Hydrogeomorphology Vol. 13 , No. 46, 2026

Research Paper

Identifying the most suitable locations for watershed constructions in humid and semi-humid areas using the Analytic Hierarchy Process (AHP) approach

Babak Ghaderi Vangah[1], Reza Ghazavi*[2], Siamak Dokhani[3], Omid Asadi Nalivan[4]

1- PhD Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kashan, Iran.
babak.ghaderi.2023@gmail.com
2- Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kashan, Iran.
ghazavi@kashanu.ac.ir
3- Assistant Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kashan, Iran.
siamakdokhani@kashanu.ac.ir
4- Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran.
o.asadi@maragheh.ac.ir

Keywords

Location, Modeling, Talesh, Fouman, Roudbar, Iran.

Receive: 2025/08/08

Accepted: 2025/11/16

Published: 2026/04/12

ABSTRACT

Introduction

Locating watershed constructions traditionally and based on field visits requires a lot of money and time. In this study, the Analytical Hierarchy Process (AHP) approach was used to identify suitable locations for implementing watershed constructions. Three watersheds of Aqevlar Talesh, Masouleh Fouman, and Totkabon Rudbar in Gilan Province were selected for the study. Then, using expert opinions, 21 criteria affecting the location of watershed constructions were identified in 8 general categories and compared binary, and final maps were prepared with three classes of no potential, medium potential, and high potential for the construction of structures. The results showed that the criteria of discharge, precipitation, runoff height, and slope are of great importance in locating suitable areas for constructing structures. The accuracy of this method was determined using the receiver operating characteristic (ROC) curve and the area under the curve (AUC) for the Aqevlar, Masouleh and Totkabon basins was 0.945, 0.958 and 0.788, respectively. Comparing the location of the structures with the research results showed that 90 and 99.5 percent of the Masonry wall and gabion structures were located in the medium and high potential classes of the maps obtained from this method, respectively, which confirms the accuracy of this method in determining the appropriate location for the construction of watershed constructions. Therefore, it is recommended that the Natural Resources and Watershed Management Organization of the country use this model systematically for locating watershed constructions.

*Correspondin Author: Ghazavi, R. E-mail: ghazavi@kashanu.ac.ir
How to cite this article: Ghaderi Vangah, Babak. Ghazavi, Reza. Dokhani, Siamak. & Asadi Nalivan, Omid. (2025). Identifying the most suitable locations for constructing watershed constructions in humid and semi-humid areas using the Analytic Hierarchy Process (AHP) approach. Hydrogeomorphology, 13(46): 117– 137.
DOI: 10.22034/hyd.2025.68534.1810

Copyright: © by the authors Publisher: University of Tabriz

Methodology

The present study was conducted in three watersheds of Gilan province, including the Aqevlar watersheds of Talesh County, Masouleh of Fouman County, and Totkabon of Rudbar County, with areas of 7000, 10660, and 4660 ha, respectively. The AHP method was used to determine suitable locations for watershed constructions. The influential factors were examined in eight groups and 21 criteria. In order to conduct this study, a hierarchical structure was first formed with the aim of determining the criteria, sub-criteria, options, and the relationship between them. In order to determine the importance and value of each criterion and sub-criteria, a questionnaire was distributed among 30 people involved in watershed development projects, and the amount and importance of the value of each criterion and sub-criteria was determined using the standard scales of Saaty with 9 levels of intensity. The criteria were normalized in the pairwise comparison matrix by determining the score of each criterion on its column vector. In order to ensure the accuracy of the response, the consistency ratio (CR(was calculated and a coefficient less than or equal to 0.1 was accepted as consistency in the judgments. Then, the weight assigned to each criterion and its related sub-criteria was multiplied by the value of the different classes of that criterion and its related sub-criteria. Expert Choice 11 software was used to perform the analyses. Arc GIS 10.8 software was used to combine the standardized weighted criterion layers and determine the 10-meter buffer of the streams, and a map of suitable locations for the watershed constructions was prepared in three classes: no potential, medium potential, and high potential. Finally, the efficiency and accuracy of the AHP model were evaluated using the receiver operating characteristic (ROC) curve and the area under the curve (AUC).

Results and Discussion

The results of this study showed that among the eight main categories, the importance of hydrology, topography, and land cover groups is higher than other groups. The consistency ratio (CR) was 0.077, and the consistency in judgments was accepted. According to this study, among the 21 influential criteria, the criteria of discharge, precipitation, runoff height, slope, and flow accumulation were determined as the top 5 criteria, and the discharge criterion with a weight of about 0.2 was determined as the most important criterion in determining suitable locations for watershed constructions. The results of the final maps showed that 39.4, 97.7, and 45.0 km of streams in the Aqevlar, Totkabon, and Masouleh watersheds, respectively, have high potential for gabion and masonry wall constructions. The areas with medium and high potential in each of the watersheds of Aqevler, Totkabon and Masouleh for constructing gabion and masonry wall structures were obtained as 79.9, 93.7 and 84.0, respectively. The results showed that out of a total of 649 structures constructed in the studied basins, 640 structures (about 98 percent of the structures) are in the medium and high potential range of the map obtained from the analytic hierarchy process approach, and among these, 377 structures (about 60 percent of the structures) are in the high potential range of the map obtained from this approach. This value was obtained as about 90 percent for masonry wall structures and as about 99.5 percent for gabion structures. The results of the receiver operating characteristic (ROC) curve and area under the curve (AUC) showed that the AUC value in the Aqevlar, Totkabon, and Masouleh watersheds was 0.945, 0.788, and 0.958, respectively, indicating the completely adequate performance of the AHP model in determining suitable locations for constructing watershed structures.

Conclusions

Choosing the suitable location for a watershed construction is one of the most important factors that can affect the success or failure of watershed management projects. The Analytical Hierarchy Process (AHP), as an approach based on expert knowledge and experience, combined with the Geographic Information System (GIS) and utilizing the results of basic studies of detailed-executive watershed management projects, is one of the most important and efficient methods in determining the suitable location for the watershed constructions. In this study, the criteria of discharge, precipitation, runoff height, flow accumulation, channel strength index, distance from the river and drainage density as criteria of the hydrology group, along with the slope criterion, with a total weight of more than 75 percent, were determined to be the most important criteria effective in determining the suitable location for gabion and Masonry wall constructions. Considering the complexity of the topographic, eco-climatic, and edaphic conditions prevailing in northern Iran, as one of the challenging areas in determining suitable locations for constructing watershed management structures, it is recommended and emphasized to conduct similar research in a number of representative watershed basins located in the provinces of Gilan, Mazandaran, and Golestan in order to achieve final criteria in locating gabion and Masonry wall and other important watershed constructions in flood and sediment control..

مقاله پژوهشی

شناسایی مناسب‌ترین مکان‌های احداث سازه‌های آبخیزداری در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

بابک قادری وانگاه[۱]، رضا قضاوی*[۲]، سیامک دخانی[۳]، امید اسدی نلیوان[۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع‌طبیعی و علوم‌زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. babak.ghaderi.2023@gmail.com
۲- استاد گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع‌طبیعی و علوم‌زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. ghazavi@kashanu.ac.ir
۳- استادیار گروه گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع‌طبیعی و علوم‌زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. siamakdokhani@kashanu.ac.ir
۴-استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. o.asadi@maragheh.ac.ir

چکیده

مکان‌یابی احداث سازه‌های آبخیزداری به‌صورت سنتی و بر مبنای بازدیدهای صحرایی، مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است. در این پژوهش، جهت شناسایی مکان‌های مناسب اجرای اقدامات سازه‌ای آبخیزداری، از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد. جهت انجام تحقیق سه حوضه آبریز آق‌اولر تالش، ماسوله فومن و توتکابن رودبار استان گیلان انتخاب شدند. سپس با بهره‌گیری از نظرات کارشناسی، ۲۱ معیار تاثیرگذار بر مکان‌یابی اقدامات سازه‌ای آبخیزداری در ۸ دسته کلی مشخص و به صورت دودویی مقایسه شده و نقشه‌های نهایی با سه طبقه بدون پتانسیل، پتانسیل متوسط و پتانسیل بالا جهت احداث سازه تهیه شد. نتایج نشان‌داد که معیارهای دبی، بارش، ارتفاع رواناب و شیب، اهمیت بالایی در مکان‌یابی مناطق مناسب احداث سازه دارند. صحت عملکرد این روش با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) تعیین و سطح زیر منحنی (AUC) برای حوضه‌های آق‌اولر، ماسوله و توتکابن به‌ترتیب برابر ۰/۹۴۵، ۰/۹۵۸ و ۰/۷۸۸ بدست آمد. مقایسه مکان سازه‌ها با نتایج تحقیق نشان‌داد که به ترتیب ۹۰ و ۹۹/۵ درصد سازه‌های سنگی–ملاتی و گابیونی در طبقه با پتاسیل متوسط و بالای نقشه‌های حاصل شده از این روش قرار گرفتند که موید دقت عملکرد این روش در تعیین مکان مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری است. بنابراین توصیه می‌شود سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور از این مدل به‌صورت سیستماتیک در طرح‌های مکان‌یابی سازه‌ها استفاده نماید.

کلیدواژه‌ها

مکان‌یابی، مدلسازی، تالش، فومن، رودبارایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/23

*نویسنده مسئول: رضا قضاوی
رایانامه: ghazavi@kashanu.ac.ir
شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2025.68534.1810

ارجاع به این مقاله: قادری وانگاه، بابک؛ قضاوی، رضا؛ دخانی، سیامک و اسدی نلیوان، امید؛ (۱۴۰۴). شناسایی مناسب‌ترین مکان‌های احداث سازه‌های آبخیزداری در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب با استفاده از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی (AHP) هیدروژئومورفولوژی، ۱۳(۴۶): 137 – 117.

Copyright: ©2025 by the authors
Publisher: University of Tabriz

مقدمه

اقدامات سازه‌ای آبخیزداری بعنوان یکی از کاربردی‌ترین تکنیک‌ها در کنترل سرعت جریان آب در آبراهه‌ها و جلوگیری از وقوع سیلاب در بسیاری از کشورها محسوب می‌شود (آگورامورتی و همکاران[1]، ۲۰۰۸: ۵۶۶). انتخاب مکان مناسب جهت احداث سازه‌های آبخیزداری باعث بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها شده و بنابراین مهم‌ترین مرحله اجرای اقدامات سازه‌ای آبخیزداری، شناسایی مکان‌های مناسب جهت اجرای این طرح‌ها است (ناصری و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۰۵؛ چزکی و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۳؛ عبدالماجد و مصطفی[2]، ۲۰۲۵: ۶۱). در حال حاضر شناسایی مکان‌های مورد نیاز جهت احداث سازه‌های آبخیزداری به‌صورت سنتی و عمدتا بر مبنای بازدیدهای صحرایی و وابسته به نظر کارشناس/کارشناسان مکان‌یابی بوده و کمتر به نتایج مطالعات پایه پروژه‌های تفصیلی-اجرایی آبخیزداری بعنوان مطالعات همه‌جانبه‌نگر جهت تعیین مکان‌های مناسب احداث سازه‌ها توجه می‌شود. این مسئله سبب می‌گردد که تصمیم‌گیری‌ها تا حدودی سلیقه‌ای و فاقد پشتوانه مطالعاتی باشد.

نظر به اینکه معیارها و عوامل متعددی مانند عوامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی، پوشش‌گیاهی، وضعیت ادافیکی و فرسایش‌خاک و مسائل و مشکلات اقتصادی – اجتماعی به‌همراه زیرمعیارهای مربوطه در انتخاب مکان مناسب برای احداث سازه‌های آبخیزداری دخالت دارند، تعیین نقش و اهمیت همه این عوامل بر مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری و همچنین تاثیرگذاری و تاثیرپذیری آن‌ها بر هم با استفاده از روش‌های سنتی عملا امکان‌پذیر نیست، لذا استفاده از روش‌های ستادی دقیق و با کارایی زیاد به‌منظور مکان‌یابی صحیح سازه‌ها با استفاده از نتایج مطالعات پایه و تخصصی پروژه‌های تفصیلی – اجرایی آبخیزداری جهت افزایش دقت، صرفه‌جویی در وقت و همچنین کاهش هزینه ناشی از بازدیدهای میدانی طولانی مدت، حائز اهمیت فراوان است (میلادی و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۵؛ زارع بیدکی و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۸). در این پژوهش از رویکرد فرآیندی تحلیل سلسله مراتبی[3] (AHP) بعنوان یکی از معروف‌ترین روش‌های تحلیلی تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)[4] در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)[5] به‌منظور تعیین مناسب‌ترین مکان جهت اقدامات سازه‌ای آبخیزداری استفاده شد (هیل و همکاران، ۲۰۰۵: ۹۵۶؛ اتازرینی، ۲۰۲۱: ۵۶۷). این روش اولین‌بار توسط توماس ال ساعتی در دهه ۱۹۷۰ ابداع و از آن هنگامی‌که تصمیم‌گیری با چند گزینه رقیب و معیار تصمیم‌گیری روبرو است استفاده می‌شود. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بر اساس مقایسه‌های زوجی بنا نهاده شده و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران می‌دهد (زارع بیدکی و همکاران، ۱۴۰۰). تاکنون مطالعات متعددی با روش AHP در داخل و خارج از کشور در این‌باره انجام شده‌است، اما با توجه به عدم استفاده از معیارهای مهم و اساسی و فقدان مطالعات در مناطق شمالی ایران، در این پژوهش معیارهای متفاوتی به‌منظور مکان‌یابی در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب شمال کشور مورد استفاده قرار گرفت.

