مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۰ ■ شماره ۲ ■ پاییز ۱۳۹۹
صفحه‌های ۳۱۶-۳۰۱

مقاله پژوهشی:

رتبه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری دشت مشهد نسبت به کاهش منابع آب زیرزمینی با روش بیزین بهترین- بدترین

آزاده دوگانی[۱]، آرش دوراندیش[۲*]، محمد قربانی[۳]
۱. دانشجوی دکتری، اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۲. دانشیار، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۳. استاد، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۲

چکیده

عدم امنیت آب یک نگرانی رو به رشد در سطح جهان است، به‌ویژه برای کشورهای در حال توسعه، که در آن طیف وسیعی از فعالیت‌ها از جمله کشاورزی به سیستم‌های تأمین آب وابسته است. ایران نیز از این قاعده مستثنی نیست. برای مثال استفاده فزاینده از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت مشهد در نتیجه توسعه کشاورزی و صنایع وابسته در این دشت منجر به تشدید روند نزولی سطح آبخوان آن شده است. از این‌رو، تاب‌آوری دشت مشهد نسبت به کاهش منابع آب زیرزمینی مسأله‌ای بسیار مهم است. در این تحقیق سعی شده است تا با توجه به نظر کارشناسان امر و با استفاده از دو روش بیزین بهترین- بدترین و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، پس از تعیین متغیرهای اساسی تأثیرگذار بر مدل به تحلیل اولویت این متغیرها پرداخته شود تا بتوان با استفاده از این دانش، در آینده به تعریف استراتژی‌های اساسی برای افزایش تاب‌آوری این منابع در این دشت پرداخت. با توجه به مرور پژوهش‌های انجام‌شده، این پژوهش اولین تلاش برای به‌کارگیری روش بیزین بهترین- بدترین در این حوزه پژوهشی است. نتایج این پژوهش نشان داده است که به‌ترتیب نرخ تخلیه آب‌های زیرزمینی در کشاورزی با وزن نهایی ۰/۱۸۱ در بخش BWM و ۰/۲۱۲ در بخش AHP، منابع آب زیرزمینی موجود کشاورزی با وزن نهایی ۰/۲۰۱ در بخش BWM و ۰/۱۷٤ در بخش AHP، میزان تلفات آب سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی با وزن نهایی ۰/۱۰۲ در بخش BWM و ۰/۰۸۸ در بخش AHP، با ترتیبی متفاوت در دو روش، بالاترین اهمیت را دارا می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: بیزین بهترین- بدترین، تاب‌آوری منابع آب زیرزمینی، دشت مشهد، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی.

Ranking of Resilience Indicators of Mashhad Plain to Groundwater Resources Reduction by Bayesian Best-Worst Method

Azadeh Dogani[1], Arash Dourandish[2*], Mohammad Ghorbani[3]
1. Ph.D. Candidate, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Received: May 31, 2020 Accepted: September 12, 2020

Abstract
Water insecurity is a growing concern worldwide, especially for developing countries, where a wide range of activities, including agriculture, depend on water supply systems. Iran is no exception. For example, the increasing use of surface and groundwater resources in the Mashhad plain as a result of the development of agriculture and related industries in this plain has led to an intensification of the declining trend of its aquifer level. Therefore, the resilience of Mashhad plain is very important in reducing groundwater resources. In this research, it has been tried to analyze the priority of these variables after determining the basic variables affecting the model, according to the opinion of experts and using the two best-worst business methods and the process of hierarchical analysis. In the future, knowledge will define the basic strategies for increasing the resilience of these resources in this plain. According to the literature review, this research is the first attempt to apply the best-worst business method in this field of research. The results of this study showed that the discharge rate of groundwater in agriculture with a final weight of 0.181 in the BWM section and 0.212 in the AHP section, respectively, the existing agricultural groundwater resources with a final weight of 0.044 in the BWM section and 0.174 in the AHP section, the amount of surface and groundwater losses in the agricultural sector with a final weight of 0.102 in the BWM section and 0.884 in the AHP section, with different order in the two methods, are of the highest importance.

Keywords: Bayesian best-worst, Hierarchical analysis process, Mashhad plain, Resilience of groundwater resource.

* نویسنده مسئول Email: dourandish@um.ac.ir

مقدمه

هدررفت آب در ایران بیش از میانگین جهانی است و بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در کشور است این در حالی است که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۰ شمسی، جمعیت به مرز ۱۰۰ میلیون نفر برسد و برای تأمین نیازهای غذایی این جمعیت، سالانه به حدود ۱۵۰ میلیارد مترمکعب آب نیاز خواهد بود (٦).

از طرفی، در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک منابع آب زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی (یا حداقل یک مؤلفه مهم) تأمین آب شیرین موردتوجه می‌باشد، زیرا سطح بارش پایین و کم‌آبی و وقوع خشکسالی‌های متوالی جزء جدایی‌ناپذیری این مناطق بوده و در صورت عدم سازگاری، می‌تواند به یکی از فاجعه‌بارترین بلاها تبدیل شود. به همین دلیل، این منابع نقش بسیار مهمی در تأمین امنیت و رفاه روزانه مردم در این مناطق دارند (۲۸). هم‌چنین آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی در تعادل محیط زیست این مناطق ایفا می‌کند (۲۹). منابع آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به‌شمار می‌روند، که شناخت صحیح و بهره‌برداری اصولی از آنها می‌تواند در توسعه پایدار و فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی یک منطقه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش به‌سزایی داشته باشد (١٦). با این‌حال و با وجود اهمیت بسیار زیاد این منابع در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در اغلب موارد منابع آب زیرزمینی به‌صورت بهینه مدیریت نشده‌اند و به‌طور عمده در معرض استفاده بیش از حد بوده و یا به‌طور مداوم آلودگی آن‌ها تشدید می‌شود (۲۸). ایران نیز مانند بسیاری از دیگر نقاط جهان با مشکلات کم‌آبی گریبان‌گیر است و هم‌اکنون به‌دلیل خشکسالی‌های مکرر توأم با برداشت بیش از حد آب‌های سطحی و زیرزمینی از طریق شبکه بزرگی از زیرساخت‌های هیدرولیکی و چاه‌های عمیق، در حال تجربه مشکلات جدی در حوزه آب و مواجهه با سطح بحرانی است. متأسفانه افت مستمر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی، بسیاری از شهرهای ایران را با چالش‌های جدی و سخت در آینده روبه‌رو خواهد نمود (۳).

