

An Operational Model for Water-Efficient Sustainable Landscape Design Using a Xeriscaping Approach in Cold and Dry Mountain Climates: A Case Study of Sanandaj

Asra Khanalizade^{1*} , Vahid Heydar Nataj² 

1. Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran. (Corresponding author)

Email: Asrakhanalizade@gmail.com

2. Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

Email: V.Heidarnataj@umz.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Article Article History: Received: 15 March 2026 Revised: 06 May 2026 Accepted: 16 June 2026 Published: 30 June 2026 Use Your Device to Scan and Read the Article Online  Keywords: <i>Xeriscaping; Cold and Arid Climate; Water Consumption Reduction; Sustainable Landscape.</i>	In mountainous ecosystems with cold, arid climates in western Iran, the sustainability of human-made landscapes faces complex challenges stemming from hydrological stress, limited water resources, and geomorphological instability. This study aimed to develop a practical model for xeriscaping adapted to the climatic constraints, rugged topography, and ecological characteristics of mountainous regions, using the city of Sanandaj as a case study. Drawing on the principles of landscape ecology, environmental hydrology, and natural engineering, and employing a qualitative research approach combined with the Delphi technique, the study identified the key components of sustainable landscape design in cold, arid mountainous climates. The findings showed that achieving ecological sustainability and reducing dependence on conventional water resources requires the integration of five fundamental strategies. First, improving the hydrological properties of soil through texture amendment, increased organic matter, and permeable depressions to enhance moisture retention and control surface runoff. Second, integrated water resource management emphasizing the intelligent storage and conveyance of precipitation and snowmelt into subsurface reservoirs and infiltration basins. Third, microclimate engineering through windbreak belts, multilayer shading, and locally sourced, high-thermal-capacity materials to moderate temperature fluctuations and reduce thermal stress. Fourth, the use of alternative water sources, including treated greywater and atmospheric water harvesting systems. Fifth, adaptive planting design based on native species resistant to cold and drought stress, with physiological traits such as deep root systems, thick cuticles, water-use efficiency, and high osmotic tolerance. Overall, by integrating knowledge from geomorphology, landscape hydrology, and plant ecology, the proposed model offers a scientific and practical framework for reducing water consumption, enhancing ecosystem resilience, and promoting environmental sustainability in mountainous landscapes. It can serve as a basis for planning and designing sustainable landscapes in cold, arid regions.

Cite this article: Khanalizade, A., & Heydar Nataj, V. (2026). An Operational Model for Water-Efficient Sustainable Landscape Design Using a Xeriscaping Approach in Cold and Dry Mountain Climates: A Case Study of Sanandaj. *Environmental Research in Mountainous Regions*, 2(2), 83-100. <https://doi.org/10.22034/ermr.2026.146451.1043>



© The Author(s) retain the copyright

Publisher: University of Kurdistan

Extended Abstract

Introduction

Within the contemporary landscape design paradigm, the shift from purely ornamental approaches toward ecological sustainability has underscored the growing need to reduce resource consumption, particularly water use. Freshwater scarcity, which is particularly acute in arid and semi-arid regions, has been intensified by urban population growth, economic development, and climate change, posing increasing challenges to the sustainability of urban green spaces. Under these conditions, expanding green-space coverage without considering water-resource availability may place additional pressure on already limited supplies. Accordingly, the selection of climate-adapted plant species, optimization of planting patterns, and adoption of water-efficient landscape strategies have become increasingly important. This challenge is particularly complex in the cold, dry mountainous climate of western Iran due to pronounced temperature fluctuations, seasonal frost, limited water availability, steep topography, and unfavorable soil conditions. Despite the growing adoption of xeriscaping and water-efficient landscape design, many existing models have been developed primarily for hot-arid or temperate climates and therefore have limited applicability to the distinctive environmental conditions of mountainous regions in western Iran. Against this background, this study aims to develop a localized and operational framework for xeriscape design under cold, dry mountainous conditions, using Sanandaj as a case study. The study examines and prioritizes key components for reducing landscape water consumption, including the selection of climate-adapted plant species, soil modification, sustainable management of surface water, and microclimate optimization, with the aim of providing a practical framework for sustainable, water-efficient, and climate-resilient landscape design adapted to the environmental characteristics of cold, dry mountainous regions.

Methodology

Data collection and analysis were conducted using a qualitative approach and the Delphi technique. Accordingly, 15 experts in landscape design, climatology, architecture, civil

engineering, and environmental planning were purposively selected. Following the assessment and confirmation of the face and content validity of the questionnaire by six experts, the Delphi process was conducted in two rounds from May to November 2025. In the first round, open-ended questions and qualitative content analysis were used to identify challenges, design principles, and potential strategies related to xeriscaping in cold and dry mountainous climates and to extract the preliminary indicators. In the second round, the identified indicators were evaluated and prioritized using a three-point Likert scale based on their importance, feasibility, ecological effectiveness, and potential for localization. Finally, the data were examined through qualitative-interpretive analysis and descriptive statistics using Microsoft Excel, and the selected indicators were determined based on their frequency of occurrence and the level of agreement among the experts. The resulting findings were used to develop an operational framework for “mountain xeriscaping” aimed at supporting sustainable and water-efficient landscape design in cold and dry mountainous regions.

Results and Discussion

The results of the two rounds of the Delphi questionnaire indicated that water-saving strategies in xeriscape design for cold and dry mountainous regions can be classified into five main dimensions: increasing soil water-retention capacity; managing and storing rainwater and snowmelt; microclimate engineering; using alternative water sources and water recycling; and selecting planting schemes adapted to climatic and topographic conditions. In the first round, experts' suggestions concerning irrigation methods, water-management infrastructure, water collection and storage systems, and plant characteristics were identified, while the second round focused on determining the indicators with the highest frequency of occurrence and level of agreement. Based on the experts' consensus, soil modification, efficient irrigation systems, the creation of water-infiltration depressions and rain gardens, subsurface water storage, runoff and snowmelt management, the use of windbreaks and shade structures, and the selection of native species tolerant of drought and frost were identified as key strategies for

reducing landscape water requirements. The findings further indicated that, in cold and dry mountainous climates, particular attention to snowmelt water management and the simultaneous consideration of microclimatic conditions and frost, alongside conventional xeriscape strategies, are especially important and can provide a basis for developing a locally adapted landscape design framework consistent with the environmental conditions of these regions.

Conclusion

The findings showed that achieving sustainable landscape design in cold and dry mountainous climates requires an integrated approach that is adapted to climatic and geomorphological

characteristics and water resource limitations. The main contribution of the study was the development of a “Mountain Xeriscape” framework based on soil modification, surface water and snowmelt management, microclimate engineering, and the selection of resilient native plant species. Pilot implementation of this framework in Sanandaj’s green spaces, the use of native low-water-demand species, and the development of greywater recycling are recommended. The main limitations of the study included the limited number of experts, the lack of field validation of the proposed framework, and the focus on Sanandaj, highlighting the need for further investigation in other mountainous regions.

Ethical Considerations

Funding

According to the corresponding author, this article received no financial support or external funding.

Author Contributions

First author: Writing the theoretical foundations and literature review, collecting and analyzing spatial data, conducting graphical analyses, and developing the research methodology.

Second author: Providing scientific supervision and overall guidance throughout the research process and data interpretation, contributing to the final manuscript, and approving the final version of the article.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors declare that no artificial intelligence (AI) tools were used in the writing of this article.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Data Availability Statement

The data are available from the authors upon reasonable request.

Acknowledgments

The authors sincerely thank all individuals who collaborated with them in the collection of field data.



الگوی عملیاتی کاهش مصرف آب در منظرسازی پایدار با رویکرد خشک‌منظری در اقلیم سرد و خشک کوهستانی (مطالعه موردی: شهر سنندج)

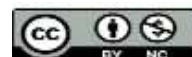
اسرا خانعلی‌زاده^{۱*}، وحید حیدرنتاج^۲ 

۱. گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: Asrakhanalizade@gmail.com

۲. گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. رایانامه: V.Heidarnattaj@umz.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در اکوسیستم‌های کوهستانی با اقلیم سرد و خشک غرب ایران، پایداری منظرهای انسان‌ساخت با چالش‌های پیچیده‌ای ناشی از تنش‌های هیدرولوژیک، محدودیت منابع آب و ناپایداری‌های ژئومورفولوژیک مواجه است. پژوهش حاضر با هدف تدوین الگویی کاربردی برای «خشک‌منظر» سازگار با محدودیت‌های اقلیمی، شرایط توپوگرافی ناهموار و ویژگی‌های بوم‌شناختی مناطق کوهستانی، با مطالعه موردی شهر سنندج، انجام شد. این مطالعه با تکیه بر اصول بوم‌شناسی منظر، هیدرولوژی محیطی و مهندسی طبیعی، و با بهره‌گیری از روش پژوهش کیفی و تکنیک دلفی، به شناسایی مؤلفه‌های کلیدی طراحی منظر پایدار در اقلیم‌های سرد و خشک کوهستانی پرداخت. یافته‌های پژوهش نشان داد که دستیابی به پایداری اکولوژیک و کاهش وابستگی به منابع آب متعارف، مستلزم تلفیق پنج راهبرد بنیادین است. نخست، بهبود ویژگی‌های هیدرولوژیک خاک از طریق اصلاح بافت، افزایش مواد آلی و طراحی فرورفتگی‌ها و بسترهای نفوذپذیر به منظور افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت و کنترل رواناب سطحی؛ دوم، مدیریت یکپارچه منابع آب با تأکید بر ذخیره‌سازی و هدایت هوشمند آب حاصل از بارش و ذوب برف در مخازن زیرسطحی و حوضچه‌های نفوذ؛ سوم، مهندسی ریزاقلیم با استفاده از کمربندهای بادشکن، سایه‌اندازی چندلایه و به کارگیری مصالح بومی با ظرفیت حرارتی بالا به منظور تعدیل نوسانات دمایی و کاهش تنش‌های حرارتی؛ چهارم، بهره‌گیری از منابع آب جایگزین، از جمله آب خاکستری تصفیه‌شده و سامانه‌های استحصال رطوبت اتمسفری؛ و پنجم، طراحی گیاهی تطبیقی مبتنی بر انتخاب گونه‌های بومی مقاوم به تنش‌های سرمایی و خشکی، با ویژگی‌های فیزیولوژیک نظیر ریشه‌های عمیق، کوتیکول ضخیم، کارایی در کاهش مصرف آب و تحمل اسمزی بالا. در مجموع، الگوی پیشنهادی با تلفیق دانش ژئومورفولوژی، هیدرولوژی منظر و اکولوژی گیاهی، چارچوبی علمی و کاربردی برای کاهش مصرف آب، افزایش تاب‌آوری اکوسیستم و ارتقای پایداری زیست‌محیطی در منظرهای کوهستانی ارائه می‌کند و می‌تواند به عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی و طراحی منظر پایدار در مناطق سرد و خشک مورد استفاده قرار گیرد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹ از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید  واژه‌های کلیدی: خشک‌منظری، اقلیم سرد و خشک، کاهش مصرف آب، منظر پایدار.

