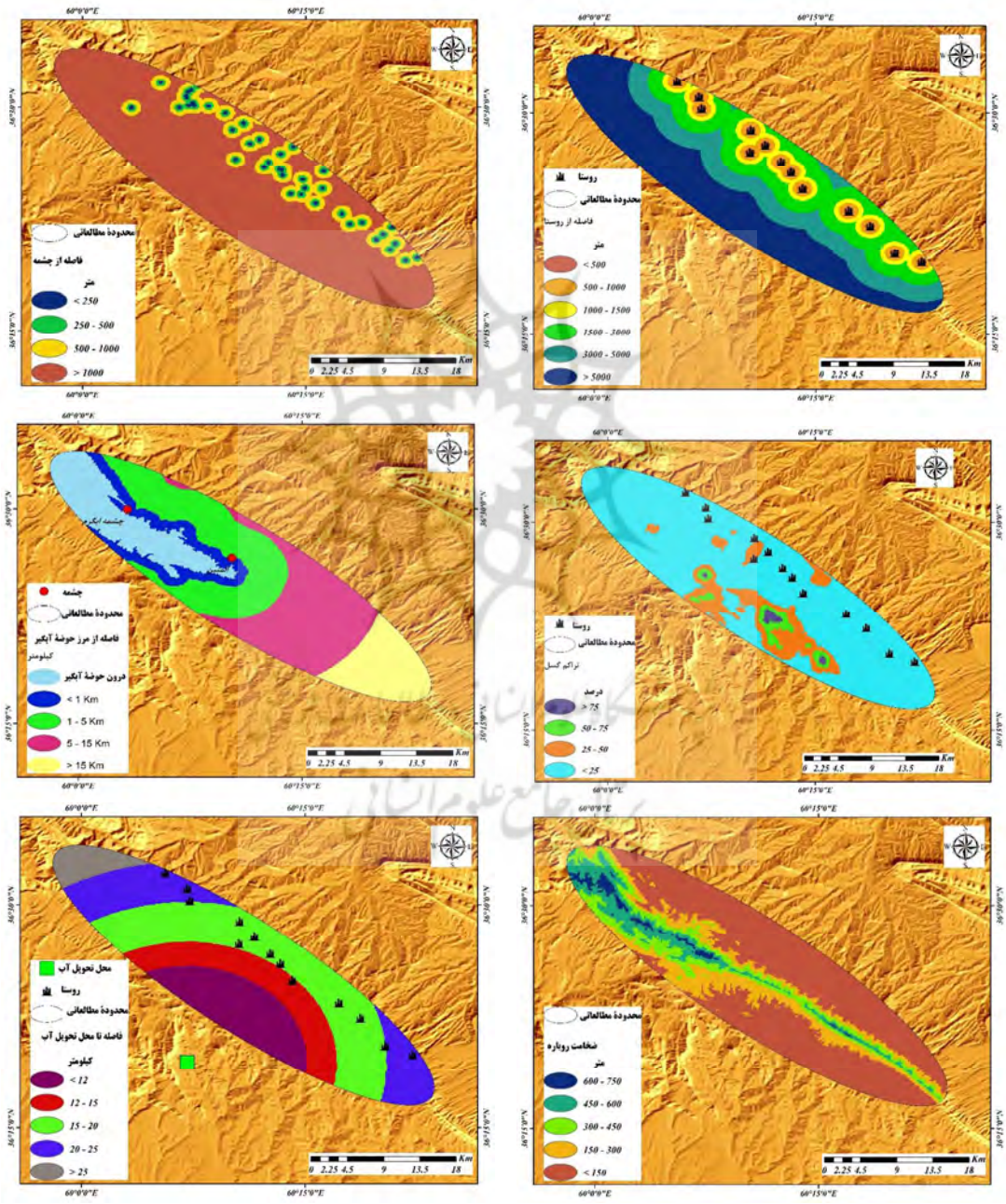
تراکم گسل و شکستگی: وجود چندین گسل در جنوب محدودهٔ مطالعاتی حاکی از تکتونیک فعال این بخش است. بنابراین تراکم گسل، به‌منزلهٔ پارامتر زمین‌شناسی، در این محدوده نمایان است. این گسل‌ها در جنوب رشته‌کوه بزنگان و سازند آهکی چمن‌بید و شیلی کشف‌رود رخنمون یافته‌اند.

حوضهٔ آبگیر چشمه‌های پرآب: با توجه به اهمیت هیدروژئولوژی، آب‌دهی چشمه‌های واقع‌در محدودهٔ مطالعاتی بررسی و مشخص شد که در محدودهٔ مطالعاتی، ۴۱ دهنه چشمه با آب‌دهی‌های متفاوت قرار دارد (شکل ۳). از این میان، در دورهٔ آماربرداری، ۳۳ دهنه آب‌دهی کمتر از یک لیتر بر ثانیه و شش دهنه آب‌دهی کمتر از پانزده لیتر بر ثانیه داشتند (جدول ۲). چشمه‌های المتین و آبگرم به‌ترتیب، با مقادیر آب‌دهی شانزده و هشتاد لیتر بر ثانیه، از چشمه‌های پرآب محدودهٔ مطالعاتی محسوب می‌شوند (جدول ۲).