با توجه به اهمیت این موضوع که در بالا ذکر شده است، نحوه پایش و ارزیابی سیستم‌های منابع آب زیرزمینی و معیارهای مربوط به آن از دغدغه‌های پژوهش‌گران و تصمیم‌گیرندگان در سه دهه اخیر بوده است (۹). تاکنون شاخص‌های متعددی برای فرایندهای زیست‌محیطی از جمله شاخص زیست‌محیطی، شاخص تنش زیست‌محیطی، شاخص زیست‌محیطی چندمعیاره و ... توسعه داده شده است، اما بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی یک چالش میان‌رشته‌ای مهم است و تنها آثار زیست‌محیطی ندارد. هر میزان بهره‌برداری از آب زیرزمینی، سیستم آب زیرزمینی را تغییر می‌دهد و عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاسی، نرخ قابل‌قبول و پایدار برداشت را تعیین می‌کند. در نتیجه لازم است شاخصی معرفی شود که به‌طور هم‌زمان شرایط اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در نظر گیرد. یکی از اساسی‌ترین اهداف که بررسی این شاخص‌ها آن را برآورده می‌کنند، تاب‌آوری است. از نظر لوکس (۱۹) برگشت‌پذیری (تاب‌آوری) توانایی سیستم در تغییر شرایط خود می‌باشد. در واقع این پارامتر برای سیستم‌های منابع آب به این صورت تعریف می‌شود که احتمال این‌که سیستم پس از شکست به حالت مطلوب بازگردد، چقدر است. براساس گفته هاشیموتو و همکاران (۱۲) نیز احتمال این‌که یک سیستم پس از شکست به حالت مطلوب برگردد را تاب‌آوری گویند.

عوامل متفاوتی در بخش تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی، موردتوجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی (۱۸)، فرایندهای

بازخورد و تعامل بین جمعیت، منابع آب و بخش‌های تولید کشاورزی (۱۷)، تاب‌آوری در سیستم رودخانه (۲۵)، شاخص‌های آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی (۲٤)، شاخص جذب مجدد آب توسط آب‌خوان (۱۳ و ۱۰)، شاخص‌های مدت زمان، میزان، فرکانس و حجم کم‌شدن آب (۲٦)، تاب‌آوری آب‌های زیرزمینی در برابر استفاده برای آشامیدن و کشاورزی (۱۱)، اثرات کاهش دسترسی به آب‌های زیرزمینی در طول خشکسالی (۲۰)، مدیریت و بهره‌برداری منابع آب (۱)، برداشت مجاز از آب زیرزمینی (۱٤)، تبادل آب های سطحی و زیرزمینی (۲۷)، از جمله عواملی هستند که توسط پژوهش‌گران موردبررسی قرار گرفته‌اند.

پایداری و تاب‌آوری منابع آب در ایران بیش از هر چیز تحت تأثیر بهره‌برداری از منابع آب کشاورزی قرار می‌گیرد، زیرا همان‌طور که ذکر شد بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب محسوب شده و بیش از ۹۰ درصد مصارف آب کشور را شامل می‌شود (۲). با توجه به این‌که حجم زیادی از آب‌های زیرزمینی ایران حدود ٤۱ درصد به‌طور نادرست صرف مصارف کشاورزی می‌شود، روشی ترکیب از مدل‌های قدرتمند که عوامل مختلف تأثیرگذار را بررسی کند، می‌تواند کمک شایسته‌ای به این حوزه باشد.

منابع تأمین‌کننده نیاز آبی بخش کشاورزی به دو دسته منابع آب سطحی و زیرزمینی تقسیم می‌شوند. با توجه به نوسانات موجود در منابع آب سطحی، این منابع علی‌رغم حجم بالا نمی‌توانند به‌عنوان منبع مطمئنی برای تأمین آب موردنیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی به‌شمار رود. ذخایر آب زیرزمینی در تأمین منابع آب کشاورزی از دو جنبه افزایش عرضه منابع آب و لزوم تثبیت آن دارای اهمیت است. در مواقعی که عرضه آب‌های سطحی کم‌تر از میزان موردنیاز است، استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند عرضه آب را مطمئن‌تر کرده و میزان دسترسی به آب آبیاری را در مواقع نیاز افزایش دهد، به‌ویژه در مواقع بروز خشکسالی، نقش تثبیت‌کنندگی مقدار عرضه آب بیش‌تر نمایان می‌گردد. برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی، موجب برهم‌خوردن توازن سیستم، عدم پایداری و کاهش ذخیره سفره‌های آب زیرزمینی شده و در نهایت توسعه پایدار کشاورزی را ناممکن می‌سازد. لذا دست‌یابی به تاب‌آوری منابع آب زیرزمینی، برقراری توازن میان تغذیه و برداشت منابع زیرزمینی از اهمیت بسیاری برخوردار است. در نتیجه به‌کارگیری مناسب سیستم استفاده از منابع آب سطحی و به‌ویژه زیرزمینی در این بخش می‌تواند به برقراری این توازن و در نهایت بهره‌برداری پایدار از منابع آب کمک کند. در پژوهش‌های پیشین مهرآذر و همکاران (۷) در مطالعه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Vensim به بررسی مدل‌سازی یکپارچه سیستم‌های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی دشت هشتگرد با رویکرد دینامیک سیستم‌ها پرداختند که در آن از داده‌های مشاهداتی برای دوره زمانی ۱۳۸۰-۱۳۸۵ شمسی و از آزمون‌های تکرار رفتار و شرایط حدی استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی مدل برای متغیرهای جمعیت، نیاز آب شرب، نیاز آب صنعت و ارزش‌افزوده نشان داد مدل به‌منظور بازسازی رفتار پارامترهای مختلف درون سیستم به‌خوبی واسنجی شده و نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب دشت هشتگرد تحت سیاست‌های مختلف در دوره‌های آتی است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مهم در ارزیابی تصمیم‌ها و اقدام‌های مختلف بر سیستم‌های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی دشت هشتگرد در مدیریت بحران آب موجود در منطقه به‌کار رود. مولوی و همکاران (۸) با استفاده از روش پویایی سیستم و با لحاظ

جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی برای مدیریت و کنترل منابع آب حوضه آبریز ارس سیاست‌های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم‌آبیاری را ارائه کردند. نتایج نشان داد که با توجه به پتانسیل بالای منابع آب سطحی در حوزه ارس، کاهش سهم استفاده از منابع آب زیرزمینی در کشاورزی به میزان ۳ درصد، به کنترل و پایداری منابع آب خواهد انجامید. غفوری‌خرانق و همکاران (٤) در پژوهشی به ارزیابی اجتماعی سناریوهای حکم‌رانی آب زیرزمینی پرداختند. برای این منظور در گام اول از سناریوهای حکم‌رانی آب زیرزمینی با مشارکت بازیگران و با توجه به هم‌بست بخش منابع آب با دو بخش غذا و انرژی در چهارچوب DPSIR استفاده کردند. سپس عملکرد سناریوهای مختلف حکم‌رانی آب زیرزمینی از نظر بُعد اجتماعی، موردارزیابی قرار گرفت. بدین منظور سه معیار رضایت‌مندی اجتماعی، عدالت اجتماعی و مشارکت اجتماعی تعریف شد. مقدار معیارهای رضایت‌مندی اجتماعی و عدالت اجتماعی با استفاده از پرسش‌نامه و معیار مشارکت اجتماعی با استفاده از شاخص چگالی با استفاده از آنالیز شبکه اجتماعی برای هر سناریو محاسبه شد. در انتها به‌منظور ترکیب سه معیار اجتماعی برای هر سناریو، از الگوریتم فاصله از حد ایده‌آل استفاده شد و سناریوهای حکم‌رانی آب زیرزمینی از دیدگاه اجتماعی رتبه‌بندی شدند. نتایج پژوهش نشان داد سناریوی برنامه‌های مدون کشت و مدیریت بازار غذا با امتیاز ۰/٤۸۵، بالاترین رتبه و سناریوی اصلاح ساختار قانونی در راستای پلمپ تمامی چاه‌های غیرمجاز با امتیاز ۰/۳۹۲ کم‌ترین رتبه را در مقایسه با سایر سناریوهای حکم‌رانی آب زیرزمینی از لحاظ تأثیرگذاری اجتماعی به‌دست آوردند. فرزانه و همکاران (۵)، با بهره‌گیری از روش تحقیق کیفی به نقد رویکرد حاکم بر طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی و پیشنهاد راه‌کار جایگزین جهت پیاده‌سازی در محدوده مطالعاتی رفسنجان پرداخته‌اند. با بررسی مطالعات انجام‌شده، اهمیت و بحرانی که موضوع کم‌آبی می‌تواند برای هر جامعه‌ای ایجاد نماید، کاملاً مشخص است. بحران کم‌آبی در مناطق خشک و کم آب و به دور از تکنولوژی‌ها و سیاست‌های کارآمد به‌روز مانند ایران اهمیت بیش‌تری می‌یابد. با توجه به اهمیت موضوع، شایسته است که با ابزار جدید (روش بیزین بهترین- بدترین) بتوان بهره‌وری بالاتری در این زمینه ایجاد کرد.

هدف از این مقاله بررسی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر افزایش تاب‌آوری اقتصادی دشت مشهد نسبت به کاهش منابع آب زیرزمینی و تحلیل سیستمی تاب‌آوری اقتصادی دشت مشهد نسبت به کاهش آبهای زیرزمینی است. بدین منظور ابتدا لازم است شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری منابع زیرزمینی در دشت موردمطالعه شناسایی و اولویت‌بندی شوند. در پژوهش حاضر، شاخص‌های مهم ارزیابی تاب‌آوری منابع آب‌های زیرزمینی با مطالعه پیشینه پژوهش، شناسایی و سپس به اولویت‌بندی آن‌ها از طریق روش بیزین بهترین- بدترین پرداخته شده است و در نهایت با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، به مقایسه آن‌ها پرداخته می‌شود. دانستن این اولویت‌ها برای تعیین راه‌کارهای صحیح جهت حفظ منابع آبی زیرزمینی این دشت، حائز اهمیت است.

مواد و روش‌ها

دشت مشهد از مهم‌ترین دشت‌های خراسان رضوی است و یکی از دشت‌های مستعد برای تولید محصولات کشاورزی است که همانند بسیاری از دشت‌های کشور بیلان آب زیرزمینی در آن منفی است. عمق آب زیرزمینی در دشت مشهد به‌طور متوسط ٤۸ متر و ذخیره ثابت آن ۵/۵ میلیارد مترمکعب است. سالانه بیش از ۱۳٦ میلیون مترمکعب اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی این دشت صورت می‌پذیرد.

مجموعه آب تجدیدشونده دشت مشهد ۹۳۵ میلیون مترمکعب است. مجموع عوامل تخلیه آبخوان دشت مشهد ۱۰۷۱ میلیون مترمکعب است. با توجه به محدودیت منابع آب سطحی و فصلی‌بودن این منابع بخش عمده آب آبیاری از منابع زیرزمینی استحصال می‌شود و سهم جریان‌ها خروجی آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، به بیش از ۷۵ درصد می‌رسد که در وضعیت موجود، برداشت اضافه بر ظرفیت از آب‌های زیرزمینی در این دشت موجب افت سالیانه ۱/٤۷ (حتی در بعضی نقاط به سه تا هفت متر رسیده است) متری سطح سفره‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در این منطقه تا حدود ۲۵ سانتی‌متر در سال شده است. با توجه به اهمیت دشت مشهد به‌عنوان یک منطقه مستعد کشاورزی از یک‌سو و وجود معضل افت شدید سطح ایستایی در این منطقه از سوی دیگر، توجه به تاب‌آوری منابع آب زیرزمینی در تولید محصولات کشاورزی و انتخاب الگوی کشت مناسب این منطقه ضروری به‌نظر می‌رسد (۲). در شکل (۱) نقشه GIS منطقه موردمطالعه (دشت مشهد) نشان داده شده است.

در این مطالعه از روش بیزین بهترین- بدترین استفاده و سپس نتایج به‌دست‌آمده از این روش با نتایج حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)[1]، مقایسه شده است. برای این امر ابتدا به معرفی روش‌ها پرداخته شد.

روش بهترین- بدترین

BWM[2] یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره نسبتاً جدید است. یکی از محبوب‌ترین روش‌های مبتنی بر مقایسه تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر مقایسه، AHP است که نیاز به مقایسه زوجی همه معیارهای تصمیم n در کنار هم دارد، یعنی n (n-1)/2 مقایسه زوجی. در مقابل، BWM فقط به اصطلاح مقایسه زوجی مرجع، یعنی مقایسه 2n-3 جفت نیاز دارد. به‌غیر از این ویژگی BWM، که آن را به یک روش کارآمدتر در مقایسه با AHP تبدیل می‌کند، دارای چندین ویژگی جالب دیگر نیز هست، از جمله بهبود نرخ ناسازگاری. ابتدا با انتخاب بهترین و بدترین معیارها و سپس مقایسه سایر معیارهای دیگر با این دو معیار، ساختاری به مسأله می‌بخشد. چنین ساختاری به مدیران تصمیم‌گیر کمک می‌کند تا مقایسات زوجی قابل اطمینان‌تری را ارائه دهد. BWM به‌عنوان یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی ارائه شده است، درحالی‌که تقریب خطی وجود دارد. روش بهترین- بدترین، پنج مرحله اصلی دارد (۲۹).