مطالعه سوری و همکاران (۱۳۹۱) نیز نمونه ای از کاربرد این روش است. آنها مکان‌یابی بندهای سنگی‌ملاتی و گابیونی را به کمک رویکرد تحلیلی سلسله مراتبی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبریز میخوران استان کرمانشاه انجام دادند. این محققان پنج معیار اقتصادی-اجتماعی، اقلیم، هیدرولوژی، خاک و فیزیوگرافی را در قالب ۱۳ زیرمعیار مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان‌داد که در مکان‌یابی بندهای گابیونی و سنگی‌ملاتی، معیار هیدرولوژی به‌ترتیب با اوزان ۰/۵۷۹ و ۰/۵۷۳ بیشترین تاثیر و معیار توپوگرافی به‌ترتیب با اوزان ۰/۰۷۱ و ۰/۰۳۴ کمترین تاثیر را دارا هستند. آن‌ها همچنین بیان نمودند که صحت نتایج به‌دست‌آمده از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی برای مکان‌یابی بندهای گابیونی و سنگی‌ملاتی به‌ترتیب برابر ۹۱ و ۸۰ درصد می‌باشد. در مطالعه دیگری، خرازی و همکاران (۱۳۹۶) به‌منظور مکان‌یابی سدهای زیرمینی در حوضه‌آبخیز دشت‌کویر استان سمنان از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده نمودند. برای این منظور، ۲۱ فرم نظرخواهی جهت انجام مقایسات زوجی معیارها بین متخصصان دانشگاهی و کارشناسان متخصص در زمینه‌های مرتبط توزیع‌گردید. آن‌ها با ایجاد سناریوهای مختلف، شش محل مناسب برای ایجاد سد زیرزمینی را تعیین نمودند و با استفاده از مدل AHP و بررسی اولویت‌های به‌دست‌آمده در سناریوهای مختلف، مناسب‌ترین محل برای ایجاد سد زیرزمینی را انتخاب‌کردند. همچنین زارع بیدکی و همکاران (۱۴۰۰) در زیرحوضه آبریز بهشت‌آباد از حوضه آبریز

[1] Agoramoorthy et al
[2] Abdalmajeed and Mustafa
[3] Analytical Hierarchy Process
[4] Multiple Criteria Decision Making
[5] Geographic Information System

کارون‌شمالی به‌منظور تعیین مکان‌یابی مناسب احداث سد خاکی کوتاه از مدل AHP و GIS استفاده کردند. پس از انتخاب مجموعه معیارها، پرسشنامه مقایسه زوجی ساخته شد و در اختیار کارشناسان مرتبط قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان‌داد که معیار ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی با کسب بیشترین وزن، اهمیت بیشتری در تعیین مکان مناسب جهت احداث سد خاکی دارد. نتایج حاصل از این تحقیق همچنین نشان‌داد که بیش از چهار کیلومتر از شبکه هیدروگرافی زیرحوضه آبریز مورد مطالعه قابلیت بسیار خوبی برای احداث سدهای خاکی کوتاه در راستای مدیریت منابع آب دارد. مطالعات مکان‌یابی عملیات مکانیکی آبخیزداری توسط دبیری و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از رویکرد MCDM و روش‌های AHP و ANP در حوضه آبریز سقرچی‌چای استان اردبیل انجام شد. آنها با بکارگیری ۱۴ معیار در پنج دسته اصلی دریافتند که در عملیات گابیونی، معیارهای تجمع جریان، فاصله از روستا و شیب به ترتیب با اوزان ۰/۳۱۵، ۰/۱۹۷ و ۰/۱۰۳ بیشترین و معیار اقلیم با وزن ۰/۰۰۵ کمترین نقش را دارد. همچنین در عملیات سنگی‌ملاتی معیارهای فاصله از روستا، تجمع جریان و فاصله از جاده به ترتیب با اوزان ۰/۳۳۸، ۰/۱۶ و ۰/۰۹۲ بیشترین و معیار تاج پوشش با وزن ۰/۰۰۹ کمترین نقش را در مکان‌یابی دارد. در تحقیقات اخیر، حاج سیدعلیخانی و همکاران (۱۴۰۳)، حساسیت و میزان دقت فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در احداث سدهای زیرزمینی مناطق‌کویری را در چهار حوضه آبریز استان کرمان با انتخاب چهار معیار اصلی، سه زیرمعیار و ۱۷ شاخص مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که روش AHP از کارایی مناسبی در مکان‌یابی سدهای زیرزمینی و مدیریت مناسب آب‌های زیرزمینی برخوردار است.

در تحقیقات دیگری، امامقلی و همکاران (۲۰۱۵) به‌منظور تعیین مناسب‌ترین مناطق برای احداث سازه‌های گابیونی در حوضه‌آبخیز سیازخ استان کردستان از مدل AHP استفاده کردند. آن‌ها چهار معیار کمّی فرسایش، دسترسی (شامل سه زیرمعیار فاصله تا جاده، فاصله تا منابع قرضه و فاصله تا روستا)، ویژگی‌های حوضه (شامل سه زیرمعیار کاربری اراضی، شیب و فاصله تا گسل) و رواناب و معیار کیفی وضعیت اقتصادی – اجتماعی (شامل سه زیرمعیار مشارکت مردمی، فرهنگ و رفاه) را بعنوان مهم‌ترین معیارهای تاثیرگذار به‌منظور تهیه نقشه مربوطه مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تهیه پرسشنامه و تحلیل آن نشان داد که معیار فرسایش با وزن ۰/۴۰۲ و معیار اقتصادی–اجتماعی با وزن ۰/۰۶۷ به‌ترتیب کمترین و بیشترین تاثیرگذاری را تهیه نقشه مکان‌یابی سازه‌های گابیونی دارد. تحقیقات انجام شده توسط اتازرینی[1] (۲۰۲۱) در استان خنیفرا مراکش روی مکان‌یابی مناطق مستعد به‌منظور احداث سازه‌های آبخیزداری با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد. وی با به‌کارگیری هشت معیار زهکشی و توپوگرافی به این نتیجه رسید که معیار شیب با وزن ۰/۳۲ و معیار شاخص موقعیت توپوگرافی با وزن ۰/۰۲ به‌ترتیب بیشترین و کمترین تاثیرگذاری را روی مکان‌یابی دارد. بر این اساس ۵۱/۵٪ آبراهه‌های موجود در شبکه زهکشی، سایت مناسب و خیلی مناسب برای اجرای عملیات سازه‌ای معرفی‌گردید. نتایج به‌دست‌آمده با منحنی تشخیص عملکرد گیرنده (ROC)[2] و سطح زیر منحنی آن (AUC)[3] ارزیابی شد و با توجه به ROC=۰/۸۳۳ و AUC=۰/۸۷۵، دقت برآورد مدل کاملا خوب ارزیابی‌گردید. همچنین داس آنجوس لوئیس و کابرال[4] (۲۰۲۱) به‌منظور مکان‌یابی مناطق مناسب احداث بندهای ذخیره‌ای در نواحی نیمه‌خشک موزامبیک از تکنیک‌های AHP و GIS استفاده‌کردند. آنها با دریافت نقطه‌نظرات متخصصین در مقیاس‌های نه‌گانه ال-ساعتی، مشخص نمودند که معیار تراکم زهکشی با وزن ۰/۳۱ و معیارهای فاصله تا روستا و فاصله تا جاده با وزن ۰/۲ به‌ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را در این مکان‌یابی دارد. نتایج همچنین نشان‌داد که مناطق نامناسب ۱۵٪، مناطق نسبتا مناسب ۷۸٪ و مناطق مناسب ۷٪ از سطح کل منطقه را شامل می‌شود. مطالعه دیگری توسط هاگوس و همکاران[5] (۲۰۲۲) به منظور شناسایی مکان‌های مناسب احداث سد در حوضه‌آبخیز چموگای اتیوپی با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد. آنها شش معیار را با تاکید بر شاخص‌های توپوگرافی و کاربری اراضی مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیق متخصصین در رویکرد تحلیل سلسله مراتبی نشان داد که معیار تراکم زهکشی با وزن ۰/۳۹ و معیار شیب با وزن ۰/۲۶ به‌ترتیب تاثیرگذارترین معیارها در مکان‌یابی محل‌های احداث سد می‌باشد. در تازه‌ترین تحقیق انجام شده توسط حسین و موما (۲۰۲۵)[6] در حوضه‌آبخیز رودخانه تسا در شمال بنگلادش از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی و بکارگیری تکنیک‌های سنجش

[1] Ettazarini
[2] Receiver Operating Characteristic Curve
[3] Area Under the Curve
[4] Dos Anjos Luís, A., & Cabral, P.
[5] Hagos et al
[6] Hossain & Muma

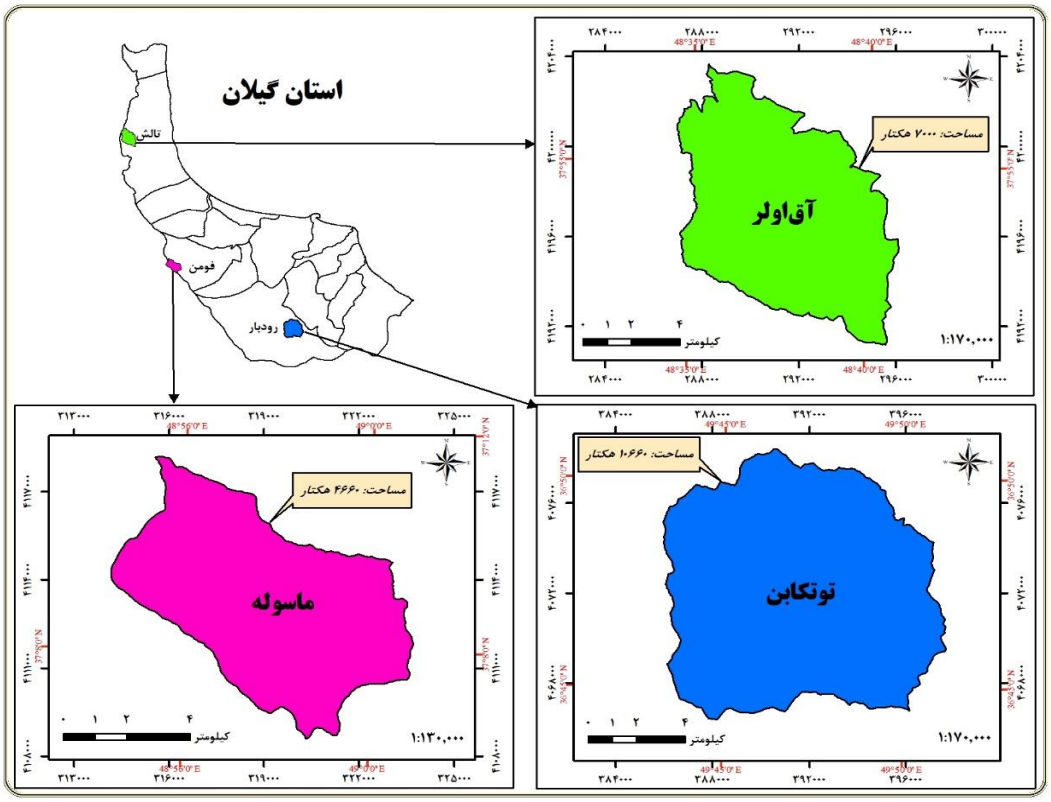
از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌منظور مدلسازی حساسیت به وقوع‌سیل استفاده شد. آنها در این تحقیق ۱۱ معیار را جهت تهیه نقشه خطر وقوع سیل انتخاب و نتایج به‌دست‌آمده را با استفاده از روش اعتبارسنجی ROC-AUC ارزیابی نموده و AUC را ۰/۸۴۸ بدست آوردند و دقت عملکرد مدل را کاملا خوب ارزیابی نمودند.

