



<https://sppl.ui.ac.ir/?lang=en>

Spatial Planning

E-ISSN: 2476-3357

Document Type: Research Paper

Vol. 14, Issue 3, No.54, Autumn 2024, pp. 115- 138

Received: 24/09/2023 Accepted: 29/07/2024

Assessment and Optimization of Hydrological Connectivity for Effective Management of Water Resources in the Samian Watershed

Zeinab Hazbavi ¹ *, Nazila Alaei ²

1- Associate professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
z.hazbavi@uma.ac.ir

2- Ph.D. student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
nazila.alaie96@gmail.com

Abstract

Water scarcity has become a critical issue in some regions. Accordingly, increasing attention has been given to the structural and functional connectivity of river networks as the primary source of surface water supply, while this can be a potential watershed-scale management solution. However, assessment of hydrological connectivity remains understudied in Iran. This pioneering research aimed to evaluate and optimize the hydrological connectivity in the Samian Watershed to enhance protection and management of water resources and improve hydrological performance. The results showed that the hydrological network in the Samian Watershed with a total length of 1254.73 km had 173 links. The Hydrological Connectivity (IIC), and Probability of Connectivity (PC) were calculated to be 0.983, 0.331, 5.66, and 1.151, respectively. The hydrological structure of the Samian Watershed in the plain areas exhibited weak connectivity. After optimization, the center of gravity of water circulation shifted southward at different connectivity levels. Increasing the optimization level up to Level 4 resulted in an improvement in the hydrological connectivity indices within the Samian Watershed. While the overall connectivity showed a sudden increase after the 4th optimization level, the IIC increased but then

*Corresponding Author

Hazbavi, Z., & Alaei, N. (2024). Assessment and Optimization of Hydrological Connectivity Aiming at Water Resources Management in the Samian Watershed. *Spatial Planning*, 14 (3), 115 - 138 .

2476-3357 © The Author(s).

Published by University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/sppl.2024.139234.1749

decreased beyond Level 4. Therefore, it is recommended to optimize the hydrological connectivity in the Samian Watershed up to Level 4 for effective management of water resources.

Keywords: Spatial Analysis, Minimum Cumulative Resistance (MCR), River Network Structure, Connectivity Index, Water Resource.

Introduction

River networks are formed over long periods through the interplay of topographic, geological, hydrological, and erosional processes. However, human interventions, particularly in recent decades, have significantly altered these natural river systems. Industrialization and the growing water demands of human societies, especially in developing countries, have led to an increase in ecological disturbances, such as dam construction, river water extraction, inter-basin water transfer, and channel modification. These intense human activities have caused the deterioration of water ecosystem structure and function, exacerbating water scarcity at local, regional, national, and global levels. Considering the effects of climate change on intensifying the water crisis, various researchers and organizations have emphasized the need to restore river networks and ensure the availability of surface water resources at the watershed scale. Hydrological connectivity at the watershed level refers to the longitudinal transfer of water, sediment, pollutants, and aquatic organisms from the upstream to the downstream areas, which is related to the watershed convergence process. Evaluating the level of hydrological connectivity is crucial for increasing managers and experts' knowledge and understanding of the spatial heterogeneity in hydrodynamic and geomorphological processes, thereby promoting sustainable watershed management and conservation. Against this backdrop, the present research was conducted to investigate the structural hydrological connectivity and its optimization with the aim of river restoration in the Samian Watershed.

Materials and Methods

The study area, the Samian Watershed, covers an area of 4236 km², representing 24% of the total area of Ardabil Province. This watershed includes 3 main rivers (Qarasu, Qori Chai, and Neor), each with several branches. The maximum and minimum altitudes are 4788 and 1200 m, respectively, with an average slope of 16.49%. The average annual rainfall in the region is estimated to be 351.52 mm. The assessment and optimization of the structural hydrological connectivity in the Samian Watershed were based on remote sensing, geographic information systems, graph theory, and binary theory. After constructing the hydrological network of the Samian Watershed, several connectivity indices were calculated to capture the internal complexity of the water flow transfer path network:

1. **Branching Index (BI):** Calculated to represent the degree of branching in the river network

2. **Connectivity Index (CI):** Calculated to represent the overall connectivity of the transmission path network

3. **Index of Integration of Connectivity (IIC):** Extracted based on binary theory using Conefor Sensinode 2.6 software to represent the overall connectivity of the transmission path network

4. **Probability of Connectivity (PC):** Also derived from binary theory to indicate the overall connectivity of the transmission path network

The cost of water connection resistance was determined based on topographical, hydrological, and anthropogenic factors. 5 optimization levels were then defined according to the priority of optimization. The migration of the gravity center model was obtained using the mean center tool in ArcMap 10.8. Discrete water bodies were selected as optimization targets and the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model was used to determine the optimal connection paths with the least obstacles to hydrological circulation. By combining ecological and geomorphological concepts,

the optimization objectives were linked to the existing water systems to improve the overall hydrological connectivity in the Samian Watershed.

Research Findings

Analysis of the water areas in the Samian Watershed revealed that the general flow direction was from the northwest to the east, southeast, and southwest. The land surface in the southeast was relatively uneven and the water network was distributed accordingly. Water zones were mainly spread in the center of the watershed. Water resources in the Samian Watershed had been developed due to cultivation and urban development, which had led to a significant risk of excessive use and unequal distribution of water resources across different temporal and spatial scales. The results showed that the hydrological network of the river had a total length of 1254.73 km with 173 links and 176 nodes. The calculated connectivity indices were as follows:

RR $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}$ (): 33333

33 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n i_{ij}$ (γ): 11111

3. IIC: 5.66


4. PC: 1.151

The hydrological structure of the Samian Watershed in the plain areas exhibited weak connectivity. After optimization, the migration of the center of gravity of water circulation shifted to the south. The presence of independent water zones was observed in areas with relatively low slopes compared to their surroundings. 7 optimization objectives were considered at each level to increase the connectivity between the independent water zones. At Optimization Level 2, 14 nodes and 14 edges were added to the river network. By increasing the optimization level to 4, the hydrological connectivity indices in the Samian Watershed also increased. The overall connectivity showed a sudden increase after 4 levels of optimization, following an incremental trend. In contrast, the IIC increased but experienced a decreasing trend after Level 4. Therefore, it is appropriate to optimize the hydrological connectivity in the Samian Watershed up to Level 4.

Discussion of Results & Conclusion

Results of the assessment and optimization of hydrological connectivity are significant for the protection of vulnerable and discrete water bodies in watersheds and improvement of ecological processes in these water bodies. In this research, a framework was developed to assess and optimize the connectivity of natural and artificial hydrological structures at the watershed scale using graph and binary theories. Spatial analysis of cost distance and center of gravity in the watershed was also conducted across 5 optimization levels. The difference in slope in the region had led to the creation of independent water zones. These independent water zones were located separately from the main river network and, as a result, contributed little to the hydrological cycle and energy transfer in the watershed, making them more fragile. To protect these water zones from destruction and disappearance and improve the overall ecological function of the water system, they had to be integrated into the hydrological connection pattern. The analysis showed that each hydrological connectivity index exhibited an increasing trend with increasing optimization level. It could be concluded that up to Optimization Level 4, the hydrological structural connectivity indices tended to increase with the increase of optimization level. Hydrological connectivity was necessary at the first optimization level in the Samian Watershed river and the third optimization level could be a more economical and appropriate choice. The numbers of corresponding edges and nodes for small areas, such as agricultural watersheds, can be considered as effective factors in the results. Each identified natural hydraulic connection path can be managed. Therefore, the results of the current research emphasize the necessity of watershed planning and management by considering the changes in hydrological connectivity caused by structural changes in the river network.

ارزیابی و بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی با هدف مدیریت منابع آب در حوزه آبخیز سامیان

زینب حزباوی* ، دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
z.hazbavi@uma.ac.ir
نازیلا علائی، دانشجوی دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
nazila.alai96@gmail.com

چکیده

کمبود منابع آب در برخی از استان‌ها به یک بحران تبدیل شده است. بر همین اساس، به‌تازگی توجه ویژه‌ای به اتصال ساختاری و عملکردی شبکه‌های رودخانه و منبع اصلی تأمین آب (به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های مدیریتی در مقیاس حوزه آبخیز) شده است. با وجود این، به اتصال هیدرولوژیکی در ایران هنوز به‌طور کافی توجه نشده است؛ بنابراین پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی در شبکه رودخانه حوزه آبخیز سامیان برای حفاظت و مدیریت بهتر منابع آب و بهبود عملکرد هیدرولوژیکی انجام شد. نتایج نشان داد که شبکه هیدرولوژیکی رودخانه با طول کلی ۱۲۵۴/۷۳ کیلومتر ۱۷۳ یال و ۱۷۶ گره دارد. همچنین، نسبت یال به گره (β)، اتصال گره به یال (γ)، شاخص یکپارچگی اتصال (IIC) و سنجه احتمال پیوستگی (PC) به ترتیب برابر با ۰/۹۸۳، ۰/۳۳۱، ۵/۶۶ و ۱/۱۵۱ به دست آمد. علاوه بر این، ساختار هیدرولوژیکی در مناطق دشتی به‌صورت ضعیف ارزیابی شد. در این میان، مهاجرت مرکز ثقل ثقل گردش آب پس از بهینه‌سازی برای سطح‌های مختلف اتصال هیدرولوژیکی به جنوب حوزه آبخیز انتقال پیدا کرده است. نتایج حاصل از محاسبه نسبت یال به گره (β) و اتصال گره لبه (γ) نشان داد که پیچیدگی داخلی شبکه مسیر با افزایش سطح بهینه‌سازی افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش سطح بهینه‌سازی از ۱ تا ۴ باعث افزایش تعداد مسیرهای اتصال آب در حوزه آبخیز، پیچیدگی شبکه رودخانه و شاخص پیوستگی هیدرولوژیکی (IIC) شده است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود اتصال هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز سامیان تا سطح ۴ بهینه‌سازی شود. **واژه‌های کلیدی:** تحلیل مکانی، حداقل مقاومت تجمعی (MCR)، ساختار شبکه رودخانه، شاخص اتصال، منابع آب.

*نویسنده مسئول

حزباوی، زینب، علائی، نازیلا. (۱۴۰۳). ارزیابی و بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی با هدف مدیریت منابع آب در حوزه آبخیز سامیان برنامه‌ریزی فضایی، ۱۴ (۳)، ۱۱۵-۱۳۸.