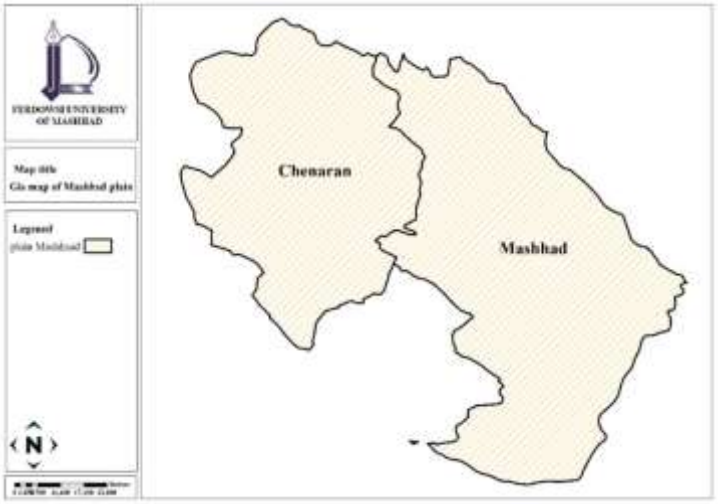

Figure 1. GIS map of Mashhad plain

مرحله ۱: تعیین مجموعه معیارهای تصمیم‌گیری

مرحله ۲: تعیین بهترین و بدترین معیار

مرحله ۳: تعیین اولویت بهترین معیار بر دیگر معیارها. عددی بین ۱ و ۹ برای این منظور استفاده شده‌است. و نتیجه آن بردار بهترین (BO) است $A_B = \{a_{B1}, a_{B2}, \ldots, a_{Bn}\}$، نشان‌دهنده اولویت بهترین معیار B بر معیار j می‌باشد.

مرحله ٤: تعیین اولویت تمامی معیارها بر بدترین معیار. عددی بین ۱ و ۹ برای این منظور استفاده شده‌است. و نتیجه آن بردار بدترین (WO) است. $A_w = (a_{w1}, a_{w2}, \ldots, a_{wn})^T$ a_{wi} اولویت معیار j بر بدترین معیار w را نشان می‌دهد.

مرحله ۵: تعیین وزن بهینه: اوزان بهینه معیار $(w_1^*, w_2^*, \ldots, w_n^*)$ باید به‌گونه‌ای تعیین شوند که تفاوت بین تمامی معیارها کاهش یابد. مجموع وزن‌ها باید ۱ باشد. و هم‌چنین وزن‌ها نباید منفی باشند. و در مدل بیشینه- کمینه Min-Max زیر نشان داده شده است:

$$min - max_j = \left\{ \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{W_j}{W_w} - a_{jw} \right| \right\} \quad (۱)$$

به‌طوری‌که:

$$\sum W_j = 1 \, W_j \geq 0, \; For \quad all \; j \quad (۲)$$

برای حل این مسأله، برنامه‌ریزی خطی را می‌توان به‌کار برد. مدل Min-Max را می‌توان به‌صورت زیر تغییر داد:

$$\min \quad \xi \quad (۳)$$

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi \quad For \quad all \quad j$$

$$\left| \frac{W_j}{W_w} - a_{jw} \right| \leq \xi \quad For \quad all \quad j$$

$$\sum W_j = 1$$

$$W_j \geq 0, \quad For \quad all \quad j$$

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi \quad For \quad all \quad j$$

با حل این مسأله، وزن‌های مطلوب و ξ^* به‌دست می‌آید. ξ^* پایایی وزن‌ها را نشان می‌دهد. و براساس پیوستگی مقایسه‌ها می‌باشد. و هرچه این میزان به صفر نزدیک‌تر باشد، پایایی و پیوستگی مقایسه‌ها بیش‌تر می‌شود. پیوستگی کامل برای تمامی j زمانی حاصل می‌شود که $a_{Bj} \times a_{jw} = a_{BW}$.

روش بیزین بهترین- بدترین

این بخش به معرفی یک مدل بیزین سلسله‌مراتبی که مدل اصلی پژوهش حاضر است. برای پیداکردن مقادیر بهینه مجموعه‌ای از معیارها براساس اولویت‌های چندگانه استفاده از بهترین چارچوب می‌پردازد.

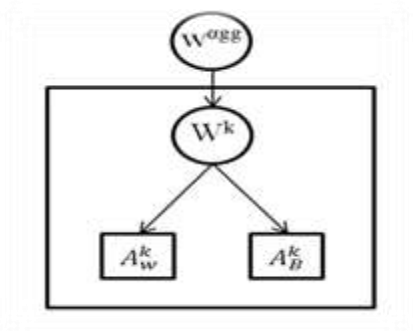

Figure 2. The probabilistic graphical model of the bayesian BWM

برای توسعه یک مدل بیزین، ابتدا باید استقلال و استقلال مشروط متغیرها را شناسایی کرد. شکل (۲) مدل‌های گرافیکی مربوط به مدل را نشان می‌دهد. گره‌های موجود در نمودار متغیرها هستند. به‌عنوان یک دسته، مستطیل‌ها متغیرهای مشاهده‌شده هستند، که ورودی‌های اصلی BWM هستند. گره‌های دایره‌ای متغیرهایی هستند که باید تخمین زده شوند. هم‌چنین، فلش نشان می‌دهد که گره در مبدأ وابسته به گره در انتهای دیگر است. یعنی مقدار W_k به A_W^K و A_B^K بستگی