استناد: خانعلی‌زاده، اسرا و حیدرنتاج، وحید. (۱۴۰۵). الگوی عملیاتی کاهش مصرف آب در منظرسازی پایدار با رویکرد خشک‌منظری در اقلیم سرد و خشک کوهستانی (مطالعه موردی: شهر سنندج). پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی، ۲ (۲)، ۸۳-۱۰۰. <https://doi.org/10.22034/ermr.2026.146451.1043>



مقدمه

در پارادایم معاصر طراحی منظر، گذار از رویکردهای صرفاً تزئینی به سوی «پایداری اکولوژیک» به‌عنوان ضرورتی اجتناب‌ناپذیر مطرح شده است. بحران جهانی کمبود منابع آب شیرین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، چالش‌های اساسی را در زمینه پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی پروژه‌های منظرسازی ایجاد کرده است (واقفی^۱، ۲۰۱۹). این بحران صرفاً به مناطقی که از ادوار گذشته تاکنون به صورت سنتی درگیر کمبود منبع آب و خشکسالی بوده‌اند، محدود نمی‌شود و در حال حاضر در بسیاری از فضاهای مختلف جغرافیایی در حال پیشروی است. در این میان فضاهای شهری نیز از چالش کمبود منابع آب شیرین در امان نیستند و ابعاد آن در سکونتگاه‌های شهری نیز به‌سرعت در حال گسترش است؛ بر پایه برآوردهای انجام گرفته در سال‌های گذشته، جمعیت شهرنشین جهان که با کمبود منابع آب مواجه هستند از حدود ۹۳۳ میلیون نفر در سال ۲۰۱۶ به بیش از ۱/۷ تا ۲/۴ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهند یافت. این آمار رشدی بیش از دو برابر را در طی بازه زمانی مذکور نشان می‌دهد. نکته قابل تأمل این است که در این میان، افزایش تقاضای آب ناشی از رشد جمعیت و توسعه اقتصادی، عامل اصلی روند کاهش منابع آبی مورد نیاز شهروندان است، در حالی که تغییر اقلیم سهم کوچک‌تر اما رو به‌رشدی را در تشدید این بحران ایفا می‌کند (هی^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). این واقعیت نشان می‌دهد که با توجه به روند افزایش جمعیت جهان و بع تبع آن تسریع تغییر و تحولات اقتصادی که به دنبال تأمین نیازهای جمعیت روبه افزایش هستند، کمبود آب دیگر صرفاً یک محدودیت منطقه‌ای نیست، بلکه چالشی ساختاری در مقیاس جهانی است که طراحی منظر شهری و مدیریت فضای سبز را نیز به‌طور مستقیم درگیر می‌کند و این چالش‌ها به صورت پیوستد و زنجیره‌واری تمامی ابعاد توسعه شهری را تحت تأثیر قرار خواهند داد.

نکته قابل‌توجه دیگر آن است که پژوهش‌های اخیر در حوزه بوم‌شناسی منظر هشدار داده‌اند که راهکار متعارف افزایش سطح فضای سبز شهری برای بهبود پایداری منظر، در شرایط کمبود آب می‌تواند اثری معکوس داشته و خود به تشدید فشار بر منابع آبی و در نتیجه کاهش کمبود منابع آبی بینجامد؛ از این‌رو به‌جای گسترش بی‌رویه فضای سبز، بهینه‌سازی آرایش فضایی و ترکیب گونه‌ای آن با تأکید بر کاهش مصرف آب، ضرورتی راهبردی تلقی می‌شود (لیو^۳ و همکاران، ۲۰۲۴). این راهبرد به‌طور مشخص بر اهمیت رویکردهای خشک‌منظر که در پژوهش حاضر دنبال می‌شود، تأکید می‌کند، چراکه چنین رویکردهایی امکان حفظ کارکردهای اکولوژیک و زیبایی‌شناختی منظر را بدون تحمیل بار آبی مضاعف فراهم می‌سازند.

این مسئله در اقلیم‌های سرد و خشک کوهستانی غرب ایران، به دلیل پیچیدگی‌های اقلیمی و ژئومورفولوژیک، ابعاد گسترده‌تری می‌یابد؛ نوسانات شدید دمایی، وقوع یخبندان‌های فصلی، محدودیت منابع هیدرولوژیک و فقر مواد آلی خاک، کارایی سامانه‌های متداول آبیاری و نگهداشت فضای سبز را با محدودیت‌های جدی مواجه ساخته است. در چنین شرایطی، استفاده از گونه‌های گیاهی غیربومی یا وابسته به آبیاری سنگین، نه‌تنها از منظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست، بلکه با تحمیل بار اکولوژیک مضاعف، موجب تشدید آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های حساس کوهستانی می‌شود.

با وجود اهمیت روزافزون رویکردهای منظرسازی کم‌مصرف، همچنان خلأ پژوهشی قابل‌توجهی در زمینه تدوین الگوهای بومی‌سازی شده برای اقلیم سرد و خشک کوهستانی غرب ایران مشاهده می‌شود؛ بخش عمده الگوها و دستورالعمل‌های موجود، مبتنی بر شرایط اقلیمی گرم و خشک یا اقلیم‌های معتدل تدوین شده‌اند و در مواجهه با پدیده‌هایی نظیر یخبندان، چرخه‌های ذوب و انجماد، شیب‌های تند و محدودیت‌های خاکی مناطق کوهستانی، کارایی محدودی دارند. از این‌رو، طراحی منظر پایدار در این مناطق مستلزم رویکردی تلفیقی است که هم‌زمان ویژگی‌های هیدرولوژیک، شرایط توپوگرافی، ریزاقلیم و ظرفیت اکولوژیک بستر طبیعی را مدنظر قرار دهد.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف تدوین و ارائه یک الگوی عملیاتی مبتنی بر اصول «خشک‌منظر» برای اقلیم سرد، خشک و کوهستانی غرب ایران انجام شده است. در این راستا، با تحلیل ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیک منطقه مورد مطالعه، راهکارهای تخصصی طراحی شامل انتخاب گونه‌های گیاهی سازگار، اصلاح و مهندسی خاک، مدیریت پایدار آب‌های سطحی و بهینه‌سازی ریزاقلیم بررسی می‌شود تا چارچوبی علمی و کاربردی برای طراحی منظرهای پایدار، کم‌مصرف و تاب‌آور در این اقلیم خاص ارائه گردد. بر همین مبنا، پژوهش حاضر در پی پاسخ‌گویی به سوالات زیر است: مهم‌ترین مؤلفه‌های کاهش مصرف آب در طراحی خشک‌منظر برای اقلیم سرد و خشک کوهستانی شهر سنجند کدام‌اند؟ و مؤلفه‌های کاهش مصرف آب در طراحی خشک‌منظر برای اقلیم سرد و خشک کوهستانی شهر سنجند چگونه می‌توانند در قالب یک الگوی عملیاتی و اولویت‌بندی‌شده تدوین شوند؟

مرور ادبیات و سوابق پژوهش

پارادایم خشک‌منظری: گذار از منظر تزئینی به اکوسیستم پایدار

پارادایم «خشک‌منظر» در طراحی منظر معاصر، فراتر از یک سبک بصری یا صرفاً انتخاب گونه‌های گیاهی کم‌مصرف، به‌عنوان تحولی بنیادین در نگرش انسان به تعامل با محیط زیست در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود (کومانسکو^۱، ۲۰۲۵). این مفهوم برای نخستین بار به‌طور نظام‌مند در قالب راهنماهای عملیاتی کاهش مصرف آب در منظرسازی مناطق خشک معرفی شد و بر گزینش گونه‌های گیاهی سازگار با اقلیم، بهبود کارایی آبیاری و اصلاح ساختار خاک تأکید داشت (الیفسون^۲ و همکاران، ۲۰۰۴). این رویکرد که ریشه در جریان‌های نوین طراحی منظر پایدار و مدیریت اکولوژیک سرزمین دارد، پاسخی ساختاریافته به بحران جهانی کمبود آب و پیامدهای ناشی از تغییرات اقلیمی، از جمله کاهش و ناپایداری الگوهای بارش، محسوب می‌شود (آی‌پی‌سی‌سی^۳، ۲۰۲۳). هسته مفهومی این پارادایم بر این اصل استوار است که منظر نباید به‌عنوان سامانه‌ای منفک و مستقل از بوم‌سازگان طبیعی در نظر گرفته شود، بلکه باید به‌مثابه بخشی پویا و عملکردی از چرخه طبیعی آب، انرژی و مواد مغذی عمل کند (موساکیو^۴، ۲۰۰۹). مرور مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهد اصول خشک‌منظری در طیف وسیعی از اقلیم‌ها، از مناطق نیمه‌گرمسیری تا کوهستانی، قابل بازتعریف و انطباق است (پراجاپاتی^۵ و همکاران، ۲۰۲۳).

در تقابل با الگوهای سنتی منظرسازی که بر پایه مصرف مداوم آب، انرژی و نهادهای شیمیایی برای حفظ وضعیت ظاهری ثابت و کنترل‌شده شکل گرفته‌اند و از منظر اکولوژیک سامانه‌هایی ناپایدار محسوب می‌شوند، خشک‌منظر با پذیرش پویایی‌های طبیعی، تنش‌های محیطی و چرخه‌های متناوب خشکی و رطوبت، رویکردی سازگار با فرایندهای طبیعی ارائه می‌دهد.

در این چارچوب، پایداری منظر نه در حذف تنش‌های محیطی، بلکه در انطباق عملکرد اکوسیستم با شرایط اقلیمی تعریف می‌شود. از این رو، هدف اصلی خشک‌منظر، کاهش حداکثری مصرف آب، افزایش بهره‌وری اکولوژیک و ارتقای تاب‌آوری اکوسیستم در برابر تغییرات اقلیمی و تنش‌های محیطی است (اسماعیل، ۲۰۲۲). در ابعاد طراحی و بوم‌شناختی، این پارادایم بر اصل «سازگاری اقلیمی» تأکید دارد؛ طراحی خشک‌منظر مستلزم شناخت دقیق ویژگی‌های هیدرولوژیک، اقلیمی و فیزیکی بستر طبیعی است و به‌کارگیری راهکارهایی نظیر جمع‌آوری و ذخیره‌سازی آب‌های سطحی، اصلاح ساختار خاک به‌منظور افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت، کاهش تبخیر، و انتخاب گونه‌های گیاهی بومی و مقاوم به تنش‌های محیطی را ضروری می‌سازد (ست هیلر^۶ و همکاران، ۲۰۰۸). نهادهای متولی مدیریت منابع آب شهری نیز در سال‌های اخیر این اصول را در قالب راهنماهای عملیاتی برای شهروندان و طراحان منظر تدوین کرده‌اند (آب دنور^۷، ۲۰۱۷). برخلاف تصور رایج که خشک‌منظر را مترادف با فضاهای فاقد پوشش گیاهی یا مناظر خشک و بی‌روح می‌داند، این رویکرد بر استفاده از گونه‌هایی تأکید دارد که چرخه رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیک آن‌ها با الگوهای طبیعی بارش، دما و رطوبت منطقه هم‌خوانی دارد. چنین هم‌سویی اکولوژیکی موجب کاهش نیاز به آبیاری تکمیلی، جلوگیری از افت سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش ورود آلاینده‌های شیمیایی ناشی از مصرف کودها و سموم به محیط می‌شود (گرین^۸، ۲۰۲۴). از نگاه اکولوژی منظر، خشک‌منظر را می‌توان رویکردی مبتنی بر بازآفرینی عملکردهای طبیعی اکوسیستم دانست که در آن مؤلفه‌هایی نظیر مدیریت چرخه آب، پایداری خاک، تنوع زیستی و تاب‌آوری اقلیمی به‌صورت یکپارچه مورد توجه قرار می‌گیرند. در این چارچوب، منظر نه‌تنها واجد ارزش زیبایی‌شناختی، بلکه به‌عنوان زیرساختی اکولوژیک برای حفظ پایداری محیطی، کاهش فشار بر منابع طبیعی و ارتقای کیفیت زیست در سکونتگاه‌های انسانی تعریف می‌شود.

