نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۴، صفحات ۵۱-۶۲، زمستان ۱۴۰۴

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 4, PP. 51-62, Winter 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2025.500951.1441

مقاله پژوهشی

کاربرد هوش مصنوعی مولد در ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های جمع‌آوری آب باران

محمدجواد امامی اسکاردی[1*]، رضا هدایتی مرزونی[2] و یاسمن سمائی[3]

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری معماری بیوتیک، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۳- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه امام خمینی (ره).

*نویسنده مسئول، ایمیل: mje.skardi@umz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یکی از راهبردهای اساسی در مدیریت منابع آب، موردتوجه قرارگرفته‌اند. با درنظرگرفتن تغییرات اقلیمی و رشد تقاضای آب، بسیاری از مناطق جهان با بحران کمبود آب روبه‌رو هستند. این سامانه‌ها می‌توانند به‌عنوان رویکردی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای مقابله با این مشکلات به‌کار گرفته شوند. این پژوهش با هدف شناسایی و رتبه‌بندی مناطق مناسب برای استحصال آب باران انجام‌شده است. با استفاده از هوش مصنوعی مولد، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تحلیل داده‌های جغرافیایی در نرم‌افزار GIS، مناطق مستعد استان مازندران برای این هدف مشخص شده‌اند. از هوش مصنوعی ChatGPT-4 برای شبیه‌سازی نظرات کارشناسان در مقایسه‌های زوجی استفاده شده است. نتایج این تحقیق علاوه‌بر کمک به توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، می‌تواند رویکرد استفاده از هوش مصنوعی را در مهندسی و مدیریت منابع آب نیز مورد سنجش قراردهد. در نتایج به‌دست‌آمده شیب با وزن نهایی ۰/۲۴۱۲ و ژئومورفولوژی با وزن نهایی ۰/۰۳۷۲ به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین وزن را داشتند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند تصمیم‌گیری‌های همراه با عدم قطعیت و چالش در مهندسی و مدیریت منابع آب را تسهیل نماید.

کلمات کلیدی: جمع‌آوری آب باران، هوش مصنوعی مولد، تصمیم‌گیری چندمعیاره، اولویت‌بندی.

Research Paper

The Application of Generative Artificial Intelligence in Evaluating and Ranking the Key Factors Influencing the Performance of Rainwater Harvesting Systems

Mohammad Javad Emami-Skardi[1*], Reza Hedayati Marzooni[2] and Yasaman Samaei[3]

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

2- M.Sc. Student, Biotic Architecture Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

3- M.Sc. in Water Resources Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*Corresponding Author, Email: mje.skardi@umz.ac.ir

Received: 20/01/2025
Revised: 30/03/2025
Accepted: 08/06/2025
© IWWA

Abstract

Rainwater harvesting systems have been recognized as one of the fundamental strategies in water resource management. Considering climate change and the growing demand for water, many regions are facing water scarcity. These systems can be utilized as a sustainable and cost-effective approach to address these issues. This study aims to identify and rank suitable areas for rainwater harvesting. Using the Generative Artificial Intelligence, Analytical Hierarchy Process (AHP) and geographic data analysis in GIS software, potential areas in Mazandaran province have been identified for this purpose. ChatGPT-4 artificial intelligence was employed to simulate expert opinions in pairwise comparisons. The results of this research, in addition to aiding the development of rainwater harvesting systems, can also evaluate the use of AI in the water resources management and engineering. Among the obtained results, slope had the highest weight with a final value of 0.2412, while geomorphology had the lowest weight with a final value of 0.0372. The findings indicate that the use of AI can facilitate decision-making under uncertainty and challenges in water resource engineering and management.

Keywords: Rainwater Harvesting, Artificial Intelligence, Multi-Criteria Decision Making, Prioritization.

۱- مقدمه

محدودیت منابع آبی، افزایش جمعیت و توسعه صنعتی که منجر به افزایش تقاضا برای آب می‌شود، همراه با کمبود فضاهای مناسب برای ایجاد زیرساخت‌های بزرگ‌مقیاس مانند سدها و پیامدهای محیط‌زیستی آن‌ها، هم‌چنین چالش‌های توسعه شبکه‌های آبرسانی و میزان بالای هدررفت آب در این سیستم‌ها، ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای پایدار و سازگار با محیط‌زیست را بیش از پیش نمایان می‌سازد (امامی اسکاردی و همکاران، ۱۴۰۱). در این راستا، جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر می‌تواند به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، به‌عنوان یکی از راهبردهای مهم در مدیریت منابع آب، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (شریفیان و همکاران، ۱۴۰۱). با توجه به این‌که بسیاری از مناطق جهان با مشکلات کمبود آب مواجه هستند، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌توانند به‌عنوان رویکردی پایدار و اقتصادی در مقابله با این چالش‌ها به‌کار گرفته شوند. این سامانه‌ها به ذخیره و استفاده از آب باران در محیط‌های شهری و روستایی کمک می‌کنند و به کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی و سطحی می‌انجامند (Raimondi et al., 2023).

یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، بهبود مدیریت منابع آب است. در بسیاری از مناطق شهری، بارش‌های سنگین باعث سیلاب‌های ناگهانی و ایجاد خسارت‌های زیادی به زیرساخت‌ها می‌شوند. با استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، می‌توان از این آب‌ها به‌عنوان منبع جایگزین استفاده کرد و هم‌زمان از خطرات سیلاب جلوگیری نمود (Soh et al., 2023). این سامانه‌ها هم‌چنین به کاهش تقاضای آب شرب کمک می‌کنند؛ زیرا آب باران می‌تواند برای مصارف غیرشرب مانند آبیاری فضای سبز و شست‌وشو مورد استفاده قرار گیرد (Nandi and Gonela, 2022).

علاوه‌بر این، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌توانند به حفاظت از محیط‌زیست کمک کنند. این سامانه‌ها با کاهش مصرف آب از منابع طبیعی، به حفظ تنوع زیستی و کاهش تأثیرات محیط‌زیستی ناشی از برداشت بی‌رویه آب کمک می‌کنند (Ward et al., 2012). هم‌چنین استفاده از این سامانه‌ها موجب کاهش انرژی مورد نیاز برای تصفیه و توزیع آب می‌شود، که به‌نوبه خود به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود (Li et al., 2010).

درنهایت، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای مدیریت بحران‌های آبی در مناطق کم‌آب مورد توجه قرارگرفته‌اند. در مناطقی که با دوره‌های خشکسالی مکرر مواجه هستند، این سامانه‌ها می‌توانند به‌عنوان یک منبع آب پایدار و قابل‌اتکا عمل نمایند (Bojer et al., 2024).

Zheng et al. (2023) از تکنیک‌های عوامل چندگانه مؤثر (MIF) و هم‌پوشانی فازی (Fuzzy Overlay) برای شناسایی مکان‌های مناسب جمع‌آوری آب باران در استان خیبر پختون‌خواه پاکستان استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که سامانه‌های جمع‌آوری آب باران یا Rainwater Harvesting (RWH) می‌توانند به کمبود آب در مناطق کوهستانی کمک کرده و تولید محصولات کشاورزی را بهبود بخشند. این تحقیق اهمیت تحلیل جغرافیایی در بهینه‌سازی اجرای سامانه‌های RWH برای مقاصد کشاورزی را نشان می‌دهد. برای مواجهه با عدم‌قطعیت‌های عمیق مرتبط با سامانه‌های RWH، مطالعه‌ای توسط Alves and Pacheco (2024) تأثیر تقاضای آب، تعرفه و نرخ تنزیل را بر قابلیت اجرایی سامانه‌های RWH در برزیل ارزیابی کرد. پژوهش عملکرد سامانه‌های RWH را برای پیکربندی‌های مختلف شبیه‌سازی کرده و نتایج نشان داد که تعرفه آب و نرخ تنزیل، تأثیر زیادی بر معیارهای عملکرد دارند. این مطالعه اهمیت درنظرگرفتن عوامل اقتصادی در طراحی و اجرای سامانه‌های RWH را برجسته می‌کند.