دارد و مقدار W^{agg} نیز به W_k بستگی دارد. صفحه، که مجموعه‌ای از متغیرها را در بر می‌گیرد، بدین معنی است که برای هر تصمیم متغیرهای مربوطه تکرار می‌شوند، و W^{agg} در صفحه قرار ندارد زیرا فقط یک W^{agg}برای تصمیم وجود دارد (۱۵). استقلال مشروط بین متغیرهای مختلف براساس شکل (۲) مشخص است. به‌عنوان مثال، A_W^K وابسته به W_k که خود از W^{agg} شده است، یعنی:

$$P(A_W^K|W^{\propto gg}, W^K) = (A_W^K|W^K) \quad (٤)$$

با درنظرگرفتن تمام استقلال بین متغیرهای مختلف، اعمال قاعده بیز به احتمال مشترک در زیر و در رابطه (۵) آمده است:

$$P(W^{\propto gg}, W^{1:K}|A_B^{1:K}, A_W^{1:K}) \propto= \quad (۵)$$

$$P(A_B^{1:K}, A_W^{1:K}|W^{\propto gg}, W^{1:K})$$

$$P(W^{\propto gg}) \prod_{K=1}^{K} P\,(A_W^K|W^K) P(A_B^K|W^K) p(W^K|W^{\propto gg})$$

در جایی‌که آخرین تساوی با استفاده از قاعده زنجیر احتمال و استقلال مشروط متغیرهای مختلف به‌دست می‌آید و این واقعیت که هر تصمیم‌گیرنده به‌طور مستقل اولویت‌های خود را فراهم می‌کند. ازآنجاکه برآورد پارامترها در معادله (۵) متکی به برآورد متغیرهای دیگر است، یک زنجیره بین پارامترهای مختلف وجود دارد. وجود این زنجیره دلیل آن است که این مدل، سلسله‌مراتبی نامیده می‌شود. لازم به ذکر است که تنها یک تفاوت بین AB و AW وجود دارد زیرا اولی اولویت همه معیارها در بدترین شرایط را نشان می‌دهد درحالی‌که دومی اولویت بهترین ضابطه را در تمام معیارهای دیگر نشان می‌دهد (۲۳).

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

فرایند سلسله‌مراتبی تحلیلی یکی از روش‌های قدیمی و پر کاربرد تصمیم‌گیری چند معیاره است. در AHP، ارزش‌هایی مانند قیمت، وزن، یا منطقه یا حتی عقاید ذهنی مانند احساسات، ترجیحات و یا رضایت، می‌توانند به روابط عددی قابل اندازه‌گیری تبدیل شوند. هسته اصلی AHP مقایسه جفت به‌جای مرتب‌سازی (رتبه‌بندی)، رأی‌گیری (به‌عنوان مثال تعیین امتیاز) یا اختصاص اولویت‌ها است. مراحل اساسی برای حل مسأله تصمیم‌گیری با استفاده از AHP بسیار ساده است:

تعیین هدف تصمیم- تصمیم برای چه منظوری است، و گزینه‌ها چیست؟

ایجاد ساختار مسأله تصمیم‌گیری در یک سلسله مراتب- دسته‌ها و معیارهایی که در تصمیم شکل می‌گیرد چیست؟

مقایسه جفت معیارها در هر دسته. به‌عنوان مثال آبی یا سبز؟ کدام‌یک را ترجیح می‌دهیم و با چه میزان رنگ را ترجیح می‌دهیم؟

محاسبه اولویت‌ها و یک شاخص سازگاری- آیا مقایسه‌ها منطقی و سازگار بودند؟

ارزیابی گزینه‌های جایگزین با توجه به اولویت‌های مشخص‌شده، چه راه‌حل بهینه جایگزینی برای مشکل تصمیم‌گیری وجود دارد؟ گاهی اوقات گزینه‌های دیگر به‌طور ضمنی توسط مسأله تعریف شده‌اند و این روش فقط برای تعیین اولویت‌ها کافی است (۱۳).

نتایج و بحث

در این پژوهش پس از دست‌یابی به معیارهای ابتدایی با استفاده از مرور پیشینه، برای عملیاتی‌کردن آن در گام اول باید معیارها توسط خبرگان تأیید شوند. لذا در ابتدا و به‌صورت اجمالی معیارها توسط خبرگان تأیید شد و سپس این معیارها به گام دوم وارد شد. در گام بعد با استفاده از روش بیزین بهترین- بدترین اهمیت هر یک از معیارها و زیرمعیارها تعیین و رتبه‌بندی گردید. بر همین اساس با توجه به بررسی و مطالعه پژوهش‌های پیشین شاخص‌ها همانند آن‌چه در جدول (۱) و در جدول‌های بعدی نشان داده شد، شناسایی شدند. شاخص‌های

استخراج‌شده نهایی همگی پرتکرارترین شاخص‌ها در بررسی پیشینه پژوهش بودند. این شاخص‌ها به چهار بخش مجزا تقسیم‌شده‌اند.

سپس، با استفاده از نظرات یازده خبره و براساس نه طیف کیفی به‌صورت جدول (۲)، داده‌ها جهت چهار متغیر اصلی و زیر متغیرها به‌دست آمد.

در گام بعد مدل بیزین بهترین- بدترین را تشکیل داده و با حل این مدل اوزان معیارها محاسبه شد و با مقایسه اوزان به‌دست‌آمده، در گام بعد با استفاده از روش بیزین بهترین- بدترین اهمیت هر یک از معیارها و زیر معیارها تعیین و رتبه‌بندی شد. در نهایت بهترین و بدترین معیارها به‌دست‌آمده و نتایج این بررسی در جدول (۳) آورده شده است.

Table 1. Factors affecting groundwater

Row	The main criterion	Under the criteria	Symbol
1	Industry section	Cost of distribution of ground and surface water to industrial sector	I1
		Industrial water demand (surface water resources)	I2
		Industrial water demand (groundwater resources)	I3
		Water productivity index in industrial	I4
		Water value added in industrial	I5
2	Home section	Cost of distribution of surface and ground water to household sector	H1
		Household water demand (surface water resources)	H2
		Water demand (groundwater resources) household	H3
3	Agriculture section	Cost of distribution of surface and ground water to agricultural sector	A1
		Agricultural water demand (surface water resources)	A2
		Agricultural water demand (groundwater resources)	A3
		Surface water discharge in agriculture	A4
		Groundwater discharge in agriculture	A5
		Water productivity index in agriculture	A6
		Water value added in agriculture	A7
		Use of agricultural water for other purposes	A8
		Surface water consumption in agriculture	A9
		Agricultural sustainability index	A10
		Surface and ground water losses in agriculture	A11
		Water resources sustainability index	A12
		Reclaimed water from agriculture to groundwater	A13
		Renewable water in agriculture	A14
		Farmers' satisfaction with the use of municipal and industrial wastewater	A15
4	Public section	Available groundwater resources	P1
		Input groundwater flow rate	P2
		Groundwater flow rate output	P3

Table 2. The range of assessment

Verbal expressions	Equal importance	Very weak importance	Weak importance	The importance of preference	Good importance	Relatively good importance	Very good importance	Absolute importance	Complete importance
Value	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Table 3. The best and worst of the variables