فیزیک اقلیم کوهستانی: چارچوب ترمودینامیکی و هیدرولوژیک

فیزیک اقلیم کوهستانی به مطالعه برهم‌کنش‌های پیچیده و غیرخطی میان توپوگرافی ناهموار، سامانه‌های جوی و فرایندهای سطح زمین می‌پردازد. در این سامانه‌ها، گرادیان‌های شدید ارتفاعی و ناهمگنی‌های موضعی ناشی از اختلاف ارتفاع، شیب و جهت‌گیری دامنه‌ها، منجر به شکل‌گیری ریزاقلیم‌های متنوع در مقیاس‌های مکانی کوچک می‌شود (پپین^۹ و همکاران، ۲۰۱۵). این تنوع ریزاقلیمی، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوهای توزیع پوشش گیاهی، چرخه هیدرولوژیک، تعادل انرژی و پایداری اکوسیستم‌های کوهستانی دارد. مهم‌ترین سازوکار حاکم بر اقلیم کوهستانی، «گرادیان آدیاباتیک» است؛ با افزایش ارتفاع، کاهش فشار اتمسفری موجب انبساط و در نتیجه سرد شدن توده‌های هوای

1. Kumanescu
2. Ellefson
3. IPCC
4. Musacchio
5. Prajapati
6. St Hilaire
7. Ab-e Denor
8. Green
9. Pepin

صعودکننده، اعم از اشباع و غیراشباع، می‌شود (لاندکوئیست^۱، ۲۰۰۸). این فرایند، اساس شکل‌گیری بارش‌های اوروگرافیک در دامنه‌های روبه‌باد و ایجاد پدیده «سایه باران» در دامنه‌های پناه‌گرفته را تشکیل می‌دهد (هوبس^۲، ۲۰۰۶). در چنین شرایطی، توزیع مکانی دما و رطوبت به‌شدت تحت تأثیر مورفولوژی زمین قرار می‌گیرد و تفاوت‌های اقلیمی محسوس را حتی در فواصل کوتاه ایجاد می‌کند. دینامیک جریان هوا در مناطق کوهستانی نیز تحت تأثیر فرایندهای توربولانسی و گردش‌های محلی هوا قرار دارد. از مهم‌ترین این پدیده‌ها می‌توان به «جریان دره به کوه» در طول روز و «جریان کوه به دره» در هنگام شب اشاره کرد. در ساعات شبانه، هوای سرد و متراکم به سمت بخش‌های پایین‌دست حرکت کرده و در کف دره‌ها تجمع می‌یابد؛ فرایندی که منجر به شکل‌گیری «چاله‌های هوای سرد» و افزایش خطر وقوع یخبندان می‌شود.

این پدیده‌ها نقش مهمی در تعیین الگوی استقرار پوشش گیاهی، انتخاب گونه‌های مقاوم و طراحی منظر در اقلیم‌های سرد کوهستانی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، جهت‌گیری شیب‌ها یکی از عوامل کلیدی در کنترل تعادل انرژی سطحی محسوب می‌شود؛ دامنه‌های رو به جنوب در نیمکره شمالی، به دلیل دریافت بیشتر تابش خورشیدی، ذوب سریع‌تر برف، دمای بالاتر و نرخ تبخیر بیشتری را تجربه می‌کنند، درحالی‌که دامنه‌های رو به شمال معمولاً سردتر، مرطوب‌تر و دارای ماندگاری بیشتر پوشش برفی هستند (پیین و همکاران، ۲۰۱۵). این تفاوت‌ها، به‌طور مستقیم بر رطوبت خاک، طول فصل رشد و الگوی پراکنش گونه‌های گیاهی اثر می‌گذارد. در نهایت، هیدرولوژی برف به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بنیادین اقلیم کوهستانی، نقش ذخیره‌ساز استراتژیک آب را در چرخه هیدرولوژیک مناطق مرتفع ایفا می‌کند؛ میزان تجمع، زمان ذوب و الگوی توزیع پوشش برفی تحت تأثیر متغیرهایی نظیر دما، شدت تابش خورشیدی، جهت شیب و شرایط توپوگرافی قرار دارد (بنیستون^۳، ۲۰۰۳).

ذوب ناهمگن برف در دامنه‌های مختلف، جریان تدریجی آب را در فصل گرم تضمین کرده و در تأمین منابع آب سطحی و زیرزمینی نقش حیاتی دارد (بارنت^۴ و همکاران، ۲۰۰۵). از این‌رو، شناخت دقیق سازوکارهای ترمودینامیکی و هیدرولوژیک اقلیم کوهستانی، پیش‌نیاز اساسی برای طراحی منظر پایدار، مدیریت منابع آب و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های کوهستانی در برابر تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود.

منظر سازی کوهستانی: اصول اکولوژیک، ژئومورفولوژیک و طراحی سازگار با اقلیم

منظرسازی کوهستانی به‌عنوان شاخه‌ای تخصصی از طراحی منظر، با چالش‌های منحصر به فردی ناشی از توپوگرافی ناهموار، شرایط اقلیمی سخت و حساسیت بالای اکوسیستم‌های کوهستانی مواجه است. این رویکرد، فراتر از جنبه‌های صرفاً زیبایی‌شناختی، بر اصول «طراحی سازگار با اقلیم» و «مدیریت ریسک‌های ژئومورفولوژیک» استوار بوده و تلاش می‌کند میان مداخلات انسانی و ظرفیت‌های اکولوژیک بستر طبیعی تعادل برقرار کند (ناسائور^۵ و همکاران، ۲۰۰۸). در چنین محیط‌هایی، هرگونه مداخله در منظر باید مبتنی بر شناخت دقیق پایداری شیب‌ها، دینامیک هیدرولوژی سطحی، ویژگی‌های خاک و پیچیدگی‌های بوم‌شناختی باشد تا از تشدید فرسایش، ناپایداری زمین و تخریب زیست‌بوم جلوگیری شود.

۱. اصول ژئومورفولوژیک و پایداری شیب

یکی از مهم‌ترین ارکان منظرسازی کوهستانی، شناخت سازوکارهای فرسایش، ناپایداری شیب و لغزش‌های توده‌ای خاک است. طراحی در این مناطق باید بر پایه اصول «مهندسی طبیعی» و استفاده از راهکارهای زیست‌فنی برای تثبیت شیب‌ها انجام گیرد. بهره‌گیری از گونه‌های گیاهی بومی با سیستم ریشه‌ای عمیق، گسترده و متراکم، علاوه بر افزایش انسجام خاک و کاهش خطر لغزش، موجب بهبود نفوذپذیری بستر و کاهش رواناب سطحی می‌شود. این فرایند در کنترل سیلاب‌های ناگهانی، کاهش فرسایش آبی و حفظ پایداری اکولوژیک شیب‌ها نقش مؤثری ایفا می‌کند. همچنین، پرهیز از خاک‌برداری‌های گسترده، ایجاد سطوح افقی وسیع و ترازسازی شدید زمین، از منظر ژئوتکنیکی ایمن‌تر و از نظر اکولوژیکی سازگارتر با فرایندهای طبیعی محیط کوهستانی است (استوکس^۶ و همکاران، ۲۰۱۴).

۲. هیدرولوژی منظر و مدیریت پایدار آب‌های سطحی

در اقلیم‌های کوهستانی، چرخه هیدرولوژیک تحت تأثیر بارش‌های فصلی، ذوب برف، شیب‌های تند و تغییرات سریع رواناب، ماهیتی پویا و گاه مخرب دارد. از این‌رو، منظرسازی کوهستانی باید بر پایه اصول «مدیریت پایدار آب‌های سطحی» و افزایش ظرفیت نگهداشت آب در بستر

طبیعی شکل گیرد. این رویکرد شامل طراحی آبراهه‌های طبیعی، کانال‌های هدایت‌کننده رواناب، فرورفتگی‌های نفوذپذیر و حوضچه‌های تغذیه مصنوعی به‌منظور کنترل جریان آب حاصل از بارش و ذوب برف است. هدف اصلی، کاهش سرعت جریان، افزایش زمان ماندگاری آب در سامانه اکولوژیک و تقویت نفوذ آب به لایه‌های زیرسطحی است تا ضمن کاهش فرسایش خاک و جلوگیری از شست‌وشوی مواد مغذی، نیاز آبی پوشش گیاهی نیز به‌صورت طبیعی تأمین شود (فلچر^۱ و همکاران، ۲۰۱۵).

۳. اکولوژی منظر و انتخاب گونه‌های بومی

انتخاب پوشش گیاهی در منظرسازی کوهستانی باید مبتنی بر اصل «سازگاری اقلیمی و اکولوژیک» باشد. استفاده از گونه‌های بومی که به‌طور طبیعی با شرایط سخت سرمایی، خشکی، بادهای شدید و نوسانات دمایی سازگار شده‌اند، علاوه بر کاهش نیاز به نگهداشت و آبیاری، موجب حفظ تعادل بوم‌سازگان و جلوگیری از گسترش گونه‌های مهاجم می‌شود. این گونه‌ها معمولاً دارای ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک ویژه‌ای مانند ریشه‌های عمیق، سطح تبخیر پایین، مقاومت به تنش آبی و تحمل سرمای شدید هستند که امکان استقرار پایدار آن‌ها را در شرایط کوهستانی فراهم می‌کند. از منظر اکولوژی منظر، ایجاد پیوستگی زیستی میان لکه‌های پوشش گیاهی و فضاها، سبز، نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی، تسهیل جابه‌جایی گونه‌ها و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم در برابر تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. این پیوستگی اکولوژیک، از گسست زیستگاه‌ها جلوگیری کرده و ظرفیت سازگاری سامانه‌های طبیعی را در مواجهه با تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد (فورمن^۲، ۱۹۹۵).

۴. تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی

منظرسازی کوهستانی، در چارچوب رویکردهای نوین طراحی پایدار، باید واجد سطح بالایی از تاب‌آوری اقلیمی باشد. این تاب‌آوری به معنای توانایی منظر در حفظ عملکرد اکولوژیک و ساختاری خود در برابر تنش‌ها و رویدادهای حدی نظیر سیلاب‌های ناگهانی، رانش زمین، فرسایش شدید خاک، طوفان‌های مخرب و نوسانات شدید دمایی است. از این‌رو، طراحی منظر در محیط‌های کوهستانی باید بر پایه کاهش آسیب‌پذیری اکوسیستم و افزایش ظرفیت سازگاری آن با تغییرات اقلیمی صورت گیرد. پوشش گیاهی بومی، علاوه بر تثبیت خاک و کاهش فرسایش، به‌عنوان سپری حفاظتی در برابر رواناب‌های مخرب، ناپایداری شیب‌ها و تنش‌های اقلیمی عمل می‌کند و نقش مهمی در حفظ تعادل اکولوژیک سامانه‌های کوهستانی دارد (آهرن^۳ و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه بر این، توجه به ویژگی‌های توپوگرافیک و جهت‌گیری شیب‌ها، یکی از مؤلفه‌های کلیدی در طراحی اقلیم‌پایه در مناطق کوهستانی به‌شمار می‌رود. جهت و زاویه شیب‌ها بر میزان دریافت تابش خورشیدی، الگوی ذوب برف، شرایط حرارتی سطح و جریان‌های هوایی محلی تأثیر مستقیم دارد. بهینه‌سازی استقرار فضاهای ساخته‌شده بر اساس جهت تابش خورشید، می‌تواند ضمن کاهش اتلاف انرژی، موجب بهبود آسایش حرارتی، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش نیاز به سامانه‌های گرمایش و سرمایش مصنوعی شود (پپین و همکاران، ۲۰۱۵).