Rao et al. (2024) با بهره‌گیری از شبکه‌های حافظه بلند-کوتاه‌مدت Long Short-Term Memory (LSTM) چندبعدی و الگوریتم انتخاب کلونی یا Clonal Selection Algorithm (CSA)، بهره‌وری سامانه‌های برداشت آب باران را بررسی کردند. این پژوهش با بهبود کارایی این سیستم‌ها، نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آبی ایفا می‌کند.

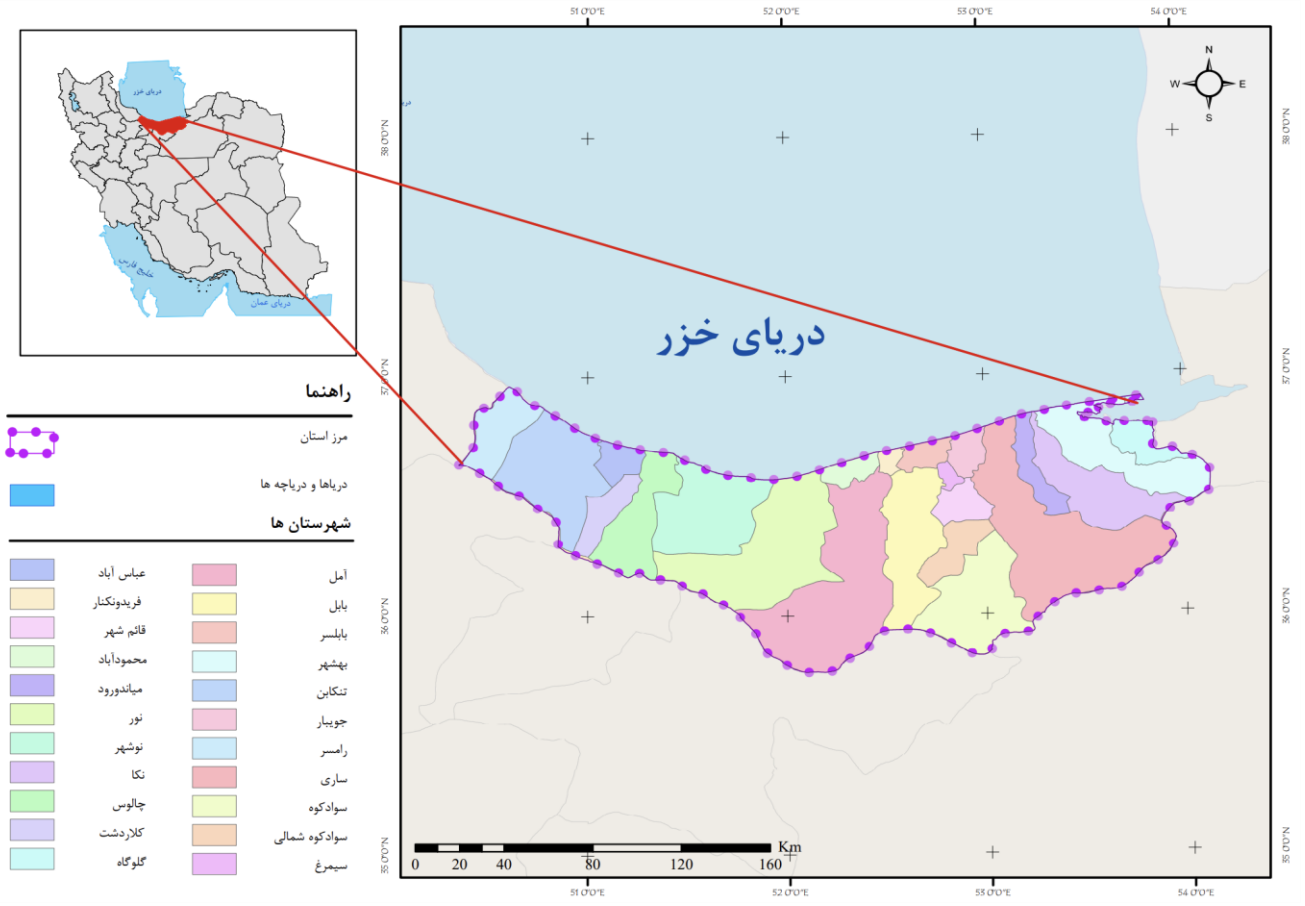
توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران برای مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری کلیدی به مهندسان در تحلیل داده‌ها در زمینه‌های مختلف مانند مدیریت پایدار منابع آب کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری بگیرند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دقت و سرعت تحلیل‌ها را افزایش می‌دهد و منجربه کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی می‌شود. در مهندسی عمران، هوش مصنوعی در طراحی سازه‌های هوشمند و پیش‌بینی شکست‌ها مؤثر است. در مهندسی برق و مکانیک، سامانه‌های هوشمند بهره‌وری را بهبود می‌بخشند و ضایعات را کاهش می‌دهند. هم‌چنین هوش مصنوعی در ربات‌ها و سامانه‌های خودکار برای انجام وظایف خطرناک کاربرد دارند. به‌طورکلی، این فناوری به نوآوری و کاهش ریسک‌ها در پروژه‌های مهندسی کمک می‌کند.

۲- روش‌شناسی

این پژوهش با هدف شناسایی و رتبه‌بندی مناطق مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران انجام شده است. روش‌شناسی تحقیق شامل تحلیل مقالات علمی، شبیه‌سازی نظرات کارشناسان با استفاده از هوش مصنوعی مولد، به‌ویژه ChatGPT-4 و به‌کارگیری فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای اولویت‌بندی معیارها و تحلیل‌های مکانی است. هدف نهایی این مطالعه، شناسایی و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران با بهره‌گیری از هوش مصنوعی و تهیه نقشه‌ای از مناطق مناسب در استان مازندران است. در مرحله نخست، ۱۰۰۰ مقاله مرتبط با سامانه‌های جمع‌آوری آب باران شناسایی شد؛ سپس ۲۰۰ مقاله برتر با بیش‌ترین ارتباط به موضوع، توسط پژوهشگران انتخاب شد. پس از بررسی این مقالات، ۵۰ معیار کلیدی در توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران شناسایی شد، که یکی از مهم‌ترین ملاک‌های انتخاب این معیارها، میزان تکرار آن‌ها در مطالعات مختلف بود. در گام بعد، ۱۰ کارشناس مجازی مبتنی بر هوش مصنوعی مولد (ChatGPT-4) تعریف شدند و مقایسه گزینه‌ها به‌صورت دوبه‌دو براساس رویکرد AHP با استفاده از این مدل انجام شد. درنهایت، ماتریس نهایی با میانگین‌گیری هندسی از جدول‌های حاصل تهیه شد. پس از وزن‌دهی معیارها، ارزیابی و محاسبه نرخ ناسازگاری نیز انجام شد. نتایج پژوهش، به‌ویژه بخش‌هایی که قابلیت نمایش بصری داشتند، به‌صورت نقشه‌های تحلیلی ارائه شد تا مناطق مناسب برای استحصال آب باران به‌طور دقیق مشخص شوند.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مازندران، در شمال ایران، منطقه‌ای با ظرفیت بالای استحصال آب باران است. این استان با جمعیت حدودا ۳/۳ میلیون نفر و وسعت ۲۳,۰۰۰ کیلومترمربع، از شمال به دریای خزر و از جنوب به رشته‌کوه‌های البرز محدود می‌شود. اقلیم مازندران با بارش سالانه ۸۰۰ تا ۱,۲۰۰ میلی‌متر، به‌خصوص در پاییز و زمستان، منابع آب سطحی و زیرزمینی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. تنوع زمین‌شناسی و خاک‌های غنی این استان، جذب و نگهداری آب باران را تسهیل می‌کند. هم‌چنین پوشش گیاهی و اکوسامانه‌های طبیعی باعث افزایش رطوبت خاک و بهبود شرایط استحصال آب باران برای مدیریت منابع آب و استفاده‌های کشاورزی، باغداری و دامپروری می‌شوند.