مقدمه

شبکه رودخانه‌های طبیعی در طی دوره‌های زمانی طولانی با تعامل عوامل توپوگرافی، زمین‌ریخت‌شناسی، حرکت آب و فرسایش بستر شکل می‌گیرد؛ اما دخالت‌های انسانی به‌طور چشمگیری شبکه رودخانه‌ها را به‌ویژه در دهه‌های اخیر تغییر داده است (Xingyuan et al., 2023, P. 6). از زمان صنعتی شدن میزان مصرف منابع آب ازسوی جوامع بشری به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است؛ به‌طوری که تعداد و شدت اختلالات بوم‌شناختی در پهنه‌های طبیعی آب از جمله سدسازی، پمپاژ رودخانه، انتقال آب بین حوضه‌ای و کانال‌سازی درحال افزایش است (Tian et al., 2022, P. 4). به‌نحوی که فعالیت‌های شدید انسانی موجب تخریب ساختار و عملکرد بوم‌سازگان‌های آبی و تشدید کمبود آب در سطح‌های مختلف محلی، منطقه‌ای، ملی و جهانی شده است (Eros et al., 2011, P. 185). بر همین اساس و باتوجه به اثرهای ناشی از تغییر اقلیم در تشدید بحران آب محققان مختلف و سازمان‌های ملی و بین‌المللی به لزوم احیا شبکه‌های رودخانه و تأمین منابع آب سطحی درمقیاس حوزه آبخیز تأکید کرده‌اند (Rasoulzadeh et al., 2023, P. 4).

یکی از معیارهای کمی در ارزیابی شدت تخریب منابع آبی درمقیاس حوزه آبخیز، اتصال هیدرولوژیکی رودخانه است که به‌عنوان ابزار مهمی برای رسیدگی به مسائل مربوط به عملکرد سیستمی، فرآیندهای زیستی-شیمیایی و تخصیص آب در نظر گرفته می‌شود (Tian et al., 2022, P. 5). چگونگی توسعه جریان آب در شرایط مختلف محیطی با مفهوم اتصال هیدرولوژیکی قابل تبیین است و مدیران را قادر می‌کند تا تعیین کنند که چه زمانی، کجا و چگونه می‌توان در فرآیندهای هیدرولوژیکی حوزه آبخیز با موفقیت مداخله کرد. بر همین اساس، ارزیابی اتصال هیدرولوژیکی یک ابزار مهم برای مدیریت منابع آب و یک مبنای نظری اساسی برای برنامه‌ریزی و مهندسی بوم‌شناختی در نظر گرفته می‌شود (Li et al., 2020, P. 2826).

از آنجایی که ارتباط بهم پیوسته‌ای بین مواد، انرژی و فرآیندها در یک رودخانه وجود دارد، اتصال شبکه رودخانه معیاری مهم برای ارزیابی سلامت رودخانه است (Rinaldo et al., 2018, P. 28; Xingyuan et al., 2023, P. 5). یک شبکه رودخانه با اتصال ساختاری و عملکردی مناسب، وضعیت متعادلی از نظر تبادل زیستی، انرژی و چرخه مواد مغذی دارد. بر همین اساس، چنین رودخانه‌ای می‌تواند ثبات نسبی را در یک محیط زیست درحال تغییر و تخریب حفظ کند (Reid et al., 2016, P. 140). درحقیقت، پویایی شبکه رودخانه منعکس‌کننده ناهمگونی مکانی-زمانی فرآیندهای هیدرولوژیکی و پیچیدگی زیستی آن در نتیجه تعاملات بین جریان آب و وضعیت فیزیکی است (Hermoso et al., 2011, P. 59; Xingyuan et al., 2023, P. 62).

مرور منابع نشان می‌دهد که شاخص‌ها و روش‌های مختلفی در زمینه ارزیابی اتصال هیدرولوژیکی ارائه شده است؛ برای نمونه، تأثیر لکه‌های زیستگاه در اتصال شبکه با استفاده از شاخص‌های توپولوژیکی در اسپانیا بررسی شد. نتایج نشان داد که تحلیل انتگرال اتصال (IIC)، احتمال اتصال (PC) و مرکزیت بین‌المللی (BC) در حفظ اتصال شبکه‌های زیستگاهی نقش مؤثری دارد (Baranyi et al., 2011). در ادامه، تغییرات سالانه و فصلی اتصال هیدرولوژیکی با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 بین سال‌های 2013 تا 2019 در شمال چین ارزیابی شد. نتایج نشان داد که

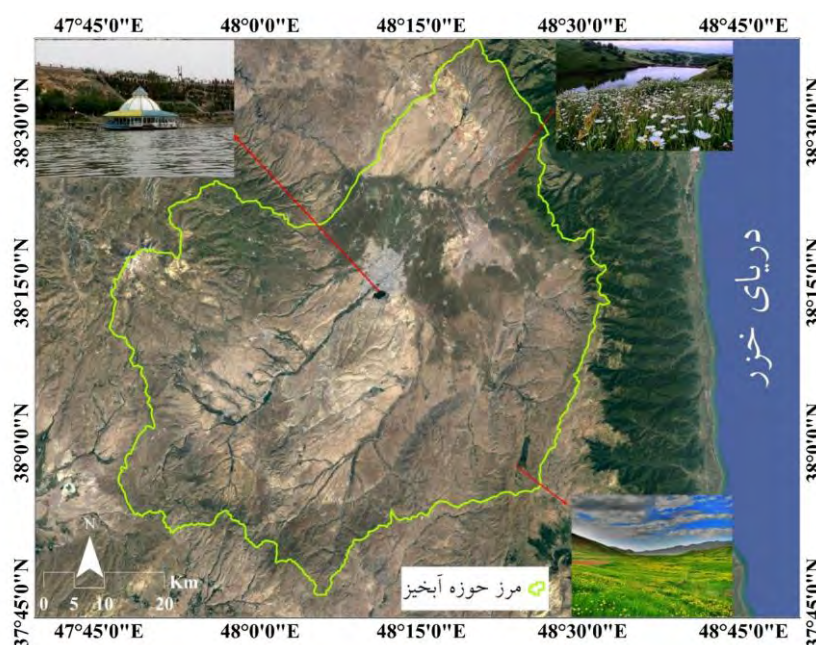
بازتاب باند مادون قرمز نزدیک دقیق‌ترین شاخص برای طبقه‌بندی آب با دقت بیش از ۹۸ درصد بود. شیب روابط خطی بین اتصال هیدرولوژیکی و سطح آب نیز نشان داد که اتصال هیدرولوژیکی با افزایش سطح آب بیشتر می‌شود؛ در نتیجه میانگین ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۸۸ به دست آمد (Li et al., 2021). همچنین، با ارزیابی و بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی براساس نظریهٔ گراف درحوضهٔ رودخانهٔ Dongliao چین این نتیجه حاصل شد که با افزایش سطح بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی، شاخص موران جهانی افزایش و سپس کاهش یافته است. همچنین، اثرهای اتصال هیدرولوژیکی در سطح‌های مختلف بهینه‌سازی، متفاوت به دست آمد (Tian et al., 2022). به‌تازگی، تغییرات اتصال هیدروگرافیکی حوضهٔ رودخانهٔ زرد طی دورهٔ زمانی 2000-2020 با استفاده از شاخص اصلاح‌شدهٔ تفاوت عادی آب (MNDWI) (Modified Normalized Difference Water Index) بررسی شده است. نتایج نشان داد که زمین‌های کشاورزی بیش از ۵۰ درصد از مساحت را پوشش می‌دهد و فعالیت‌های انسانی تأثیر زیادی بر تغییرات اتصال هیدروگرافیکی داشته است (Li et al., 2023). در ادامه، ساختار شبکه و پایداری اتصال رودخانه در منطقهٔ Taihu بررسی و مشخص شد که درجهٔ گره شبکهٔ رودخانه به‌طور متوسط برابر با ۲/۹ بوده و دراصل اتصال ضعیف داشته است. در این میان، تخریب گره‌های مهم باعث کاهش شدید پایداری شبکه شده است. این تأثیر در مناطق مختلف، متفاوت به دست آمد. همچنین، شهرنشینی تأثیر منفی بر ویژگی‌های شبکهٔ رودخانه داشته است (Yu et al., 2023). تنها مطالعهٔ یافت‌شده در ایران نشان از اتصال هیدرولوژیکی حوزهٔ آبخیز قره‌سو با استفاده از شبکهٔ منبع رواناب و شبکهٔ جریان دارد که نتایج به‌دست‌آمدهٔ آن منجر به شناسایی مناطق با پتانسیل اختلال در آینده شده است (Jahanishakib et al., 2021).

جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نتایج ارزیابی اتصال هیدرولوژیکی منطقه‌محور بوده است و تمامی آن مطالعات محدودیت‌های منطقه‌ای داشته است (Tian et al., 2022, P. 5; Borselli et al., 2008, P. 269). همچنین، محققان در عمدهٔ مطالعات اخیر برای ارائهٔ راه‌حل ساده در زمینهٔ ارزیابی جنبه‌های متعدد اتصال سیمای سرزمین و بوم‌شناسی حفاظتی بر کارایی زیاد تئوری گراف تأکید دارند (Ricotta et al., 2000, P. 90; Eros Keitt et al., 1997). بر همین اساس و با توجه به کمبود مطالعات در زمینهٔ اتصال هیدرولوژیکی پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی در حوزهٔ آبخیز سامیان (واقع در مرکز استان اردبیل) و با استفاده از تئوری گراف برنامه‌ریزی شده است. نتایج این مطالعه به‌طور نظری و عملیاتی برای بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی در مناطق با کمبود منابع آب حائز اهمیت است. ارزیابی و بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی برای حفاظت منطقه‌ای از بوم‌سازگان‌های آبی، مدیریت تقاضا، تخصیص منابع آب و طراحی پروژه‌های بوم‌شناختی نیز ضروری است.

منطقهٔ مطالعه‌شده

حوزهٔ آبخیز سامیان (شکل ۱) واقع در استان اردبیل مساحتی بالغ بر ۴۲۳۶ کیلومتر مربع را پوشش داده است. این منطقه ۲۴ درصد از کل مساحت استان اردبیل را تشکیل می‌دهد. مختصات محدودهٔ جغرافیایی بین $47^{\circ} 42'$ تا $48^{\circ} 28'$

طول شرقی و $40^{\circ} 37'$ تا $20^{\circ} 38'$ عرض شمالی قرار دارد. این حوزه آبخیز شامل سه رودخانه اصلی (قره‌سو، قوری‌چای و ثور) است که هر کدام شاخه‌های متعددی دارد (مصطفی‌زاده و مهری، ۱۳۹۷، ص. ۳۲). بیشترین و کمترین ارتفاع ۴۷۸۸ و ۱۲۰۰ متر و میانگین شیب منطقه برابر با ۱۶/۴۹ است. قسمت‌های شرقی و غربی حوزه آبخیز بیشترین شیب را دارند. همچنین، حوزه آبخیز سامیان قسمتی از جنگل فندقلو را به خود اختصاص داده است. میانگین بارندگی در منطقه برابر با ۳۵۱/۵۲ میلی‌متر برآورد شده است. علاوه بر این، در این حوزه حدود ۸ طبقه کاربری (کاربری زراعت دیم ۳۶/۰۵ درصد، زراعت آبی ۲۵/۶۷ درصد، مرتع ۳۰/۵۷ درصد، جنگل ۱/۷۱ درصد، باغ ۱/۳۰ درصد، برونزد سنگی ۱/۳۲ درصد و مسکونی ۲/۵۳ درصد) شناسایی شده است. صحت کلی و ضریب کاپای نقشه کاربری اراضی به ترتیب برابر با ۸۹/۸۱ و ۸۸/۱۸ درصد به دست آمده است (مرادزاده و همکاران، ۱۴۰۱، ص. ۱۲۰؛ حزباوی و همکاران، ۱۴۰۱، ص. ۸۲؛ Moradzadeh et al., 2024, P. 3).