1. Weighted Index Overlay

بنابراین حوضه‌های آبگیر این دو چشمه، در ارتفاعات شمال‌غرب محدودهٔ مطالعاتی، به‌منزلهٔ معیار هیدروژئولوژیکی جایابی تونل در نظر گرفته شدند و فاصله‌های دورتر از آنها نقاط بهینه محسوب شدند.

ضخامت روباره: در بین مؤلفه‌های زمین‌شناختی و توپوگرافی وارد بر تونل، ضخامت روباره که بارسنگ و بارآبی نیز از آن استخراج خواهد شد، معیار اثرگذار تعیین شد. با توجه به اینکه تراز ارتفاعی ۱۲۰۰ متر به‌منزلهٔ نقطهٔ خروجی پیش‌فرض تونل محسوب شده است، مقادیر روباره از این تراز به ترازهای بالاتر محاسبه شد (شکل ۵).



شکل ۵. نقشه‌های معیار جایابی حفر تونل انتقال آب هزارمسجد

فاصلهٔ خروجی تونل تا محل تحویل آب: در مطالعات انتقال آب، از ارتفاعات هزارمسجد به‌منزلهٔ یکی از گزینه‌های اصلی تأمین آب مشهد، از تصفیه‌خانهٔ شمارهٔ ۳ مشهدـ چرمشهر به‌منزلهٔ محل تحویل آب، یاد شده است. بنابراین فاصله از محل تحویل آب را معیار اقتصادی طرح در نظر گرفتیم. این فاصله، در محدودهٔ کمتر از ۱۲ کیلومتر تا بیش‌از ۲۵ کیلومتر در محدودهٔ مطالعاتی، متغیر است که آب را ازطریق خط لوله، از خروجی تونل تحویل می‌گیرد.

با توجه به اهمیت هر طبقه و براساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی، به طبقات هر پارامتر امتیاز داده شد. ماتریس زوجی روش تحلیل سلسله‌مراتبی در جدول ۲ آمده است. بر این اساس، امتیاز هر طبقه با مجموع امتیازات برابر با ۱ محاسبه شد. مقادیر شاخص سازگاری C.I کمتر از ۰/۱۵، در تمامی شاخص‌ها، گویای اعتبار ماتریس زوجی ایجادشده است. در تهیهٔ نقشهٔ نهایی به فاصله‌های دورتر از روستاها و چشمه‌های واقع‌در محدودهٔ مطالعاتی، با عنوان شاخص اجتماعی، امتیازات بالاتری تعلق یافت. همچنین براساس مقیاس گسترهٔ طرح و مطابق با نظر کارشناسان، فاصله از چشمه به چهار طبقه، با حد بالایی ۱ کیلومتر و روستا به پنج طبقه، با حد بالایی ۵ کیلومتر تقسیم شد (جدول ۲). درمورد معیارهای زمین‌شناختی و توپوگرافی، امتیازات بیشتر حاکی از نقاط بهینهٔ احداث تونل با تراکم کمتر عناصر ساختاری، همانند گسل و در محل‌های با ضخامت روبارهٔ کمتر، بوده است (جدول ۲). شایان ذکر است که درنَهایت، معیار اقتصادی حفر تونل، با فرض نقاط بهینهٔ نزدیک به محل تحویل آب در تصفیه‌خانهٔ شمارهٔ ۳ مشهد، به پنج طبقه تقسیم شد.

جدول ۲. ماتریس زوجی و امتیازدهی به طبقه‌بندی‌های پارامترهای مؤثر در جایابی تونل در گسترهٔ طرح، به‌روش AHP

فاصله از چشمه (متر)					**فاصله از روستا (متر)**						
	< 250	500-250	1000-500	> 1000		< 500	1000-500	1500-1000	3000-1500	5000-3000	> 5000
< 250	1	0/5	0/2	0/3	< 500	1	0/2	0/2	0/3	0/2	0/1
500-250		1	1	0/5	1000-500		1	0/3	0/2	0/3	0/2
1000-500			1	0/5	1500-1000			1	0/5	0/3	0/3
> 1000				1	3000-1500				1	0/3	0/5
	C.I.=0/05				5000-3000					1	1
امتیاز	0/1	0/2	0/3	0/4	> 5000						1
						C.I.=0/1					
					امتیاز	0/03	0/07	0/1	0/2	0/3	0/3

ادامهٔ جدول ۲

فاصله تا حوضهٔ آبگیر (کیلومتر)										**تراکم گسل (درصد)**				
	> 15 km	15-5 km	5-1 km	< 1 km	واقع‌در حوضه		> %75	75-50	50-25	< %25	
> 15 km	1						1				
15-5 km	0/5	1					1				
5-1 km	0/5	0/3	1				2	1			
< 1 km	0/3	0/5	0/3	1			3	2	1		
واقع‌در حوضه	0/1	0/2	0/3	0/3	1		4	3	1	1	< %25
امتیاز	0/4	0/3	0/2	0/1	0/04		C.I.=0/08			C.I.=0/01	
											امتیاز