شکل ۱- نقشه محدوده استان مازندران و شهرهای آن

۲-۲- روش فرآینده تحلیل سلسله‌مراتبی (Analytical Hierarchy Process)

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از تکنیک‌های معتبر تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در شرایط پیچیده و با وجود عدم قطعیت کاربرد دارد. این روش توسط Saaty (1980) معرفی شد و به تحلیل و اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از مقایسه‌ها زوجی کمک می‌کند. در AHP، تصمیم‌گیرنده ابتدا معیارهای مهم را شناسایی کرده و سپس با مقایسه زوجی آن‌ها، وزن‌های نسبی هر معیار را تعیین می‌کند (Darko et al, 2018). این روش با ساخت یک ماتریس، مقایسه‌های زوجی و استفاده از تکنیک‌های ریاضی مانند محاسبه مقدار ویژه، امکان محاسبه وزن‌ها و اولویت‌ها را فراهم می‌آورد. AHP هم‌چنین نرخ ناسازگاری (CR) را محاسبه می‌کند تا اطمینان حاصل شود که مقایسه‌های انجام‌شده منطقی و قابل‌قبول هستند (Al-Harbi, 2001). در این پژوهش، AHP به‌منظور شناسایی مکان‌های مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران به‌کار گرفته شده است؛ به‌طوری‌که وزن هر معیار به‌طور علمی و منطقی تعیین و درنهایت، به اولویت‌بندی گزینه‌های موجود منجر شده است.

۲-۳- هوش مصنوعی مولد

هوش مصنوعی یا Artificial Intelligent (AI) به‌عنوان یک فناوری نوین، توانایی پردازش و تحلیل داده‌های پیچیده را دارد و در بسیاری از حوزه‌ها، ازجمله تصمیم‌گیری و تحلیل داده‌ها، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. هوش مصنوعی مولد (Generative AI) یکی از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی است که با استفاده از الگوهای استخراج‌شده از داده‌های ورودی، قادر به تولید محتوای جدید مانند متن، تصویر، صدا و ویدئو است. این فناوری در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده و به‌ویژه در میان عموم مردم به‌سرعت گسترش یافته است. بنابراین، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک نقش به‌سزایی در زمینه‌های مختلف مهندسی و مدیریت منابع آب ایفا نماید. مسئله حیاتی در استفاده از هوش مصنوعی در سال‌های پیش‌رو، کاربرد آن نه به‌عنوان تنها یک ابزار بلکه به‌عنوان عاملی تصمیم‌گیرنده در فرایندهای زندگی بشری و بخشی‌هایی از آن همانند علوم مهندسی است. نسخه‌های مختلفی از هوش مصنوعی تاکنون ارائه و گزارش شده است که برخی از آن‌ها امروزه راه به زندگی اغلب انسان‌ها به‌ویژه در محیط‌های تخصصی پیدا کرده‌اند. ChatGPT-4 یک مدل زبانی پیشرفته از OpenAI است که توانسته با استفاده از یادگیری عمیق، به ایجاد محتوای متنی و تحلیل اطلاعات کمک نماید. در این پژوهش، از ChatGPT-4 به‌عنوان یک مشاور مجازی برای انجام مقایسه‌های زوجی در روش AHP استفاده شده است. این مدل با ارائه نظرات و تحلیل‌های کارشناسانه، توانسته است دقت و کارایی فرآیند تصمیم‌گیری را افزایش دهد. استفاده از ChatGPT-4 در این مطالعه، به شناسایی معیارهای مؤثر بر استحصال آب باران و تحلیل نظرات کارشناسان مجازی کمک کرده و موجب تسهیل در جمع‌آوری و پردازش داده‌ها شده است. به این ترتیب، ترکیب هوش مصنوعی و روش‌های سنتی مانند AHP به بهبود نتایج و کیفیت تصمیم‌گیری در انتخاب مکان‌های مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران منجر شده است.

۲-۴- نوع پژوهش

این پژوهش کاربردی است و هدف آن استفاده از نتایج برای یافتن اولویت پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران و ارائه نقشه از مناطق مناسب به‌منظور استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در استان مازندران برای مدیریت بهتر منابع آب است. ازنظر روش‌شناسی، این تحقیق، ترکیبی محسوب می‌شود که داده‌های کیفی و کمی را دربرمی‌گیرد. در این پژوهش، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده و نتایج به‌دست‌آمده مستقیماً قابل‌استفاده در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های آتی خواهد بود.

۲-۵- گردآوری اطلاعات

۲-۵-۱- مطالعات کتابخانه‌ای

اولین مرحله پژوهش، جمع‌آوری اطلاعات از منابع علمی بود. با استفاده از موتورهای جستجوی معتبر مانند Scopus، Google Scholar و Web of Science حدود ۲۰۰ مقاله در زمینه استحصال آب باران و مکان‌یابی مناسب شناسایی شد. معیارهای انتخاب، شامل تاریخ انتشار (فقط مقالات ده سال اخیر)، ارتباط با موضوع (مقالات مرتبط با استحصال آب باران و مکان‌یابی) و اعتبار علمی (مقالات منتشرشده در مجلات معتبر) بود. مطالعه چکیده‌ها و بخش‌های کلیدی این مقالات منجربه شناسایی ۵۰ معیار اولیه برای مکان‌یابی شد.

۲-۵-۲- تعریف کارشناسان مجازی با استفاده از هوش مصنوعی

پس از شناسایی معیارهای اولیه، به‌جای استفاده از

کارشناسان واقعی برای مقایسه‌های دودویی در AHP، از هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی نظرات کارشناسان استفاده شد. به این منظور در Chat GPT-4 پروفایل‌های شخصیتی و تخصصی برای کارشناسان مجازی تعریف شد. ده کارشناس تعریف‌شده در جدول ۲ مشاهده می‌شوند.

جدول ۱- معیارهای استخراج‌شده از مقالات بررسی‌شده در زمینه استحصال آب باران و مکان‌یابی آن