The most important indicator		The least important indicator	
6.00	I4	4.13	I5
6.27	H3	3.00	H2
4.89	A5	2.63	A15
7.45	P1	4.12	P2

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که به‌ترتیب،شاخص‌های بهره‌وری آب در بخش صنعتی، نرخ تقاضای آب در بخش خانگی (از منابع زیرزمینی)، نرخ تخلیه آب‌های زیرزمینی در کشاورزی و منابع آب زیرزمینی موجود مهم‌ترین شاخص‌ها در این تحقیق بوده است. هم‌چنین، ارزش‌افزوده آب در بخش صنعتی، نرخ تقاضای آب در بخش خانگی (از منابع سطحی)، رضایت کشاورزان درباره استفاده از آب ضایعاتی شهری و صنعتی و نرخ جریان آب زیرزمینی ورودی کم اهمیت‌ترین معیارها بودند. در مرحله بعد میزان برتری بهترین معیار نسبت به معیارهای دیگر و میزان برتری همه معیارها نسبت به بدترین معیار به‌دست آمد و در جدول (٤) آورده شد. نتایج جدول (٤) بیان می‌کنند که میزان برتری بهترین معیار نسبت به معیارهای دیگر و میزان برتری همه معیارها نسبت به بدترین معیار چگونه است.

سپس وزن هرکدام از زیرمتغیرها محاسبه و نتایج آن در جدول (۵) آورده شد.

نتایج جدول (۵) بیان‌گر وزن هر یک از شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد. همان‌طوری‌که از نتایج این جدول قابل‌مشاهده می‌باشد، شاخص H3 (نرخ تقاضای آب در بخش خانگی (از منابع زیرزمینی) و A7 (ارزش‌افزوده آب در بخش کشاورزی) به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین اوزان را به‌خود اختصاص دادند. ازآنجایی‌که تقریباً ٦٥ درصد از نیازهای ایران به جریان آب قابل‌شرب از منابع زیرزمینی یعنی چاه‌ها، سیستم‌های آب قنات و چشمه‌های معدنی که در میزان هشداردهنده کاهش می‌یابد، وابسته است، لذا اهمیت متغیر نرخ تقاضای آب در بخش خانگی (از منابع زیرزمینی) بیش از پیش مشخص می‌گردد.

Table 4. The degree of superiority of the best criteria relative to the other criteria and the degree of superiority of all criteria relative to the worst

Variable	The superiority of the best criterion over other criteria	The superiority of all criteria over the worst	Variable	The superiority of the best criterion over other criteria	The superiority of all criteria over the worst
I1	2	8	A5	1	8
I2	6	4	A6	3	6
I3	3	7	A7	4	5
I4	1	9	A8	7	2
I5	9	1	A9	3	6
H1	7	2	A10	5	4
H2	8	1	A11	2	7
H3	1	8	A12	4	5
A1	5	4	A13	6	3
A2	3	6	A14	7	2
A3	4	5	A15	8	1
A4	2	7	P1	1	9

Table 5. Weight of sub-variables

Symbol	W	Symbol	W
I1	0.187	A6	0.065
I2	0.164	A7	0.006
I3	0.21	A8	0.078
I4	0.435	A9	0.012
I5	0.004	A10	0.025
H1	0.136	A11	0.101
H2	0.01	A12	0.078
H3	0.854	A13	0.019
A1	0.042	A14	0.024
A2	0.104	A15	0.001
A3	0.006	P1	0.718
A4	0.018	P2	0.094
A5	0.421	P3	0.188

براساس داده‌های وزارت آب، ۷۳٤۰۰۰ حلقه چاه (قانونی و غیرقانونی)، ۱۷۳ هزار و ۵۰۰ چشمه و ٤۱۰۰۰ قنات آب را برای بخش اصلی کشاورزی فراهم می‌کند. ساعت‌ساز نیز در مقاله خود از اهمیت این متغیر نام برده است (۲۸). از طرفی با توجه به استفاده سنتی از آب در بخش کشاورزی در ایران و با توجه به نوع فرهنگ کشاورزی ایران که کاملاً سنتی و دور از تکنولوژی‌های جدید است و با توجه به فرهنگ حاکم بر ایران می‌توان بیان کرد که ارزش افزوده آب در بخش کشاورزی به‌صورت مشخصی معرفی و شناخته‌شده نیست، بنابراین با توجه به زمان و هزینه ایجاد دانش و فرهنگ مربوط به آن، ارزش متغیر نیز پایین بوده است.

در شروع به‌کارگیری روش‌های چندمعیاره پیشنهادی، نمودار وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر یک از ریزمتغیرها، در روش BWM به‌صورت شکل (۳) می‌باشد.

در نهایت نرخ و شاخص سازگاری برای هرکدام از متغیرهای اصلی به‌دست آمد و در جدول (٦) آورده شد. این شاخص‌ها برای تعیین وزن‌های ورودی در روش‌های چندمعیاره این پژوهش مورداستفاده قرار گرفت.

با توجه به مفهوم تاب‌آوری در این پژوهش، هدف این پروژه اولویت‌بندی تصمیم براساس متغیرهای (٤) دسته عنوان شده است. در مرحله اول وزن هر یک از متغیرها را محاسبه کرده (در این پژوهش از بیزین بهترین- بدترین) و در جدول (۷) آورده شد. برای مقایسه روش پیشنهادشده این پژوهش، بیزین بهترین- بدترین، از روش AHP نیز با استفاده از داده‌ای حاصل از نظرات ۱۱ خبره، ماتریس زوجی تمامی متغیرهای اصلی براساس زیرمتغیرهای آن، حاصل شد و به بررسی نتایج پرداخته شد.

در مرحله نهایی، وزن دسته‌های اصلی با استفاده از ضرب ماتریسی، به‌دست‌آمده و در جدول (۸) آورده شد.

شکل (٤)، وزن دسته‌ها را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد.