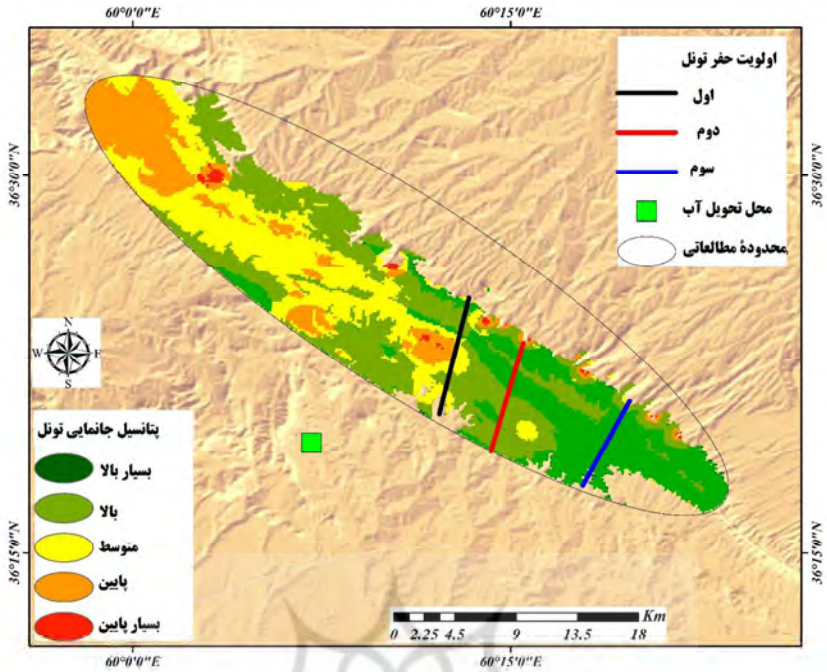
فاصله تا محل تحویل آب (کیلومتر)										**ضخامت روباره (متر)**				
	> 25km	25-20 km	20-15 km	15-12 km	< 12 km		750-600	600-450	450-300	300-150	< 150	
> 25 km	1						1					
25-20 km	2	1					2	1				
20-15 km	2	3	1				2	3	1			
15-12 km	3	2	4	1			3	2	4	1		
< 12 km	6	2	3	1	1		6	2	3	1	1	< 150
امتیاز	0/1	0/1	0/2	0/3	0/33		0/1	0/1	0/2	0/3	0/3	امتیاز
	C.I.=0/09						C.I.=0/09					

در مرحلهٔ بعد، وزن نهایی معیارها با استفاده از مدل آنتروپی شانون تعیین شد (جدول ۳). براساس نتایج، بیشترین وزن به معیار فاصله از چشمه و کمترین آن به فاصله از روستا تعلق یافت. به‌هرحال می‌توان استنباط کرد که، اگرچه فاصله از روستا عامل مهمی در قیاس با دیگر معیارها محسوب نمی‌شود، وجود چشمه به‌علت اهمیت معیشتی برای ساکنان، شرایط را پیچیده خواهد کرد و این بدان‌معنی است که دوری یا نزدیکی به روستا نمی‌تواند عامل مستقلی برای جایابی حفر تونل در نظر گرفته شود. در ردهٔ دوم، معیار فاصله از گسل به‌سبب اثر مستقیم در پایداری سازه، اهمیت ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. سایر معیارها در شرایط حد واسط اهمیت قرار دارند.

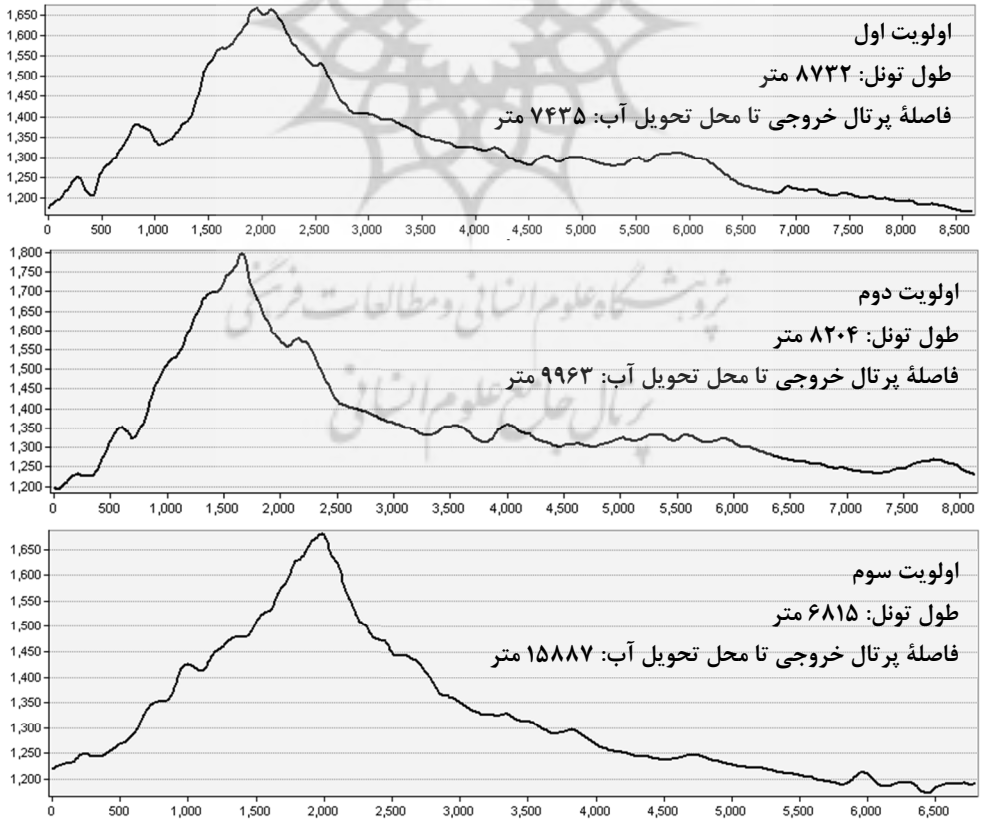
جدول ۳. وزن نهایی پارامترهای مؤثر در جایابی تونل در گسترهٔ طرح، با روش آنتروپی شانون