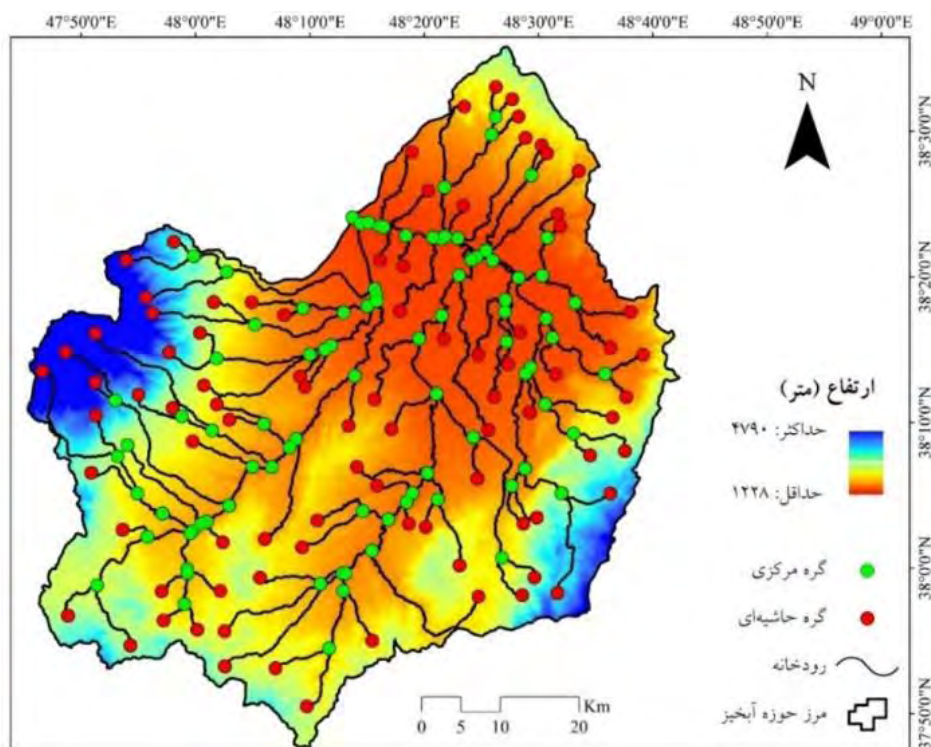
شکل ۱: نمایی از حوزه آبخیز سامیان (منبع: نگارندگان)

Figure 1: A view of the Samian watershed

ارزیابی اتصال هیدرولوژیکی

در کاربرد نظریه گراف سیمای سرزمین به صورت گراف مدل‌سازی می‌شود. مجموعه‌ای از گره‌هایی با یال‌ها بهم متصل می‌شود که در آن پیوند بین هر دو گره نشان‌دهنده ارتباط عملکردی بین آنهاست. این رویکرد به ویژه در تعیین لکه‌های زیستگاه یا مجموعه‌های کوچکی از لکه‌ها با هدف حفاظت و مدیریت پایدار اهمیت زیادی دارد (Bunn et al., 2000, P. 266; Jordán et al., 2003, P. 84; Bodin, 2009, P. 2728; Saura & Pascual-Hortal, 2007, P. 93a). تئوری گراف امکان تبدیل سامانه‌های سیمای سرزمین را به تصاویر رقومی فراهم می‌کند؛ بدین صورت که در آن گره‌ها و یال‌ها شناسایی می‌شود و مجموعه‌ای از یال‌ها وجود روابط یا تعاملات بین عناصر را نشان می‌دهد (Tian et al., 2022, P. 8). بر همین اساس، ابتدا شبکه هیدرولوژیکی برای تعیین موقعیت جغرافیایی پهنه‌های آبی و اتصال

هیدرولوژیکی تهیه و سپس رودخانه‌ها به‌عنوان یال‌هایی در نظر گرفته و در نهایت، محل اتصال رودخانه‌ها به‌عنوان گره تعیین شد. همچنین، آبراهه‌های انتهایی به‌عنوان گره حاشیه و آبراهه‌هایی که از اطراف به یکدیگر اتصال داشتند به‌عنوان گره مرکزی مشخص شدند. در شکل (۲) ساختار اتصالات هیدرولوژیکی در شبکه رودخانه حوزه آبخیز سامیان نمایش داده شده است.



شکل ۲: ساختار اتصالات هیدرولوژیکی در شبکه رودخانه حوزه آبخیز سامیان (منبع: نگارندگان)

Figure 2: The structure of hydrological connections in the river network of Samian watershed

پس از ساخت شبکه هیدرولوژیکی برای نشان دادن پیچیدگی داخلی شبکه مسیر انتقال جریان آب نسبت یال به گره (β) و اتصال گره لبه (γ) محاسبه شد. نسبت یال به گره (β) میانگین تعداد زنجیره‌های رودخانه در هر گره در شبکه اتصال و نشان‌دهنده میزان پیچیدگی ارتباط بین هر گره و سیستم آبی اطراف است که طبق رابطه (۱) محاسبه شد (Tian et al., 2022, P. 6)

$$\beta = \frac{m}{n} \quad [1]$$

که در آن β نسبت یال به گره رودخانه بوده و از صفر تا سه متغیر است. m تعداد یال‌ها و n تعداد گره‌ها در کل شبکه رودخانه است. مقدار بیشتر β نشان‌دهنده تعداد بیشتری از مسیرهای انتقال آب متصل به آن گره است که پیچیدگی داخلی شبکه هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. اتصال گره لبه (γ) نسبت تعداد واقعی لبه‌های رودخانه متصل به بیشترین تعداد لبه‌های رودخانه متصل است (رابطه ۲) که نشان‌دهنده قدرت اتصال متقابل بین زنجیره‌های رودخانه در شبکه رودخانه بوده است و پیچیدگی شبکه را منعکس می‌کند (Tian et al., 2022, P. 7).

$$\gamma = \frac{m}{[3 \times (n - 2)]} \quad [۲]$$

γ درج g پیوند واقعی بوده که از صفر تا یک متغیر است. m و n نیز بیانگر تعداد یال‌ها و تعداد گره‌ها در کل شبکه است که در رابطه (۱) نیز استفاده شده‌اند. وقتی $\gamma = 0$ باشد، نشان‌دهنده این است که هیچ پیوندی در شبکه وجود ندارد و فقط نقاط جدا از هم وجود دارد. هنگامی که $\gamma = 1$ باشد، بیانگر آن است که هر گره در شبکه به تمام گره‌های دیگر مرتبط است.

براساس تئوری دودویی از شاخص یکپارچگی اتصال ((Index of integration of connectivity (IIC)) و سنجه احتمال پیوستگی ((Probability of connectivity (PC)) برای نشان‌دادن اتصال کلی شبکه مسیر انتقال و ارزیابی اتصال هیدرولوژیکی حوزه آبخیز استفاده شد. IIC یکی از بهترین شاخص‌های شناخته‌شده برای تحلیل‌های پیوستگی است که می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۳) محاسبه کرد (Bodin, 2009, P. 2731).

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \times a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad [۳]$$

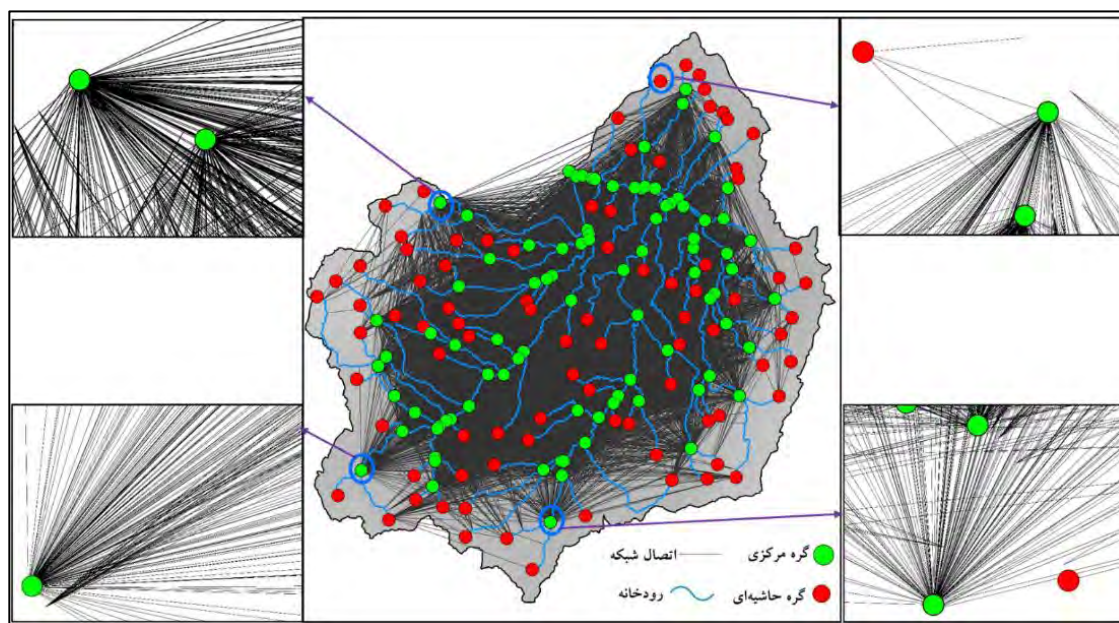
در این رابطه n تعداد کل لکه در سیمای سرزمین، a_i و a_j مساحت‌های لکه‌های i و j ، nl_{ij} تعداد کوتاه‌ترین مسیرهای ممکن بین لکه‌های i و j و A_L مساحت کل سیمای سرزمین است. مبنای این شاخص نظریه پیوستگی درون‌لکه‌ای است که در آن فضای درون لکه به‌عنوان فضایی پیوسته در نظر گرفته می‌شود. از میان سنجه‌ها IIC در تشخیص لکه‌های با اهمیت‌تر از نظر موقعیت توپولوژیک و نیز از نظر ارزش‌های درونی هر لکه موفق عمل کرده است. همچنین، قادر است پیوستگی درون‌لکه‌ای را در محاسبات لحاظ کند (Bodin, 2009, P. 2731).