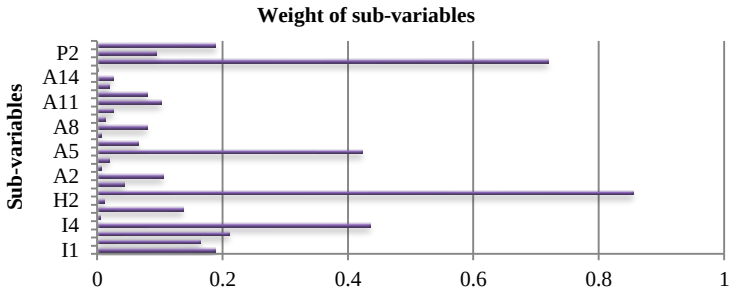

Figure 3. Weight of sub-variables

Table 6. Adjustment rate and index

Industry section	Compatibility index	5.23
	ℑ	0.474
	Compatibility rate	0.091
Home section	Compatibility index	4.47
	ℑ	0.428
	Compatibility rate	0.096
Agriculture section	Compatibility index	4.91
	ℑ	0.435
	Compatibility rate	0.093
Public section	Compatibility index	5.13
	ℑ	0.465
	Compatibility rate	0.095

Table 7. Weight of edges

Symbol	W	Symbol	W
I1	0.14	A6	0.045
I2	0.16	A7	0.003
I3	0.18	A8	0.056
I4	0.512	A9	0.008
I5	0.008	A10	0.011
H1	0.215	A11	0.17
H2	0.04	A12	0.025
H3	0.745	A13	0.045
A1	0.052	A14	0.061
A2	0.089	A15	0.002
A3	0.004	P1	0.683
A4	0.021	P2	0.071
A5	0.408	P3	0.246

Table 8. Weight of categories

Category	The weight of categories
Category 1	0.149
Category 2	0.076
Category 3	0.520
Category 4	0.255

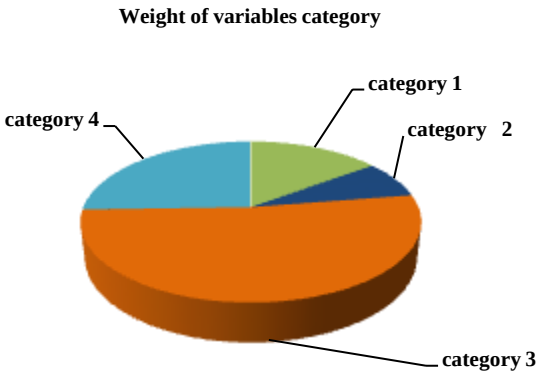

Figure 4. Comparison of the weight of variables category

ازآنجاکه مشاهدات آب‌وهوایی نشان می‌دهند که گرم‌شدن جهانی هوای کره زمین منجر به بارندگی‌های کم‌تر اما شدیدتر می‌شود، درک روشنی از چگونگی جایگزین‌شدن این منابع برای توسعه استراتژی‌هایی برای کاربرد آب‌های زیرزمینی که در حالتی بهتر و با تغییرپذیری بیش‌تر در بارش و تخلیه رودخانه با تغییر آب‌وهوا سازگار است، حیاتی است. لذا در این مقاله سعی شد تا با استفاده از روش بیزین بهترین- بدترین و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از روش AHP اولویت شاخص‌های تأثیرگذار بر تاب‌آوری منابع آب زیرزمینی در دشت مشهد، تعیین گردد. پس از حل مسأله از طریق روش بیزین بهترین-بدترین و تعیین وزن پارامترها و دسته آن‌ها، اولویت پارامترها برای تعیین تاب‌آوری دشت مشهد نسبت به کاهش منابع آب زیرزمینی، مشخص شد. این اولویت، در جدول (۹) آمده است.

نتایج نشان داد که مهم‌ترین فاکتورهای حاصل از این روش در تاب‌آوری منابع آب‌های زیرزمینی به‌ترتیب منابع آب زیرزمینی موجود، نرخ تخلیه آب‌های زیرزمینی در کشاورزی، میزان تلفات آب سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی، شاخص بهره‌وری آب در بخش صنعتی و نرخ جریان آب زیرزمینی خروجی، می‌باشد.

Table 9. Priority of the variables derived from the bayesian best-worst method

Priority	Variable	Final weight	Priority	Variable	Final weight
1	P1	0.20104	14	P2	0.02632
2	A5	0.18103	15	A1	0.01806
3	A11	0.10248	16	H1	0.01632
4	I4	0.07395	17	A10	0.01075
5	P3	0.05264	18	A14	0.01032
6	A2	0.04472	19	A13	0.00817
7	H3	0.04343	20	A4	0.00774
8	I3	0.0357	21	A9	0.00516
9	A8	0.03354	22	A3	0.00258
10	A12	0.03354	23	A7	0.00258
11	I1	0.03179	24	H2	0.0012
12	A6	0.02795	25	I5	0.00068
13	I2	0.02788	26	A15	0.00043

در دشت مشهد، آب‌های زیرزمینی، ٥٤/٣٦ درصد آب کشاورزی و حدود ٤١/٦٩ درصد آب آشامیدنی را تأمین می‌کنند. در این منطقه از سال ٨٢ تا ٩٠ ، سطح آب به اندازه ٦/٥ متر کاهش یافته است (این آمار در سال ٩٥، ٧٠ الی ٧٥ سانتی‌متر بوده است). این آمار نشان می‌دهد که میزان برداشت آب در دشت مشهد ١٥ درصد بیش‌تر از پتانسیل آبی است، بدین معنی که عمر دشت مشهد با سرعت ١٥ درصدی در حال کم‌شدن است (پایگاه اینترنتی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی). از طرفی دولت برای فعالیت‌های کشاورزی در این دشت یارانه در نظر گرفته است. اما کم‌بودن دستمزد کارگران برای استفاده از آب‌های زیرزمینی، آن‌ها را مجبور نموده تا بدون توجه به حفاظت از منابع آب‌های زیرزمینی، تعداد چاه‌ها (در دشت مشهد تعداد چاه‌های غیرمجاز عمیق ١٦٥ و چاه‌های نیمه‌عمیق غیرمجاز ٢٦٨٠ حلقه چاه است) را افزایش دهند. در نتیجه سطح آب‌های زیرزمینی در طی دهه‌های اخیر به‌طور مستمر کاهش یافته و زندگی سفره‌های آب زیرزمینی در این منطقه را به خطر انداخته است. براساس مطالعات صورت‌گرفته در برنامه آمایش استان خراسان رضوی متوسط آب تجدیدشونده آبخوان مشهد حدود ٥٣٠ میلیون مترمکعب برآورد شده است. شکل (٥) میزان برداشت از آبخوان را در مقایسه با متوسط آب تجدیدشونده زیرزمینی دشت مشهد نشان می‌دهد.