	طبقه	امتیاز طبقه	درصد پیکسل	P	Eji	Hj	Hjmax	Ij	Vji	VJ
فاصله از روستا (متر)	< 500	0/03	2/107	0/014	0/199	2/532	2/585	0/020	0/0003	0/002
	1000-500	0/07	5/874	0/012	0/167				0/0002	
	1500-1000	0/13	8/029	0/016	0/227				0/0003	
	3000-1500	0/18	22/300	0/008	0/113				0/0002	
	5000-3000	0/28	20/803	0/013	0/188				0/0003	
	> 5000	0/31	40/887	0/008	0/106				0/0002	
فاصله تا حوضهٔ آبگیر (کیلومتر)	واقع‌در حوضه	0/04	18/592	0/002	0/039	1/960	2/322	0/156	0/0003	0/02
	1-0	0/11	10/414	0/011	0/190				0/0016	
	5-1	0/19	27/715	0/007	0/123				0/0011	
	15-5	0/28	28/822	0/010	0/175				0/0015	
	>15	0/38	14/458	0/026	0/473				0/0041	
فاصله از چشمه (متر)	< 250	0/08	1/638	0/049	0/390	1/698	2/000	0/151	0/0074	0/05
	500-250	0/21	4/346	0/048	0/386				0/0073	
	1000-500	0/29	12/607	0/023	0/184				0/0035	
	> 1000	0/42	81/409	0/005	0/041				0/0008	
تراکم گسل (درصد)	< 25%	0/41	75/752	0/005	0/062	1/709	2/000	0/146	0/0008	0/03
	50-25	0/34	9/002	0/038	0/431				0/0055	
	75-50	0/16	12/400	0/013	0/147				0/0019	
	> 75%	0/09	2/846	0/032	0/361				0/0046	
ارتفاع از تراز تونل (متر)	1350-1200	0/33	59/530	0/006	0/068	2/133	2/322	0/081	0/0005	0/01
	1500-1350	0/32	17/057	0/019	0/230				0/0015	
	1650-1500	0/16	12/014	0/013	0/163				0/0011	
	1800-1650	0/12	9/128	0/013	0/161				0/0011	
	1950-1800	0/07	2/271	0/031	0/378				0/0025	
فاصله تا محل تحویل آب (کیلومتر)	< 12 km	0/33	18/862	0/017	0/303	2/133	2/322	0/081	0/0014	0/01
	15-12 km	0/32	17/787	0/018	0/312				0/0015	
	20-15 km	0/16	36/997	0/004	0/075				0/0004	
	25-20 km	0/12	20/567	0/006	0/101				0/0005	
	> 25 km	0/07	5/788	0/012	0/209				0/0010	

درنَهایت، وزن نهایی حاصل از این مرحله در کلاس‌های عامل مذکور ضرب شد و نقشهٔ نهایی از هم‌پوشانی و تلفیق این نقشه‌ها به دست آمد (شکل ۶). در شکل ۶، نقشهٔ پهنه‌بندی مناطق مناسب حفر تونل، به‌علاوهٔ سه اولویت اصلی محور تونل پیشنهادی، ارائه شده است. در این نقشه، مشهود است که بخش شمال‌غرب محدودهٔ مطالعاتی برای حفاری مناسب نیست و مخاطراتی درپِی خواهد داشت. بنابراین ارجحیت حفاری به بخش میانی و شرقی این محدوده اختصاص خواهد یافت. بر این اساس، در نیمهٔ جنوب‌شرق نیز، اولویت حفاری به مناطق میانی اختصاص یافته است؛ چراکه نقاط نزدیک‌تر به محل تحویل آب محسوب می‌شوند. ویژگی‌های سه مسیر حفر تونل در شکل ۷ ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، اگرچه اولویت نخست، در مقایسه با تونل دوم و سوم دارای طول بیشتری برای حفاری است، به‌دلیل فاصلهٔ نزدیک‌تر تا محل تحویل آب در تصفیه‌خانهٔ شمارهٔ ۳ مشهد، می‌تواند گزینهٔ بهتری باشد. درواقع با اینکه درازای تونل اول، برای حفاری، ۵۰۰ متر بیشتر از اولویت دوم و حدود ۲ کیلومتر بیشتر از اولویت سوم است، با توجه به فاصلهٔ نزدیک‌تر به محل تحویل آب، یعنی ۲/۵ کیلومتر تا اولویت دوم و ۸/۵ کیلومتر تا اولویت سوم، ارجحیت بیشتری دارد. ازطرفی، تونل شمارهٔ یک حدود ۴۵۰ متر روبارهٔ کمتری از دو گزینهٔ دیگر تحمل می‌کند و مخاطرات زیرسطحی حفاری در آن، اعم از بارسنگ و بارآبی وارد بر تراز تونل، به‌تبع کمتر خواهد بود (شکل ۷).