سنجه PC به‌عنوان بهترین شاخص برای تحلیل نوع اتصال هیدرولوژیکی معرفی شده است (علائمی و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۲۳). این سنجه چندین ویژگی مرتبط با اتصالات هیدرولوژیکی را در مقایسه با سایر شاخص‌های موجود ارائه می‌دهد. همچنین، عملکرد IIC را بهبود می‌بخشد. سنجه PC را می‌توان با استفاده از رابطه (۴) محاسبه کرد (Saura & Pascual-Hortal, 2007).

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot p_{ij}^*}{A_L^2} \quad [۴]$$

در این رابطه n تعداد کل گره‌های زیستگاه در سیمای سرزمین است. a_i و a_j صفات گره‌های i و j هستند. A_L بیشترین ویژگی (مساحت) چشم‌انداز بوده و p_{ij}^* بیشترین احتمال پیوستگی تمام مسیرهای بین لکه‌های i و j را نشان می‌دهد.

تمام محاسبات شاخص انتگرال پیوستگی (IIC) و سنجه احتمال پیوستگی (PC) با استفاده از نرم‌افزار Conefor (CS 2.6) و مبتنی بر نتایج به‌دست‌آمده براساس تئوری گراف (شکل ۳) صورت پذیرفته است (Bodin, 2009, P. 2731). به‌طوری که اطلاعات حاصل از ابزار Conefor در نرم‌افزار Arc Map 10.8 با فرمت TEXT براساس مشخصات هر گره و یال‌های بین آنها به‌عنوان داده‌های اولیه وارد نرم‌افزار Conefor (CS 2.6) شده است.



شکل ۳: شماتیکی از بررسی اتصال شبکه رودخانه حوزه آبخیز سامیان (منبع: نگارندگان)

Figure 3: Schematic of the river network connectivity survey in the Samian watershed

بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی حوزه آبخیز

با تلفیق مفاهیم بوم‌شناسی و ژئومورفولوژیکی، پهنه‌های آبی گسسته که با سایر پهنه‌های آبی در اتصال نیستند به‌عنوان هدف بهینه‌سازی در الگوی اتصال هیدرولوژیکی استفاده شدند. با استخراج مسیرهای با کمترین موانع گردش در حوزه آبخیز، هدف‌های بهینه‌سازی به سامانه‌های آبی موجود برای بهبود اتصال هیدرولوژیکی حوضه پیوند داده شدند. هدف‌های بهینه‌سازی و مسیرهای اتصال سامانه‌های آبی موجود تحت تأثیر عوامل متعددی در حوضه قرار دارند (Dai et al., 2021, P. 5). عوامل هیدرولوژیکی شامل توزیع آب سطحی، عوامل توپوگرافی شامل زمین و ژئومورفولوژی، عوامل انسانی شامل کاربری زمین و ساخت و ساز مهندسی هیدرولیک است. با در نظر گرفتن این عوامل از مدل حداقل مقاومت تجمعی (MCR) (Minimum Cumulative Resistance) برای تعیین یک سطح مقاومت تجمعی و تحلیل گردش هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز استفاده شد. در همین راستا، مسیرهای اتصال بین پهنه‌های آبی منفرد و پهنه‌های پیوسته آبی موجود و نتایج بهینه‌الگوهای اتصال هیدرولوژیکی نیز به دست آمد (Tian et al., 2022, P. 8).

با استفاده از مدل MCR مسیرهای منبع (شبکه هیدرولوژیکی موجود) از طریق محاسبه سطح فاصله تخلیه تجمعی تا کمترین فاصله تخلیه تجمعی مورد هدف برای بهینه‌سازی شبکه هیدرولوژیکی تعیین شدند. طبق رابطه (۵) برای تعیین درجه انسداد جریان آب در حوزه آبخیز و محاسبه مسیر با کمترین انسداد، مدل MCR براساس تابع تحلیل مکانی در نرم‌افزار ArcMap 10.8 پیاده‌سازی شد (Tian et al., 2022, P. 8)

$$C_I = \sum D_i \times F_I \quad [5]$$

که در آن C_i هزینه تجمعی سلول شبکه نام به هدف بهینه‌سازی و بیانگر حداقل مقاومت تجمعی (MCR) در مسیر سلول شبکه در آن مکان به منبع است. D_i تعداد تجمعی پیکسل‌ها در مسیر یک سلول شبکه i در مکان معین تا هدف بهینه‌سازی با حداقل هزینه است. F_i هزینه تجمعی مقاومت یک سلول شبکه i در سطح بهینه‌سازی است. کلیه محاسبات MCR در نرم‌افزار ArcMap 10.8 و با استفاده از ابزار Cost Distance انجام شده است.

از سامانه‌های آبی موجود در حوزه آبخیز (از جمله رودخانه‌های فصلی) به عنوان منبع بهینه‌سازی شبکه آب برای ساخت مسیرهای اتصال پهنه آبی جدید استفاده شد. در این راستا، اتصال پهنه‌های آبی مستقل در حوزه آبخیز باعث بهبود اتصال هیدرولوژیکی، افزایش گردش سیستم آب و افزایش تعداد منابع آبی موجود می‌شود.

هزینه مقاومت اتصال آب (Cost of water connectivity resistance) در یک حوزه آبخیز براساس سه عامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی و انسانی تعیین شد. عوامل توپوگرافی و هیدرولوژی در ۹ سطح با وزن‌های مقاومت ۱ تا ۹ طبقه‌بندی شد. با کاهش شیب هزینه بیشتر می‌شود؛ زیرا در این حالت تجمع آب بیشتر می‌شود. برای همین به کمترین طبقه شیب ارزش ۹ داده می‌شود. همچنین، فعالیت‌های انسانی با استفاده از طبقات مختلف کاربری اراضی (باغ، پهنه آبی، برونزدگی، جنگل، زراعت آبی، زراعت دیم، مرتع و مسکونی) تبیین شد. وزن‌های اختصاص یافته به هر عامل در جدول (۱) ارائه شده است. در نهایت، سطح مقاومت وزنی اتصال آب به دست آمد.

جدول ۱: وزن مقاومت برای هر عامل

Table 1: Resistance weight for each factor

طبقه									عامل
تا ۱۸۲/۱۰	تا ۱۵۹/۳۴	تا ۱۳۶/۵۸	تا ۱۱۳/۸۲	تا ۹۱/۰۵	تا ۶۸/۲۹	تا ۴۵/۵۳	تا ۲۲/۷۷	تا ۰	توپوگرافی
۲۰۴/۶۸	۱۸۲/۰۹	۱۵۹/۳۳	۱۳۶/۵۷	۱۱۳/۸۱	۹۱/۰۴	۶۸/۲۸	۴۵/۵۲	۲۲/۷۶	
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	
تا ۰/۶۷	تا ۰/۲۰	تا -۰/۱۲	تا -۰/۲۹	تا -۰/۴۰	تا -۰/۴۹	تا -۰/۵۵	تا -۰/۶۲	تا -۰/۶۱	هیدرولوژیکی
۱	۰/۶۶	۰/۱۹	-۰/۱۳	-۰/۳۰	-۰/۴۱	-۰/۵۰	-۰/۵۶	-۰/۶۱	
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	
-	پهنه آبی	مرتع	زراعت دیم	زراعت آبی	جنگل	باغ	برونزدگی	مسکونی	انسانی
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	

منبع: Tian et al., 2022, P. 7

مدل MCR با در نظر گرفتن متغیر شیب برای عامل توپوگرافی، متغیر شاخص اصلاح شده تفاوت عادی آب (Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)) برای عامل هیدرولوژیکی و کاربری اراضی برای عامل انسانی تهیه شد. در شاخص MNDWI از ترکیب NIR-SWIR (مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه) برای افزایش حضور آب در برگ‌های گیاهان استفاده می‌شود. مقادیر مثبت MNDWI برای ویژگی‌های آبی و مقادیر منفی (صفر) برای خاک و پوشش گیاهی زمینی در نظر گرفته شده است. مقادیر MNDWI برای پهنه‌های آبی T بزرگ‌تر از ۰/۵ است. پوشش گیاهی با مقادیر بسیار کمتری از MNDWI است که باعث می‌شود

پوشش گیاهی از پهنه‌های آبی راحت‌تر تشخیص داده شود. شاخص MNDWI با استفاده از رابطه (۶) برای داده‌های لندست ۸ در تاریخ 2021/08/10 محاسبه شد. بدین منظور از داده‌های مربوط به سنجنده OLI به دست آمده از پایگاه اطلاعاتی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) استفاده شد.

$$\text{MNDWI} = (\text{Band 3} - \text{Band 5}) / (\text{Band 3} + \text{Band 5}) \quad [6]$$

در پژوهش حاضر نقشه شیب از لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر تهیه شد. همچنین، نقشه کاربری اراضی / پوشش اراضی (LULC) از روش طبقه‌بندی نظارت شده (مهدویان و همکاران، ۱۴۰۱، ص. ۲۸) و با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ مورخ 2021/08/10 مربوط به سنجنده OLI تهیه شده است. در این مطالعه برای ارزیابی صحت با استفاده از تصاویر Google Earth صحت کلی و ضریب کاپا (به ترتیب برابر با ۸۹/۸۱ و ۸۸/۱۸ درصد) محاسبه شد (مرادزاده و همکاران، ۱۴۰۱، ص. ۱۲۰).

در این مطالعه از پهنه‌های آبی مستقل موجود در حوزه آبخیز به عنوان هدف‌های اتصال بهینه شبکه هیدرولوژیکی استفاده شد؛ بنابراین پهنه‌های آبی مستقل در کل حوزه آبخیز غربال شد. پهنه‌های آبی با سطح آب بیش از ۱۰۰۰۰ متر مربع انتخاب و براساس اهمیت عملکردی بوم‌شناسی آب به هدف‌های مختلف درجه‌بندی شد. در نهایت، ۵ سطح مطابق با جدول (۲) از هدف‌های بهینه‌سازی به دست آمد.

جدول ۲: درجه‌بندی هدف بهینه‌سازی

Table 2: Grading of the optimization objective

سطح اولویت	مساحت سطح آب (برابر یا بیش از ۱۰۰۰۰ متر مربع)	تعداد آبراهه (یال)
۱	۶۰۰-۲۰۰	۷
۲	۲۰۰-۵۰	۱۴
۳	۵۰-۲۰	۲۴
۴	۲۰-۵	۶۲
۵	۱-۵	۱۲۳

منبع: Tian et al., 2022, P. 8

با استفاده از شبکه آب موجود در حوزه آبخیز به عنوان منبع، سلول شبکه آن برابر با ۱ تعریف شد؛ یعنی حداقل مقاومت در برابر جریان با منبع و مقاومت در برابر جریان از طریق شبکه‌های دیگر در حوزه آبخیز مرتبط و با فاصله بین شبکه، منبع و هزینه مقاومت خود شبکه بوده است. در نهایت، مسیری با کمترین انسداد بین منبع و هدف به دست آمد. نتیجه بهینه‌سازی با قراردادن شبکه آب موجود در مسیر اتصال هدف بهینه‌شده به دست آمد (Tian et al., 2022, P. 12). باتوجه به اولویت بهینه‌سازی، فاصله تجمعی صرف‌شده در هر سطح از بهینه‌سازی با در نظر گرفتن نتایج سطح قبلی بهینه‌سازی به عنوان محل منبع به دست آمد؛ برای مثال، منبع سطح دوم محاسبه بهینه‌سازی، مسیر اتصال بهینه سیستم آب موجود در حوزه آبخیز بوده که بر سطح اول هدف‌های بهینه‌سازی استوار است.