در حوزه طراحی محیط و منظر با الگوهای کاهش مصرف آب، رزاقی‌اصل و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش خویش به تغییر شیوه‌های آبیاری مانند بهره‌گیری از روش‌های نوین و کارآمد به‌جای روش‌های سنتی کم‌بازده، تغییر زمان آبیاری جهت بهره‌وری بیشتر و استفاده از آب‌های نامتعارف و تغییر الگوی کشت در پوشش گیاهی پرداخته‌اند. گوهر^۴ (۲۰۱۰) به بررسی نقش و اثربخشی قوانین و مقررات مدیریت آب در منظر پرداخته و اهمیت آن‌ها را در حفظ منابع آب در فضای سبز شهری و مناطق خشک مورد تأکید قرار می‌دهد. قوانین آب منظر، شامل محدودیت‌هایی در زمان‌بندی و مقدار آبیاری، الزام به استفاده از گیاهان مقاوم به خشکی و به‌کارگیری فناوری‌های آبیاری کم‌مصرف مانند آبیاری قطره‌ای است. پژوهش همچنین بر نیاز به طراحی سیاست‌های تطبیقی و مبتنی بر شرایط اقلیمی و فرهنگی منطقه‌ای تأکید دارد تا ضمن حفظ کارایی، انعطاف‌پذیری لازم در مدیریت منابع آب فراهم شود. سعیدی و همکاران (۲۰۲۰) به ترجیحات و منظرسازی بر اساس نیاز آبی پایین گیاهان و ارجحیت قرار دادن این نوع طراحی در مناطق دارای محدودیت آبی برای پایداری و توسعه مناظر طراحی‌شده تأکید دارند. کوماوات^۵ و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی بر مزایای زیست‌محیطی و عملکردی خشک‌منظری در مناطق شهری تأکید دارند، چراکه با بهره‌گیری از گیاهان بومی مقاوم به خشکی، سیستم‌های آبیاری کارآمد و پوشش‌های مالچ، می‌توان مصرف آب فضای سبز شهری را تا ۷۵٪ کاهش داد. چاو^۶ و همکاران (۲۰۱۲) افزون بر آن، نشان دادند خشک‌منظری سبب کاهش هزینه نگهداری، بهبود سلامت خاک، جذب کرده‌افشان‌ها و ارتقای پایداری اکولوژیک در محیط‌های شهری می‌شود. اونال^۷ (۲۰۲۳) به بررسی کارآمدی خشک‌منظری به‌عنوان راهکاری

1 Fletcher
2. Forman
3. Ahern
4. Gober
5. Kumawat
6. Chow
7. Unal

مؤثر برای کاهش مصرف آب در طراحی منظر می‌پردازد؛ این مطالعه در محوطه دانشگاه ایالتی آریزونا در آمریکا با اقلیم گرم و خشک و با مقایسه سه نوع الگوی منظر (چمن‌زار، ترکیبی و خشک‌منظر) نشان داد که خشک‌منظر دارای کمترین میزان مصرف آب است. با تحلیل سناریوهای مختلف جایگزینی چمن با خشک‌منظر (از ۲۵ درصد تا ۱۰۰ درصد) مشخص شد که جایگزینی کامل می‌تواند تا ۸۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب ایجاد کند. استفاده گسترده از این سبک طراحی می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر در مدیریت پایدار منابع آبی در مناطق خشک به کار رود و مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های آینده طراحی فضای سبز شهری فراهم آورد. کاناس^۱ و همکاران (۲۰۲۴) به معرفی روش‌های طراحی حیاط‌های کم‌دردر می‌پردازند که با استفاده از گیاهان بومی منطقه و جایگزین‌های چمن‌های سنتی، نیاز به آبیاری، کوددهی و نگهداری را به حداقل رسانده است. این رویکردها علاوه بر کاهش مصرف آب، به حفظ تنوع زیستی و بهبود کیفیت خاک و اکوسیستم شهری کمک می‌کنند. پژوهش به‌طور تخصصی به اهمیت انتخاب گونه‌های مناسب برای هر نوع خاک و شرایط نوری محیط تأکید دارد. هیرا^۲ و همکاران (۲۰۲۴)، در پژوهشی نوآورانه با هدف ارزیابی و ارتقای عملکرد سامانه‌های سبز ساختمانی یکپارچه در اقلیم‌های مدیترانه‌ای بر پایه اصول طراحی خشک‌منظری و طبیعت‌بنیاد، به بررسی مدل‌های بهره‌برداری و نگهداری مشارکتی و پایش بلندمدت اثرات اکولوژیک، زیبایی‌شناختی و عملکردی سیستم‌های سبز یکپارچه پرداخته و بر اهمیت تلفیق فناوری هوشمند، مصالح مقاوم اقلیمی و شبکه‌سازی میان ذی‌نفعان در پایداری این سیستم‌ها تأکید دارند.

برخلاف بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های پیشین که عمدتاً رویکردی تک‌بعدی داشته و تمرکز خود را صرفاً بر جنبه‌هایی نظیر انتخاب گونه‌های گیاهی مقاوم یا تثبیت مکانیکی شیب‌ها معطوف کرده‌اند، نوآوری بنیادین پژوهش حاضر در تلفیق میان‌رشته‌ای دانش «فیزیک اقلیم کوهستانی» با اصول طراحی خشک‌منظر و بوم‌شناسی منظر نهفته است. این رویکرد، طراحی منظر را از یک فرایند صرفاً زیبایی‌شناختی یا سبک‌محور فراتر برده و آن را به سامانه‌ای علمی، عملکردگرا و مبتنی بر سازوکارهای محیطی تبدیل می‌کند که قادر است به پیچیدگی‌های اقلیمی، هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک مناطق کوهستانی پاسخ دهد.

پژوهش حاضر با هدف کاهش خلأهای دانشی موجود در حوزه طراحی منظر پایدار، به‌ویژه در بستر اقلیم سرد، خشک و کوهستانی غرب ایران، در پی ارائه الگویی عملیاتی برای تبیین چارچوب «خشک‌منظر کوهستانی» است. در این چارچوب، طراحی منظر نه بر اساس الگوهای کلیشه‌ای و تعمیم‌یافته، بلکه بر پایه درک دقیق از دینامیک‌های اقلیمی و فرایندهای محیطی شکل می‌گیرد. مؤلفه‌هایی نظیر گرادبان‌های دمایی، الگوهای تجمع و ذوب برف، جهت‌گیری شیب‌ها، گردش‌های محلی هوا، رفتار رواناب سطحی و ویژگی‌های حرارتی بستر، به‌عنوان متغیرهای بنیادین در فرایند طراحی مورد توجه قرار می‌گیرند.

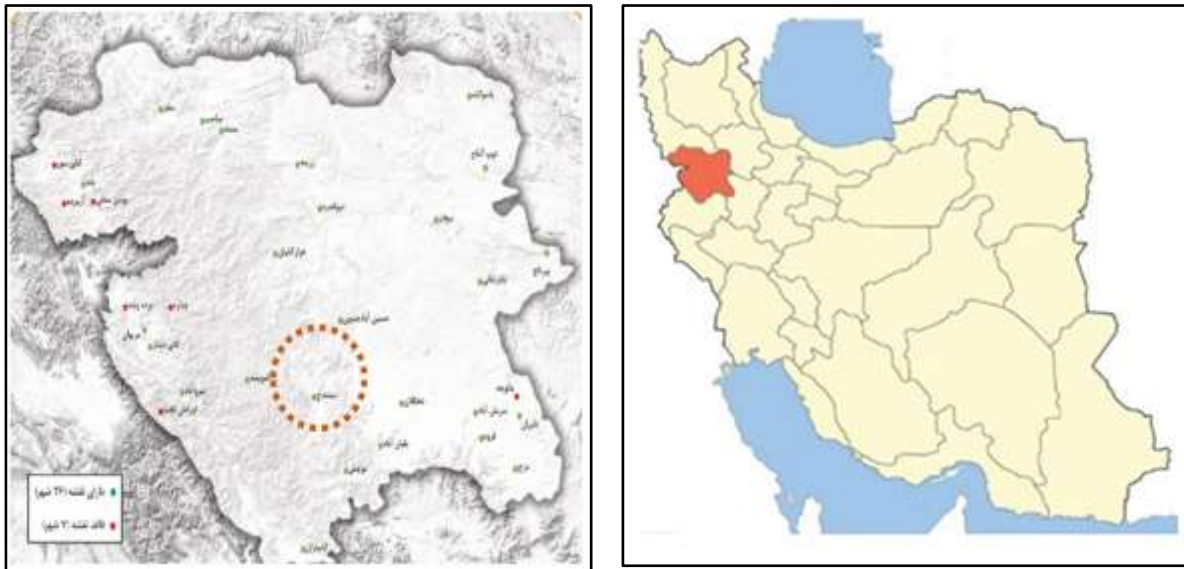
یکی از ابعاد کلیدی این پژوهش، پاسخ هم‌زمان به دو چالش اساسی مناطق کوهستانی، یعنی «مدیریت کم‌آبی» و «پایداری ژئوتکنیکی شیب‌ها» است. در این رویکرد، پوشش گیاهی صرفاً به‌عنوان عنصری تزئینی یا مصرف‌کننده آب تلقی نمی‌شود، بلکه به‌مثابه یک سامانه زنده و عملکردی در ساختار اکولوژیک منظر ایفای نقش می‌کند. استفاده از گونه‌های گیاهی بومی با سامانه ریشه‌ای عمیق و متراکم، ضمن کاهش نیاز به آبیاری تکمیلی، موجب افزایش انسجام خاک، بهبود نفوذپذیری، کاهش رواناب سطحی و کنترل فرسایش در شیب‌های ناپایدار می‌شود. در نتیجه، پوشش گیاهی در این الگو به‌عنوان ابزاری برای «مهندسی طبیعی» و ارتقای تاب‌آوری اکوسیستم در برابر تنش‌های اقلیمی و مخاطرات ژئومورفولوژیک عمل می‌کند. علاوه‌براین، پژوهش حاضر با بومی‌سازی راهکارهای جهانی خشک‌منظر در چارچوب ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی و هیدرولوژی غرب ایران، تلاش می‌کند مدلی کاربردی و قابل‌اجرا برای طراحی منظر پایدار ارائه دهد. این مدل می‌تواند به‌عنوان مرجعی علمی برای طراحان منظر، برنامه‌ریزان شهری و مدیران محیطی در راستای خلق فضاهایی کم‌مصرف، ایمن، تاب‌آور و سازگار با فرایندهای طبیعی مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، چارچوب پیشنهادی این پژوهش را می‌توان گامی مؤثر در گذار از منظرهای صرفاً تزئینی به منظرهای اکولوژیک، عملکردگرا و تاب‌آور در مناطق کوهستانی ایران دانست.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه

شهر سنجند، مرکز استان کردستان، در غرب ایران و در پهنه کوهستانی زاگرس واقع شده است. این شهر با ارتفاع حدود ۱۴۵۰ تا ۱۵۵۰ متر از سطح دریا و قرارگیری در میان کوه‌های زاگرس، دارای توپوگرافی تپه‌ای و کوهستانی و شیب‌های نسبتاً زیاد است. اقلیم سنجند در محدوده اقلیم سرد و خشک کوهستانی قرار می‌گیرد و تابستان‌هایی گرم و خشک و زمستان‌هایی سرد و همراه با یخبندان دارد. بارندگی بیشتر در

پاییز، زمستان و بهار رخ می دهد و تابستان کم بارش ترین فصل سال است. این ویژگی های اقلیمی و توپوگرافی، در شکل گیری شرایط محیطی، جریان آب های سطحی، فرسایش خاک و نحوه طراحی فضاهای شهری و منظر نقش مهمی دارند. بررسی میانگین داده های هواشناسی سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ نشان می دهد سنجند دارای اختلاف دمای قابل توجه میان فصول گرم و سرد، کاهش رطوبت و بارش در تابستان و افزایش رطوبت و بارش در فصل سرد است. بنابراین، تفاوت شدید شرایط اقلیمی، محدودیت منابع آب و ویژگی های توپوگرافی از عوامل اصلی مؤثر بر طراحی منظر شهری سنجد به شمار می روند. در چنین شرایطی، انتخاب گونه های گیاهی سازگار با اقلیم، کاهش نیاز آبی فضای سبز، استفاده بهینه از منابع آب موجود و توجه به نحوه دسترسی و انتقال آب به گیاهان، از الزامات اساسی منظرسازی در شهر سنجد است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منبع: سامانه ملی تقسیمات کشوری سازمان نقشه برداری کشور، ۱۴۰۳

روش تحقیق

در راستای تحقق اهداف پژوهش و پاسخ گویی به شکاف های دانشی شناسایی شده، فرایند گردآوری و تحلیل داده ها بر پایه رویکرد پژوهش کیفی و با بهره گیری از تکنیک «دلفی» طراحی و اجرا شد. هدف اصلی از انتخاب این روش، تبدیل دانش ضمنی، تجربیات اجرایی و دیدگاه های تخصصی خبرگان به دانشی صریح، ساختار یافته و قابل استناد برای تدوین چارچوب نظری و عملیاتی پژوهش بود. روش دلفی، به دلیل ماهیت تعاملی و اجماع محور خود، امکان دستیابی به دیدگاهی چندرشته ای و همگرا را در موضوعات پیچیده و میان رشته ای فراهم می سازد؛ موضوعی که در پژوهش حاضر، با توجه به پیوند میان طراحی منظر، اقلیم شناسی، هیدرولوژی و مهندسی محیط، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. فرایند اجرا شامل یک دور استاندارد سازی پرسشنامه توسط متخصصان و سپس دو دور پرسشنامه تخصصی دلفی، طی بازه زمانی اردیبهشت ۱۴۰۴ تا آبان ۱۴۰۴ به طول انجامید.