شکل ۶. نقشهٔ پتانسیل و اولویت‌بندی جایابی حفاری تونل انتقال آب هزارمسجد



شکل ۷. پروفایل ارتفاعی و ویژگی‌های اولویت‌بندی جایابی حفاری تونل انتقال آب هزارمسجد

پیش‌از این، دیلانی[1] و همکاران (۲۰۱۸) از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای ایجاد مسیر بهینهٔ تونل و مناسب‌ترین روش تونل‌زنی در پروژهٔ نیروگاه آبی در کلمبوی سریلانکا استفاده کردند. آنها چهار گزینهٔ تونل‌زنی را براساس معیار ده‌عاملی مبنی‌بر جنبه‌های ژئوتکنیکی، زمین شناختی، ژئومورفولوژیکی، ایمنی، فنی، اقتصادی و اجتماعی- محیطی، برای انتخاب مسیر تونل بهینه، ارزیابی کردند. ژو[2] و همکاران (۲۰۲۱) نیز، نُه شاخص ازجمله توپوگرافی بستر دریا، چینه شناسی، ساختار زمین‌شناختی، زلزله، تأثیرات زیست‌محیطی، مقیاس مهندسی، شرایط تهویه، رضایت ساکنان و موقعیت خروجی تونل، را در نظر گرفتند و سه مسیر متفاوت را با روش تحلیل سلسله‌مراتبی، برای مسیریابی تونل زیردریایی تنگهٔ بوهای، اولویت‌بندی کردند. مزیت مطالعهٔ حاضر بر دو مطالعهٔ پیشین در دو بخش خلاصه می‌شود. نخست اینکه، در اینجا، استفاده از روش‌های تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی شانون درزمرهٔ نوآوری‌های پژوهش محسوب می‌شود؛ حال‌آنکه در مطالعات پیشین فقط از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده بود. همچنین مطالعات دیلهانی و همکاران (۲۰۱۸) نیازمند هزینه‌کرد برای مطالعات زمین‌شناختی و ژئوتکنیکی گوناگون است؛ درصورتی که پژوهش حاضر مطالعه‌ای مقرون‌به‌صرفه به شمار می‌رود که قبل‌از هرگونه آزمایش یا هزینه‌کرد، مسیرهای بهینهٔ حفر تونل را به محققان ارائه می‌دهد. مقایسهٔ مطالعه حاضر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که این مطالعه، به‌دلیل استفاده از رویکرد ترکیبی و کاهش هزینه‌ها، نوآوری و مزیت خاصی بر دیگر پژوهش‌های مطرح‌شده دارد. بنابراین امید است روش ارائه‌شده، در مطالعات مکان‌یابی از این قبیل، نگرشی پیشرو محسوب شود.

۵- نتیجه‌گیری

جایابی صحیح تونل‌های انتقال آب در محیط‌های سنگی نه‌تنها موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری پروژه می‌شود، بلکه نقش مهمی در حفاظت از محیط زیست و تأمین پایدار منابع آب دارد. بررسی دقیق و جامع تمامی عوامل مذکور به مهندسان کمک می‌کند، با انتخاب بهترین مسیر و استفاده از تکنیک‌های مناسب، پروژه‌های انتقال آب را با موفقیت به پایان برسانند. بررسی مخاطرات گوناگون اجتماعی، زمین‌شناختی، توپوگرافیک، هیدروژئولوژیکی و اقتصادی در تعیین مسیر بهینهٔ تونل دارای اهمیت بسیاری است. با این همه، ارزیابی بسیاری از این مخاطرات نیازمند عملیات گوناگون و آزمایش‌های متعدد هزینه‌بر، نظیر عملیات حفر گمانه، بررسی ویژگی‌های درزه‌ها، ویژگی‌های زمین‌شناختی و زمین‌شناختی مهندسی مسیر، پهنه‌های خردشدهٔ مسیر و درنَهایت، شرایط هیدروژئولوژیکی تونل خواهد بود. بنابراین مطالعات ابتدایی جایابی مسیر تونل می‌تواند مسیر صحیح را به فرد نشان دهد؛ به‌گونه‌ای که کمترین مخاطرات اثرگذار و اثرپذیر را درمورد سازهٔ حفاری دربر بگیرد. در این مطالعه، با استفاده از روش‌های گوناگون تصمیم‌گیری همانند تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی شانون و نرم‌افزارهای مکان‌یابی مانند سیستم اطلاعات جغرافیایی، جایابی بهینهٔ مسیر تونل انتقال آب هزارمسجد بررسی شد. پس‌از شناسایی معیارهای مؤثر در تعیین مسیر بهینهٔ حفر تونل که شامل فاصله از روستا، فاصله از چشمه، حوضهٔ آبگیر چشمه‌های بزرگ، تراکم گسل، ضخامت روبارهٔ تونل و فاصله تا محل تحویل آب می‌شد، برای تهیهٔ نقشه‌های موضوعی، امتیازدهی به طبقات و درنَهایت، وزن‌دهی به معیارها با روش‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی شانون اقدام شد. نتایج حاصل از وزن‌دهی لایه‌ها به‌روش آنتروپی شانون نشان داد که پارامترهای فاصله از چشمه با وزن ۰/۰۵، تراکم گسل ۰/۰۳، حوضهٔ آبریز چشمه‌های بزرگ ۰/۰۲، ارتفاع از تراز تونل یا ضخامت روباره ۰/۰۱، فاصله تا محل تحویل آب ۰/۰۱ و فاصله از روستا ۰/۰۰۲