مدل مهاجرت مرکز ثقل (Barycenter Migration Model)

مدل مهاجرت مرکز ثقل مفیدترین معیار کمی برای توصیف توزیع مکانی اشیا جغرافیایی است که می‌تواند پویایی تغییرات مکانی را منعکس کند (Wang et al., 2019, P. 3). یک مرکز ثقل مکانی مسطح برای مقاومت اتصال هیدرولوژیکی با استفاده از ابزار مرکز میانگین (mean center) در ArcMap 10.8 به‌دست آمد. مرکز ثقل مسطح می‌تواند روندهای مکانی و زمانی تغییرات در اشیا جغرافیایی منطقه‌ای را تجسم کند. در این پژوهش مرکز ثقل سطح مقاومت در هر سطح بهینه‌سازی برای سطح‌های مختلف بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی به دست آمد. در ادامه، روند تکاملی مکانی مقاومت نسبت به اتصال هیدرولوژیکی نیز تحلیل شده است (رابطه‌های ۶ و ۷).

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^p (C_{ti} X_i)}{\sum_{i=1}^p C_{ti}} \quad [۶]$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^p (C_{ti} Y_i)}{\sum_{i=1}^p C_{ti}} \quad [۷]$$

X_t و Y_t بیانگر طول و عرض کلاس معین از مرکزهای مدنظر هستند. در فضای کلاس t : C_{ti} مساحت موانع اتصال ام در سطح t : X_t و Y_t به ترتیب طول و عرض لکه را نشان می‌دهند. همچنین، p تعداد کل لکه‌ها در یک کلاس معین از فضا در سال t است. مسافت مرکز تغییر ثقل مقاومت اتصال هیدرولوژیکی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد

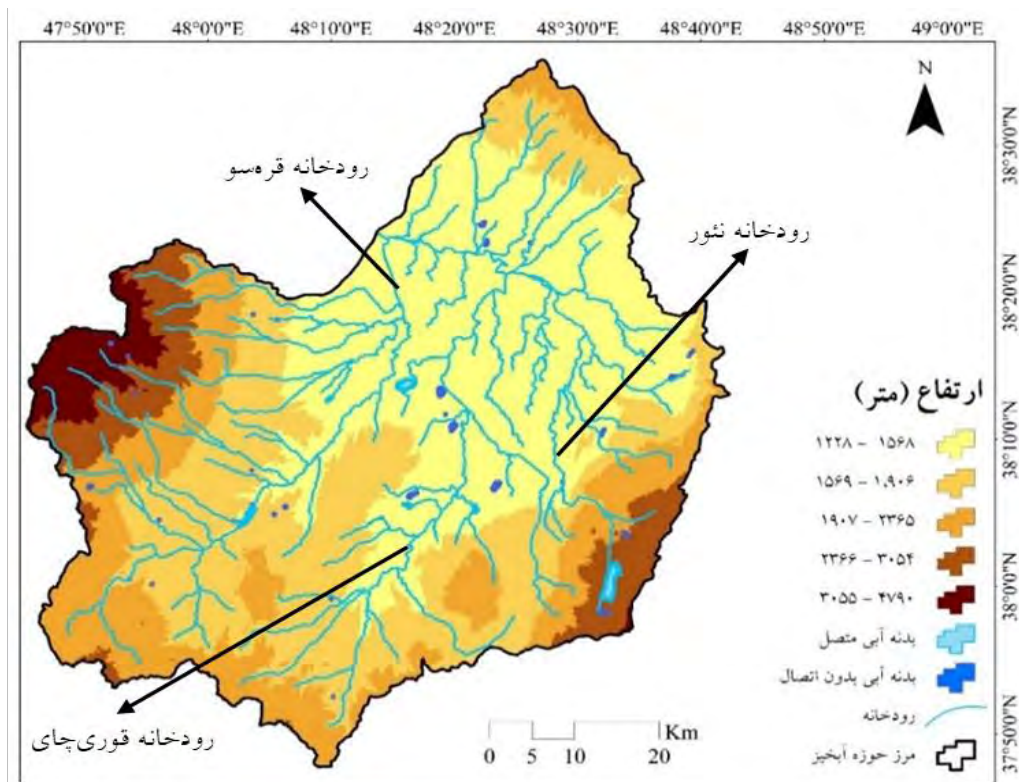
$$D_{i-1} = C \times \sqrt{(X'_t - X_t)^2 - (Y'_t - Y_t)^2} \quad [۸]$$

که در آن D فاصله مرکز ثقل از سطح بهینه‌سازی t تا t' است. C تبدیل واحدهای مختصات جغرافیایی به مسافت (km) با مقدار ۱۱۱/۱۱۱ است. X_t و Y_t به ترتیب طول و عرض جغرافیایی را در نقطه نمونه‌برداری در سطح بهینه‌سازی t نشان می‌دهند. X'_t و Y'_t به ترتیب طول و عرض جغرافیایی را در نقطه نمونه‌برداری در سطح بهینه‌سازی X' نشان می‌دهند.

یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل

نتایج حاصل از ارزیابی اتصال هیدرولوژیکی

توزیع پهنه‌های آبی موجود در حوزه آبخیز سامیان (شکل ۴) نشان می‌دهد که جهت کلی جریان از شمال غربی به شرق، جنوب شرقی و جنوب غربی است. سطح زمین در جنوب شرقی تا حدودی ناهموار بوده و شبکه آبی بر این اساس توزیع شده است. پهنه‌های آبی بیشتر در مرکز حوزه آبخیز گسترش دارند. علاوه بر برخی پهنه‌های آب سطحی بزرگ مانند دریاچه شورابیل که جزء سامانه‌های آبی متصل هستند، رودخانه بزرگ قره‌سو به طول ۸۱/۵۴ کیلومتر در داخل حوزه آبخیز سامیان قرار دارد. در حالت کلی، شبکه بوم‌شناختی آب حوزه آبخیز سامیان از سه رودخانه اصلی قره‌سو، نئور و قوری‌چای به ترتیب با طول ۸۱/۵۴، ۵۸/۰۱ و ۵۷/۳۷ کیلومتر تشکیل شده است. منابع آبی در حوزه آبخیز سامیان به دلیل کشت و زرع و توسعه شهری توسعه یافته است. بر همین اساس، ریسک چشمگیری از نظر استفاده بیش از حد و توزیع نابرابر منابع آب در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی وجود دارد که با نتایج راثی‌نظامی (۱۴۰۲) مطابقت دارد. شکل (۵) شیب و پهنه‌های آبی مستقل را در حوزه آبخیز سامیان نشان می‌دهد.

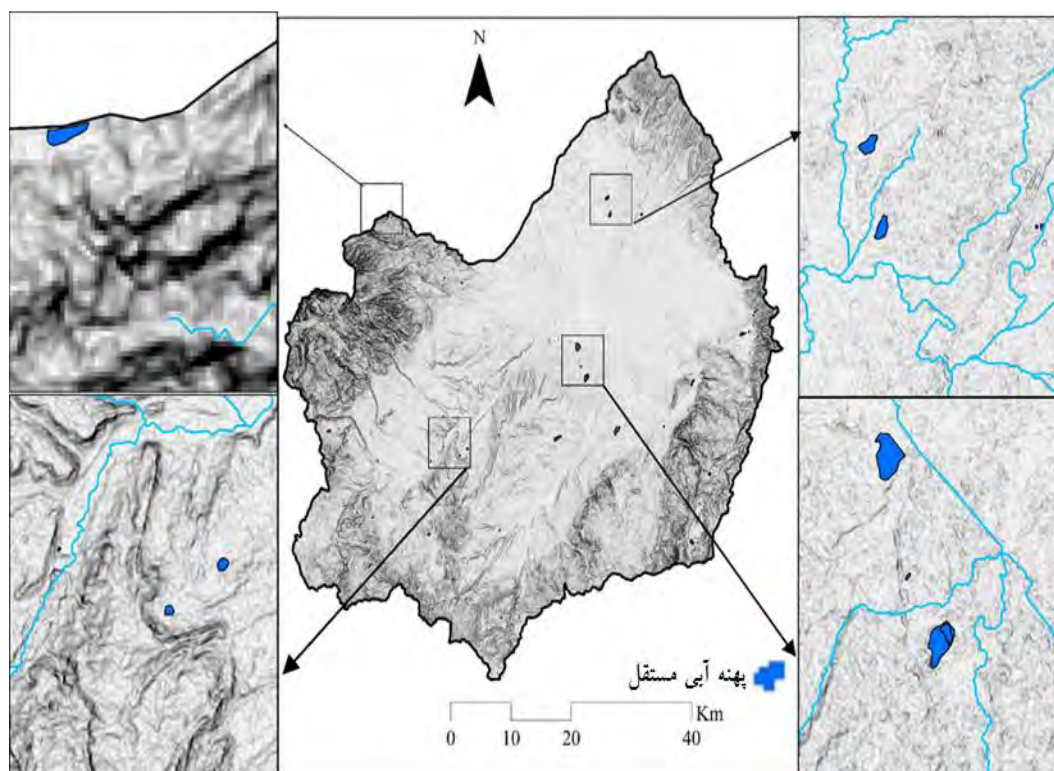


شکل ۴: سامانه‌های آبی موجود در رودخانه حوزه آبخیز سامیان (منبع: نگارندگان)

Figure 4: Water systems in the Samian watershed

اختلاف شیب در منطقه منجر به ایجاد پهنه‌های آبی مستقل شده است. از آنجایی که پهنه‌های آبی مستقل به‌طور جداگانه از شبکه رودخانه اصلی قرار گرفته‌اند، مشارکت کمی در چرخه هیدرولوژیکی و انتقال انرژی در حوزه آبخیز دارند و شکننده‌تر هستند. به همین دلیل، برای محافظت از آنها در برابر تخریب و ناپدیدشدن و بهبود عملکرد کلی بوم‌شناختی آب باید آنها را در الگوی اتصال هیدرولوژیکی حوزه آبخیز یکپارچه کرد که این موضوع یافته‌های سایر محققان (Tian et al., 2022) را تأیید می‌کند.