جامعه آماری این بخش شامل ۱۵ نفر از متخصصان و خبرگان حوزه های طراحی منظر، اقلیم شناسی، معماری، مهندسی عمران و برنامه ریزی محیطی بود که به صورت هدفمند و تا رسیدن به اشباع نظری انتخاب شدند. معیار انتخاب افراد، برخورداری از سابقه علمی یا اجرایی مرتبط، تجربه فعالیت در پروژه های مرتبط با محیط های کوهستانی و تخصص در زمینه پایداری محیطی و طراحی اقلیم پایه بود. نتایج پرسشنامه صرفاً حاصل دیدگاه های متنوع یک رشته طراحی نیست، بلکه ترکیبی از دیدگاه های افراد با تخصص در حیطه های اکولوژیکی، مدیریتی و اقلیمی است؛ چراکه استانداردهای طراحی منظر باید بتوانند پاسخ گوی نیازهای چندبعدی محیط زیست، اقلیم و عملکرد باشند. این تنوع تخصصی، در حقیقت موجب افزایش اعتبار بیرونی پژوهش می شود و قابلیت تعمیم نتایج به جامعه وسیع تری را فراهم می کند و امکان بررسی موضوع از ابعاد مختلف اکولوژیک، فنی و طراحی را فراهم کرد.

پیش از توزیع پرسشنامه مرحله نخست، روایی صوری و محتوایی ابزار پژوهش از طریق بررسی و تأیید اولیه ۶ نفر از میان همان اعضای پانل، که از تجربه بالاتری برخوردار بودند، پیش از توزیع نهایی تأیید شد. پایایی فرایند دلفی نیز از طریق بازخورد و اصلاح تدریجی نظرات در دو دور متوالی و بررسی ثبات پاسخ ها تأیید شد.

فرایند گردآوری داده‌ها در دو مرحله متوالی و تکرارشونده انجام شد تا از طریق بازخورد مستمر و اصلاح تدریجی دیدگاه‌ها، زمینه دستیابی به اجماع علمی میان متخصصان فراهم شود.

مرحله نخست: اکتشاف مفاهیم و استخراج شاخص‌ها

در مرحله اول، پرسشنامه‌ای نیمه‌ساختاریافته با پرسش‌های باز در اختیار متخصصان قرار گرفت. هدف از این مرحله، شناسایی آزادانه چالش‌ها، ظرفیت‌ها، اصول طراحی و راهکارهای بالقوه مرتبط با خشک‌منظر در اقلیم سرد و خشک کوهستانی، بدون اعمال محدودیت‌های پیشینی بود. پاسخ‌های گردآوری‌شده با استفاده از روش تحلیل محتوای کیفی، به‌صورت دستی و بر پایه کدگذاری موضوعی با کدهای «پیشنهاد ۱» تا «پیشنهاد آخر» مورد بررسی قرار گرفت و مفاهیم کلیدی، مضامین اصلی و شاخص‌های اولیه استخراج و طبقه‌بندی شدند. خروجی این مرحله، مبنای طراحی ابزار سنجش در مرحله دوم پژوهش قرار گرفت.

مرحله دوم: سنجش، اولویت‌بندی و اجماع‌سازی

بر اساس یافته‌های مرحله نخست، پرسشنامه مرحله دوم در قالبی بسته و چندگزینه‌ای تدوین شد. در این مرحله، از متخصصان خواسته شد شاخص‌های استخراج‌شده را بر اساس معیارهایی نظیر اهمیت، قابلیت اجرا، کارآمدی اکولوژیک و امکان بومی‌سازی، در مقیاس «لیکرت سه درجه‌ای» ارزیابی و رتبه‌بندی کنند. معیار اجماع در این پژوهش، بسامد تکرار هر پیشنهاد در میان پاسخ‌های متخصصان بود؛ بدین ترتیب، شاخص‌هایی که بیشترین میزان تکرار و توافق را در میان پیشنهادهای دریافتی داشتند، در جدول نهایی شاخص‌های منتخب (جدول ۷) گنجانده شدند و مبنای وزن‌دهی و اولویت‌بندی شاخص‌های مؤثر در طراحی خشک‌منظر کوهستانی قرار گرفتند.

مرحله سوم: تحلیل داده‌ها و استنتاج نهایی

داده‌های حاصل از هر دو مرحله، پس از تلفیق و تحلیل کیفی-تفسیری و تحلیل‌های آماری توصیفی با استفاده از نرم‌افزار Excel، مبنای استنتاج‌های نهایی پژوهش قرار گرفتند. نتایج به‌صورت جداول طبقه‌بندی‌شده و ماتریس‌های تحلیلی ارائه شدند تا میزان اجماع متخصصان، اهمیت نسبی شاخص‌ها و روابط میان مؤلفه‌های اصلی طراحی مشخص شود. برآیند این تحلیل‌ها، چارچوب تلفیقی «خشک‌منظر کوهستانی» را شکل داد؛ چارچوبی که با تکیه بر اصول بوم‌شناسی منظر، هیدرولوژی محیطی و طراحی اقلیم‌پایه، به‌عنوان الگویی کاربردی برای طراحی منظر پایدار در مناطق سرد و خشک کوهستانی ارائه می‌شود.

یافته‌ها و بحث

این بخش به بررسی پرسش‌های مرتبط با مدیریت آب و کاهش مصرف آن اختصاص دارد. موضوعات مورد بررسی شامل روش‌ها و سیستم‌های آبیاری و همچنین راهبردهای مدیریت مصرف آب با هدف حذف یا به حداقل رساندن مصرف است که در مرحله نخست پرسشنامه به‌صورت باز جمع‌آوری شده‌اند. نتایج این مرحله بر اساس پیشنهادهای ارائه‌شده از سوی متخصصان استخراج شده و تمامی شاخص‌ها و مؤلفه‌های مؤثر و دارای اهمیت در طراحی محوطه بر اساس اصول خشک‌منظری را دربر می‌گیرد (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج خام پرسشنامه باز مرحله نخست دلفی، راهکارها و الزامات مدیریت بهینه در مصرف آب

ردیف	محوریت سوالات	نتیجه‌گیری پیشنهادات و پاسخ سوالات
۱	راهکارهایی جهت آبیاری بهینه	- پیشنهاد ۱: اصلاح خاک مکان مورد نظر، کشت بذور مناسب، استفاده از مواد ذخیره کننده آب و توپوگرافی مناسب - پیشنهاد ۲: آبیاری نمشی و جذب آب در کوهستانی که ماسه‌ای است - پیشنهاد ۳: آبیاری قطره‌ای اتوماتیک - پیشنهاد ۴: پوشش‌های سطحی به کمک سنگ ریزه و خاک برگ گیاهان بومی - پیشنهاد ۵: بادشکن و سایه‌سازها پشت به افتاب حین طراحی کشت. - پیشنهاد ۶: طراحی شبکه‌ای پوشش گیاهی همسان - پیشنهاد ۷: آبیاری عمیق اما کم تکرار
۲	الزامات و پیش‌نیازهای زیرساختی سیستم آبیاری	- پیشنهاد ۱: فرورفتگی‌های جذب آب در نقاط شیب‌دار. - پیشنهاد ۲: ترازهای کندکننده جریان آب در مسیر آب - پیشنهاد ۳: توجه به منابع ذخیره دغنی یا نیمه‌دغنی - پیشنهاد ۴: توجه به دمای یخبندان خاک جهت قراردادی سیستم زیرسطحی

ردیف	محوریت سوالات	نتیجه گیری پیشنهادات و پاسخ سوالات
۳	سامانه های جمع آوری، هدایت و ذخیره آب باران و ذوب برف	- پیشنهاد ۱: آبخیزداری مبتنی بر جمع آوری ژئو ممبران - پیشنهاد ۲: متناسب با موقعیت، لازم است بهترین شیوه جمع آوری شناسایی شود - پیشنهاد ۳: قراردعی منبع جمع آوری آب سطحی در پایین دست سایت - پیشنهاد ۴: تعبیه شبکه اسفنجی در سطوح شیب دار برای جذب چند مرحله ای - پیشنهاد ۵: قراردعی تانک های زیرسطحی - پیشنهاد ۶: سیستم های زیرزمینی مدولار - پیشنهاد ۷: سیستم پروانه ای جمع آوری آب باران - پیشنهاد ۸: سیستم BlueBloqs - پیشنهاد ۹: سیستم های جمع کننده رطوبت از هوا - پیشنهاد ۱۰: روش کنداساسیون خنک کننده
۴	مهم ترین و کارآمد ترین نوع سیستم مدیریت آب	- پیشنهاد ۱: قرار دهی ناودان ها - پیشنهاد ۲: شیرهای خودکار - پیشنهاد ۳: سیستم های حسگر رطوبت - پیشنهاد ۴: آبیاری زیرسطحی - پیشنهاد ۵: آبیاری قطره ای
۵	بهترین روش برای مدیریت آب	- پیشنهاد ۱: ذخیره آب گلدانی و یا تغییر خاک برای نگه داشت رطوبت در کوهستان - پیشنهاد ۲: کانال های شیب دار - پیشنهاد ۳: ایجاد باغچه های بارانی با توجه به سایت - پیشنهاد ۴: مالچ پاشی گیاهی گسترده
۶	تعیین ویژگی های فیزیولوژیکی و ریخت شناختی گیاهان	- پیشنهاد ویژگی: گونه های برگ کوچک و غیر گوشتی، سیستم ریشه عمیق - پیشنهاد گونه: آویشن، بومادران، اسطوخدوس، گون ها، زیتون تلخ، بلوط، زالزالک، آویشن، مرزه زاگرس، کاکوتی، شوربیز. - پیشنهاد گیاهان: تیغ دار مثل گلرنگ پشمی، ستوره خورشیدی، کوزینیا، آکارنا.
۷	تعیین معیارهای تخصصی برای انتخاب گیاه	- فاکتور انتخابی: تحمل به یخ زدگی، تحمل وزن برف، مقاوم در برابر باد، تحمل خشکی - پیشنهاد گونه: آویشن، اسطوخدوس، بومادران سفید و زرد، انواع گون.
۸	تعیین فاکتورهای منع کشت گیاه	- فاکتور عدم انتخابی: گونه های رطوبت دوست، برگ پهن بزرگ، سریع الرشد، گونه های اروپایی و مهاجم سازگار شده، گونه های با ارتفاع قدی بالا.
۹	تعیین گونه های بومی یا انطباق پذیر با اقلیم کوهستانی سرد و خشک	- پیشنهاد درخت و درختچه: زالزالک، بادام، درخت ون، پسته وحشی، زرشک وحشی، سماق، بنه، زبان گنجشک، ارغوان زاگرس، سنجد، دارمازو، تایله. - پیشنهاد گیاهان علفی: آویشن، پونه، بومادران سفید، لاله واژگون، مرزه هورامی، جایی کوهی، آویشن کوهی، افدرا، شاه تره، گون قلاب، ختمی زاگرس، یولاف، کاسنی وحشی، گون گل آبی، گون گل سرخی، بومادران زاگرس، بابونه زاگرس، شوربیز، خرگوشک کوردی، پنیرک سوراخ برگ، بوقناق، رازیانه وحشی، چویل، گل گندم شاخه دار، کوسینیا، خارتوبی، گل گاوزبان زاگرس، شورک خاردار، پیچک درختچه ای، شمعدانی غده ای، گل راعی زبر، خرگوشک اولیویه، گوش بره، کلکنه باد کرده، کلپوره.

منبع: یافته های پژوهش، ۱۴۰۴

جدول (۲) به پرسش های مربوط به مدیریت آب و کاهش مصرف آب اختصاص دارد که در آن، نتایج نهایی مرحله دوم پرسشنامه، بر اساس بیشترین بسامد تکرار و توافق در پیشنهادهای دریافتی از متخصصان استخراج شده و در جدول ارائه شده است. در جدول حاضر، تنها شاخص ها و مولفه های دارای اهمیت بالا که از دیدگاه متخصصان به بیشترین میزان توافق و تکرار دست یافته اند، لحاظ شده اند و از درج موارد با درجه اهمیت کم تا متوسط به طور آگاهانه اجتناب شده است.