1. Dilhani
2. Xue

به‌ترتیب، بیشترین تا کمترین تأثیر را در جایابی مسیر حفر تونل هزارمسجد دارند. هم‌پوشانی لایه‌ها نشان داد که نیمهٔ غربی محدودهٔ مطالعاتی شرایط مناسبی برای حفر تونل ندارد و به‌سمت جنوب‌شرق، شرایط مناسب‌تر خواهد بود. در این بخش، سه اولویت حفاری معرفی شد که اولویت نخست به نقطهٔ نزدیک‌تر تا محل تحویل آب تعلق دارد. درنتیجه، بهترین گزینهٔ حفر تونل سازه‌ای به‌طول ۸۷۳۲ متر، در حد فاصل شمال‌غرب روستای چنارسوخته در شمال تا یال جنوبی ارتفاعات هزارمسجد خواهد بود. شایان ذکر است که پس‌از جایابی مسیر حفر تونل تا پیش‌از حفاری آن، باید مطالعات جامع هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناختی مهندسی و زمین‌شناختی ازطریق بازدیدهای صحرایی، حفاری گمانه در مسیر و آزمایش‌های مربوط به آن انجام شود. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از رویکردهای چندمعیاره و تکنولوژی‌های پیشرفتهٔ پهنه‌بندی می‌تواند به بهبود فرایند تصمیم‌گیری، در پروژه‌های بزرگ زیربنایی، کمک کند و با بیان چارچوبی جامع برای جایابی بهینهٔ تونل های انتقال آب، به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارآیی پروژه‌های عمرانی منجر گردد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند، به‌منزلهٔ مرجعی برای دیگر پروژه‌های مشابه، به کار رود.

۶- منابع

Aalianvari, A., Katibeh, H. & Sharifzadeh, M., 2012, **Application of Fuzzy Delphi AHP Method for the Estimation and Classification of Ghomrud Tunnel from Groundwater Flow Hazard**, Arabian Journal of Geosciences, 5(2), PP. 275-284.

Abbasi Shastanroudi, S., Gonbadi, M. & Hakimi, S., 2013, **Investigating the Squeezing Potential of the Bayandarreh Water Transmission Tunnel**, 8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment, SID. https://sid.ir/paper/849294/fa.

Aghanabati, S., 2004, **The Geology of Iran**, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran.

Amir Ahmadi, A., Naemi Tabar, M. & Gholkar ostadi, B., 2017, **Prioritize and Zoning Factors Affecting the Landslide Model Entropy (Case Study: Bajgiran, Ghochan)**, Hydrogeomorphology, 4(11), PP. 105-125, SID. https://sid.ir/paper/512170/fa.

Arora, K., Gutierrez, M., Hedayat, A. & Xia, C., 2021, **Tunnels in Squeezing Clay-Rich Rocks**, Underground Space, 6(4), PP. 432-445.

Chu, A.T.W., Kalaba, R.E. & Spingarn, K., 1979, **A Comparison of Two Methods for Determining the Weights of Belonging to Fuzzy Sets**, Journal of Optimization Theory & Applications, 27, PP. 531-538.

Cui, Q.L., Shen, S.L., Xu, Y., Wu, H.N. & Yin, Z.Y., 2015, **Mitigation of Geohazards during Deep Excavations in Karst Regions with Caverns: A Case Study**, Engineering Geology, 195, PP. 16-27.

Dilhani, M.N., Subasinghe, S.M.M., Edirisinghe, E.A.R.M., Samarawickrama, M.N.C. & Laksiri, K., 2018, **Selection of Optimal Tunnel Route and Tunneling Method based on AHP Technique**, Engineer, 50(04), PP. 57-74.

Eshghi, A.R. & Servati, M.R., 2004, **Charactristic of Karst Landscape of Watershed Basin pf Kardeh-River (East of Kopeh-Dagh Zone),** Geographical Research Quarterly, 36(48), PP. 1-16, SID. https://sid.ir/paper/5479/en.

Feyzolahpour, M., Manafi, M. & Khoshraftar, R., 2021, **Landslide Hazard Zonation Using of Model Shannon Entropy (Case Study: Taleghan Watershed)**, Journal of Applied Research in Geographical Sciences (jgs), 21(62), P. 5, URL: http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3143-en.html. SID. https://sid.ir/paper/963396/fa.

Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 1988, Geological Map of Mozdooran, Narangan, Chahchaha, Mashhad, Ghahghahe and Kalat Naderi, (Scale 1/100.000).