ردیف	نویسنده (سال)	عنوان مقاله	معیارهای استخراج‌شده از مقاله
۱	خیرخواه و همکاران (۱۳۹۴)	تعیین مناطق مستعد استحصال آب باران با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رود سراب شهرستان خوشاب استان خراسان رضوی)	کاربری اراضی، شیب، نفوذپذیری، بافت خاک، عمق خاک و فاصله از آبراهه
۲	اکبرپور و همکاران (۱۳۹۵)	تعیین مکان‌های مناسب جمع‌آوری آب باران برای استفاده در مصارف کشاورزی با استفاده از مدل AHP (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بیرجند)	شیب، کاربری اراضی، بافت خاک، زهکشی، فاصله تا مناطق مسکونی، فاصله تا زراعت‌های آبی، فاصله تا زراعت‌های دیم
۳	سلطانی و همکاران (۱۴۰۱)	مکان‌یابی مقایسه‌ای جمع‌آوری آب باران (مطالعه موردی: حوضه‌های میخوران و خسروآباد استان کرمانشاه)	پوشش گیاهی، تاج پوشش، درصد شیب، جهت شیب، بارندگی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، ژئومورفولوژی، طبقات ارتفاعی، فرسایش
۴	نوروززاده و همکاران (۱۴۰۱)	کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تعیین نقاط مناسب برای احداث سازه‌های جمع‌آوری آب باران	بارندگی، شیب، شوری زمین، پوشش گیاهی، بافت، ژئومورفولوژی
۵	عربی علی‌آباد و ملکی‌نژاد (۱۳۹۴)	ارزیابی استحصال آب باران از ساختمان‌های مسکونی (مطالعه موردی شیراز)	بارندگی، پوشش گیاهی، جنس خاک، نوع خاک، مسائل محیط‌زیستی
۶	فقیهی و جهان‌تیغ (۱۴۰۲)	تعیین مکان‌های مناسب برداشت آب باران با استفاده از GIS	توپوگرافی، شیب زمین، نوع خاک، شدت بارندگی، پوشش کاربری زمین، زهکشی، جریان رودخانه و معیارهای اجتماعی-اقتصادی
۷	اکبرپور و همکاران (۱۳۹۴)	مقایسه روش‌های مکان‌یابی مناطق مستعد جمع‌آوری باران به کمک سیستم پشتیبانی تصمیم DDS مبتنی بر GIS	بارندگی، شیب حوضه آبریز، عمق خاک، بافت خاک، شبکه آبراهه‌های دشت، کاربری اراضی منطقه
۸	معماریان و همکاران (۱۳۹۴)	ملاحظات و استانداردهای محیط‌زیستی اجرای سیستم‌های استحصال آب باران در منازل مسکونی	مخزن، سطح آبگیر، ناودان‌ها، آبروها، بررسی پیامدهای محیط‌زیستی، بررسی اقتصادی، بررسی اجتماعی
۹	Toosi et al. (2020)	A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting	بارش، شیب زمین، نوع خاک، عمق خاک، کاربری زمین، خشکسالی
۱۰	نوری و قاسم‌لونیا (۱۳۹۸)	A review of criteria in rainwater harvesting management	بارش باران، شیب زمین، بافت خاک، خشکسالی، پوشش زمین، کاربری زمین، فاصله زمین از جاده و سایر مکان‌ها، عوامل اجتماعی-محیط‌زیستی، تکتونیک و زمین‌شناسی مربوط به سازه، عوامل کشاورزی
۱۱	Mosase et al. (2017)	Assessment of the suitability of rainwater harvesting areas using multi-criteria analysis and Fuzzy Logic	عوامل اقلیمی (بارش)، عوامل مربوط به خاک (بافت، عمق، زهکشی)، عوامل توپوگرافیکی (شیب)، پوشش زمین
۱۲	Martínez-Acosta et al. (2019)	Design criteria for planning the agricultural rainwater harvesting systems: A review	عوامل مربوط به جغرافیا (بارش، تبخیر، رطوبت، سرعت باد، تابش)، عوامل فیزیوگرافیک (شبکه زهکشی، شیب، رواناب، حوضه آبریز، کاربری)، عوامل مربوط به خاک (عمق، پوشش، بافت)، عوامل اجتماعی-اقتصادی (تعداد ساکنان، ذی‌نفعان، هزینه، مالکیت زمین، تورم)، عوامل مربوط به فاصله از (جریان‌های آب، محصولات زراعی)
۱۳	Ammar et al. (2016)	Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review	عوامل بیوفیزیکی، عوامل اقتصادی-اجتماعی
۱۴	Singh et al. (2017)	Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply	ضریب رواناب، شیب، زهکشی، عوامل زمین‌شناسی
۱۵	Alwan et al. (2020)	Potential water harvesting sites identification using spatial multi-criteria evaluation in Maysan Province, Iraq	جاده‌ها، شیب زمین، جریان آب، بارش، خاک، تبخیر

هرکدام از متخصصان مذکور با ویژگی "دارای دکتری تخصصی در زمینه خودشان و سابقه کار در زمینه مرتبط برای ۱۵ سال" تعریف شدند. سپس از Chat GPT-4 خواسته‌شد که با توجه به این پروفایل‌ها، به‌عنوان این کارشناسان در مقایسه و اولویت‌بندی معیارها نظر دهد. هر کارشناس مجازی نظر خود را درباره اهمیت معیارها ارائه کرد و از این نظرات در مقایسه‌های دودویی روش AHP استفاده شد. این فرآیند این امکان را می‌دهد تا بدون نیاز به مصاحبه با کارشناسان واقعی، که ممکن است در دسترس نباشند، نظرات دقیق و شبیه‌سازی‌شده‌ای برای تحلیل به‌دست آید. هم‌چنین از سایر مزایای این روش می‌توان به سرعت بخشیدن در انجام مقایسه‌ها، کم‌کردن هزینه‌های مربوط به پرسش و پرسش‌نامه و حذف خطاهای انسانی در روش معمول پرسش‌نامه اشاره نمود.

جدول ۲- کارشناسان مجازی تعریف‌شده برای هوش مصنوعی

ردیف	کارشناس مجازی	ردیف	کارشناس مجازی
۱	کارشناس متخصص هیدرولوژی	۶	کارشناس متخصص اقلیم‌شناسی
۲	کارشناس متخصص مهندسی عمران	۷	کارشناس متخصص مهندسی منابع آب
۳	کارشناس متخصص مهندسی محیط زیست	۸	کارشناس متخصص اقتصاددان محیط زیست
۴	کارشناس متخصص برنامه‌ریزی شهری	۹	کارشناس متخصص مهندسی کشاورزی
۵	کارشناس متخصص زمین‌شناسی	۱۰	کارشناس متخصص مهندسی GIS

۲-۵-۳- انتخاب معیارهای نهایی

پس از تحلیل داده‌های اولیه استخراج‌شده از مقالات، ۱۰ معیار پرتکرار و با اهمیت انتخاب شد. به این معیارها در جدول ۳ اشاره شده است.

جدول ۳- معیارهای پرتکرار در مقالات استخراج‌شده

شیب زمین	شبکه آبراهه‌ها
بارندگی	عمق خاک
بافت خاک	زهکشی
کاربری اراضی	معیارهای اجتماعی
پوشش گیاهی	ژئومورفولوژی

این معیارها به‌عنوان مهم‌ترین عوامل در مکان‌یابی برای استحصال آب باران در نظر گرفته شده و برای تحلیل استفاده شدند.

جدول ۴- بررسی تعداد تکرار هر معیار در مقالات بررسی‌شده

ردیف	معیار	تکرار
۱	شیب زمین	۱۳
۲	بارندگی	۱۰
۳	بافت خاک	۹
۴	کاربری اراضی	۸
۵	پوشش گیاهی	۶
۶	شبکه آبراهه‌ها	۶
۷	عمق خاک	۵
۸	زهکشی	۵
۹	معیارهای اجتماعی	۵
۱۰	ژئومورفولوژی	۵

۲-۶- فرآیند تحلیل داده‌ها با روش AHP و هوش مصنوعی

۲-۶-۱- روش AHP (فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی)

روش AHP برای تحلیل داده‌ها و تعیین اهمیت نسبی معیارها استفاده شده است. این روش از طریق مقایسه زوجی معیارها، به تعیین وزن هر معیار در فرآیند تصمیم‌گیری کمک می‌کند. هر معیار با معیارهای دیگر به‌صورت دوبه‌دو مقایسه شده و براساس اهمیت نسبی خود در استحصال آب باران امتیاز داده شدند. این مقایسه‌ها توسط کارشناسان مجازی تعریف‌شده در Chat GPT-4 انجام شدند.

۲-۶-۲- شبیه‌سازی مقایسه‌های جفتی با استفاده از Chat GPT-4

از Chat GPT خواسته شد که به‌عنوان هریک از کارشناسان مجازی، مقایسه‌های دوبه‌دویی بین معیارها انجام دهد. این مقایسه‌ها براساس پروفایل تخصصی هر کارشناس انجام شد و هریک از کارشناسان مجازی، نظرات خود را درخصوص اهمیت هر معیار نسبت به معیار دیگر ارائه کردند. به این ترتیب، برای هر معیار یک ماتریس مقایسه‌ای تولید شد.