با توجه به مطالعات انجام شده، مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری معمولاً به‌صورت سنتی و با تکیه بر بازدیدهای میدانی و قضاوت کارشناسی انجام می‌شود. این روش‌ها اغلب سلیقه‌ای، پرهزینه و فاقد پشتوانه علمی‌اند. پژوهش حاضر به منظور شناسایی مناسب‌ترین مکان‌های احداث سازه‌های آبخیزداری با استفاده از داده‌های مکانی و ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تولید نقشه‌های پتانسیل از طریق دریافت نظر خبرگان بخش دولتی، خصوصی (شرکت های مهندسان مشاور) و دانشگاهیان انجام شد. در این تحقیق هم‌زمان از ۲۱ معیار در قالب ۸ گروه هیدرولوژی، توپوگرافی، پوشش‌زمین، زمین شناسی، خاک، فرسایش و عوامل اقتصادی–اجتماعی برای نخستین بار در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب شمال کشور استفاده‌شد و لذا نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند برای پژوهشگران، مسوولان و متخصصان فنی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری حائز اهمیت باشد.

موارد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سه حوضه آبریز استان گیلان به‌عنوان استان معرف منطقه مرطوب و نیمه‌مرطوب ایران شامل حوضه‌های آبریز آق‌اولر شهرستان تالش، ماسوله شهرستان فومن و توتکابن شهرستان رودبار مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱) موقعیت مکانی حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه در سطح شهرستان‌ها و استان گیلان را نشان می‌دهد. حوضه آبخیز آق‌اولر شهرستان تالش با مساحت ۷۰۰۰ هکتار، در حد فاصل طول جغرافیایی "۴۳ '۳۴ °۴۸ تا "۵۴ '۴۰ °۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی "۴۲ '۵۰ °۳۷ تا "۲۰ '۵۷ °۳۷ شمالی واقع شده است. حداقل، متوسط و حداکثر ارتفاع حوضه به‌ترتیب برابر ۸۴۴، ۲۱۶۹ و ۳۲۲۷ متر و شیب متوسط آن ۳۷ درصد می‌باشد. مجموع بارش سالانه آن ۶۲۵ میلیمتر، میانگین دمای سالانه ۴ درجه سانتیگراد و اقلیم حوضه بر اساس روش‌آمبرژه از نوع خیلی‌مرطوب است. کاربری‌های عمده این حوضه نیز شامل مرتع، زراعت و جنگل است. حوضه آبخیز توتکابن شهرستان رودبار با مساحت ۱۰۶۶۰ هکتار، در حد فاصل طول جغرافیایی "۲۷ '۴۳ °۴۹ تا "۱۱ '۵۱ °۴۹ شرقی و عرض جغرافیایی "۱۰ '۴۴ °۳۶ تا "۴۱ '۵۰ °۳۶ شمالی واقع شده است. حداقل، متوسط و حداکثر ارتفاع حوضه به‌ترتیب برابر ۹۱۶، ۱۶۰۷ و ۲۳۱۰ متر و شیب متوسط آن ۳۲ درصد است. مجموع بارش‌سالانه حوضه ۵۶۰ میلیمتر، میانگین دمای سالانه ۱۰/۹ درجه سانتیگراد و اقلیم آن بر اساس روش آمبرژه از نوع نیمه‌مرطوب است. کاربری‌های عمده این حوضه شامل زراعت، جنگل و مرتع است. حوضه آبخیز ماسوله شهرستان فومن با مساحت ۴۶۶۰ هکتار، در حد فاصل طول جغرافیایی "۲۶ '۵۴ °۴۸ تا "۵۵ '۰ °۴۹ شرقی و عرض جغرافیایی "۲۳ '۶ °۳۷ تا "۳۰ '۱۱ °۳۷ شمالی واقع شده است. حداقل، متوسط و حداکثر ارتفاع حوضه به‌ترتیب برابر ۷۷۲، ۱۸۸۸ و ۲۹۰۹ متر و شیب متوسط آن ۵۶ درصد است. مجموع بارش سالانه حوضه ۶۲۰ میلیمتر، میانگین دمای سالانه ۱۲ درجه سانتیگراد و اقلیم آن بر اساس روش‌آمبرژه از نوع مرطوب تا خیلی‌مرطوب است. کاربری‌های عمده حوضه شامل جنگل، مرتع و سایر کاربری‌ها می‌باشد (مهندسان مشاور طرح و سازه شفارود، ۱۳۹۸).

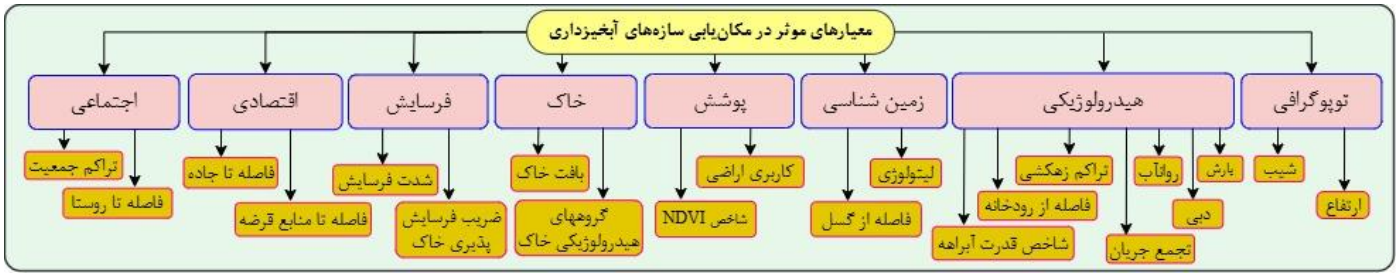


شکل (۱): موقعیت مکانی حوضه‌های آبریز مورد مطالعه در استان گیلان

Figure (1): Location of the studied watersheds in Gilan province

روش کار

به‌منظور انجام تحقیق حاضر، ابتدا با بررسی منابع مختلف و دریافت دیدگاه متخصصان، مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری (به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) تعیین‌گردید (شکل ۲). این عوامل در هشت گروه مطابق شکل زیر طبقه‌بندی شدند. سپس براساس ماهیت هر معیار و نقطه‌نظرات متخصصان و منابع‌موجود، زیرمعیارهای مربوط به هر معیار تعیین شد (سانتوسو[1] و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۸۶؛ عربامری و همکاران، ۲۰۱۹: ۹۰۷؛ هاگوس[2] و همکاران، ۲۰۲۲: ۶۲).



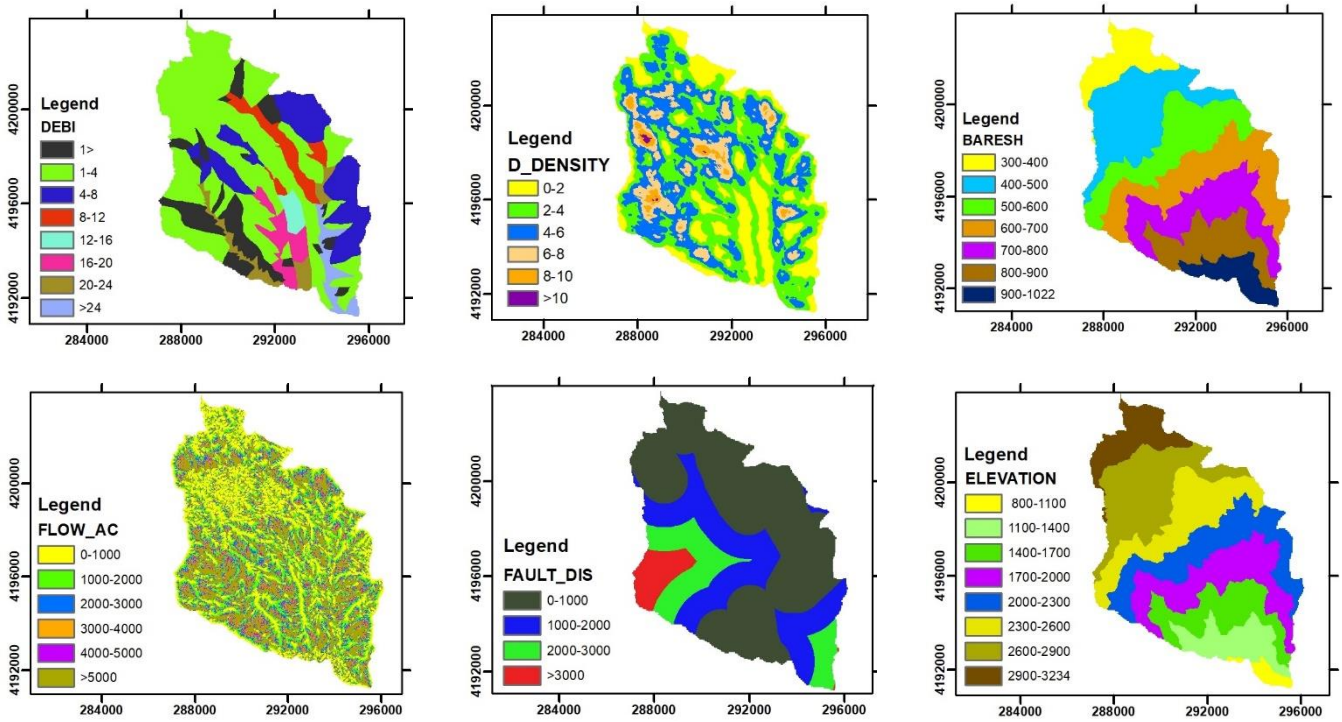
شکل (۲): معیارهای تاثیرگذار روی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری

Figure (2): Criteria affecting the location of watershed constractions

نقشه ارتفاع حوضه‌های مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM)[3] با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر از سایت آلاسکا (ALOS PALSAR DEM) به‌دست آمد. نقشه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و تابع Slope در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 حاصل‌شد