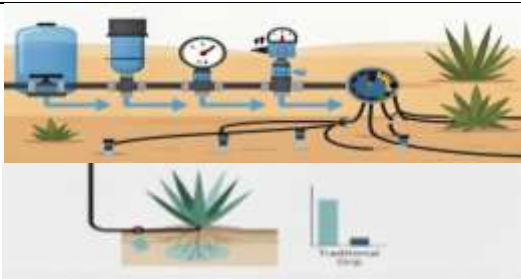
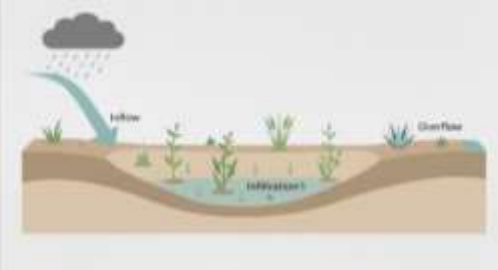
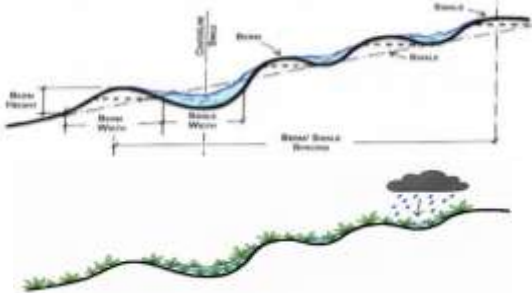
جدول ۲. نتایج پرسشنامه مرحله دوم دلفی، راهکارها و الزامات مدیریت بهینه در مصرف آب

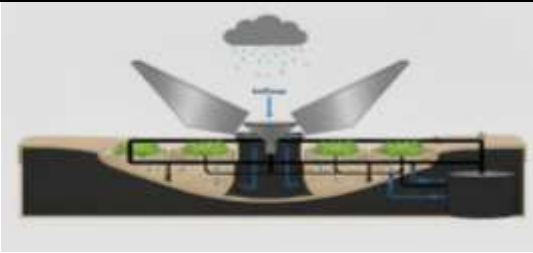
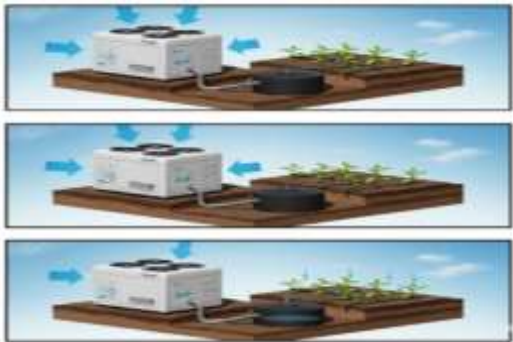
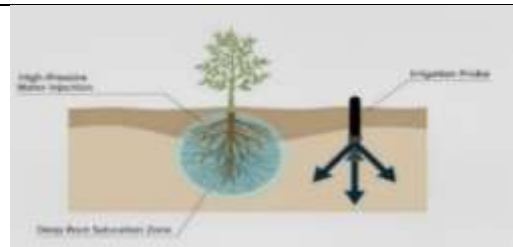
ردیف	محوریت سوالات	نتیجه‌گیری پیشنهادات و پاسخ سوالات
۱	راهکارهایی جهت آبیاری بهینه	- پیشنهاد پراهمیت ۱: اصلاح خاک مکان مورد نظر - پیشنهاد پراهمیت ۲: آبیاری نمشی - پیشنهاد پراهمیت ۳: آبیاری قطره‌ای اتوماتیک - پیشنهاد پراهمیت ۴: پوشش‌های سطحی - پیشنهاد پراهمیت ۵: آبیاری عمیق اما کم تکرار - پیشنهاد پراهمیت ۶: طراحی شبکه‌ای پوشش گیاهی همسان
۲	الزامات و پیش‌نیازهای زیرساختی سیستم آبیاری	- پیشنهاد پراهمیت ۱: فرورفتگی‌های جذب آب در نقاط شیب‌دار - پیشنهاد پراهمیت ۲: ترازهای کندکننده جریان آب در مسیر آب - پیشنهاد پراهمیت ۳: توجه به منابع ذخیره دلفنی یا نیمه‌دلفنی
۳	سامانه‌های جمع‌آوری، هدایت و ذخیره آب باران و ذوب برف	- پیشنهاد پراهمیت ۱: آبخیزداری مبتنی بر جمع‌آوری ژئو ممبران - پیشنهاد پراهمیت ۲: تعبیه شبکه اسفنجی - پیشنهاد پراهمیت ۳: قرار دهی منبع جمع‌آوری آب سطحی در پایین‌دست سایت - پیشنهاد پراهمیت ۴: جذب آب چند مرحله‌ای - پیشنهاد پراهمیت ۵: قرار دهی تانک‌های زیرسطحی - پیشنهاد پراهمیت ۶: سیستم پروانه‌ای جمع‌آوری آب باران - پیشنهاد پراهمیت ۷: سیستم‌های جمع‌کننده رطوبت از هوا
۴	مهم‌ترین و کارآمدترین نوع سیستم مدیریت آب	- پیشنهاد پراهمیت ۱: قراردادی ناودان‌ها - پیشنهاد پراهمیت ۲: آبیاری تحت فشار - پیشنهاد پراهمیت ۳: آبیاری زیرسطحی - پیشنهاد پراهمیت ۴: آبیاری قطره‌ای
۵	بهترین روش برای مدیریت آب	- پیشنهاد پراهمیت ۱: تغییر یا اصلاح خاک برای نگه‌داشت رطوبت - پیشنهاد پراهمیت ۲: کانال‌های شیب‌دار - پیشنهاد پراهمیت ۳: ایجاد باغچه‌های بارانی با توجه به سایت - پیشنهاد پراهمیت ۴: مالچ پاشی گیاهی گسترده
۶	تعیین ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ریخت‌شناختی گیاهان	- پیشنهاد پراهمیت: گونه‌های برگ کوچک و غیرگوشی، سیستم ریشه عمیق
۷	تعیین معیارهای تخصصی برای انتخاب گیاه	- پیشنهاد پراهمیت: تحمل به یخ زدگی، تحمل خشکی
۸	تعیین گونه‌های بومی یا انطباق‌پذیر با اقلیم کوهستانی سرد و خشک	- پیشنهاد پراهمیت درخت و درختچه: زالزالک، بلوط زاگرسی، درخت ون، زرشک وحشی، سماق، ولیک، بنه، ارغوان زاگرسی، دارمازو، سنجید، تایل. - پیشنهاد پراهمیت گیاهان علفی: سلمه معطر، شوربیز، کاسنی وحشی، گون گل آبی، بومادران چندسر، افدارا، چای کوهی، هیرشفلدیا خاکستری، بابونه، گلرنگ پشمی، کوزینیا، کریپیس، اکینوپس شرقی، لازیبوگون موس مانند، مریم نخودی، چمن اسفندی، دم موشی، علف پر، گون پنبه ای، شقایق باریک برگ، کلاه میرحسن بالدار، بومادران ویلهمی، درمنه کوهی، بابونه زرد، فرقیون شاخ دار، کوکیا ستاره‌ای، آویشن، کاکوتی، ترشک کیسه دار، اسپند، ستاره کوهی، علف پشمکی، خارسر، علف صحرایی پارس، سورنجان پارس، بل والیا، اسطوخودوس.

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

جدول (۳) به نمایش تصویری کلیه سیستم‌ها و روش‌های مدیریت و کاهش مصرف آب قابل‌کاربرد در طراحی خشک‌منظری اختصاص دارد. این جدول با هدف افزایش خوانایی، معرفی بصری و شناسایی دقیق سیستم‌ها و روش‌های اجرایی، به‌منظور استفاده و آشنایی متخصصان، پژوهشگران و دانشجویان حوزه طراحی منظر تدوین شده است. جدول حاضر شامل نوع سیستم، ویژگی‌های اختصاصی هر سیستم و همچنین تصاویر گرافیکی مرتبط با هر روش و نحوه اجرای آن در طراحی منظر است. منبع تصاویر توسط نگارندگان پژوهش گرافیکی و طراحی شده است.

جدول ۳. نمایش تصویری سیستم‌ها و روش‌های مدیریت مصرف آب

ردیف	نوع سیستم	تصاویر
۱	نوع سیستم: آبیاری قطره‌ای اتوماتیک ویژگی: - آبیاری قطره‌ای آب را مستقیم به ریشه گیاه می‌رساند، مصرف آب را کاهش و رشد گیاه را بهبود می‌بخشد.	
۲	نوع سیستم: جذب آب در نقاط شیب دار ویژگی: - جریان سریع آب از سطح خاک به حوض - قرار گیری بیشتر آب در معرض گیاه - هدایت سریع تر آب به گیاه مدنظر	
۳	نوع سیستم: باغچه‌های بارانی ویژگی: - جمع‌آوری و هدایت آب باران به خاک - کاهش جریان سطحی و فرسایش - نفوذ بهتر آب به ریشه گیاهان - کاهش مصرف آب شهری - کاهش مصرف آب شهری	
۴	نوع سیستم: ترازکننده‌های زمین در مسیر آب ویژگی: - کاهش سرعت جریان سطحی آب - جلوگیری از فرسایش خاک - افزایش نفوذ آب به خاک - کمک به تثبیت گیاهان و پوشش خاک - توزیع یکنواخت آب در زمین‌های شیب‌دار	
۵	نوع سیستم: منابع ذخیره دغنی ویژگی: - جمع‌آوری آب باران یا روان‌آب‌ها در زیر زمین - استفاده برای آبیاری در دوره‌های خشک - جلوگیری از هدررفت آب در سطح زمین - کاهش تبخیر نسبت به منابع سطحی	
۶	نوع سیستم: آبخیز داری مبتنی بر جمع‌آوری ژئو ممبران ویژگی: - جمع‌آوری کارآمد آب باران و روان‌آب‌ها - کاهش نفوذ آب به خاک‌های غیرمفید - ذخیره‌سازی آب اضافه در مخازن یا حوضچه‌ها	

ردیف	نوع سیستم	تصاویر
۷	نوع سیستم: پروانه ای جمع آوری آب ویژگی: - جمع‌آوری بیشترین سطح آب باران - هدایت آب به مخزن مرکزی یا ذخیره زیرزمینی - افزایش راندمان جمع‌آوری آب باران - کاهش فرسایش و جریان سطحی	
۸	نوع سیستم: سیستم های جمع کننده رطوبت از هوا SkyH2O ویژگی: - استخراج رطوبت از هوا بدون نیاز به بارش - مناسب برای مناطق خشک و کم بارش - کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی و سطحی - تولید آب قابل شرب و آبیاری	
۹	نوع سیستم: آبیاری زیرسطحی ویژگی: - کاهش تبخیر آب نسبت به آبیاری سطحی - کاهش رشد علف‌های هرز - جلوگیری از شسته شدن مواد مغذی خاک - صرفه‌جویی زیاد در مصرف آب	
۱۰	نوع سیستم: آبیاری تحت فشار ویژگی: - کاهش فرسایش خاک و تبخیر آب - انتقال آب به سطوح پایین تر ریشه گیاه - کاهش مصرف آب با انتقال سریع و پرفشار - دسترسی سریع ریشه گیاه به آب	
۱۱	نوع سیستم: آبراهه و خاکریز ویژگی: - افزایش نفوذ آب به خاک و ریشه - ذخیره رطوبت در زمین‌های شیب‌دار - کاهش نیاز به آبیاری مصنوعی	

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

نتایج حاصل از پرسشنامه‌های مطرح‌شده جهت دستیابی به پاسخ پژوهش، به‌طور کلی در پنج دسته تخصصی قرار می‌گیرند. در این پژوهش با توجه به ویژگی‌های اقلیم، توپوگرافی و فیزیک محیطی منطقه می‌توان این‌چنین استنباط کرد که الگوی کاهشی در مصرف آب در منظرسازی مناطق کوهستانی با اقلیم سرد و خشک شامل مواردی است که در زیر به تفکیک بیان شده است:

۱. افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک

- افزایش مواد آلی خاک برای بهبود ظرفیت نگهداری آب
- بهره‌گیری از پلیمرهای نگهدارنده آب در بستر کاشت

- پوشاندن خاک با مالچ آلی یا معدنی جهت کاهش تبخیر

- اصلاح بافت خاک در نواحی با خاک ضعیف

- طراحی فرورفتگی‌های نفوذپذیر (باغچه‌های بارانی) برای افزایش نفوذ آب به خاک در مناطق با شیب تند