۲-۶-۳- ایجاد ماتریس نهایی

درنهایت ۱۰ ماتریس مقایسه‌ای برای ۱۰ معیار از طریق متخصصان مجازی تعریف‌شده در Chat GPT-4 تولید شد؛ سپس با ترکیب این ماتریس‌ها و استفاده از میانگین هندسی، یک

ماتریس نهایی ایجاد شد که اهمیت نسبی هر معیار را مشخص می‌کند.

۲-۷- ملاحظات اخلاقی

در این پژوهش از کارشناسان واقعی استفاده نشده، بلکه از پروفایل‌های مجازی تعریف‌شده در Chat GPT-4 بهره گرفته شد. این امر منجربه حذف نیاز به دریافت رضایت‌نامه از افراد حقیقی شد. هم‌چنین تمامی منابع علمی به‌درستی ارجاع داده شده‌اند و اصول اخلاقی در گردآوری و تحلیل داده‌ها رعایت شده است.

۲-۸- جمع‌بندی

در انتها، مراحل مختلف پژوهش از گردآوری اطلاعات، شبیه‌سازی نظرات کارشناسان با Chat GPT-4 و تحلیل داده‌ها با استفاده از AHP تشریح شد. اولویت‌بندی نهایی این پژوهش، پارامترهای مؤثر بر سامانه استحصال آب باران را مشخص می‌کند که می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کاربردی برای مدیریت منابع آب در استان مورد استفاده قرار گیرد.

۳- نتایج

در این مقاله، رویکردی نوین برای اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران و ارائه نقشه مکان‌های مناسب به‌منظور استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در استان مازندران ارائه شد. این رویکرد با استفاده از ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و هوش مصنوعی ChatGPT-4 طراحی و پیاده‌سازی شد. هدف اصلی، ارزیابی و اولویت‌بندی معیارهای مختلف مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران با بهره‌گیری از دیدگاه‌های کارشناسی مجازی، ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری دقیق و کارآمد و درنهایت ارائه نقشه مکان‌های مناسب برای استفاده از این سامانه‌ها در استان مازندران بود.

۳-۱- ترکیب AHP و ChatGPT-4

ابتدا ۱۰ معیار کلیدی به‌عنوان عوامل مؤثر بر انتخاب مکان مناسب طبق مطالعات صورت‌گرفته از مقالات تعیین شدند (جدول ۴)؛ سپس ۱۰ کارشناس مجازی در زمینه‌های مختلف مرتبط تعریف شدند؛ این جدول‌ها که از هوش مصنوعی گرفته شده، در شکل ۳ نمایش داده شده است. سپس با استفاده از مدل ChatGPT-4، ماتریس‌های مقایسه زوجی برای هر کارشناس مجازی براساس دانش و تخصص آن‌ها تشکیل شد.

۳-۲- محاسبه ماتریس‌های مقایسه زوجی و ماتریس‌های نهایی

پس از تشکیل ۱۰ ماتریس مقایسه زوجی برای ۱۰ کارشناس تعریف‌شده، میانگین هندسی این ماتریس‌ها برای ماتریس نهایی محاسبه شد (جدول ۵). ماتریس پایانی نمایانگر دیدگاه کلی تمامی کارشناسان مجازی درباره اهمیت معیارها در انتخاب اولویت پارامترهای مؤثر بر سامانه استحصال آب باران است.

جدول ۵- ماتریس نهایی مقایسه‌های زوجی ۱۰ کارشناس مجازی خروجی هوش مصنوعی

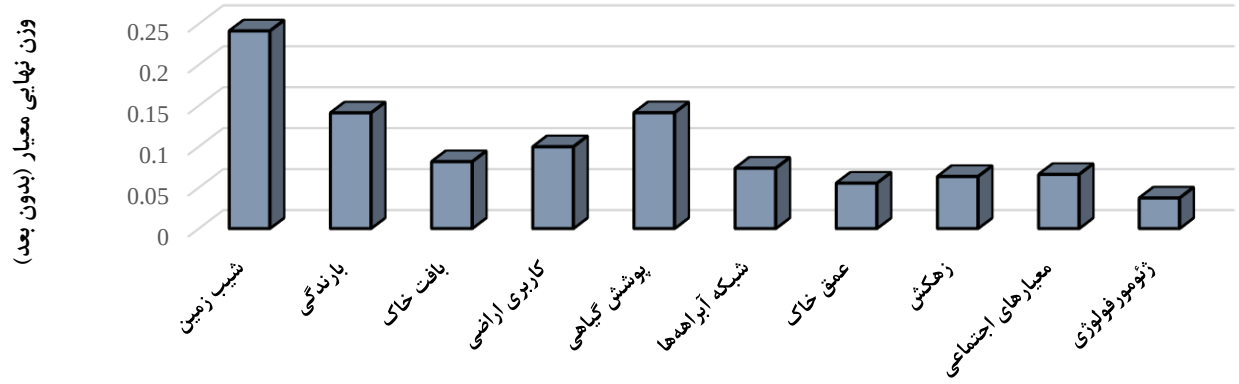
ماتریس پایانی										
معیارها	شیب زمین	بارندگی	بافت خاک	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	شبکه آبراهه‌ها	عمق خاک	زهکشی	معیارهای اجتماعی	ژئومورفولوژی
شیب زمین	۱	۳/۷۵	۴/۷۸۷	۲/۶۶۵	۱/۱۴۲	۳/۴۱۱	۳/۲۸۸	۲/۶۵۸	۲/۶۵۷	۴/۵۴۵
بارندگی	۰/۸۲	۱	۳/۴۴۳	۱/۱۵۷	۱/۱۹۰	۲/۲۶۰	۳/۵۱۲	۲/۴۴۰	۱/۹۴	۳/۱۴۰
بافت خاک	۰/۸۰۲	۰/۷۹۲	۱	۰/۸۶	۰/۹۳	۱/۵۲۷	۲/۴۱	۱/۹۳۲	۱/۶۹۸	۳/۹۸۱
کاربری اراضی	۰/۱۹۳	۰/۷۶۵	۱/۸۲۰	۱	۰/۷۰۹	۱/۵۷۴	۱/۸۷۹	۱/۶۲۸	۱/۵۳۱	۲/۳۴۷
پوشش گیاهی	۰/۶۰۸	۰/۷۱۹	۲/۳۵۱	۱/۳۱۱	۱	۲/۳۰۳	۳/۵۷۰	۲/۹۶۰	۱/۸۴۴	۲/۸۴۹
شبکه آبراهه‌ها	۰/۱۲۳	۰/۳۸۴	۰/۱۸۵	۰/۶۷۶	۰/۸۳۴	۱	۲/۶۶	۱/۴۸۴	۰/۳۵۶	۲/۵۷۳
عمق خاک	۰/۵۵۲	۰/۱۳	۰/۹۶۴	۰/۸۹۴	۰/۷۲۳	۰/۴۷۳	۱	۱/۷۵۵	۱/۴۴۱	۲/۶۳۳
زهکشی	۰/۸۴۳	۰/۳۸۴	۰/۴۰۸	۰/۴۴۵	۰/۷۶۴	۰/۱۷۶	۰/۴۵۶	۱	۱/۹۵	۱/۹۴۵
معیارهای اجتماعی	۰/۵۶۳	۰/۲۶۶	۰/۶۴۵	۰/۵۷۶	۰/۷۶۵	۱/۵۵۲	۰/۵۶۶	۰/۷۱۷	۱	۱/۳۰۸
ژئومورفولوژی	۰/۲۲	۰/۹۲۳	۰/۲۱۳	۰/۷۶۳	۰/۸۳۳	۰/۱۲۴	۰/۷۲۴	۰/۶۴۶	۰/۳۵۵	۱

۳-۳- وزن معیارها و اولویت‌بندی

وزن‌های نهایی معیارها از طریق نرمال‌سازی ماتریس پایانی به‌دست آمدند (جدول ۶). نتایج نشان‌داد که معیار شیب زمین، بالاترین اهمیت و ژئومورفولوژی و عمق خاک کم‌ترین اهمیت را در مکان‌یابی برای استحصال آب باران دارند. وزن هر معیار به‌صورت ستونی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل اعداد ستون بدون بعد هستند.