[1] Santoso et al
[2] Hagos et al
[3] Digital Elevation Model

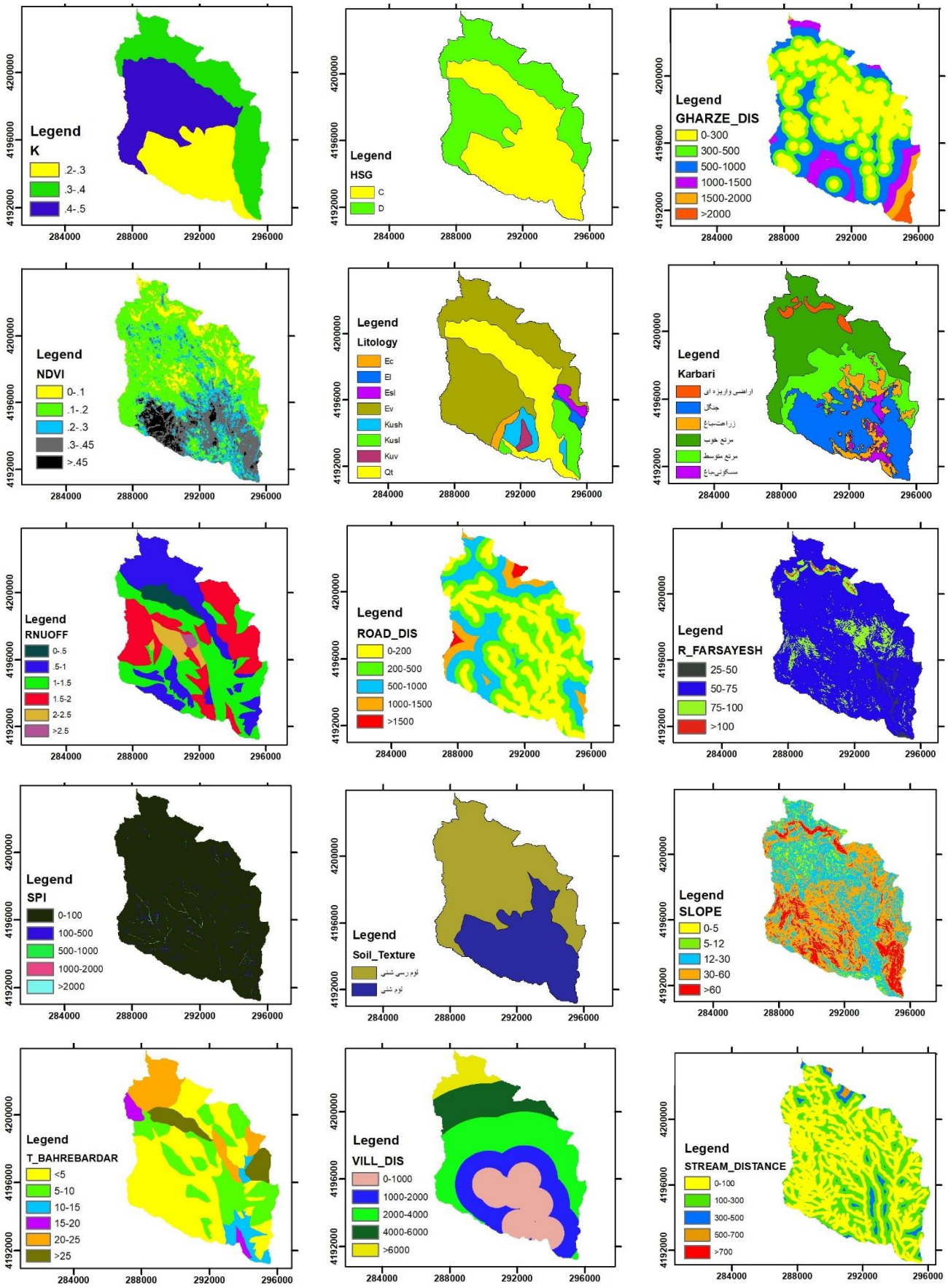
(رحیم پور و همکاران، ۲۰۲۵: ۱۲۲). نقشه بارش با استفاده از داده‌های میانگین بارندگی سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک، تبخیرسنجی و بارانسنجی اطراف محدوده حوضه‌های مورد مطالعه با دوره آماری ۲۵ ساله از طریق روش‌های زمین‌آمار به‌دست آمد. به‌منظور تعیین ارتفاع روانآب و دبی اوج سیل از روش SCS[1] استفاده شد. تجمع جریان از طریق محاسبه شماری از پیکسل‌ها در لایه رستری (DEM) که به سمت خروجی حوضه تشکیل می شود در نرم‌افزار SAGA GIS 8 محاسبه شد (لوپز-ویسنته و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۳؛ تیان بای و همکاران، ۲۰۱۹: ۶). تراکم‌زهکشی از طریق دستور Line Density با استفاده از لایه رقومی شبکه آبراهه در محیط ArcGIS تهیه شد (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۹: ۸۷۷؛ داس آنجوس لوئیس و کابرال[2]، ۲۰۲۱: ۳۸۵). معیارهای فاصله‌ای شامل فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، فاصله از منابع قرضه، فاصله تا جاده و فاصله تا روستا با استفاده از ابزار اقلیدسی (Euclidian distance tool) نرم‌افزار ArcGIS به‌دست آمد (شریفی پیچون و موسوی، ۱۴۰۴: ۴۳). شاخص توان آبراهه (SPI) [3] برمبنای رابطه $SPI = A_S * tan_\beta$ در نرم‌افزار SAGA GIS 8 محاسبه شد. نقشه زمین‌شناسی و فاصله از گسل از نقشه‌های ۱:۱۰۰،۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استخراج شد. در این تحقیق از نقشه کاربری اراضی مطالعات تفصیلی- اجرایی استفاده شد و این نقشه با استفاده از جدیدترین تصاویر Google Earth اصلاح و بروزرسانی شد. شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده بر مبنای رابطه $NDVI = \frac{NIR-IR}{NIR+IR}$ و با استفاده از تصویر لندست هشت (Landsat 8 OLI/TIRS) در نرم‌افزار SAGA GIS 8 محاسبه شد (اسلامی نژاد و همکاران، ۱۴۰۱: ۴۸؛ تیان بای و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۶۳). نقشه بافت، گروه‌های هیدرولوژیکی و عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) و همچنین مقدار فرسایش از نتایج مطالعات تفصیلی –اجرایی آبخیزداری حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه موجود در آرشیو اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان استخراج شد. جهت تعیین تراکم جمیت، تعداد جمعیت از آمار سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ استخراج شد و نقشه آن براساس نفر در هر هکتار در نرم‌افزار ArcGIS تولید شد (دهمرده قلعه نو و همکاران، ۱۳۹۹: ۳۹۵؛ قاسمیان و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۱). به ترتیب در اشکال ۳ تا ۵ نقشه معیارهای تاثیرگذار روی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در حوضه های آبخیز آق‌اولر، توتکابن و ماسوله آورده شده‌است.



شکل (۳): نقشه معیارهای تاثیرگذار روی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در حوضه آبریز آق اولر

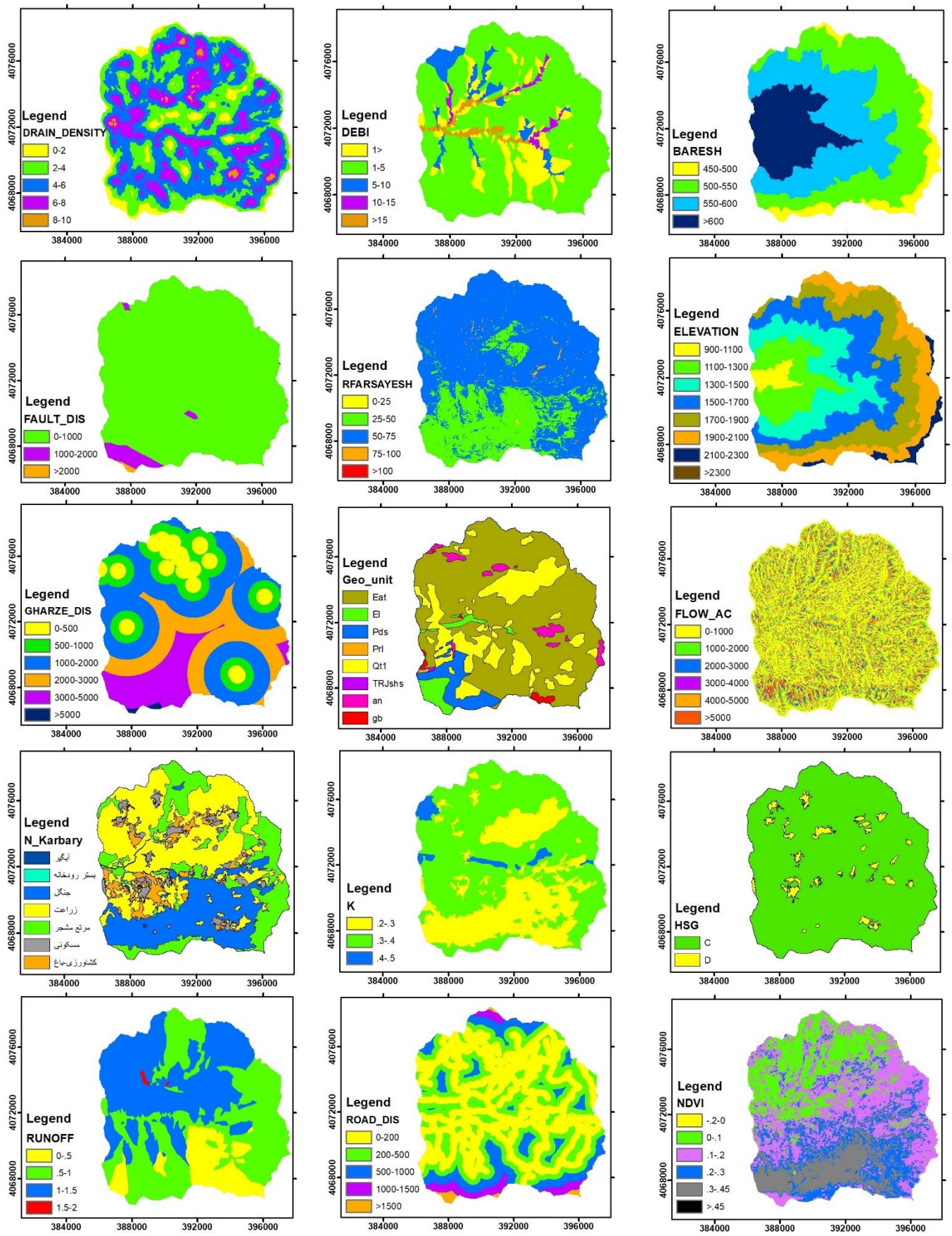
Figure (3): Criteria affecting the location of watershed constractions in Aqevlar watershed

[1] Service Conservation Service
[2] Dos Anjos Luis & Cabral
[3] Stream Power index



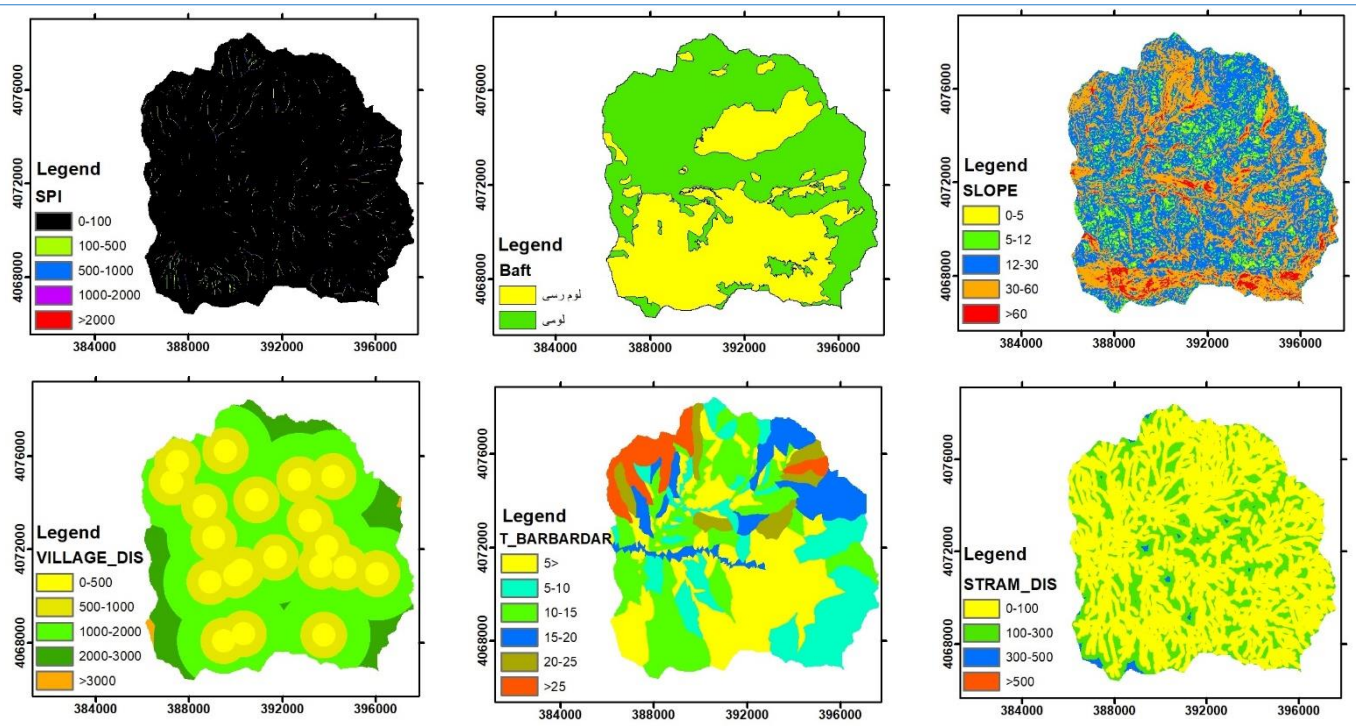
ادامه شکل (۳): نقشه معیارهای تاثیرگذار روی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در حوضه آبریز آق اولر

Figure (3): Criteria affecting the location of watershed constractions in Aqevlar watershed