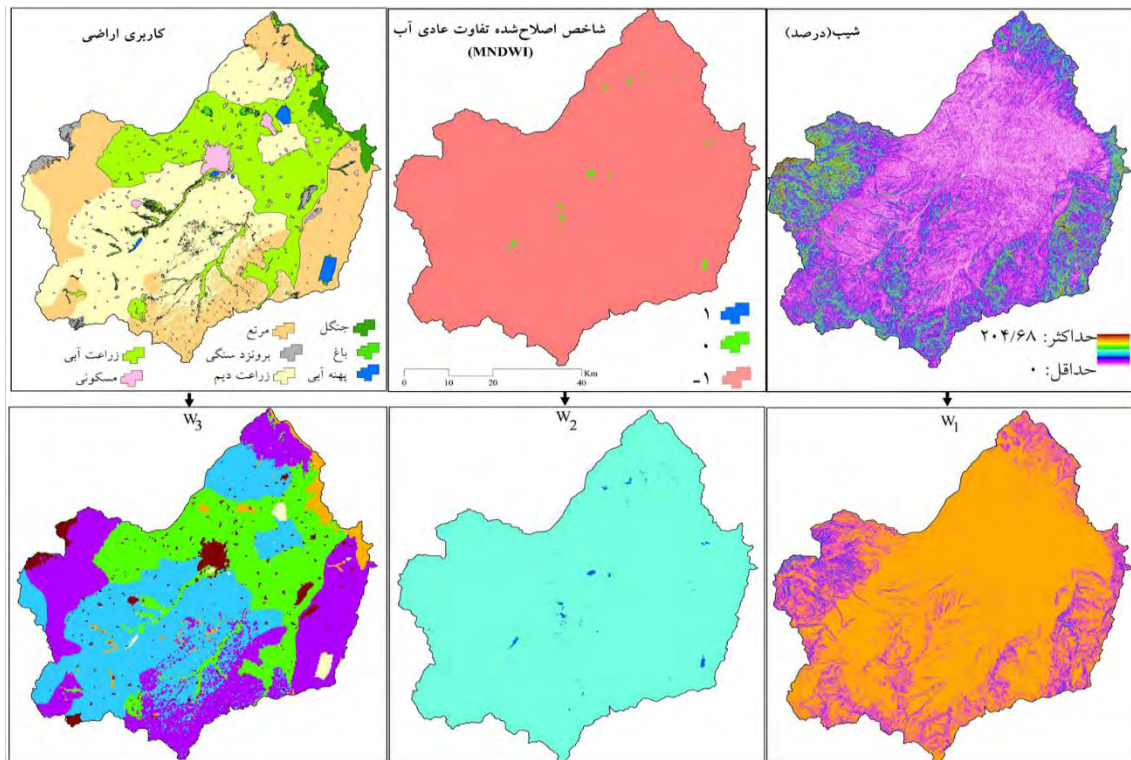
شبکه هیدرولوژیکی رودخانه حوزه آبخیز سامیان ۱۷۳ یال و ۱۷۶ گره با طول کلی ۱۲۵۴/۷۳ کیلومتر دارد. شاخص‌های ارزیابی اتصال هیدرولوژیکی برابر با $\beta = 0/983$ ، $\gamma = 0/331$ ، $IIC = 5/66$ و $PC = 1/151$ محاسبه شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده رودخانه سامیان با کاهش بارش و کمبود آب مواجه بوده است که مؤید نتایج مطالعات پیشین است (مصطفی‌زاده و مهری، ۱۳۹۷). در حال حاضر در رودخانه‌های طبیعی حوزه آبخیز سدهایی (سد یامچی و سد سبلان) موجود است (نصیری‌خیای و همکاران، ۱۳۹۸) که وجود چنین سدهایی منجر به محافظت از منابع مهم آب شده است. هرچند با توجه به نتایج، ساختار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز سامیان به‌خوبی در مناطق دشتی بهم متصل نیست (شکل ۵).



شکل ۵: شیب و پهنه‌های آبی مستقل در حوزه آبخیز سامیان (منبع: نگارندگان)

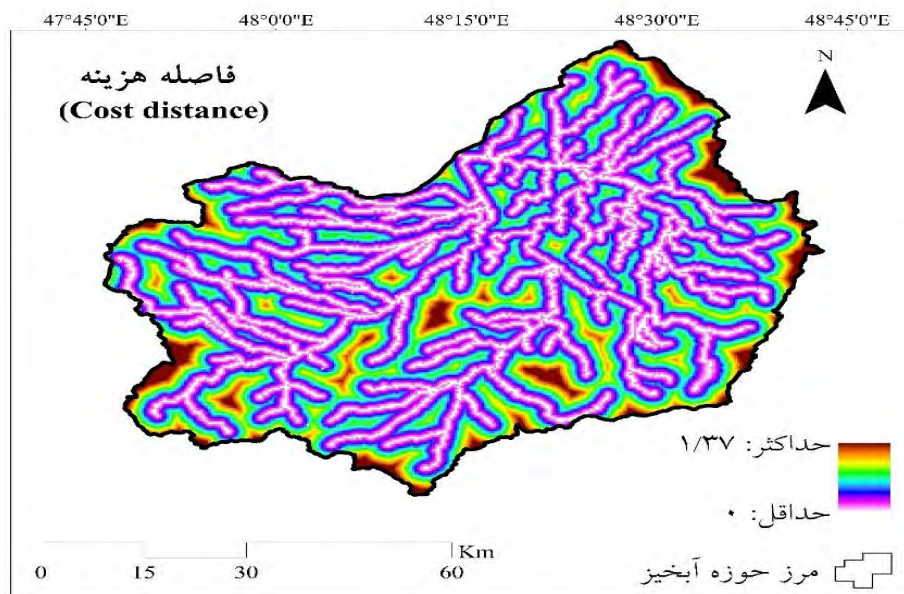
Figure 5: Slope and independent water body in the Samian watershed

نتایج حاصل از مدل حداقل مقاومت تجمعی (MCR) یا همان فاصله هزینه براساس عوامل فیزیوگرافی، هیدرولوژیکی و انسانی در شکل (۶) ارائه شده است. طبق نتایج بیشترین و کمترین شیب حوزه آبخیز سامیان در بازه صفر تا ۲۰۴/۶۸ و شاخص MNDWI در بازه صفر تا ۱- تغییر می‌کند. شاخص MNDWI در بیشتر بخش‌های حوزه آبخیز سامیان تغییرات یکسانی دارد و بخش‌های کمی از آن مقدار صفر دارد. در شکل (۷) توزیع مکانی فاصله هزینه (MCR) ارائه شده است.



شکل ۶: توزیع مکانی عوامل مدل حداقل مقاومت تجمعی (MCR) و وزن آنها (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲)
 Figure 6: Spatial distribution of minimum cumulative resistance (MCR) model factors and their weights

از تلفیق سه عامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی و انسانی مقدار فاصله هزینه که بیانگر خروجی مدل MCR است در بازه صفر تا ۱/۳۷ متغیر بوده است. در این میان، متوسط مقدار آن برای رودخانه حوزه آبخیز سامیان برابر با مقدار عددی ۰/۲۷ به دست آمد.



شکل ۷: توزیع مکانی فاصله هزینه (MCR) (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲)
 Figure 7: Spatial distribution of cost distance (MCR)

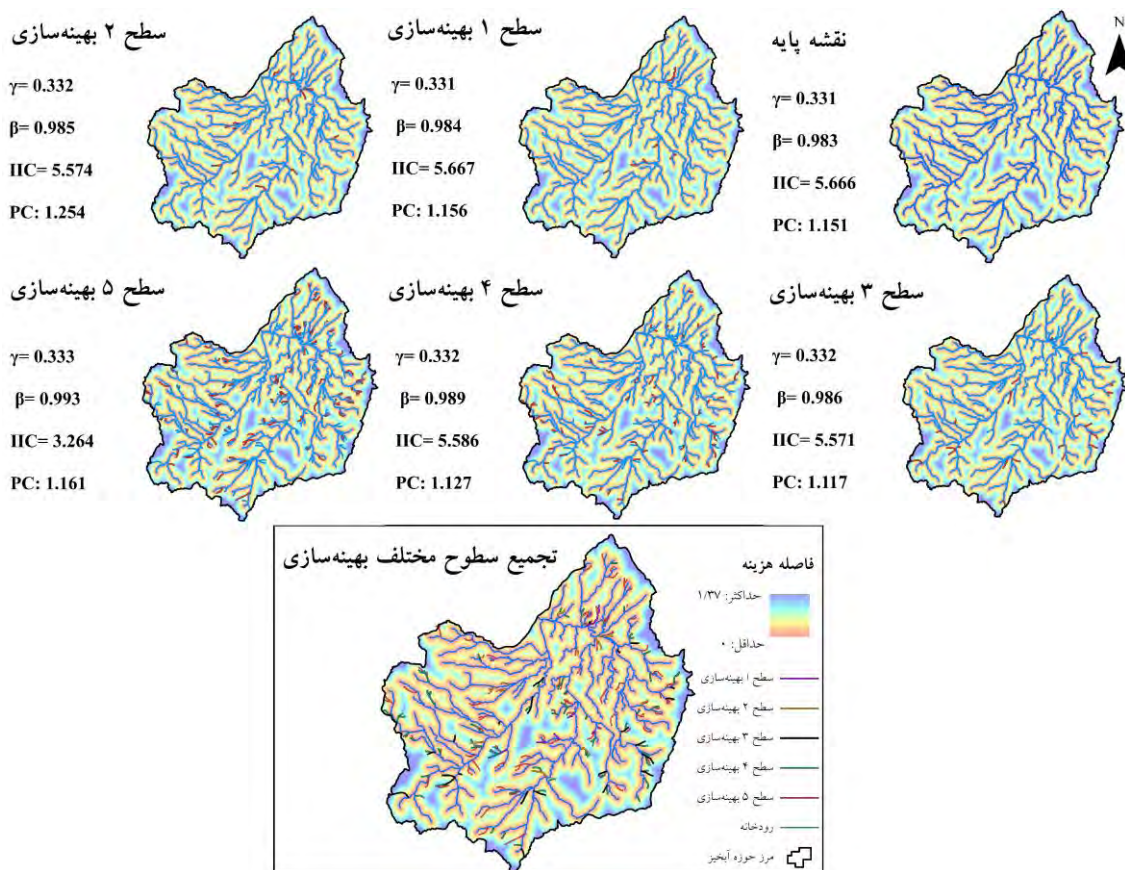
نتایج حاصل از بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی

حضور پهنه‌های آبی مستقل در مناطقی رخ می‌دهد که شیب آنها نسبت به اطراف خود به نسبت پایین باشد. به همین منظور، در پژوهش حاضر ۷ هدف از هر سطح بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. برای افزایش اتصال پهنه‌های آبی مستقل در حوزه آبخیز سامیان هدف‌های بهینه‌سازی در نظر گرفته و بدین ترتیب، آن مسیرهای اتصال پهنه آبی جدید ساخته شد. در سطح ۲ بهینه‌سازی به تعداد ۱۴ گره و ۱۴ یال به رودخانه اضافه شد. برای جلوگیری از مسیرهای غیربهینه یا تکراری توسط محاسبات مستقل فرآیند بهینه‌سازی، محاسبات بهینه‌سازی در هر سطح براساس نتایج بهینه‌سازی سطح قبلی انجام شده است. نتایج هر سطح از بهینه‌سازی و هزینه فاصله استفاده شده برای بهینه‌سازی در شکل (۸) نشان داده شده است.