جدول ۶- وزن نرمال‌شده معیارها پس از محاسبه میانگین هندسی خروجی هوش مصنوعی

معیار	ژئومورفولوژی	معیارهای اجتماعی	زهکش	عمق خاک	شبکه آبراهه‌ها	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	بافت خاک	بارندگی	شیب زمین
وزن نهایی	۰/۰۳۷۲	۰/۰۶۵۹	۰/۰۶۳۴	۰/۰۵۵۳	۰/۰۷۳۵	۰/۱۴۱۲	۰/۰۹۹۷	۰/۰۸۱۵	۰/۱۴۱۰	۰/۲۴۱۲



شکل ۲- وزن نهایی هر معیار

۳-۴- نرخ ناسازگاری

نرخ ناسازگاری، شاخصی است که میزان سازگاری پاسخ‌های خبرگان به ارزیابی‌ها و مقایسه‌های زوجی را اندازه‌گیری می‌کند. برای ارزیابی سازگاری مقایسه‌ها، نرخ ناسازگاری (CR) مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad (۱)$$

که CI: شاخص ناسازگاری و RI: شاخص ناسازگاری تصادفی (Random Index) است که برای ماتریس‌هایی با ابعاد مختلف مقدار ثابتی دارد.

مقدار ویژه (λ_{max}) برای ماتریس پایانی برابر با ۱۰/۳۴۵۸ است. این مقدار برای محاسبه شاخص ناسازگاری (CI) و سپس نرخ ناسازگاری (CR) استفاده خواهد شد. برای محاسبه شاخص ناسازگاری (CI) از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$CI = \frac{\lambda max - n}{n-1} = \frac{10.3458 - 10}{10-1} \approx 0.03484 \qquad (۲)$$

که λ_{max}: مقدار ویژه محاسبه‌شده و n: تعداد معیارها است. مقدار ویژه (λ_{max}) قبلاً برابر با ۱۰/۳۴۵۸ درنظر گرفته‌شد و تعداد معیارها n=۱۰ است. بنابراین، شاخص ناسازگاری (CI) برابر ۰/۰۳۸۴ است. نرخ ناسازگاری (CR) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0384}{1.49} \approx 0.0258$$

برای یک ماتریس با ۱۰ معیار، مقدار RI=۱/۴۹ است. بنابراین، نرخ ناسازگاری (CR) برابر ۰/۰۲۵۸ است.

بررسی و ارزیابی ناسازگاری در روش AHP با استفاده از نرخ ناسازگاری (CR) انجام می‌شود. طبق استانداردهای این روش، اگر مقدار CR کم‌تر از ۰/۱ باشد، مقایسه‌های زوجی انجام‌شده ازنظر سازگاری قابل‌قبول هستند و نیازی به بازنگری ندارند. اگر این مقدار بیش‌تر از ۰/۱ باشد، مقایسه‌ها ناسازگار تلقی شده و نیاز به بازنگری و تصحیح دارند.

باتوجه به این‌که مقدار نرخ سازگاری محاسبه‌شده برابر با ۰/۰۲۵۸ و کم‌تر از ۰/۱ است، پس نیاز به بازنگری و تغییر در مقایسه‌های انجام‌شده نیست و وزن‌ها و اولویت‌های معیارها معتبر هستند. درنهایت باتوجه به محاسبات انجام‌شده، وزن نهایی

معیارها به‌دست آمده است (شکل ۲). این نمودار نشان‌دهنده اولویت هر معیار نسبت به سایر معیارها است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب روش AHP و هوش مصنوعی مولد می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر و کارآمد در فرآیند اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران در استان مازندران به‌کار گرفته‌شود. این رویکرد با محاسبه نرخ ناسازگاری ۰/۰۲۵۸ (کم‌تر از آستانه ۰/۱)، از سازگاری قابل‌قبول مقایسه دوبه‌دو حکایت دارد و امکان ارزیابی چندمعیاره یکپارچه با قابلیت اعتماد بالا را برای سیاست‌گذاران و مدیران محیط‌زیستی فراهم می‌کند. براساس یافته‌ها، شیب زمین با وزن نهایی ۰/۲۵۴ (بالاترین اهمیت) و بارندگی به‌عنوان کلیدی‌ترین معیارهای تأثیرگذار شناسایی شدند؛ درحالی‌که ژئومورفولوژی و عمق خاک با وزن‌های به‌ترتیب ۰/۰۳۸ و ۰/۰۶۵ کم‌ترین تأثیر را در مکان‌یابی نشان دادند. این نتایج با تحلیل‌های کیفی موجود در مطالعه هم‌خوانی دارد. به‌طور مثال، تأثیر مستقیم شیب زمین بر افزایش سرعت رواناب و نقش بارندگی به‌عنوان عامل اصلی تأمین آب در سامانه‌های استحصال، مؤید اولویت‌بندی انجام‌شده است. هم‌چنین، معیارهای قابل‌ارائه به‌صورت نقشه (مانند شبکه آبراهه‌ها، کاربری اراضی، و پوشش گیاهی) تهیه شدند که می‌توانند به‌عنوان لایه‌های اطلاعاتی در سیستم GIS برای طراحی عملیاتی پروژه‌ها مورد استفاده قرارگیرند. یافته‌ها حاکی از آن است که تلفیق این روش با پروژه‌های آب و فاضلاب شهری، به‌ویژه در مناطق با ویژگی‌های مشابه استان مازندران، می‌تواند راه‌کار مناسبی برای مدیریت پایدار منابع آب تحت شرایط تغییرات اقلیمی باشد. هم‌چنین نتایج حاصل از بررسی‌های انجام‌شده در مورد اهمیت و نقش معیارهای انتخابی در سیستم استحصال آب باران، در جدول ۸ قابل‌مشاهده است.