۲. مدیریت و ذخیره آب باران و ذوب برف

- طراحی سامانه‌های ذخیره آب باران در مخازن زیرسطحی جهت جلوگیری از انجماد و آسیب

- هدایت آب ذوب برف به حوضچه‌های نفوذپذیر ذخیره‌ای برای فصول کم‌بارش

- افزایش نفوذپذیری خاک برای استفاده حداکثری از بارش طبیعی

۳. مهندسی ریزاقلیم برای کاهش نیاز آبی گیاهان

- ایجاد کمربندهای بادشکن برای کاهش تبخیر

- افزایش سایه‌اندازی با کاشت چندلایه گیاهی بومی

- استفاده از مصالح بومی منطقه با بازتاب کم و ظرفیت حرارتی بالا

۴. استفاده از منابع جایگزین و بازچرخانی آب

- بازیافت و استفاده مجدد از آب خاکستری در آبیاری

- سامانه‌های استخراج رطوبت از هوا در مناطق بسیار خشک

- بهره‌گیری از آب‌های غیرمتعارف تصفیه‌شده برای آبیاری فضای سبز

۵. طرح کاشت گیاهی مناسب و متناسب با اقلیم و توپوگرافی منظر

- معیارهای فیزیولوژیک سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده برای دسترسی به رطوبت‌های زیرسطحی

- کوتیکول ضخیم و اپیدرم مومی برای کاهش اتلاف آب

- ظرفیت اسمزی بالا برای جلوگیری از آسیب سلولی ناشی از یخ‌زدگی

- بهره‌مندی از گیاهان بومی، خاردار و برگ‌کوچک جهت کاهش تعرق

الگوی پنج‌گانه حاصل از اجماع پانل متخصصان در پژوهش حاضر، در چند محور با یافته‌های پیشین هم‌سویی نشان می‌دهد و در برخی ابعاد نیز آن‌ها را برای بستر کوهستانی بسط می‌دهد. تأکید پانل بر گونه‌های گیاهی بومی مقاوم به خشکی و سامانه‌های آبیاری کارآمد (محور اول و پنجم) با یافته‌های کوموات و همکاران (۲۰۲۲) هم‌راستا است که کاهش تا ۷۵ درصدی مصرف آب فضای سبز شهری را در نتیجه به‌کارگیری چنین رویکردی گزارش کرده‌اند. همچنین، اولویت بالای محور چهارم (بازچرخانی آب خاکستری و منابع جایگزین) با یافته‌های اوانال (۲۰۲۳) درباره صرفه‌جویی تا ۸۵ درصدی در سناریوهای جایگزینی کامل چمن با خشک‌منظر هم‌خوانی دارد. با این حال، برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً در اقلیم گرم و خشک (مانند آریزونا، آمریکا) انجام شده‌اند، محور دوم و سوم الگوی حاضر (مدیریت آب ذوب برف و مهندسی ریزاقلیم برای مقابله با یخبندان) در پیشینه پژوهش کمتر مورد توجه قرار گرفته بودند؛ این تفاوت را می‌توان ناشی از ویژگی اقلیمی متمایز منطقه مورد مطالعه (اقلیم سرد و کوهستانی در برابر اقلیم گرم‌وخشک اغلب مطالعات پیشین) دانست و دقیقاً همین نکته، وجه تمایز و نوآوری اصلی چارچوب پیشنهادی این پژوهش نسبت به ادبیات موجود خشک‌منظری را تشکیل می‌دهد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی منظر پایدار در اقلیم‌های سرد و خشک کوهستانی غرب ایران، مستلزم گذاری از رویکردهای سنتی و تک‌بعدی به سمت چارچوبی یکپارچه است که در آن فیزیک اقلیم کوهستانی، اصول ژئومورفولوژیک و راهکارهای عملیاتی کاهش مصرف آب به‌صورت هم‌زمان لحاظ شوند. مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، تدوین چارچوب «خشک‌منظر کوهستانی» است که برخلاف الگوهای رایج مختص اقلیم‌های گرم و خشک، به‌طور اختصاصی پاسخ‌گوی چالش‌های دوگانه کم‌آبی و ناپایداری ژئوتکنیکی شیب‌ها در بستر کوهستانی است. اجماع گسترده پانل متخصصان بر محورهایی نظیر اصلاح ساختار خاک، مدیریت آب‌های سطحی و ذوب برف، مهندسی ریزاقلیم و انتخاب گونه‌های گیاهی بومی، نشان می‌دهد این محورها نه گزینه‌های مجزا، بلکه اجزای به‌هم‌پیوسته یک راهبرد طراحی واحدند که کارایی آن‌ها به میزان تلفیق و هم‌افزایی‌شان با یکدیگر وابسته است.

با توجه به این یافته‌ها، به مدیران شهری و طراحان منظر پیشنهاد می‌شود اجرای آزمایشی الگوی پیشنهادی را در قالب یک پروژه پایلوت در یکی از فضاهای سبز عمومی شهر (مانند پارک‌ها یا محوره‌های ورودی شهر) در دستور کار قرار دهند تا میزان صرفه‌جویی واقعی در مصرف آب به‌صورت میدانی سنجیده شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود شهرداری سنندج در تدوین ضوابط و پروانه ساخت فضای سبز، استفاده

از حداقل درصد مشخصی از گونه‌های گیاهی بومی مقاوم به خشکی را الزامی کند و مشوق‌هایی برای بازچرخانی آب خاکستری در پروژه‌های منظرسازی عمومی و خصوصی در نظر بگیرد.

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز همراه بود که توجه به آن‌ها در تفسیر یافته‌ها و پژوهش‌های آتی ضروری است. نخست، پانل دلفی این پژوهش به ۱۵ متخصص محدود بود که هرچند از نظر تنوع تخصصی غنی بودند، امکان تعمیم قطعی نتایج به سایر بسترهای کوهستانی را محدود می‌کند. دوم، الگوی پیشنهادی این پژوهش مبتنی بر اجماع نظر متخصصان است و هنوز در قالب یک پروژه اجرایی واقعی آزموده و اعتبارسنجی میدانی نشده است. سوم، این پژوهش صرفاً به مطالعه موردی شهر سنندج محدود بوده و تعمیم مستقیم یافته‌ها به سایر شهرهای اقلیم سرد و خشک کوهستانی غرب ایران نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

بر این اساس، برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود: - الگوی پیشنهادی در قالب یک پروژه پایلوت اجرایی در یک سایت واقعی در سنندج پیاده‌سازی و میزان صرفه‌جویی واقعی در مصرف آب به‌صورت کمی اندازه‌گیری شود؛ - کارایی این چارچوب در سایر شهرهای هم‌اقلیم غرب ایران (مانند کرمانشاه، همدان و بخش‌هایی از لرستان و آذربایجان غربی) به‌صورت تطبیقی بررسی شود؛ - تحلیل هزینه - فایده اقتصادی اجرای الگوی خشک‌منظر کوهستانی در مقایسه با شیوه‌های متعارف منظرسازی صورت گیرد؛ و - تأثیر بلندمدت این الگو بر تنوع زیستی و خدمات اکوسیستمی شهری با مطالعات میدانی چندساله ارزیابی شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: نگارش مبانی نظری و پیشینه پژوهش، گردآوری داده‌های مکانی و تجزیه و تحلیل، تحلیل‌های گرافیکی، روش‌شناسی تحقیق.

نویسنده دوم: نظارت علمی و راهنمایی کلی بر روند پژوهش و نتایج داده‌ها، مشارکت در نگارش نهایی مقاله و تأیید نهایی متن.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزار هوش مصنوعی (AI) برای نگارش این مقاله استفاده نکرده‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی ندارند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌ها بنا به درخواست نویسندگان در دسترس هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان از تمامی افرادی که در گردآوری داده‌های میدانی با آنها همکاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- برادران، فاطمه، سلطانی محمدی، امیر، و ایزدپناه، زهرا. (۱۳۹۷). بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل و شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با مدل SIMETAW. *پژوهش آب ایران*، ۱۲(۲۸)، ۶۳-۷۲. https://iwj.sku.ac.ir/article_10576.html
- تکیه‌خواه، جاهده، نجفی، اکبر، و اصغری، آزاد. (۱۳۹۴). تدوین استراتژی توسعه طبیعت‌گردی بر اساس تحلیل SWOT و فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP): مطالعه موردی (پارک جنگلی آیدر در شهر سنندج). *نشریه گردشگری شهری*، ۲(۲)، ۱۳۶-۱۲۱. <https://doi.org/10.22059/jut.2015.55829>
- حسینی، سید محمد، حسینی، سید اسعد، و کربلایی درقی، علیرضا. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص‌های زیست‌اقلیمی سنندج. *مطالعات علوم محیط زیست*، ۴(۲)، ۱۵-۱. https://www.jess.ir/article_92252.html
- سازمان نقشه‌برداری کشور. (۱۴۰۳). *سامانه ملی زیرساخت داده‌های مکانی ایران*. <https://iransdi.ncc.gov.ir/layersf/irdv>

- سعیدی، ایمان، و دارابی، حسن. (۱۳۹۷). طراحی اکولوژیک منظر در مناطق نیمه خشک با تأکید بر طراحی شهری حساس به آب (نمونه موردی: شهر مهاجران). *محیط‌شناسی*، ۴۴(۴)، ۶۸۹-۷۰۱. <https://doi.org/10.22059/jes.2019.234934.1007446>
- فشخورانی، سامان. (۱۴۰۳). بررسی شرایط آب و هوایی شهرستان سندج جهت ارائه زمان مناسب برای برگزاری مسابقات ورزشی در فضای باز. *مطالعات تربیت بدنی و علوم ورزشی*، ۴۹(۴)، ۳۰-۴۳. <https://www.noormags.ir/view/en/articlepage/2276110>
- کرد، مهدی، رستمی، هلاله، و محمودی، محمدپیام. (۱۴۰۳). بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و شرب‌پذیری چشمه‌های شهری سندج به عنوان منابع جایگزین در شرایط بحران آبی. *هیدروژئولوژی*، ۲۹(۲)، ۹۳-۱۱۱. <https://doi.org/10.22034/hydro.2025.66382.1330>
- ملکی مرشد، رقیه، و سبحانی، بهروز. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دمای بیشینه و امواج گرمایی با رویکرد زیست‌بوم گیاهان (مطالعه موردی: شهرهای سندج و کرمانشاه). *هواشناسی و علوم جو*، ۴(۲)، ۸۷-۱۰۱. https://www.ims-jmas.net/article_155539.html
- Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 341-343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>
- Ashraf Vaghefi, S., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9, 1464. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53784-0>
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- Beniston, M. (2003). Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts. *Climatic Change*, 59(1-2), 5-31. <https://doi.org/10.1023/A:1024458411589>
- Chen, X. (2016). An analysis of climate impact on landscape design. *Atmospheric and Climate Sciences*, 6(3), 475-481. <https://doi.org/10.4236/acs.2016.63037>
- Chow, W. T., & Brazel, A. J. (2012). Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47, 170-181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>
- Comanescu, P. C., Raicu, M., & Urziceanu, M. M. (2025). Xeriscaping – Smart landscaping with indigenous plants adapted to drought. *Annals of the University of Craiova, Biology, Horticulture, Food Products Processing Technology, Environmental Engineering*, 30(66). <https://doi.org/10.52846/bihpt.v30i66.226>
- Darand, M., Dostkamyan, M., & Rehmani, M. I. A. (2017). Spatial autocorrelation analysis of extreme precipitation in Iran. *Russian Meteorology and Hydrology*, 42(6), 415-424. <https://doi.org/10.3103/S1068373917060073>
- Denver Water. (2017). *Water wise landscape handbook*. https://www.denverwater.org/sites/default/files/2017-05/Water_Wise_Landscape_Handbook.pdf
- Ellefson, C. L., & Winger, D. (2004). *Xeriscape Colorado: The complete guide*. Westcliffe Publishers.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Forman, R. T. T. (1995). *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press.
- Gober, P., & Kirkwood, C. W. (2010). Vulnerability assessment of climate-induced water shortage in Phoenix. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21295-21299. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914433107>
- Green, J. C., Solins, J. P., Brissette, L. E. G., Benning, T. L., Gould, K., Bell, E. M., & Cadenasso, M. L. (2024). Patterns of water-wise residential landscaping in a drought-prone city. *Journal of Urban Ecology*, 10(1), juae003. <https://doi.org/10.1093/jue/juae003>
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12, 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- Herrera, L., Pérez, G., Coma, J., & Ballesta, A. (2024). BIG4LIFE (building-integrated greenery): Collaborative xeriscaping-based maintenance and monitoring in Mediterranean cities. *E3S Web of Conferences*, 585, 13002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458513002>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Ismaeil, E. M., & Sobaih, A. E. E. (2022). Assessing xeriscaping as a retrofit sustainable water consumption approach for a desert university campus. *Water*, 14(11), 1681. <https://doi.org/10.3390/w14111681>
- Kumawat, K. R. (2022). Advantages of xeriscaping: Great potential for urban areas. *Agri Articles*. <https://agriarticles.com/advantages-of-xeriscaping-great-potential-for-urban-areas/>
- Larson, K. L., Cook, E., Strawhacker, C., & Hall, S. J. (2010). The influence of diverse values, ecological structure, and geographic context on residents' multifaceted landscaping decisions. *Human Ecology*, 38(6), 747-761. <https://doi.org/10.1007/s10745-010-9350-2>