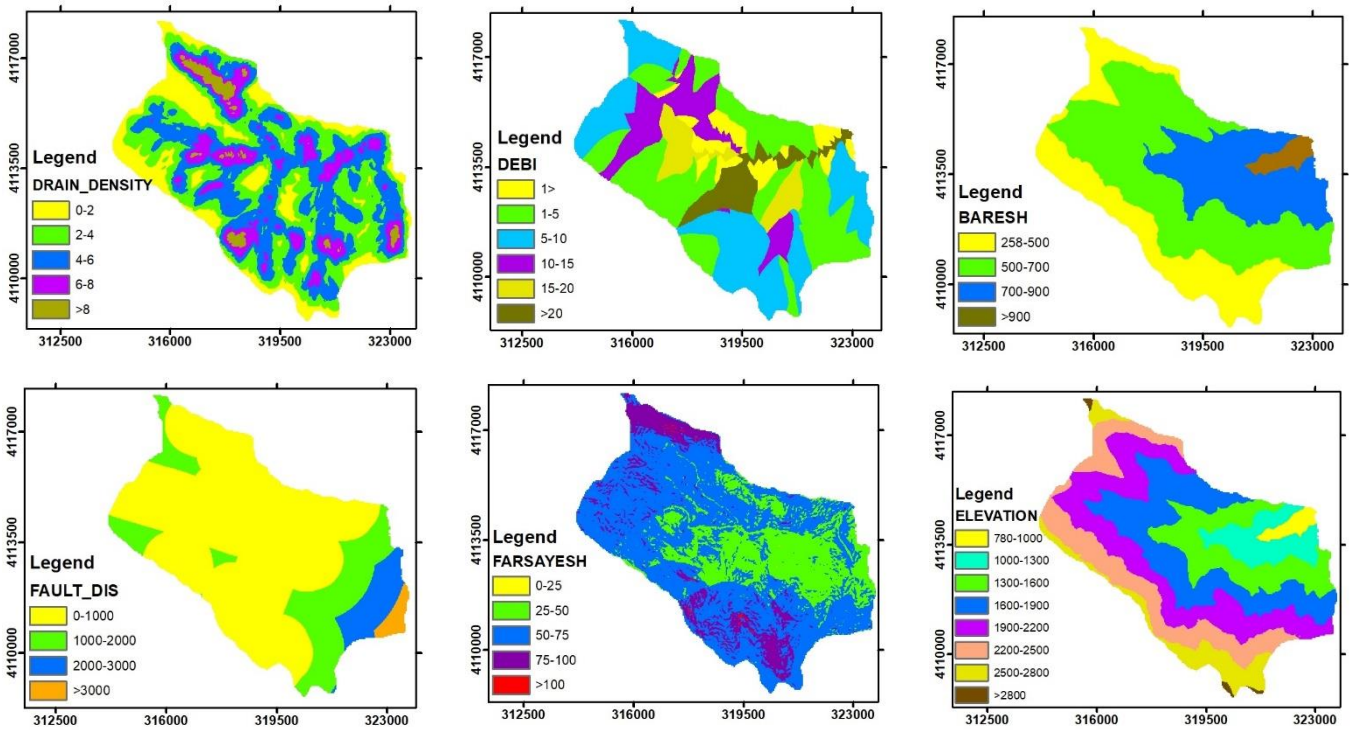
شکل (۴): نقشه معیارهای تاثیرگذار روی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در حوضه آبریز توتکابن

Figure (4): Criteria affecting the location of watershed constractions in Totkabon watershed



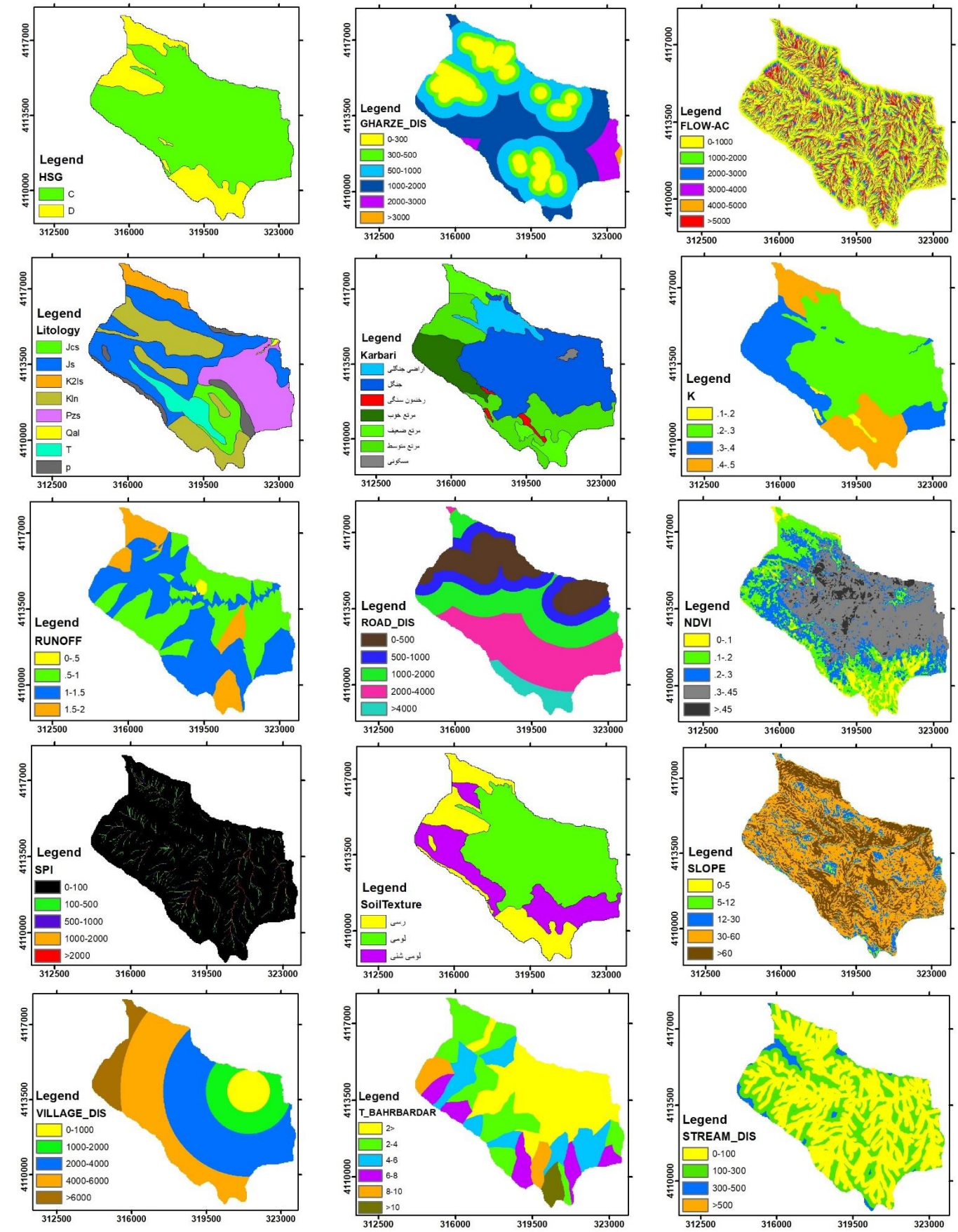
ادامه شکل (۴): نقشه معیارهای تاثیرگذار روی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در حوضه آبریز توتکابن

Figure (4): Criteria affecting the location of watershed constractions in Totkabon watershed



شکل (۵): نقشه معیارهای تاثیرگذار روی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در حوضه آبریز ماسوله

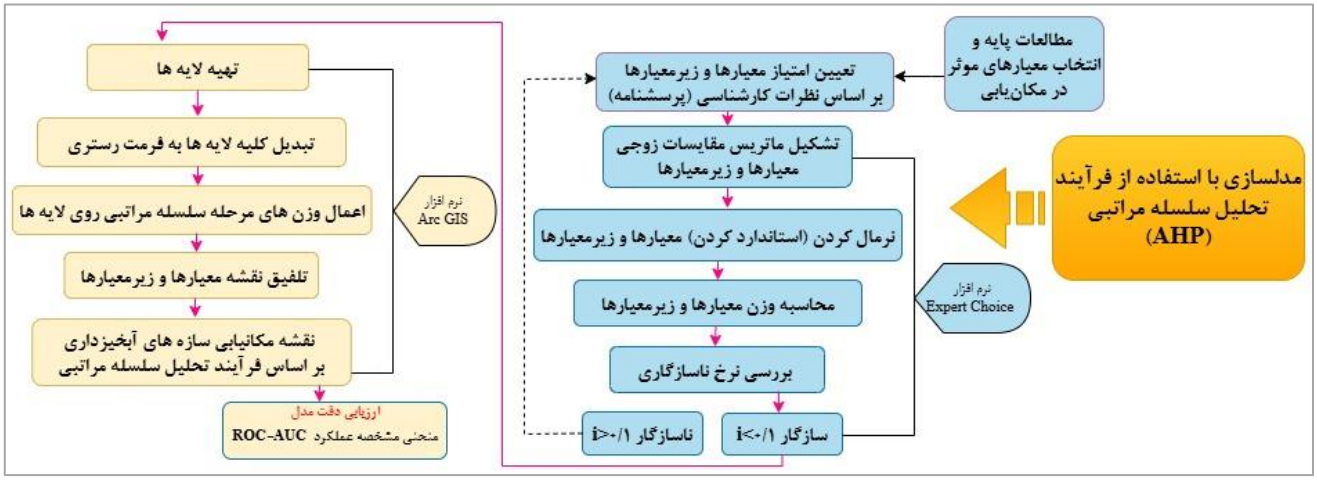
Figure (5): Criteria affecting the location of watershed constractions in Masouleh watershed



ادامه شکل (۵): نقشه معیارهای تاثیرگذار روی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در حوضه آبریز ماسوله

Figure (5): Criteria affecting the location of watershed constractions in Masouleh watershed

شکل (۶) نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق را نشان می‌دهد. اولین گام در فرآیند AHP، ایجاد ساختار سلسله مراتبی است که در آن اهداف، معیارها و زیرمعیارها نشان‌داده می‌شود (اکبرپور و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۸). تعیین اهمیت و ارزش هر معیار و زیرمعیار، تهیه ماتریس مقایسات زوجی، نرمال‌کردن (استاندارد کردن) امتیازها، تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها و محاسبه نرخ ناسازگاری، مراحل بعدی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی است که در این تحقیق به‌ترتیب انجام شد. (زارع بیدکی و همکاران، ۱۴۰۰: ۴۳).



شکل (۶): نمودار جریانی روش تحقیق
Figure (6): Flowchart of the research method

به‌منظور تعیین ارزش هر معیار و زیرمعیار، پرسشنامه‌ای طراحی و بین ۳۰ نفر از دست‌اندرکاران پروژه‌های عمرانی آبخیزداری اعم از کارفرمایان (سازمان منابع‌طبیعی و آبخیزداری کشور و ادارات کل منابع‌طبیعی و آبخیزداری استان‌ها)، مهندسان مشاور و شخصیت‌های دانشگاهی آشنا با موضوع پژوهش توزیع شد. روایی پرسشنامه با نظر پانلی از اعضای هیئت علمی دانشگاه تهران تأیید شد. برای تعیین پایایی ابزار تحقیق پیش‌آزمون صورت گرفت که مقدار آلفای کرونباخ محاسبه‌شده برای مقیاس اصلی پرسشنامه شامل عوامل مؤثر بر مکان‌یابی اقدامات سازه‌ای آبخیزداری ۰/۹۴ بدست‌آمد (اسحاقی و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۶۳). به‌منظور دریافت نظرات کارشناسان در خصوص میزان و اهمیت ارزش هرکدام از معیارها و زیرمعیارها از مقیاس نه کمیتی ساعتی مطابق جدول زیر استفاده شد (امامقلی و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۷؛ رضوی زاده و شاهدی، ۱۳۹۵: ۳۷).

جدول (۱): مقیاس نه کمیتی ساعتی برای تعیین ارزش معیارها و زیرمعیارها و مقایسات دودویی
Table (1): standard scales of Saaty with 9 levels of intensity for determining the value of criteria and sub-criteria and pairwise comparisons

امتیاز	تعریف	توضیح
۱	اهمیت مساوی	در تحقق هدف دو متعیر اهمیت مساوی دارند
۳	اهمیت اندکی بیشتر	برای تحقق هدف اهمیت i بیشتر از j است
۵	اهمیت بیشتر	اهمیت i خیلی بیشتر از j میباشد
۷	اهمیت خیلی بیشتر	اهمیت i خیلی خیلی بیشتر از j میباشد
۹	اهمیت مطلق	اهمیت خیلی بیشتر i نسبت به j به طور قطعی به اثبات رسیده است
۲،۴،۶،۸	-	هنگامی که حالت های میانه وجود دارد

مرحله بعدی، نرمال کردن (استاندارد کردن) معیارها در ماتریس مقایسات زوجی و سپس تعیین وزن نهایی هر معیار و زیرمعیار است که این مرحله از طریق تعیین امتیاز هر معیار بر بردار ستونی آن معیار به‌دست آمد (داس آنجوس لوئیس و کابرال، ۲۰۲۱: ۳۸۸؛ هاگوس و همکاران، ۲۰۲۲: ۸). به‌منظور اطمینان از صحت پاسخ‌دهی، نرخ ناسازگاری مقایسات با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$CR = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، CR[1]: نرخ ناسازگاری، CI[2]: شاخص سازگاری و RI[3]: شاخص تصادفی است. مقدار CI از رابطه $CI = \frac{\lambda max - n}{n-1}$ به‌دست آمد که λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه است که حاصل میانگین عناصر ماتریس مقایسات زوجی است و n نیز تعداد معیارها است. شاخص تصادفی بودن (RI) نیز با توجه به تعداد معیارها از جدول زیر به‌دست آمد (سوئین[4] و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۰).