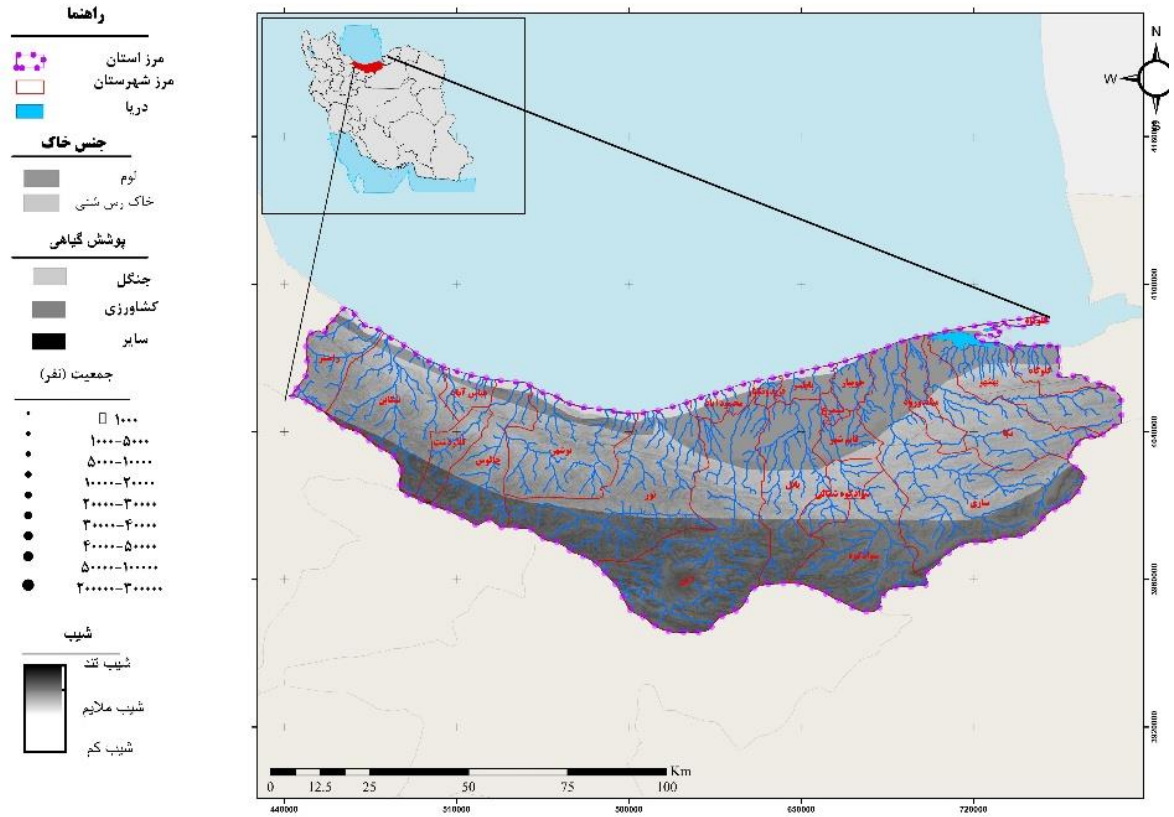
باتوجه به انجام این مطالعات برای استان مازندران و نظر به برخی داده‌های موجود، شکل ۳ به‌عنوان نمونه‌ای از نقشه‌های برهم‌نهی برخی از معیارهای ارائه‌شده در این مقاله شامل شیب زمین، پوشش گیاهی و جمعیت، نمایش داده می‌شود.

۵- محدودیت‌ها

این مطالعه با استفاده از روش AHP و بهره‌گیری از کارشناسان مجازی انجام شد. استفاده از ChatGPT به‌عنوان جایگزین کارشناسان واقعی ممکن است نتایج را کم‌تر تطابق‌پذیر با شرایط میدانی کند که این امر نیاز به بررسی بیش‌تر دارد. هم‌چنین با توجه به محدودیت‌های استفاده از نسخه محدود هوش مصنوعی ChatGPT-4، گرفتن خروجی‌های طولانی و انجام محاسبات طولانی در آن مقدور نیست و انجام یکباره تمامی بخش‌های محاسبات و خروجی‌ها نیاز به نسخه نامحدود دارد.

جدول ۸- اهمیت و نقش معیار ها

معیارها	
شیب زمین: شیب زمین تأثیر مستقیمی بر جریان سطحی آب دارد. افزایش شیب، باعث افزایش سرعت رواناب و کاهش زمان نفوذ آب به خاک می‌شود. بنابراین، زمین‌های با شیب ملایم برای استحصال آب باران مناسب‌تر هستند	**شبکه آبراهه‌ها:** نزدیکی به شبکه‌های آبراهه و رودخانه‌ها، نقش مهمی در جمع‌آوری و هدایت آب باران ایفا می‌کند. مکان‌هایی که به شبکه‌های آبراهه نزدیک‌تر هستند، پتانسیل بهتری برای انتقال رواناب و افزایش کارایی استحصال آب دارند.
بارندگی: مقدار و توزیع بارندگی اصلی‌ترین عامل تأمین آب در سامانه‌های استحصال است. مناطق با بارندگی زیاد، پتانسیل بیش‌تری برای جمع‌آوری آب دارند.	**عمق خاک:** عمق خاک عامل مهمی در نگهداری آب است. خاک‌های عمیق‌تر ظرفیت بیش‌تری برای ذخیره‌سازی آب دارند؛ بنابراین هرچه عمق خاک بیش‌تر باشد، توانایی ذخیره آب باران نیز افزایش می‌یابد.
بافت خاک: بافت خاک بر توانایی ذخیره و نفوذ آب تأثیر می‌گذارد. خاک‌های ماسه‌ای به‌دلیل ظرفیت نفوذپذیری بالا، سریع‌تر آب را جذب می‌کنند، درحالی‌که خاک‌های رسی توانایی کم‌تری در نفوذ آب دارند. درنتیجه برای استحصال باران، خاک‌هایی با بافت مناسب و توانایی ذخیره‌سازی آب ترجیح داده می‌شوند.	**زهکشی:** سیستم زهکشی زمین، نقش کلیدی در مدیریت رواناب دارد. زهکشی مناسب می‌تواند از تجمع آب جلوگیری کرده و باعث بهبود نفوذپذیری شود. زهکشی نامناسب ممکن است باعث هدررفت آب شود.
کاربری اراضی: کلاس‌های کاربری اراضی، بر رواناب و میزان آب استحصال‌شده تأثیر می‌گذارد. زمین‌های غیرمستحکم و جنگلی به‌دلیل پوشش گیاهی بیش‌تر، توانایی بیش‌تری در جذب و نگهداری آب باران دارند.	**معیارهای اجتماعی:** عواملی مانند پذیرش محلی، هزینه‌های اجرایی و نیازهای جوامع می‌تواند بر موفقیت و پذیرش سامانه‌های استحصال آب باران تأثیر بگذارد. بنابراین، درنظرگرفتن نیازهای اجتماعی در این پروژه‌ها ضروری است.
پوشش گیاهی: پوشش گیاهی می‌تواند سرعت جریان آب سطحی را کاهش‌داده و فرصت بیش‌تری برای نفوذ آب به خاک ایجاد کند. مناطقی با پوشش گیاهی متراکم‌تر، آب بیش‌تری را ذخیره و خطر فرسایش خاک را کاهش می‌دهند.	**ژئومورفولوژی:** ویژگی‌های سطح زمین، مانند پستی و بلندی‌ها، بر نحوه جریان آب باران و مکان مناسب برای ذخیره‌سازی آن تأثیر می‌گذارد. مناطقی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مناسب، پتانسیل بیش‌تری برای استحصال و ذخیره آب باران دارند.



شکل ۳- برهم‌نهی برخی از معیارهای ارائه‌شده در این مقاله شامل شیب زمین، پوشش گیاهی و جمعیت

البته می‌توان کار را به چند گام کوچک‌تر تقسیم کرد و پس از انجام هر گام، با گذراندن مدت‌زمانی که دسترسی به این هوش مصنوعی قطع می‌شود، گام‌های بعد را برای رسیدن به نتیجه نهایی انجام داد. هم‌چنین تهیه نقشه نهایی براساس داده‌های موجود و مقدور برای نمایش صورت پذیرفت.

۶- پیشنهادها

در ادامه این پژوهش، پیشنهاد می‌شود همین فرآیند با مشارکت متخصصان دنیای واقعی تکرار شده و نتایج به‌دست‌آمده از هوش مصنوعی با داده‌های حاصل از تجربیات عملی مقایسه‌شود. در مرحله بعد، این مقایسه می‌تواند با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی کنترل‌شده صورت‌گیرد تا میزان دقت و کارایی هوش مصنوعی در فرآیند تصمیم‌گیری ارزیابی شود. علاوه‌بر این، گسترش دامنه تحقیق از طریق شناسایی عوامل تأثیرگذار جدید و تحلیل نتایج در شرایط متنوع می‌تواند به غنای پژوهش بیفزاید. هم‌چنین پیشنهاد می‌شود که نتایج این پژوهش در محیط‌های عملیاتی واقعی، ازجمله در کاربردهایی مانند کنترل سیلاب، مورد آزمایش و ارزیابی قرارگیرد تا میزان اثربخشی و قابلیت اجرایی آن‌ها سنجیده شود.