مطابق با شکل (۸) هر شاخص اتصال هیدرولوژیکی روند افزایشی را با افزایش سطح بهینه‌سازی نشان می‌دهد که در میان آنها، m ، n ، β و γ روند صعودی تقریباً یکسانی را پس از بهینه‌سازی نشان می‌دهند. به طوری که درجه افزایش β و γ با سطح بهینه‌سازی افزایش می‌یابد. پنج سطح گره و یال بهینه‌شده به ترتیب در مجموع تا ۴۰۳ گره و ۴۰۶ یال افزایش یافت. شاخص β از ۰/۹۳۳ در شبکه اتصال هیدرولوژیکی پایه به ۰/۹۳۸ در سطح ۵ بهینه‌سازی افزایش یافت. همچنین، شاخص γ از ۰/۳۳۱ به ۰/۳۳۳ افزایش، شاخص IIC از ۵/۶۶۶ به ۳/۲۶۴ کاهش و شاخص PC از ۱/۱۵۱ به ۱/۱۶۱ افزایش یافت. طبق نتایج به دست آمده شاخص IIC روند افزایشی را در چهار سطح اول داشته است؛ اما در سطح ۵ بهینه‌سازی کاهش چشمگیری داشته است که دلیل آن را می‌توان به افزایش تعداد بیش از حد آبراهه (می‌تواند پیوستگی هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار دهد) نسبت داد که با نتایج سایر محققان (Tain et al., 2022) مطابقت دارد. در حالت کلی، افزایش یال و گره از یک مقدار مشخص اتصال هیدرولوژیکی را کاهش داده است یا به عبارتی، با افزایش سطح بهینه‌سازی از ۴ به ۵ مقاومت کلی اتصال هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز با کاهش جزئی همراه خواهد بود.

به طور کلی، در بهینه‌سازی اگر گره‌ها از قبل در تقاطع یال رودخانه بهینه‌سازی شده باشند و شبکه اصلی وجود داشته باشد، تعداد عناصر اضافه شده بر این اساس کاهش می‌یابد. هرچه اتصال شبکه با افزودن یال رودخانه بهینه‌سازی شده بهتر باشد، تعداد عناصر اضافه شده کمتر خواهد بود (Guo et al., 2021, P. 187). طبق نتایج، معیارهای β و γ نشان داد که پیچیدگی داخلی شبکه مسیر با سطح بهینه‌سازی افزایش می‌یابد. افزایش سطح بهینه‌سازی باعث افزایش تعداد مسیرهای اتصال آب در حوزه آبخیز و پیچیدگی شبکه رودخانه می‌شود. در مجموع، اتصال کلی روند افزایشی داشته است؛ البته مقدار آن پس از چهار سطح بهینه‌سازی به صورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. در مقابل، شاخص پیوستگی هیدرولوژیکی (IIC) افزایش یافته است؛ اما یک روند کاهشی را پس از سطح ۴ داشته است (شکل ۸). بنابراین مناسب است اتصال هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز سامیان تا سطح ۴ بهینه شود. نتایج به دست آمده با یافته‌های Tian et al. (2022) مطابقت دارد که در این مطالعه نیز یک حدی برای افزایش سطح بهینه‌سازی گزارش شده است.

از طرفی، یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج برخی از مطالعات (Sun et al., 2021; Jahanishakib et al., 2021) مطابقت ندارد. دلیل آن را می‌توان به تعداد یال و گره مربوط برای مناطق کوچک مانند حوزه آبخیزهای کشاورزی نسبت داد. این محققان گزارش کردند که افزایش تعداد یال و گره منجر به افزایش پیوستگی می‌شود.

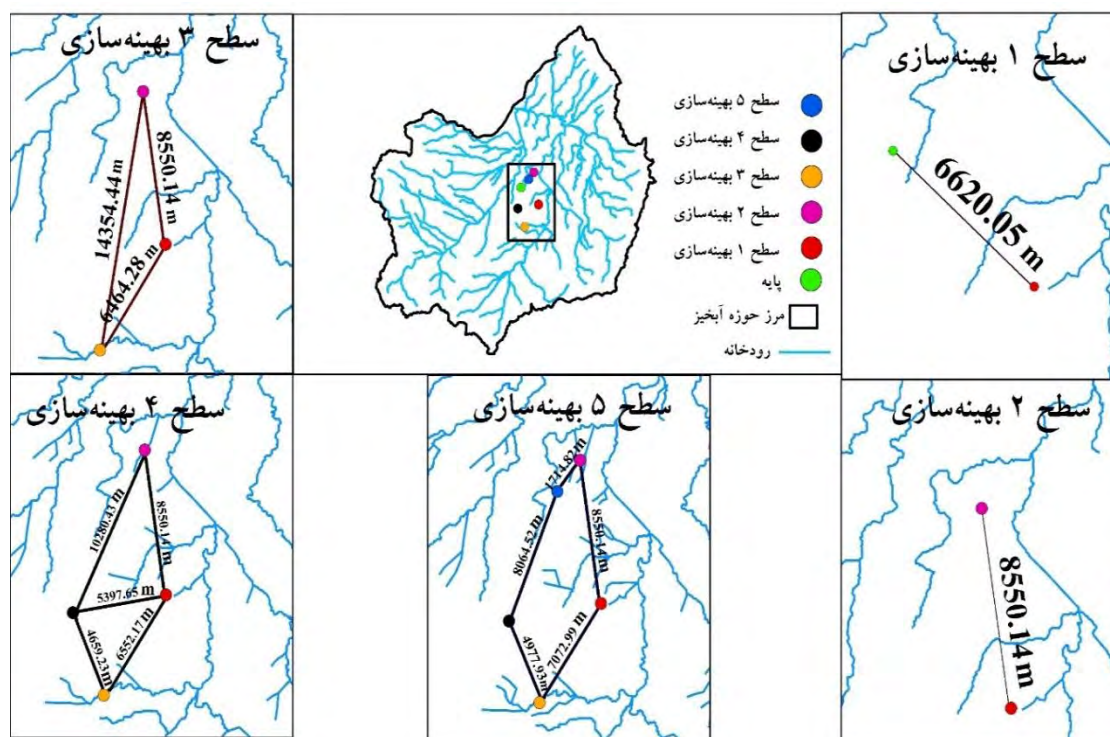


شکل ۸: نتایج بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز سامیان (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲)

Figure 8: The results of optimization of hydrological connectivity in the Samian watershed

نتایج حاصل از تکامل مرکز ثقل برای سطح‌های مختلف بهینه‌سازی

نتایج حاصل از تغییر مرکز ثقل به منظور محاسبه مسیرهای جابه‌جایی مرکز ثقل برای مناطق مقاومت مختلف و سطح‌های اتصال بهینه شده رودخانه در شکل (۹) ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده فاصله مهاجرت از نقطه پایه به سطح ۱ بهینه‌سازی ۶۶۲۰/۰۵ متر بوده است. در ادامه، فاصله مهاجرت از سطح ۱ به سطح ۲ بهینه‌سازی ۸۵۵۰/۱۴ متر و در نهایت، انتقال از سطح ۲ به سطح ۳ فاصله مهاجرت به ۶۴۶۴/۲۸ متر رسید. جهت حرکت در این سه سطح به سمت جنوب بوده است؛ اما جهت حرکت در سطح‌های بهینه‌سازی ۴ و ۵ به سمت شمال بوده است. بیشترین فاصله مهاجرت مربوط به منطقه مقاومت سطح ۵ بود که ۱۴۳۵۴/۴۳ متر به سمت شمال حرکت کرد. در حالت کلی طبق نتایج به دست آمده در سه سطح بهینه‌سازی جهت مهاجرت مرکز ثقل به سمت جنوب بوده و در سطح آخر به سمت شمال و حول نقطه ثقل پایه در حرکت است. در همین زمینه، طبق بررسی سطح‌های مختلف بهینه‌سازی اتصال در چین جهت مهاجرت هر پنج سطح بهینه‌سازی بیشتر یکسان بوده و همه در جهت جنوبی به دست آمده است (Tain et al., 2022).



شکل ۹: مهاجرت مرکز ثقل در سطح مختلف بهینه‌سازی در رودخانه حوزه آبخیز سامیان (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲)

Figure 9: Barycenter migration at the different optimization levels in the river of Samian watershed

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از ارزیابی و بهینه‌سازی اتصال هیدرولوژیکی برای محافظت از پهنه‌های آبی آسیب‌پذیر و گستره درحوزه آبخیز و نیز برای بهبود فرآیندهای بوم‌شناختی در پهنه‌های آبی حائز اهمیت هستند. بر همین اساس، در پژوهش حاضر چارچوبی برای ارزیابی و بهینه‌سازی اتصال ساختارهای هیدرولوژیکی طبیعی و مصنوعی در مقیاس حوزه آبخیز با استفاده از تئوری‌های گراف و دودویی تهیه شد. تجزیه و تحلیل مکانی فاصله هزینه و مرکز ثقل درحوزه آبخیز در پنج سطح بهینه‌سازی نیز انجام شد. طبق نتایج شاخص‌های اتصال ساختاری تا سطح بهینه‌سازی ۴ با افزایش سطح بهینه‌سازی تمایل به افزایش داشتند. بر همین اساس، پیشنهاد می‌شود که اتصال هیدرولوژیکی در سطح اول بهینه‌سازی در رودخانه حوزه آبخیز سامیان ضروری است و بهینه‌سازی در سطح سوم نیز می‌تواند مقرون به صرفه‌تر باشد.

منابع

حزباوی، زینب، بابایی، لیلا، زارعی، شیرین، علائی، نازیلا، و ملکیان، راحله (۱۴۰۱). ناهمگونی فضایی امنیت اکولوژیکی آبخیز سامیان، استان اردبیل. *برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۱۲ (۴۸)، ۷۷-۹۴.

<https://doi.org/10.30495/jzpm.2021.27360.3853>

راثی نظامی، سعید، ایزدی فرد، هادی، خاوریان، حسن، و مصطفی‌زاده، رئوف (۱۴۰۲). تغییرات کاربری/پوشش اراضی حوضه سامیان و ارتباط آن با کیفیت منابع آب سطحی. *محیط زیست و مهندسی آب*، ۹ (۳)، ۴۱۳-۴۲۶.