Gholi Nataj Malekshah, M.A., Mousavi, S.R., Jahani, D., Kohansal Ghadimvand, N. & Vaziri, S.H., 2021, **Identification of Karst Areas Using Remote Sensing and GIS Method and Its Expansion in Zalem-Rud Sub-Basin of Sari in Mazandaran, Iran**,

Journal of RS and GIS for Natural Resources (Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resource Science), 13(3(48)), PP. 14-18, SID. https://sid.ir/paper/1032431/en.

Hanifi nia, A. & Abghari, H., 2021, **Investigation of Affecting Factors Landslide Occurrence in Shannon Entropy Model with Two WOE and LNRF Approaches in Order to Zoning Sensitivity Landslide in Ziveh Watershed of Urmia**, Quantitative Geomorphological Research, 11(2), PP. 108-127, DOI: 10.22034/ gmpj.2022.340292.1348.

https://earthexplorer.usgs., 2022, Landsat 9 ETM +.

Hwang, C.L. & Lin, M.J., 1987, **Group Decision Making under Multiple Criteria: Methods and Applications**, Springer: Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-61580-1.

Iran Ministry of Energy, 2018, **Nationwide Statistics of Surface and Groundwater Sources and Uses**.

Iran Ministry of Energy, 2021, **Iran Water Resources Management Company, Quantitative Statistics of Groundwater Resources of Kalat Naderi and Narimani Study Areas (Qaraqom Watershed)**.

Islam, S. & Roy, T.K., 2006, **A New Fuzzy Multi-Objective Programming: Entropy Based Geometric Programming and Its Application of Transportation Problems**, Eur. Journal Oper. Res., 173, PP. 387-404.

Khalil, R., 2013, **Decision Support System for Tunnel Alignment Based on GIS**, Civil Engineering Research Magazine, 35(2), PP. 656-667.

Kiani, T. & Fatholahzadeh, M., 2019, **Classification and Identification of Karstic Aquifers in the Oshtorankuh Region**, Applied Research and Geographical Science, 19(52), PP. 21-34, http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2676-en.html. 10.29252/jgs.19.52.21.

Kiani, S., Safari, A., Mursali, M. & Khanmohammadi, M., 2022, **Comparasion Groundwater Extraction of the Hezar-Masjid Aquifer between Iran and Turkmenistan and Its Hazards**, Environmental Management Hazards, 9(2), PP. 109-132, DOI: 10.22059/jhsci.2022. 343054.719.

Lin, J., 1991, **Divergence Measures Based on the Shannon Entropy**, IEEE Transactions on Information Theory, 37, PP. 145-151.

Ma, J., Guan, J., Duan, J., Huang, L. & Liang, Y., 2020, **Stability Analysis on Tunnels with Karst Caves Using the Distinct Lattice Spring Model Stability Analysis on Tunnels with Karst Caves Using the Distinct Lattice Spring Model**, Underground Space, 6(11), PP. 1-26.

Malczewski, J., 1999, **GIS and Multicriteria Decision Analysis: Evaluation Criteria and Criterion Weighting**, John Wiley and Sons, Inc.

Mirmehrabi, H., Ghafouri, M., Lashkaripour, Gh. & Hassanpour, J., 2015, **Hazards of Tunnel Excavation in H2S-Bearing Grounds: (Case Study of Aspar Tunnel)**, Journal of Environmental Science and Technology, 16, PP. 51-66, SID. https://sid.ir/paper/86993/en.

Mohammad Doust, A. & Shamsnia, SA., 2023, **Identification and Zoning of Flood-Prone Areas Using AHP - GIS (Case Study: Dayyer County, Bushehr Province)**, Journal of Geography and Environmental Studies, 12(47), PP. 152-167, magiran.com/ p2632864.

Mohammadi, M., Spross, J. & Stille, H., 2023, **Probabilistic Time Estimation of Tunneling Projects: The Uri Headrace Tunnel**, Rock Mechanics and Rock Engineering, 56, PP. 703-717, https://doi.org/ 10.1007/s00603-022-03022-3.

Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S. & Rezaei A., 2014, **Groundwater Qanat Potential Mapping Using Frequency Ratio and Shannon's Entropy Models in the Moghan Watershed, Iran**, Earth Science Informatics [ESIN], Vol. 8, PP. 171-186, DOI 10.1007/s12145-014-0145-7.

National Cartographic Center of Iran (NCC), 2006, **Topographic map (Scale 1:25.000),** NCC.gov.ir.

National Cartographic Center of Iran (NCC), 2021, **Khorasan Razavi Province Map and Spatial Information Atlas**, NCC.gov.ir.

Paraskevopoulou, C. & Benardos, A., 2013, **Assessing the Construction Cost of Greek Transportation Tunnel Projects**, Tunnelling and Underground Space Technology, 38, PP. 497-505, https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.08.005.

Pourakbari, S., Kalantari, N., Aghdaki, Y. & Moslih, A., 2020, **Potential of Karstic Water Resources Using RS, GIS and AHP (Case Study: Lilly and Kenno Anticlines in the North East of Khuzestan)**, Water Resources Engineering, 13(45), PP. 99-112.