جدول (۲): شاخص تصادفی بودن (RI)
Table (2): Randomness Index (RI)

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
RI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹۶	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹	۱/۵۱

چنانچه این ضریب کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد سازگاری در قضاوت‌ها مورد قبول است در غیر اینصورت باید در قضاوت‌ها تجدیدنظر شود (دهقان و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۱؛ پاپائی اوآنو و همکاران[5]، ۲۰۱۵: ۴۱۰). کلیه این تحلیل‌ها در نرم‌افزار Expert Choice 11 بعنوان نرم‌افزار کاربردی رویکرد تحلیل سلسله مراتبی انجام‌شد. پس از تعیین وزن‌های نرمال‌شده و اطمینان از مناسب‌بودن نرخ ناسازگاری آن‌ها، مقدار وزن اختصاص یافته به هر معیار و زیرمعیارهای مربوط به آن در ارزش طبقات مختلف آن معیار و زیرمعیارهای مربوطه ضرب‌گردید (نوری و همکاران، ۱۳۹۸: ۴۲). در این تحقیق به‌منظور تلفیق لایه‌های معیار استاندارد شدهِ وزنی از نرم‌افزار Arc GIS 10.8 استفاده‌گردید و در نهایت پس از تلفیق لایه‌ها، نقشه مناطق مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری در سه طبقه بدون‌پتانسیل، پتانسیل‌متوسط و پتانسیل‌بالا تهیه شد (زودیه و تسفا[6]، ۲۰۲۳: ۳۶۹؛ و شارکر و همکاران[7]، ۲۰۲۵: ۱۲).

برای تعیین حریم آبراهه‌ها از الگوریتم Buffer در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استفاده‌شد. برای این منظور، حریم ۱۰ متری از آبراهه‌ها به عنوان عامل محدودکننده در نظر گرفته شد، به این معنا که نقاط خارج از این محدوده هیچ‌گونه قابلیتی برای احداث سازه آبخیزداری ندارند (باقلانی و همکاران، ۱۳۹۹؛ زارع بیدکی و همکاران، ۱۴۰۰). ضمن آنکه با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد گیرنده (ROC) و سطح زیر منحنی آن (AUC)، کارایی و دقت مدل AHP ارزیابی شد (اتازرینی، ۲۰۲۱: ۵۶۷).

نتایج

بررسی نتایج این مطالعه نشان داد که از بین هشت دسته اصلی، درجه اهمیت گروه‌های هیدرولوژی، توپوگرافی و پوشش‌زمین بیش از سایر گروه‌ها است. در جدول ۳ میزان اهمیت دسته‌های اصلی بر اساس مقایسات‌زوجی و مقیاس نه‌کمیتی ساعتی و در جدول ۴ نرمال‌کردن دسته‌ها در ماتریس مقایسات‌زوجی و تعیین وزن هر یک از دسته‌های هشت‌گانه موثر در مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری آورده شده است.

[1] Inconsistency Rate
[2] Consistency Index
[3] Inconsistency Random Index
[4] Swain et al
[5] Papaioannou et al
[6] Zewdie & Tesfa
[7] Sharker et al

جدول (۳): میزان اهمیت دسته‌های هشت‌گانه عوامل موثر در مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری بر اساس مقیاس نه کمیتی ساعتی

Table (3): The importance of the eight categories of factors affecting the location of watershed constractions based on the standard scales of Saaty with 9 levels of intensity

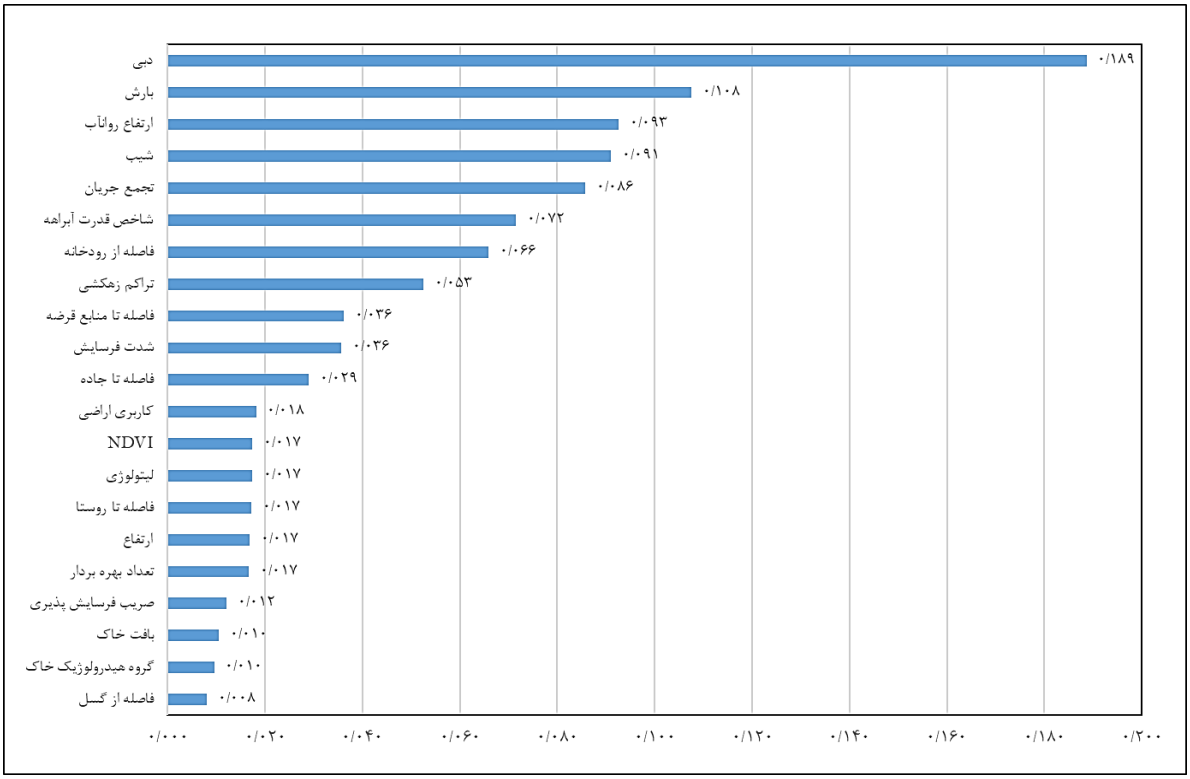
دسته/گروه	هیدرولوژیکی	توپوگرافی	پوشش	اقتصادی	فرسایش	اجتماعی	خاک	زمین‌شناسی
هیدرولوژیکی	۱							
توپوگرافی	۱/۵	۱						
پوشش	۱/۵	۱/۳	۱					
اقتصادی	۱/۴	۱/۳	۱/۴	۱				
فرسایش	۱/۵	۱/۲	۱/۳	۱/۲	۱			
اجتماعی	۱/۸	۱/۸	۱/۷	۱/۵	۱/۶	۱		
خاک	۱/۶	۱/۴	۱/۴	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۱	
زمین‌شناسی	۱/۹	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۱

جدول (۴): نرمال‌کردن امتیاز دسته‌ها در ماتریس مقایسات‌زوجی و تعیین وزن عوامل موثر در مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری

Table (4): Normalizing the category scores in the pairwise comparison matrix and determining the weight of effective factors in locating watershed constractions

دسته/گروه	هیدرولوژیکی	توپوگرافی	پوشش	اقتصادی	فرسایش	اجتماعی	خاک	زمین‌شناسی	امتیاز
هیدرولوژیکی	۰/۴۴	۰/۶۵	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۲۳	**۰/۳۶۰**
توپوگرافی	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۲۹	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۱۳	**۰/۱۶۹**
پوشش	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۱۰	۰/۳۱	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۱۳	**۰/۱۵۰**
اقتصادی	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸	**۰/۱۱۹**
فرسایش	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۳	**۰/۰۹۶**
اجتماعی	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۱۳	**۰/۰۵۲**
خاک	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۸	**۰/۰۳۴**
زمین‌شناسی	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	**۰/۰۲۰**

بررسی نتایج همچنین حاکی از آن است که نرخ ناسازگاری مقایسات (CI) برابر ۰/۰۷۷ بوده و کمتر از ۰/۱ است و سازگاری در قضاوت‌ها مورد قبول است. برابر این بررسی، از بین ۲۱ معیار تاثیرگذار، معیارهای دبی، بارش، ارتفاع رواناب، شیب و تجمع جریان به عنوان ۵ معیار برتر در مکان‌یابی نقاط مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری محسوب می‌شوند. شکل ۷، وزن معیارهای اصلی در تعیین مناسب‌ترین مکان‌های احداث سازه‌های آبخیزداری را نشان می‌دهد.



شکل (۷): وزن معیارهای تاثیرگذار در مکان‌یابی احداث سازه‌های آبخیزداری

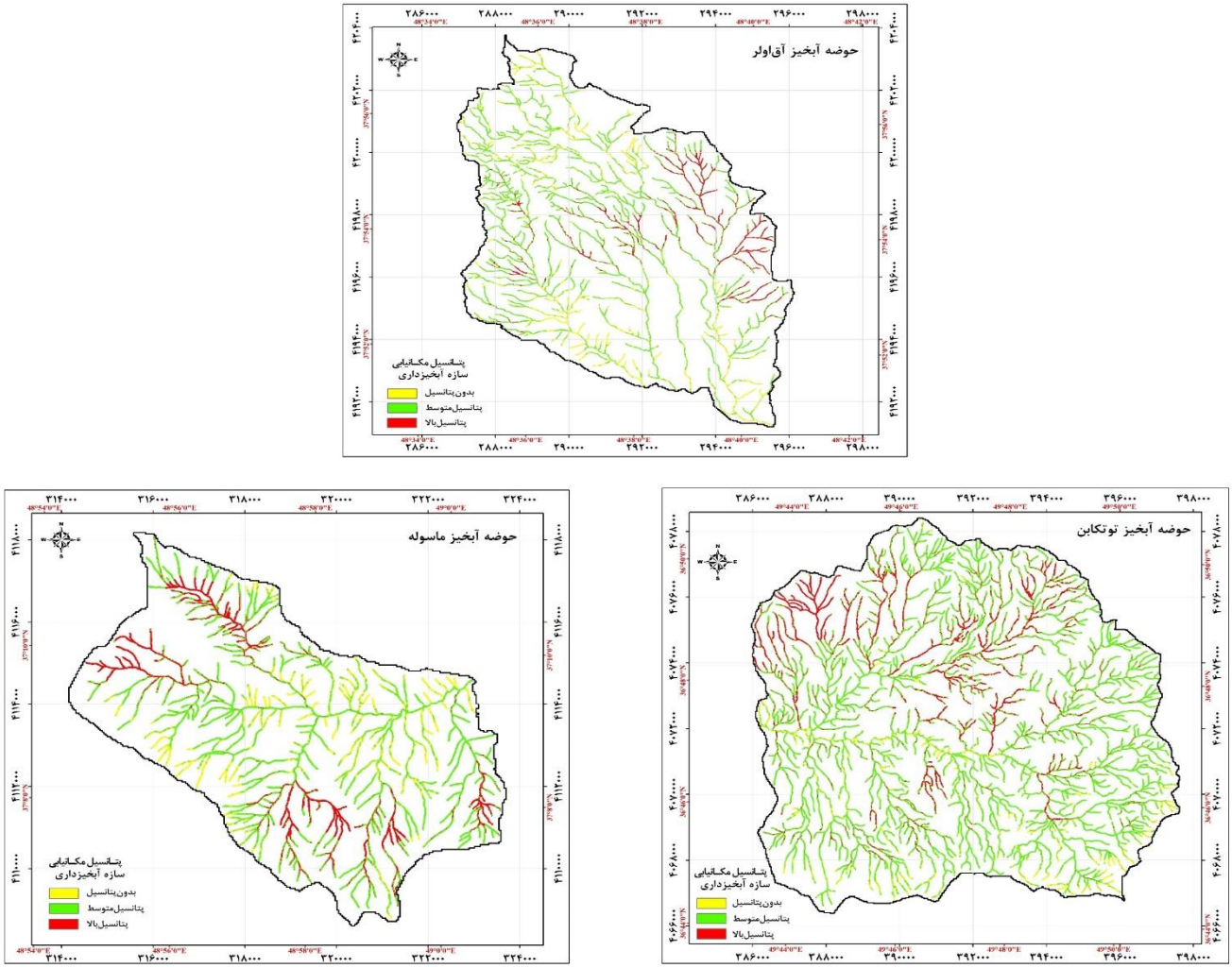
Figure (7): Weight of influential criteria in locating watershed constractions

نقشه نهایی تعیین نقاط مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری (گابیونی و سنگی‌ملاتی) در حوضه‌های آبخیز آق‌اولر، توتکابن و ماسوله در شکل ۸ نشان داده شده است. مناطقی که به رنگ زرد مشخص شده‌است، نشان‌دهنده مناطق بدون پتانسیل برای احداث سازه هستند. با توجه به روش تحقیق، نقشه‌خروجی در سه کلاس طبقه‌بندی شد. جدول ۵ چگونگی طبقه‌بندی به‌همراه سایر اطلاعات توصیفی مربوط به هر طبقه را نشان می‌دهد. مطابق این جدول به‌ترتیب ۳۹/۴، ۹۷/۷ و ۴۵/۰ کیلومتر از آبراهه‌های حوضه‌های آق‌اولر، توتکابن و ماسوله از پتانسیل‌بالا برای احداث سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی آبخیزداری برخوردار هستند.