<https://doi.org/10.22034/jewe.2022.341548.1783>

علائی، نازیلا، مصطفی زاده، رئوف، اسماعیلی، ابادر، شرری، معراج، و حزبوای زینب (۱۳۹۸). ارزیابی و مقایسه پیوستگی سیمای سرزمین درحوزه آبخیز کوزه‌تپراقی استان اردبیل. *بوم‌شناسی کاربردی*، ۸(۴)، ۱۹-۳۴.

<http://dx.doi.org/10.47176/ijae.8.4.2572>

مرادزاده، وحیده، حزبوای، زینب، اسماعیلی عوری، ابادر، مصطفی زاده، رئوف، زارعی، شیرین، و علائی، نازیلا (۱۴۰۱). ارزیابی ناهمگونی فضایی شاخص آشفستگی هیدرورسوب‌شناسی در زیرحوضه‌های سامیان.

هیدروژئومورفولوژی، ۹(۳۱)، ۱۱۷-۱۳۶. <https://doi.org/10.22034/hyd.2022.51186.1634>

مصطفی زاده، رئوف، و مهری، سونیا (۱۳۹۷). تعیین وضعیت و تغییرات شاخص فصلی بارش در بخش مرکزی استان اردبیل. *پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۱(۳)، ۲۸-۳۹.

<https://doi.org/10.22092/wmej.2018.121560.1109>

مهدویان، شیرین، زینالی، بتول، و صلاحی، برومند (۱۴۰۱). پایش تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی در نواحی جنوبی استان اردبیل (مطالعه موردی: حوضه آبریز گیوی چای). *سنجش*

از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۳(۴)، ۲۱-۴۸.

<https://doi.org/10.30495/girs.2022.686395>

نصیری خیاوی، علی، مصطفی زاده، رئوف، اسمعیلی عوری، ابادر، غفارزاده، امید، و گلشن، محمد (۱۳۹۸). تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک جریان رودخانه بالخلوچای ناشی از تأثیر ترکیبی تغییر مؤلفه‌های اقلیمی و احداث سد

یامچی اردبیل با استفاده از رویکرد دامنه تغییرپذیری. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۴)، ۸۵۱-۸۶۵.

<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.116873.1413>

References

- Alaei, N., Mostafazadeh, R., EsmaliOuri, A., Sharari, M., & Hazbavi, Z. (2020). Assessment and comparison of landscape connectivity in KoozehTopraghi watershed, Ardabil province Iranian. *Journal Of Applied Ecology*, 8(4), 19-34. <http://dx.doi.org/10.47176/ijae.8.4.2572> [In Persian].
- Baranyi, G., Saura, S., Podanic, J., & Jord, J. (2011). Contribution of habitat patches to network connectivity: Redundancy and uniqueness of topological indices. *Ecological Indicators*, 11(5), 1301–1310. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.003>
- Bodin, Ö. (2009). *Ecological topology and networks* (S. Meyers, Ed.). Encyclopedia of complexity and system science. http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_164
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D.S. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3), 268–277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Bunn, A.G., Urban, D.L., & Keitt, T.H. (2000). Landscape connectivity: A conservation application of graph theory. *Journal of Environmental Management*, 59(4), 265–278. <http://dx.doi.org/10.1006/jema.2000.0373>
- Chen, W., He, B., Nover, D., Lu, H., Liu, J., Sun, W., & Chen, W. (2019). Farm ponds in southern China: Challenges and solutions for conserving a neglected wetland ecosystem. *Science of The Total Environment*, 659, 1322–1334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.394>
- Dai, L., Liu, Y., & Luo, X. (2021). Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around poyang lake, China. *Science of The Total Environment*, 754, 141868. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141868>
- Eros, T., Schmera, D., & Schick, R.S. (2011). Network thinking in riverscape conservation – A graph-based approach. *Biological Conservation*, 144(1), 184–192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2010.08.013>

- Guo, H., Yu, Q., Pei, Y., Wang, G., & Yue, D. (2021). Optimization of landscape spatial structure aiming at achieving carbon neutrality in desert and mining areas. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129156>
- Hazbavi, Z., Babaei, L., Zareie, SH., Alaei, N., & Malekian, R. (2023). Spatial heterogeneity of ecological security of atesamian wrshed, Ardabil province. *Journal of Regional Planning*, 12(48), 77-94. <https://doi.org/10.30495/jzpm.2021.27360.3853> [In Persian].
- Hermoso, V., Linke, S., Prenda, J., & Possingham, H.P. (2011). Addressing longitudinal connectivity in the systematic conservation planning of fresh waters. *Freshwater Biology*, 56(1), 57–70. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02390.x>
- Jahanishakib, F., Salmanmahiny, A., Mirkarimi, SH., & Poodat, F. (2021). Hydrological connectivity assessment of landscape ecological network to mitigate development impacts. *Journal of Environmental Management*, 296, 113169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113169>
- Jordán, F., Báldi, A., Orci, K.M., Rácz, I., & Varga, Z. (2003). Characterizing the importance of habitat patches and corridors in maintaining the landscape connectivity of a Pholidoptera transsylvanica (Orthoptera) metapopulation. *Landscape Ecology*, 18, 83–92. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022958003528>
- Keitt, T.H., Urban, D.L., & Milne, B.T. (1997). Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conservation Ecology*, 1(1), 4. <http://www.consecol.org/vol1/iss1/art4>
- Lathouri, M., England, J., Dunbar, M.J., Hannah, D.M., & Klaar, M. (2021). A river classification scheme to assess macroinvertebrate sensitivity to water abstraction pressures. *Water and Environment Journal*, 35(4), 1226–1238. <http://dx.doi.org/10.1111/wej.12712>
- Li, W., Li, H., Zhou, D., Gong, Z., Zhang, L., & Wang, Q. (2020). Modelling hydrological connectivity in the marine-freshwater interaction in the Yellow River estuary of China. *Wetlands*, 40, 2825–2835. <http://dx.doi.org/10.1007/s13157-020-01285-6>
- Li, Z., Sun, W., Chen, H., Xue, B., Yu, J., & Tian, Z. (2021). Interannual and seasonal variations of hydrological connectivity in a large shallow wetland of north china estimated from landsat 8 images. *Remote Sensing*, 13(6), 1214. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13061214>
- Li, Z., Wei, C., Zhou, J., & Yang, F. (2023). Temporal and spatial changes of hydrographic connectivity with the development of agriculture industry and urban areas: A case study of the Yellow River Basin in Henan province during the last two decades. *Water*, 15(24), 4245. <http://dx.doi.org/10.3390/w15244245>
- Mahdavian, SH., Zeynali, B., & Salahi, B. (2022). Monitoring land use changes and its relationship with land surface temperature and vegetation index in the southern areas of Ardabil province (Case study: Kiwi chay catchment). *Journal of RS & GIS for Natural Resources*, 13(4), 21-48. <https://doi.org/10.30495/girs.2022.686395> [In Persian].
- Moradzadeh, V., Hazbavi, Z., Esmali Ouri, A., Mostafazadeh, R., Rodrigo-Comino, J., Zareie, S., & Fernández-Raga, M. (2024). A multifunctional conceptual framework for ecological disturbance assessment. *Earth Systems And Environment*, 1-19. <http://dx.doi.org/10.1007/s41748-024-00407-y>
- Moradzadeh, V., Hazbavi, Z., EsmaliOuri, A., Mostafazadeh, R., Zarei, SH., & Alaei, N. (2022). Assessment of spatial heterogeneity of hydro-sedimentological disturbance index in the samian sub-watersheds. *Hydrogeomorphology*, 9(31), 117-136. <http://dx.doi.org/10.22034/hyd.2022.51186.1634> [In Persian].
- Mostafazadeh, R., & Mehri, S. (2018). Determination of the precipitation regime and the seasonality index variations in the central part of the Ardabil province. *Journal Of Watershed Management Research*, 31(3), 28-39. <http://dx.doi.org/10.22092/WMEJ.2018.121560.1109> [In Persian].
- Nasiri Khiavi, A., Mostafazadeh, R., Esmali Ouri, A., Ghafarzadeh, O., & Golshan, M. (2019). Alteration of hydrologic flow indicators in Ardabil Balikhouchai river under combined effects of change in climatic variables and Yamchi Dam construction using range of variability approach. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 11(4), 851-865. <http://dx.doi.org/10.22092/IJWMSE.2018.116873.1413> [In Persian].
- Rasi Nezami, S., Izadifard, H., Khavarian, H., & Mostafazadeh, R. (2023). Land use/land cover changes in the samian watershed Ardabil and its relationship with the quality of surface water resources.

- Environment and Water Engineering*, 9(3), 413-426. <https://doi.org/10.22034/jewe.2022.341548.1783> [In Persian].
- Rasoulzadeh, A., Mostafazadeh, R., Mobaser, J. A., Alaei, N., Hazbavi, Z., & Kisi, O. (2023). Quantifying landscape Pattern–Hydrological process linkage in northwest Iran. *Atmosphere*, 14(12), 1814. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos14121814>
- Reid, M.A., Reid, M.C., & Thoms, M.C., (2016). Ecological significance of hydrological connectivity for wetland plant communities on a dryland floodplain river MacIntyre river Australia. *Aquatic Sciences*, 78(1), 139–158. <http://dx.doi.org/10.1007/s00027-015-0414-7>
- Ricotta, C., Stanisci, A., Avena, G.C., & Blasi C. (2000). Quantifying the network connectivity of landscape modaics: A graph-theoretical approach. *Community Ecology*, 1, 89–94. <http://dx.doi.org/10.1556/ComEc.1.2000.1.12>
- Rinaldo, A., Gatto, M., & Rodriguez-Iturbe, I. (2018). River networks as ecological corridors: A coherent ecohydrological perspective. *Advances in Water Resources*, 112, 27–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.005>
- Saura, S., & Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 83, 91–103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>
- Sun, C., Chen, L., Zhu, H., Xie, H., Qi, S., & Shen, Z. (2021). New framework for natural-artificial transport paths and hydrological connectivity analysis in an Agriculture-Intensive catchment. *Water Research*, 196, 117015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2021.117015>
- Tian, N., Zhang, Y., Li, J., Du, W., Liu, X., Jiang, H., & Bian, H. (2022). Evaluation and optimization of hydrological connectivity based on graph theory: A case study in dongliao river basin, China. *Water*, 14(23), 3958. <http://dx.doi.org/10.3390/w14233958>
- Wang, Q., Liu, Y., Zhang, Y., Tong, L., Li, X., Li, J., & Sun, Z. (2019). Assessment of spatial agglomeration of agricultural drought disaster in China from 1978 to 2016. *Scientific Reports*, 9(14393), 1–8. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-51042-x>
- Xingyuan, Z., Fawen, L., & Yong, Z. (2023). Impact of changes in river network structure on hydrological connectivity of watersheds. *Ecological Indicators*, 146, 109848. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109848>
- Yu, Z., Lu, M., Xu, Y., Wang, Q., Lin, Z., & Luo, S. (2023). Network structure and stability of the river connectivity in a rapidly urbanizing region. *Science of The Total Environment*, 894, 165021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165021>