- Liu, Z., Ying, J., He, C., Guan, D., Pan, X., Dai, Y., Gong, B., He, K., Lv, C., Wang, X., Lin, J., Liu, Y., & Bryan, B. A. (2024). Scarcity and quality risks for future global urban water supply. *Landscape Ecology*, 39, 10. <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01832-0>
- Lundquist, J. D., Pepin, N., & Rochford, C. (2008). Automated algorithm for mapping regions of cold-air pooling in complex terrain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D22107. <https://doi.org/10.1029/2008JD009879>
- Monteiro, J. A. (2017). Ecosystem services from turfgrass landscapes. *Urban Forestry & Urban Greening*, 26, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.04.001>
- Musacchio, L. R. (2009). The scientific basis for the design of landscape sustainability: A conceptual framework for translational landscape research and practice of designed landscapes and the six Es of landscape sustainability. *Landscape Ecology*, 24(8), 993–1013. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9396-y>
- Nassauer, J. I., & Opdam, P. (2008). Design in science: Extending the landscape ecology paradigm. *Landscape Ecology*, 23, 633–644. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9226-7>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pepin, N. C., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., Williamson, S. N., & Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Prajapati, R., Pandya, I., & Maitreya, B. (2023). A review on xeriscaping. *International Association of Biologicals and Computational Digest*, 2(1), 271–274. <https://doi.org/10.56588/iabcd.v2i1.163>
- St. Hilaire, R., Arnold, M. A., Wilkerson, D. C., Devitt, D. A., Hurd, B. H., Lesikar, B. J., Lohr, V. I., Martin, C. A., McDonald, G. V., Morris, R. L., Pittenger, D. R., & Shaw, D. A. (2008). Efficient water use in residential urban landscapes. *HortScience*, 43(7), 2081–2092. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.2081>
- Stokes, A., Douglas, G. B., Fourcaud, T., Giadrossich, F., Gillies, C., Hubble, T., Kim, J. H., Loades, K. W., Mao, Z., McIvor, I. R., Mickovski, S. B., Mitchell, S., Osman, N., Phillips, C., Poesen, J., Polster, D., Preti, F., Raymond, P., Rey, F., Schwarz, M., & Walker, L. R. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: Ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*, 377(1–2), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2044-6>
- Ünal Çilek, M. (2023). Xeriscaping as a water-saving landscape design: Arizona State University Tempe campus context. *GRID – Architecture Planning and Design Journal*, 6(2), 672–698. <https://doi.org/10.37246/grid.1201521>
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey*. Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-00034-8>
- Xarepe, D., Canas, R. Q., & Musarella, C. M. (2024). Green spaces more adapted and resilient to the current and future climatic conditions in the south of Portugal (Algarve): Xerophytic gardens using xeromorphic succulents. *Research Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 4(1), 16–28. <https://doi.org/10.31586/rjees.2024.884>

References

- Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 341–343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>
- Ashraf Vaghefi, S., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9, 1464. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53784-0>
- Baradaran, F., Soltani Mohammadi, A., & Izadpanah, Z. (2018). Assessment of SIMETAW model in simulation of climate parameters and investigation of climate change effect on evapotranspiration in four different climates. *Iranian Water Research Journal*, 12(1), 63–72. https://iwrrj.sku.ac.ir/article_10576.html (In Persian)
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303–309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- Beniston, M. (2003). Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts. *Climatic Change*, 59(1–2), 5–31. <https://doi.org/10.1023/A:1024458411589>
- Chen, X. (2016). An analysis of climate impact on landscape design. *Atmospheric and Climate Sciences*, 6(3), 475–481. <https://doi.org/10.4236/acs.2016.63037>

- Chow, W. T., & Brazel, A. J. (2012). Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>
- Comanescu, P. C., Raicu, M., & Urziceanu, M. M. (2025). Xeriscaping – Smart landscaping with indigenous plants adapted to drought. *Annals of the University of Craiova, Biology, Horticulture, Food Products Processing Technology, Environmental Engineering*, 30(66). <https://doi.org/10.52846/bihpt.v30i66.226>
- Darand, M., Dostkamyan, M., & Rehmani, M. I. A. (2017). Spatial autocorrelation analysis of extreme precipitation in Iran. *Russian Meteorology and Hydrology*, 42(6), 415–424. <https://doi.org/10.3103/S1068373917060073>
- Denver Water. (2017). *Water wise landscape handbook*. https://www.denverwater.org/sites/default/files/2017-05/Water_Wise_Landscape_Handbook.pdf
- Ellefson, C. L., & Winger, D. (2004). *Xeriscape Colorado: The complete guide*. Westcliffe Publishers.
- Fashkhorani, S. (2024). Investigation of climatic conditions of Sanandaj County to determine the appropriate time for holding outdoor sports competitions. *Studies in Physical Education and Sports Sciences*, 9(4), 30–43. <https://www.noormags.ir/view/en/articlepage/2276110> (In Persian)
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Forman, R. T. T. (1995). *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press.
- Gober, P., & Kirkwood, C. W. (2010). Vulnerability assessment of climate-induced water shortage in Phoenix. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21295–21299. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914433107>
- Green, J. C., Solins, J. P., Brissette, L. E. G., Benning, T. L., Gould, K., Bell, E. M., & Cadenasso, M. L. (2024). Patterns of water-wise residential landscaping in a drought-prone city. *Journal of Urban Ecology*, 10(1), juae003. <https://doi.org/10.1093/jue/juae003>
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12, 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- Herrera, L., Pérez, G., Coma, J., & Ballesta, A. (2024). BIG4LIFE (building-integrated greenery): Collaborative xeriscaping-based maintenance and monitoring in Mediterranean cities. *E3S Web of Conferences*, 585, 13002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458513002>
- Hosseini, S. M., Hosseini, S. A., & Karbalaee Doree, A. (2019). Evaluation of bioclimatic index in Sanandaj. *Journal of Environmental Science Studies*, 4(2), 1307–1316. (In Persian)
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Ismaeil, E. M., & Sobaih, A. E. E. (2022). Assessing xeriscaping as a retrofit sustainable water consumption approach for a desert university campus. *Water*, 14(11), 1681. <https://doi.org/10.3390/w14111681>
- Kord, M., Rostami, H., & Mahmoodi, M. P. (2025). Hydrogeochemical characteristics and potability assessment of urban springs in Sanandaj as alternative resources in water crisis conditions. *Hydrogeology*, 9(2), 93–111. <https://doi.org/10.22034/hydro.2025.66382.1330> (In Persian)
- Kumawat, K. R. (2022). Advantages of xeriscaping: Great potential for urban areas. *Agri Articles*. <https://agriarticles.com/advantages-of-xeriscaping-great-potential-for-urban-areas/>
- Larson, K. L., Cook, E., Strawhacker, C., & Hall, S. J. (2010). The influence of diverse values, ecological structure, and geographic context on residents' multifaceted landscaping decisions. *Human Ecology*, 38(6), 747–761. <https://doi.org/10.1007/s10745-010-9350-2>
- Liu, Z., Ying, J., He, C., Guan, D., Pan, X., Dai, Y., Gong, B., He, K., Lv, C., Wang, X., Lin, J., Liu, Y., & Bryan, B. A. (2024). Scarcity and quality risks for future global urban water supply. *Landscape Ecology*, 39, 10. <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01832-0>
- Lundquist, J. D., Pepin, N., & Rochford, C. (2008). Automated algorithm for mapping regions of cold-air pooling in complex terrain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D22107. <https://doi.org/10.1029/2008JD009879>
- Maleki Meresht, R., & Sobhani, B. (2021). Prediction of maximum temperature and heat waves with plant ecosystem approach (case study: Sanandaj and Kermanshah cities). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 4(2), 87–101. <https://doi.org/10.22034/jmas.2022.330864.1166> (In Persian)
- Monteiro, J. A. (2017). Ecosystem services from turfgrass landscapes. *Urban Forestry & Urban Greening*, 26, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.04.001>
- Musacchio, L. R. (2009). The scientific basis for the design of landscape sustainability: A conceptual framework for translational landscape research and practice of designed landscapes and the six Es of landscape sustainability. *Landscape Ecology*, 24(8), 993–1013. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9396-y>

- Nassauer, J. I., & Opdam, P. (2008). Design in science: Extending the landscape ecology paradigm. *Landscape Ecology*, 23, 633–644. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9226-7>
- National Cartographic Center of Iran. (2024). *Iranian Spatial Data Infrastructure (IRSDI)*. <https://iransdi.ncc.gov.ir/layersf/irdiv> (In Persian)
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pepin, N. C., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., Williamson, S. N., & Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Prajapati, R., Pandya, I., & Maitreya, B. (2023). A review on xeriscaping. *International Association of Biologicals and Computational Digest*, 2(1), 271–274. <https://doi.org/10.56588/iabcd.v2i1.163>
- Saeedi, I., & Darabi, H. (2019). Ecological landscape design in semi-arid areas on basis of water sensitive urban design approach (case study: Mohajeran City). *Journal of Environmental Studies*, 44(4), 689–701. <https://doi.org/10.22059/jes.2019.234934.1007446> (In Persian)
- St. Hilaire, R., Arnold, M. A., Wilkerson, D. C., Devitt, D. A., Hurd, B. H., Lesikar, B. J., Lohr, V. I., Martin, C. A., McDonald, G. V., Morris, R. L., Pittenger, D. R., & Shaw, D. A. (2008). Efficient water use in residential urban landscapes. *HortScience*, 43(7), 2081–2092. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.2081>
- Stokes, A., Douglas, G. B., Fourcaud, T., Giadrossich, F., Gillies, C., Hubble, T., Kim, J. H., Loades, K. W., Mao, Z., McIvor, I. R., Mickovski, S. B., Mitchell, S., Osman, N., Phillips, C., Poesen, J., Polster, D., Preti, F., Raymond, P., Rey, F., Schwarz, M., & Walker, L. R. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: Ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*, 377(1–2), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2044-6>
- Tekyekhah, J., Najafi, A., & Asghari, A. (2015). Providing ecotourism development strategy based on SWOT analysis and analytic network process (ANP) (case study: Abidar Jungle Park in Sanandaj). *Urban Tourism*, 2(2), 121–136. <https://doi.org/10.22059/jut.2015.55829> (In Persian)
- Ünal Çilek, M. (2023). Xeriscaping as a water-saving landscape design: Arizona State University Tempe campus context. *GRID – Architecture Planning and Design Journal*, 6(2), 672–698. <https://doi.org/10.37246/grid.1201521>
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey*. Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-00034-8>
- Xarepe, D., Canas, R. Q., & Musarella, C. M. (2024). Green spaces more adapted and resilient to the current and future climatic conditions in the south of Portugal (Algarve): Xerophytic gardens using xeromorphic succulents. *Research Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 4(1), 16–28. <https://doi.org/10.31586/rjees.2024.884>