Rahman, M.A., 2022, **Review on Tunnel Construction Method and Environmental Impact**, International Journal of Advanced Research in Technology and Innovation, 4(1), PP. 97-105, ISSN 2682-8324, Available at: <https://myjms.mohe.gov.my/index.php/ijarti/article/view/17824>. Date accessed: 08 feb. 2024.

Rezaei Arefi, M., Zanganeh Asadi, M.A., Behniyafar, A. & Javanbakht, M., 2019, **Identification and Classification of Karst Forms Based on the Models of Cvijic, Walthem, Komatina, and Herak (Case Study: Kalat Mountain Basin, Northeast of Iran)**, Geography, 17(62), PP. 174-190, SID. https://sid.ir/paper/382328/en.

Saaty, T.L., 1980, **The Analytic Hierarchy Process**, New York: McGraw- Hill.

Saffari, A., Kiani, T. & Zangenehtabar, S., 2019, **Studying the Factors Affecting the Karst Zonation and Development of Khorin Mountain USING FUZZY Logic**, Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 19(55), PP. 23-36, SID. https://sid.ir/paper/382360/fa.

Sayadi, A.R. & Amiri, A.R., 2006, **Sensitivity Analysis of Construction Costs in Dasht Zehab Water Conveyance Tunnel**, 24nd Symposium on Geoscience, Iran, Mar, SID. https://sid.ir/paper/804800/fa.

Shao, Z., Huq, M.E., Cai, B., Altan, O. & Li, Y., 2020, **Integrated Remote Sensing and GIS Approach Using Fuzzy-AHP to Delineate and Identify Groundwater Potential Zones in Semi-Arid Shanxi Province, China**, Environmental Modelling and Software, 134, P. 104868.

Shekari Badi, A., Motamedi Rad, M. & mohamadnia, M., 2022, **Combining the ANP Model and Shannon Entropy Index to Assess the Effective Factors in the Occurrence and Zonation of Landslide Hazard (Case study: Farob Roman basin in Neyshabur)**, Journal of Arid Regions Geographic Studies, 6(22), PP. 89-103.

Sun, Y., Feng, X. & Yang, L., 2018, **Predicting Tunnel Squeezing Using Multiclass Support Vector Machines**, Advances in Civil Engineering, 4543984, PP. 1-12, https://doi.org/10.1155/2018/4543984.

Wagner, DH., 2006, **Risk Evaluation and Control in Underground Construction**, International Symposium on Underground Excavation and Tunneling, Bangkok, 2-4 February, Thailand.

Wang, Z.J., Gao, J.Y., Zhang, P., Guan, X. & SJi, X.F., 2019, **Stability Analysis of Tunnel Face in High-Pressure Karst Tunnels Based on Catastrophe Theory**, Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 41(1), PP. 95-103.

Xue, Y., Qu, C., Su, M., … et al., 2021, **Comprehensive and Quantitative Evaluation of Subsea Tunnel Route Selection: A Case Study on Bohai Strait**, KSCE Journal of Civil Engineering (KSCE J. Civ. Eng.), 25, PP. 3540-3555, https://doi.org/10.1007/s12205-021-1564-x.

Yalçin, N. & Ünlü, U., 2018, **A Multi-Criteria Performance Analysis of Initial Public Offering (IPO) Firms Using CRITIC and VIKOR Methods**, Technological and Economic Development of Economy, 24(2), PP. 534-560, https://doi.org/10.3846/20294913.2016.1213201.

Yamani, M., Shamsipour, A.A., Jafari Aghdam, M. & Bagheri Seyed Shokr, S., 2013, **The Effective Factors on Development and Zoning of Karst in Cheleh Basin Using Fuzzy Logic and AHP Models in Kermanshah Province**, Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 22(88), PP. 57-68, DOI: 10.22071/gsj.2013.53641.

Yang, S., Wang, H., Fu, X., … et al., 2022, **Hydrogen Sulfide Occurrence States in China's Coal Seams**, Energy Exploration and Exploitation, 40(1), PP. 17-37, DOI:10.1177/01445987211033453.

You, K., Park, Y. & Lee, JS., 2005, **Risk Analysis for Determination of a Tunnel Support Pattern**, Tunnelling and Underground Space Technology, 20, PP. 479-486.

Yousefi Sangani, K., Mohammadzadeh, H. & Akbari, H., 2014, **An Evaluation of Groundwater Potential Zones Using Combined Fuzzy-AHP Method and GIS/RS Technologies: A Case Study of NE Hezarmasjed Mountain, Khorasan Razavi Province**, International Bulletin of Water Resources and Development, 2(4), P. 127, magiran.com/p1399151.

Yufeng, S. & Fengxiant, J., 2009, **Landslide Stability Analysis Based on Generalized Information Entropy**, International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, DOI10.1109/ ESIAT.2009.258.

Zangi Drestani, M., 2019, **Environmental Impact Assessment of Water Transfer Tunnel to Kerman City**, Tunneling and Underground Space Engineering, 8(1), PP. 45-55, SID. https://sid.ir/paper/231591/en.

Zheng, Y. & He, S., 2021, **Characteristics, Challenges and Countermeasures of Giant Karst Cave: A Case Study of Yujingshan Tunnel in High-Speed Railway**, Tunnelling and Underground Space Technology, 114, ID 103988.