جدول (۵): طبقه‌بندی نقشه مکان‌یابی مناطق مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری (گابیونی و سنگی‌ملاتی)

Table (5): Classification of the location map of suitable areas for the construction of watershed structures (gabion and Masonry wall)

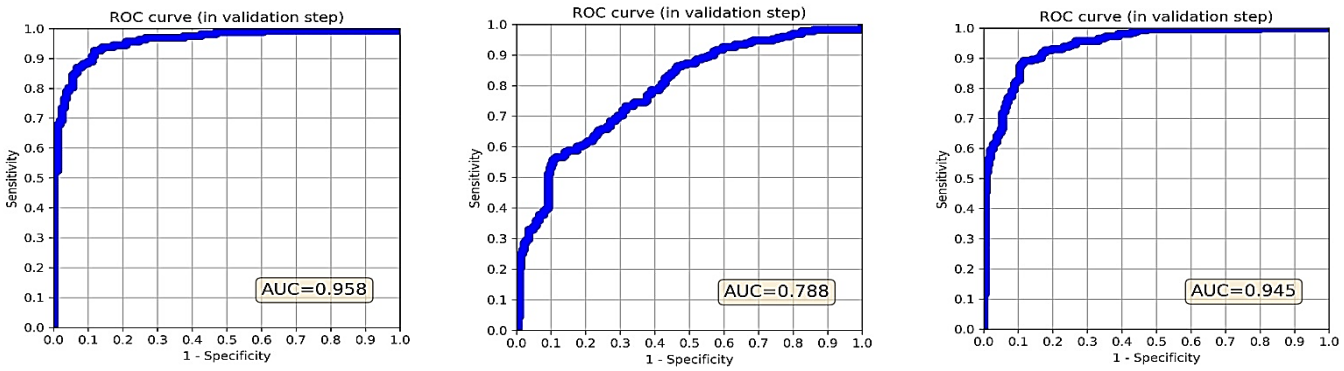
نام حوضه	طول کل آبراهه (کیلومتر)	طبقه	طول آبراهه (کیلومتر)	درصد
آق‌اولر	۲۴۷/۸	بدون‌پتانسیل	۴۹/۸	۲۰/۱
		پتانسیل‌متوسط	۱۵۸/۶	۶۴/۰
		پتانسیل‌بالا	۳۹/۴	۱۵/۹
توتکابن	۴۸۷/۱	بدون‌پتانسیل	۳۰/۴	۶/۲
		پتانسیل‌متوسط	۳۵۹/۰	۷۳/۷
		پتانسیل‌بالا	۹۷/۷	۲۰/۰
ماسوله	۱۸۷/۵	بدون‌پتانسیل	۳۰/۰	۱۶/۰
		پتانسیل‌متوسط	۱۱۲/۵	۶۰/۰
		پتانسیل‌بالا	۴۵/۰	۲۴/۰



شکل (۸): نقشه نهایی مکان‌یابی احداث سازه‌های آبخیزداری (گابیون و سنگی‌ملاتی) در حوضه‌های آق‌اولر، توتکابن و ماسوله

Figure (8): Final location map for the construction of watershed structures (gabion and Masonry wall) in the Aqevlar, Totkabon, and Masouleh basins.

نتایج حاصل از منحنی تشخیص عملکرد گیرنده (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) به‌منظور تعیین عملکرد مدل در شکل ۹ آورده شده است. نتایج نشان‌داد که مقدار AUC در حوضه‌های آبخیز آق‌اولر، توتکابن و ماسوله به‌ترتیب برابر ۰/۹۴۵، ۰/۷۸۸ و ۰/۹۵۸ است.



شکل (۹): منحنی تشخیص عملکرد (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) حوضه‌های آبخیز آق‌اولر (راست)، توتکابن (وسط) و ماسوله (چپ)

Figure (9): Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and area under the curve (AUC) of the Aqevlar (right), Totkabon (middle), and Masouleh (left) basins

تطبیق مکانی سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی موجود (اجرا شده و در حال اجرا) با نقشه‌های حاصل شده از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی (AHP) نشان‌داد که از مجموع ۶۴۹ سازه احداث‌شده در حوضه‌های مورد مطالعه، تعداد ۶۴۰ سازه در محدوده پتانسیل‌متوسط و بالای نقشه بدست‌آمده از این رویکرد قرار گرفته‌است و از این بین، تعداد ۳۷۷ سازه (حدود ۶۰ درصد سازه‌ها) در محدوده پتانسیل بالای نقشه حاصل از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی قرار دارد. نتایج تفصیلی مربوط به حوضه‌های آبخیز آق‌اولر، توتکابن و ماسوله به تفکیک نوع‌سازه و وضعیت پتانسیل حاصل از طبقه‌بندی نقشه‌های بدست‌آمده از مدل AHP در جدول (۶) آورده شده است.

جدول (۶): طبقه بندی نقشه مکان‌یابی مناطق مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری (گابیونی و سنگی‌ملاتی)

Table (6): Classification of the location map of suitable areas for the construction of watershed structures (gabion and Masonry wall)

ردیف	نام حوضه	تعداد کل سازه‌ها	وضعیت سازه‌های سنگی-ملاتی				وضعیت سازه‌های گابیونی			
			تعداد کل سازه سنگی‌ملاتی	وضعیت پتانسیل			تعداد کل سازه گابیونی	وضعیت پتانسیل		
				بدون پتانسیل	پتانسیل متوسط	پتانسیل بالا		بدون پتانسیل	پتانسیل متوسط	پتانسیل بالا
۱	آق‌اولر	۲۵۹	۴۶	۷	۳۰	۹	۲۱۳	۱	۹۱	۱۲۱
۲	توتکابن	۲۲۸	۲۵	۰	۱۴	۱۱	۲۰۳	۱	۹۵	۱۰۷
۳	ماسوله	۱۶۲	۱	۰	۰	۱	۱۶۱	۰	۳۳	۱۲۸
۴	**مجموع**	**۶۴۹**	**۷۲**	**۷**	**۴۴**	**۲۱**	**۵۷۷**	**۲**	**۲۱۹**	**۳۵۶**

بحث

نتایج حاصل از تحقیق نشان‌داد که دسته/گروه هیدرولوژی بیشترین اهمیت را در بین سایر دسته‌های هشت‌گانه عوامل‌موثر در مکان‌یابی سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی آبخیزداری دارد به‌طوری‌که نظرات، حاکی از تاثیر برجسته این گروه نسبت به سایر گروه‌ها است. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که از بین ۲۱ معیار نظرخواهی شده، معیار دبی به تنهایی با حدود ۲۰ درصد تاثیرگذاری، مهم‌ترین معیار است. داده های شکل ۴ نشان می‌دهد که بعد از معیار دبی، به استثنای شیب که در رتبه چهارم معیارهای تاثیرگذار قرار دارد، سایر معیارهای دسته هیدرولوژی مشتمل بر بارش، ارتفاع رواناب، تجمع جریان، شاخص قدرت آبراهه، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی در درجه بعدی مهم‌ترین معیارهای تاثیرگذار در مکان‌یابی سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی آبخیزداری هستند. مجموع وزن موثر معیارهای ذکر شده نشان می‌دهد که معیارهای دسته هیدرولوژی حدود ۶۷ درصد در این مکان‌یابی نقش دارند و با احتساب معیار شیب، این مقدار به بیش از ۷۵ درصد می‌رسد. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج مطالعات سوری و همکاران (۱۳۹۱)، دبیری و همکاران (۱۴۰۲)، اتازرینی (۲۰۲۱)، داس آنجوس لوئیس و کابرال (۲۰۲۱) و هاگوس و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر تاثیر ویژه معیارهای هیدرولوژی و شیب در مکان‌یابی مناطق مستعد احداث سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی در رویکرد تحلیل سلسله مراتبی تبعیت می‌کند. در حالی‌که با نتایج گزارش‌شده توسط اماقلی و همکاران (۲۰۱۵) مبنی بر تاثیر معیار فرسایش در تعیین مناسب‌ترین مناطق برای احداث سازه‌های گابیونی در حوضه‌آبخیز سیازخ استان کردستان به‌دلیل تفاوت در نوع منطقه، شرایط آب و هوایی و ادافیکی خاک و همچنین نتایج مطالعات زارع بیدکی و همکاران (۱۴۰۰) در زیرحوضه آبریز بهشت‌آباد از حوضه آبریز کارون شمالی مبنی بر تاثیر معیارهای ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی در تعیین مکان مناسب جهت احداث سد خاکی به‌دلیل تفاوت در نوع سازه و منطقه مغایرت دارد. بررسی‌های آماری نشان‌داد که مناطق با پتانسیل متوسط و بالا در هر یک از حوضه‌های آبخیز آق‌اولر، توتکابن و ماسوله جهت احداث سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی آبخیزداری به‌ترتیب برابر ۷۹/۹، ۹۳/۷ و ۸۴/۰ درصد است. نتایج حاصل از جدول ۶ به‌منظور تطبیق مکانی سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی موجود (اجرا شده و در حال اجرا) با نقشه‌های حاصل شده از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی نیز نشان داد که ۹۸ درصد سازه‌های موجود در محدوده با پتانسیل متوسط و بالای نقشه حاصل شده از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی قرار دارد. این مقدار برای سازه‌های سنگی‌ملاتی حدود ۹۰ درصد و برای سازه‌های گابیونی قریب به ۹۹/۵ درصد بدست‌آمد. نتایج حاصل از این تحقیق با یافته‌های

حاصل از مطالعات خرازی و همکاران (۱۳۹۶)، حاج سیدعلیخانی و همکاران (۱۴۰۳)، اتازرینی (۲۰۲۱) و داس آنجوس لوئیس و کابرال (۲۰۲۱) مبنی بر استفاده از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی در تعیین مکان‌های مناسب و خیلی مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری و با نتایج مطالعات سوری و همکاران (۱۳۹۱) مبنی بر عملکرد بهتر این روش در تعیین مکان‌های مناسب احداث سازه‌های گابیونی نسبت به سازه‌های سنگی‌ملاتی همخوانی دارد. ارزیابی‌مدل بر اساس معیار ROC و سطحی زیر منحنی (AUC) حاکی از عملکرد کاملا مناسب مدل AHP در تعیین مکان‌های مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری است به‌نحوی‌که مقدار AUC در حوضه‌های آبخیز آق‌اولر، توتکابن و ماسوله به‌ترتیب برابر ۰/۹۴۵، ۰/۷۸۸ و ۰/۹۵۸ است. نتایج حاصل‌شده با نتایج حاصل از مطالعات اتازرینی (۲۰۲۱) در مکان‌یابی مناطق مستعد احداث سازه‌های آبخیزداری در استان خنیفرای مراکش و با شرایط آب و هوایی مشابه مناطق مورد مطالعه با AUC برابر ۰/۸۷۵ و نتایج تحقیقات حسین و موما (۲۰۲۵) در مکان‌یابی مناطق مستعد وقوع‌سیل با AUC برابر ۸۴۸/ ۰ مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