۸- مراجع

اکبرپور، ا.، خاشعی‌سیوکی، ع.، کشاورز، ا.، و فروغی‌فر، ح.، (۱۳۹۴)، "تعیین مکان‌های مناسب جمع‌آوری آب باران برای استفاده در مصارف کشاورزی با استفاده از مدل AHP (مطالعه موردی: حوزه آب‌خیز بیرجند)"، *پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آب‌خیز*، ۶(۱۲)، ۶۵-۷۴.

اکبرپور، ا.، صادقی، ش.، فروغی‌فر، ح.، و شهیدی، ع.، (۱۳۹۴)، "مقایسه روش‌های مکان‌یابی مناطق مستعد جمع‌آوری باران به‌کمک سیستم پشتیبانی تصمیم (DSS) مبتنی بر GIS"، *نشریه جغرافیا و توسعه*، ۱۳(۳۹)، ۱۴۷-۱۶۴، https://doi.org/10.22111/gdij.2015.2010.

امامی اسکاردی، م.ج.، شوبیری، غ.، و کراچیان، ر.، (۱۴۰۱)، "تحلیل روابط بین گرورداران و تحلیل تعارض با استفاده از رویکرد درخت تعارض"، *تحقیقات منابع آب*، ۱۸(۴)، ۵۷-۷۴، https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1401.18.4.4.8

خیرخواه، آ.، محمدی، ف.، و معماریان، ه.، (۱۳۹۴)، "تعیین مناطق مستعد استحصال آب باران با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آب‌خیز رود سراب شهرستان خوشاب استان خراسان رضوی)

(حفاظت از منابع و توسعه پایدار)"، *همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۲۸-۲۹ بهمن، مشهد.

سلطانی، م.، و سلیمانی، ک.، (۱۴۰۱)، "مکان‌یابی مقایسه‌ای جمع‌آوری آب باران (مطالعهٔ موردی: حوضه‌های میخوران و خسروآباد استان کرمانشاه)"، *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۷(۱۸)، ۴۹-۶۲، https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.18.49.

عربی علی‌آباد، ف.، و ملکی‌نژاد، ح.، (۱۳۹۴)، "ارزیابی استحصال آب باران از ساختمان‌های مسکونی (مطالعه موردی شهر شیراز) (مدیریت و برنامه‌ریزی شهری)"، *همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۲۸-۲۹ بهمن، مشهد.

فقیهی، ف.، و جهان‌تیغ، ح.، (۱۴۰۲)، "تعیین مکان‌های مناسب برداشت آب باران با استفاده از GIS و FAHP"، *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳(۳)، ۲۵۱-۲۶۷، https://doi.org/10.22125/iwe.2023.168323.

معماریان، ه.، حسین‌نیا، ا.، توسلی، ا.، کومه، ز.، تاج‌بخش، ح.، عباسی، ع.، و پارسایی، ل.، (۱۳۹۴)، "ملاحظات و استانداردهای زیست‌محیطی اجرای سیستم‌های استحصال آب باران در منازل مسکونی (مدیریت و برنامه‌ریزی شهری)"، *همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۲۸-۲۹ بهمن، مشهد.

نوروززاده، م.، قانعی‌بافقی، م.، و تازه، م.، (۱۴۰۱)، "کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تعیین نقاط مناسب برای احداث سازه‌های جمع‌آوری آب باران"، *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۷(۲۱)، ۴۵-۵۸، https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.21.35.

Al-Harbi, K.M.A.S., (2001), "Application of the AHP in project management", *International Journal of Project Management*, 19(1), 19-27, https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00038-100038-1.

Alwan, I.A., Aziz, N.A., and Hamoodi, M.N., (2020), "Potential water harvesting sites identification using spatial multi-criteria evaluation in Maysan Province, Iraq", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 235, https://doi.org/10.3390/ijgi9040235.

Ammar, A., Riksen, M., Ouessar, M., and Ritsema, C., (2016), "Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review", *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 108-120, https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.03.001.

Bojer, A.K., Bekalo, D.J., Debelee, T.G., Nadarajah, S., and Al-Quraishi, A.M.F., (2024), "Rainwater harvesting site selection for drought-prone areas in Somali and Borena Zones, Oromia Regional State, Ethiopia: A geospatial and multi-criteria decision analysis", *Water*, 16(13), 1789, https://doi.org/10.3390/w16131789.

Darko, A., Chan, A.P.C., Ameyaw, E.E., Owusu, E.K., Pärn, E., and Edwards, D.J., (2019), "Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction", *International Journal of Construction Management*, 19(5), 436–452, https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452098.

Li, Z., Boyle, F., and Reynolds, A., (2010), "Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland", *Desalination*, 260(1-3), 1-8, https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.035.

Martínez-Acosta, L., López-Lambraño, A.A., and López-Ramos, A., (2019), "Design criteria for planning the agricultural rainwater harvesting systems: A review", *Applied Sciences*, 9(24), 5298, https://doi.org/10.3390/app9245298.

Mosase, E., Kayombo, B., Tsheko, R., and Tapela, M., (2017), "Assessment of the suitability of rain water harvesting areas using multi-criteria analysis and fuzzy logic", *Advances in Research*, 10(4), 1-22, https://doi.org/10.9734/AIR/2017/33983.

Nandi, S., and Gonela, V., (2022), "Rainwater harvesting for domestic use: A systematic review and outlook from the utility policy and management perspectives", *Utilities Policy*, 77, 101383, https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101383.

Noori, S., and Ghasemlounia, R., (2019), "A review of criteria in rain water harvesting management", *International Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(3), 9-16, https://doi.org/10.1007/978-3-031-28251-513.

Pacheco, G.C.R., and Alves, C.D.M.A., (2024), "The performance of rainwater harvesting systems in the context of deep uncertainties", Proceedings of IAHS, 385, 11-16, https://doi.org/10.5194/piahs-385-11-2024.

Rao, N.R., Kiran, S.P., Amena, T., Senthilkumar, A., Sivakumar, R., Kumar, M.A., and Velusamy, S., (2024), "Enhancing rainwater harvesting and groundwater recharge efficiency with multi-dimensional LSTM and clonal selection algorithm", *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101167, https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101167.

Raimondi, A., Quinn, R., Abhijith, G.R., Becciu, G., and Ostfeld, A., (2023), "Rainwater harvesting and treatment: State of the art and perspectives", *Water*, 15(8), 1518, https://doi.org/10.3390/w15081518.

Saaty, T.L., (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*, McGraw-Hill.

Singh, L.K., Jha, M.K., and Chowdary, V.M., (2017), "Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply", *Journal of Cleaner Production*, 142, 1436-1456, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163.

Soh, Q.Y., O'Dwyer, E., Acha, S., and Shah, N., (2023), "Robust optimisation of combined rainwater harvesting and flood mitigation systems", *Water*

Research, 245, 120532, https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120532.

Sharifian, H., Emami-Skardi, M.J., Behzadfar, M., and Faizi, M., (2022), “Water sensitive urban design (WSUD) approach for mitigating groundwater depletion in urban geography; through the lens of stakeholder and social network analysis”, *Water Supply*, 22(6), 5833-5852, https://doi.org/10.2166/ws.2022.206.

Toosi, A.S., Tousi, E.G., Ghassemi, S.A., Cheshomi, A., and Alaghmand, S., (2020), "A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting", *Journal of Hydrology*, 582, 124501, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124501.

Ward, S., Memon, F.A., and Butler, D., (2012), "Performance of a large building rainwater harvesting system", *Water Research*, 46(16), 5127-5134, https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.06.043.

Zheng, X., Sarwar, A., Islam, F., Majid, A., Tariq, A., Ali, M., Gulzar, S., Khan, M.I., Sardar Ali, M.A., Israr, M., Jamil, A., Aslam, M., and Soufan, W., (2023), "Rainwater harvesting for agriculture development using multi-influence factor and fuzzy overlay techniques", *Environmental Research*, 238, 117189, https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117189.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.