انتخاب محل مناسب احداث سازه یکی از مهم‌ترین عوامل موفقیت در طرح‌های آبخیزداری بشمار می‌رود. عوامل مختلف توپوگرافی، آب و هوایی، گیاهی، زمین‌ساختاری، ادافیکی و اقتصادی - اجتماعی در تعیین محل مناسب احداث سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی آبخیزداری بعنوان سازه‌های کنترل سیل و رسوب حوضه‌های آبخیز کشور و بویژه نواحی شمال ایران موثر شناخته شده‌اند و تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بهترین مکان بر اساس روش‌های سنتی به‌علت معیارهای متعدد تاثیرگذار، پیچیده است. لذا توسعه یک رویکرد مبتنی بر دانش و تجارب کارشناسان بخش مطالعات و اجرا با بهره‌گیری از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS جهت تلفیق داده‌ها و تهیه نقشه مناطق مناسب احداث سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی آبخیزداری حائز اهمیت فراوان است. در این پژوهش، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با تکیه بر دانش و تجربیات کارشناسی بصورت تلفیقی با سیستم اطلاعات جغرافیایی بکار گرفته‌شد و با استفاده از نتایج مطالعات پایه پروژه‌های تفصیلی-اجرایی آبخیزداری، مهم‌ترین معیارهای تاثیرگذار در مکان‌یابی سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی آبخیزداری تعیین‌شد. معیارهای دبی، بارش، ارتفاع‌رواناب، تجمع‌جریان، شاخص قدرت آبراهه، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی به‌همراه معیار شیب، با مجموع اوزان بیش از ۷۵ درصد، مهم‌ترین معیارهای تاثیرگذار در تعیین مکان مناسب جهت احداث سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی تعیین شدند. نتایج بدست‌آمده از منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) حاصل از تطبیق مکانی سازه‌های گابیونی و سنگی‌ملاتی موجود با نقشه‌های بدست‌آمده از مدل AHP نشان‌داد که به ترتیب ۹۰ و ۹۹/۵ درصد سازه های سنگی –ملاتی و گابیونی در محدوده‌های با پتانسیل متوسط و بالا قرار دارند و مراتب حاکی از دقت رویکرد تحلیل سلسله مراتبی در مکان‌یابی صحیح احداث سازه‌های آبخیزداری در مناطق مرطوب ایران است. بنابراین نقشه‌های پتانسیل حاصل از مدل AHP می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی، تخصیص منابع و مدیریت سیلاب در استان‌های شمالی از طریق اولویت‌بندی مناطق مستعد احداث سازه‌ها باشد. نظر به نتایج بدست‌آمده از تحقیق‌حاضر و پیچیدگی شرایط حاکم بر مناطق مرطوب شمال ایران بعنوان یکی از نواحی چالشی در تعیین مکان‌های مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری پیشرفته‌تر نظیر روش‌های فازیAHP و ANP برای کاهش خطای قضاوت انسانی و مدل‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest جهت یادگیری از داده‌های مکانی واقعی سازه‌های موجود در تحقیقات بعدی پیشنهاد می‌گردد. همچنین ترکیب داده‌های سنجش از دور و مدل ارتفاع رقومی دقیق‌تر (LiDAR DEM) برای افزایش دقت مکانی حائز اهمیت بوده و با ادغام این نتایج با مدل‌های هیدرولوژیکی پویا مانند SWAT یا HEC-HMS می‌توان ارتباط میان بارش، رواناب و عملکرد سازه‌ها را شبیه‌سازی نمودهو به تصمیم‌گیری دقیق‌تر کمک می‌نماید. بنابراین اجرای همین فرآیند در سایر استان‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب (مازندران و گلستان) برای تعیین معیارهای نهایی مکان‌یابی سازه‌ها پیشنهاد می‌شود.

References

Agoramoorthy, G., Chaudhary, S., & Hsu, M.J. (2008). The check-dam route to mitigate India's water shortages. Nat Resour J, 48(3), 565-583.

Akbarpoor, A., Khashei Siuki, A., Keshavarz, A., & Forooghifar, H. (2016). Determination of the appropriate sites to rain water harvesting using analysis hierarchical process (AHP). J Watershed Manage Res, 6(12), 65-74. (In Persion).

Arabameri, A. Yamani, M. Pradhan, B. Melesse, A. Shirani, K., & Bui, D. T. (2019). Novel ensembles of COPRAS multi-criteria decision-making with logistic regression, boosted regression tree, and random forest for spatial prediction of gully erosion susceptibility. Science of the Total Environment, 688, 903-916.

Baghelani, M., Rostami, N., & Tavakoli, M. (2021). The site selection of check dams using fuzzy AHP method in urban watersheds Ilam city watershed. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 14(50), 68-72. (In Persion).

Chezgi, J., Arab Khazaeli, E., & Heshmat Pour, A. (2020). Suitable site selecting of the underground dam construction for water resources management in arid and semi-arid lands. Desert Management, 8(15), 73-84. (In Persion).

Dabiri, R., Abghari, H., & Ghorbani, A. (2024). Locating remediation and restoration operations with MCDM and AHP and ANP methods (case study: Saqezchi-Chay watershed in Namin city). Arid Regions Geographic Studies, 15(55), 71-91. (In Persion).

Dahmardeh Ghaleno, M.R., Mirzaei, Gh. & Alvandi, E. (2021). The Choice of Location of Underground Dams Using Multi-Criteria Decision-Making Methods TOPSIS and GIS in the Eastern Part of the Watershed of Gorganroud. Journal of Environmental Science and Technology. 22 (7), 463-471. (In Persion).

Dehghan, M., Azari, M., & Sepehr, A. (2019). Providing a GIS-based decision support system for locating water and soil conservation measures (case study: Kakhak watershed), Quarterly Journal of Geography and Environmental Hazards, 8(1), 65-82. (In Persion).

Dos Anjos Luís, A. Cabral, P. (2021). Small dams/reservoirs site location analysis in a semi-arid region of Mozambique. International Soil and Water Conservation Research, 9(3), 381-393.

Emamgholi, M., Khosravi, K., & Sedaii, N. (2015). Suitable site selections for gabion check dams construction using analytical hierarchy process and decision making methods. Journal of Soil Environment, 1(1), 35-44.

Eshaghi, S.R., Rezaei, R., Hejazi, S.Y., Shiri, N. & Ghadimi. S.A. (2014). Analyzing the Factors Affecting on Rural People's Participation in the Projects of Natural Resources Conservation. Iranian Journal Of Agricultural Economics and Development Research. 44 (3), 463-471. (In Persion).

Eslaminezhad, S.A., Eftekhari, M., Akbari, M., Bayat, H. & Barghi, W. (2022). Using Boosted Regression Tree, Logistic Model Tree, and Random Forest Algorithms to Evaluate the Groundwater Potential. Watershed Management Research. 35 (3), 44-59. (In Persion).

Ettazarini, S. (2021). GIS-based land suitability assessment for check dam site location, using topography and drainage information: a case study from Morocco. Environmental Earth Sciences, 80(17), 1-17.

Ghasemian, B., Shahabi, H., Shirzadi, A., Al-Ansari, N., Jaafari, A., Kress, V. R., ... & Ahmad, A. (2022). A robust deep-learning model for landslide susceptibility mapping: A case study of Kurdistan Province, Iran. Sensors, 22(4), 1573.

Hagos, Y.G., Andualem, T.G., Mengie, M.A., Ayele, W.T., & Malede, D.A. (2022). Suitable dam site identification using GIS-based MCDA: a case study of Chemoga watershed, Ethiopia. Applied Water Science, 12(4), 69.

Hajseyedalikhani, N., Saeediyan, H., & Rezaei, M. (2024). Investigating the sensitivity and accuracy of analytical hierarchy process (AHP) process in construction of underground dams in desert regions. Journal of Ecohydrology, 11(1), 125-147. (In Persion).

Hill, M.J., Braaten, R., Veitch, S.M., Lees, B.G., & Sharma, S. (2005). Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis. Environmental Modelling & Software, 20(7), 955-976.

Hossain, M.N., & Mumu, U.H. (2024). Flood susceptibility modelling of the Teesta River Basin through the AHP-MCDA process using GIS and remote sensing. Natural Hazards, 120(13), 12137-12161.

Hosseinzadeh, M.M., Panahi, R. & Tarband, T. (2021). Flood Susceptibility Zoning in the Sanghar Basin, Kermanshah Province. Journal of Ecohydrology. 7 (4), 873-889. (In Persion).

Kharazi, P., Yazdani, M.R., Ara, H., & Khazaealpour, P. (2017). Suitable site selection for groundwater dams construction using analytical hierarchy process case study: Dasht-e-Kavir watershed. Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 26(103), 177-185. (In Persion).

López-Vicente, M., Pérez-Bielsa, C., López-Montero, T., Lambán, L.J., & Navas, A. (2014). Runoff simulation with eight different flow accumulation algorithms: Recommendations using a spatially distributed and open-source model. Environmental Modelling & Software, 62, 11-21.

Miladi, B., Maleki, A., & Ahmadi, M. (2019). Locating the construction site of underground dams using a decision support system (DSS) in the northwest of Kermanshah province. 8(1), 34-51. (In Persion).

Nouri, H., Shahedi, K., Habibnezhad Roshan, M., Kavian, A., & Faramarzi, M. (2019). Susceptibility to flooding in the Razavar watershed using analytical hierarchy process method. 8(19), 35-50. (In Persion).

Papaioannou, G., Vasiliades, L., Loukas, A. (2015). Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. Water Resources Management, 29(2), 399-418.

Rahimpour, T., & Rezaei Moghaddam, M. H. (2025). GIS-based MCDM Approach for Landslide Susceptibility Hazard Mapping (Case study: Mehran Roud Basin, Iran. Journal of Hydrogeomorphology, 12(44), 131-116.

Rahman, A.M., & Mustafa, N.F. (2025). Small Dam Design and Construction for Sustainable Water Resources Management: A Comprehensive Review. UHD Journal of Science and Technology, 9(1), 55-64.

Razavizadeh, S., & Shahedi, K. (2017). Combination of AHP and Topsis methods to prioritize of flooding in Taleghan sub watersheds. Natural Ecosystems of Iran, 7(4), 33-46. (In Persion).

Santoso, I., & Darsono, S. (2019). Review of criteria on multi criteria decision making (MCDM) construction of dams. Geomate Journal, 16(55), 184-194.

Shafarood Design and Structural Consulting Engineers. (2019). Detailed-implementation studies of watershed management in Aqevlar, Totkabon and Masouleh watersheds. Natural Resources and Watershed Management of Guilan Province. 36 volumes. (In Persion).

Sharifi Paichoon, M., & Moosavi, L. (2025). Analyzing the factors influencing flooding in the Hor Roud catchment areas and identifying high-risk zones using the fuzzy-TOPSIS model. Journal of Hydrogeomorphology, 12(44), 54-36. (In Persion).

Sharker, R., Islam, M.R., Hosen, M.B., Kader, Z., Aziz, M.T., Tahera-Tun-Humayra, U., ... & Roy, A. (2025). GIS-based AHP approach to flood susceptibility assessment in Tangail district, Bangladesh. Journal of Earth System Science, 134(1), 26.

Souri, M., Jafari, M., Azarnivand, H., Ghodousi, G., & Farahpour, M. (2013). Determining suitable locations for small dams using analytical hierarchy process and geographical information systems (case study:

Kermanshah province). Watershed Management Researches (pajouhesh-va-sazandegi), 25(4(97)), 83-91. (In Persion).

Swain, K.C., Singha, C., & Nayak, L. (2020). Flood susceptibility mapping through the GIS-AHP technique using the cloud. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(12), 720.

Tien Bui, D., Shirzadi, A., Shahabi, H., Chapi, K., Omidavr, E., Pham, B.T., ... & Lee, S. (2019). A novel ensemble artificial intelligence approach for gully erosion mapping in a semi-arid watershed (Iran). Sensors, 19(11), 2444.

Tien Bui, D., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B., & Revhaug, I. (2016). Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. Landslides, 13(2), 361-378.

Zare Bidaki, R., Moradi, B., & Bahrami, H. (2022). Locating areas susceptible to the construction of short earthen dams (case study: Behesht Abad watershed). Journal of Ecosystem Management, 1(1), 37-48. (In Persion).

Zewdie, M.M., & Tesfa, C. (2023). GIS-based MCDM modeling for suitable dam site identification at Yeda watershed, Ethiopia. Arabian Journal of Geosciences, 16(6), 369.