براساس این نمودار بهره‌برداری از آبخوان در حدود سال ١٣٥٠ از مقدار آب تجدیدشونده زیرزمینی تجاوز کرده و بهره‌برداری سالانه از منابع غیرتجدیدشونده در حدود سال ١٣٦٢ به حداکثر رسیده است. در این زمان حجم برداشت از آبخوان دشت مشهد دو برابر حجم منابع آب تجدیدشونده سالانه آبخوان است. یعنی علاوه بر ٥٣٠ میلیون مترمکعب آب تجدیدشونده زیرزمینی، حدود ٥٣٠ میلیون مترمکعب آب غیرتجدیدشونده زیرزمینی نیز برداشت شده است. اما این برداشت حداکثری دوام کوتاهی داشته و بعد از گذر از اواسط دهه ٦٠ شمسی، میزان تخلیه روندی کاهشی را نشان داده و با توجه به نیاز مصرفی در سال‌های اخیر و به‌دنبال آن افزایش عمق چاه‌های بهره‌برداری‌شده از طریق کف‌شکنی، تخلیه از آبخوان دشت مشهد در حدود ٨٧٠ میلیون مترمکعب ثابت مانده است، که حدود ٣٤٠ میلیون مترمکعب آن از منابع آب غیر تجدیدشونده است. شکل (٦) تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت مشهد را نشان می‌دهد.

همان‌طورکه در شکل (٦) نشان داده شده است، روند کاهشی سطح آب‌های زیرزمینی در پنج ساله منتهی به ٩٠-٨٩ (٢٠١٠-٢٠١١) شدت بیش‌تری داشته و دشت مشهد را در بحرانی‌ترین وضعیت خود در سال‌های گذشته، قرار داده است. با توجه به این مطلب و تعیین ترتیب اولویت‌های متغیرهای حاصل‌شده، باید

استراتژی‌های مناسب مدیریت منابع زیرزمینی و ارتقای سطح آن، مانند زه‌کشی مناسب زمین‌ها، مدیریت حفر چاه براساس مقادیر و مکان ذخیره، ازبین‌بردن چاه‌های غیرمجاز، پیاده‌سازی سیستم‌های جدید کشاورزی و آبیاری زمین در منطقه و دیگر استراتژی‌های مرتبط با این متغیرها، به‌ترتیب اولویت، موردتوجه قرار گیرد. نتایج حاصل از روش AHP نیز در جدول (۱۰) آمده است.

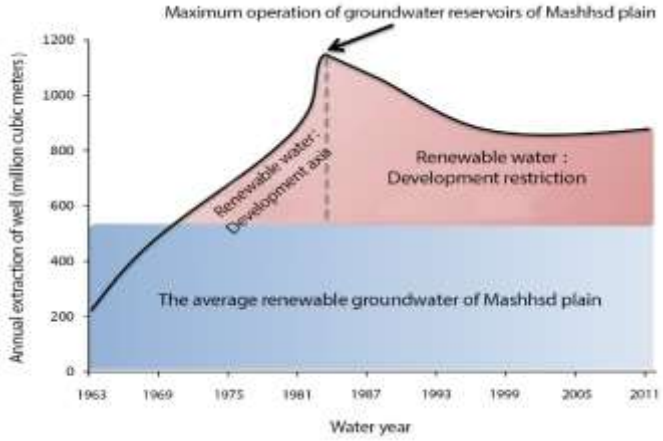

Figure 5. The process of exploiting the aquifer of Mashhad plain from the past to 1390 (Khorasan Razavi province planning, (2015)

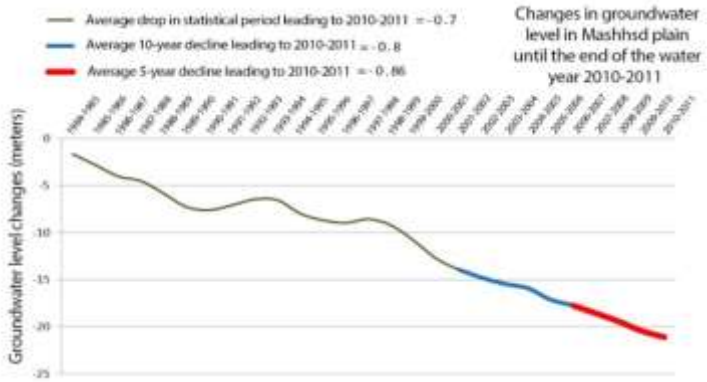

Figure 6. Changes in the groundwater level of Mashhad plain until the end of the 90th water year (Khorasan Razavi Province, 2015)

Table 10. Priority of the variables derived from the AHP method

Priority	Variable	Final weight	Priority	Variable	Final weight
1	A5	0.21216	14	A13	0.0234
2	P1	0.174165	15	I1	0.02086
3	A11	0.0884	16	P2	0.018105
4	I4	0.076288	17	H1	0.01634
5	P3	0.06273	18	A12	0.013
6	H3	0.05662	19	A4	0.01092
7	A2	0.04628	20	A10	0.00572
8	A14	0.03172	21	A9	0.00416
9	A8	0.02912	22	H2	0.00304
10	A1	0.02704	23	A3	0.00208
11	I3	0.02682	24	A7	0.00156
12	I2	0.02384	25	I5	0.001192
13	A6	0.0234	26	A15	0.00104

با مقایسه این دو روش، مشخص می‌گردد که این پنج متغیر در هر دو روش بالاترین اولویت‌ها را دارند با این تفاوت که در روش بیزین بهترین- بدترین، به‌ترتیب نرخ تخلیه آب‌های زیرزمینی در کشاورزی، منابع آب زیرزمینی موجود، اولویت بالاتری را دارند، اما در روش AHP برعکس، یعنی اولویت منابع آب زیرزمینی موجود بالاتر از نرخ تخلیه آب‌های زیرزمینی در کشاورزی، می‌باشد. دلیل این امر هم این است که روش بیزین بهترین- بدترین روابط میان معیارها را در نظر می‌گیرد، اما روش AHP تنها به‌صورت سلسله‌مراتبی انجام می‌پذیرد و اگر رابطه‌ای نیز میان متغیرهای بالا و پایین وجود داشته باشد، آن را نادیده می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

ازآنجاکه پایش‌های آب‌وهوایی نشان می‌دهند که گرم‌شدن جهانی هوای کره زمین منجر به بارندگی‌های کم‌تر اما شدیدتر می‌شود، درک روشنی از چگونگی جایگزین‌شدن این منابع برای توسعه استراتژی‌هایی برای کاربرد آب‌های زیرزمینی که در حالتی بهتر و با تغییرپذیری بیش‌تر در بارش و تخلیه رودخانه با تغییر آب‌وهوا سازگار است، حیاتی است. لذا در این پژوهش سعی شد تا با استفاده از روش بیزین بهترین- بدترین و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از روش AHP اولویت شاخص‌های تأثیرگذار بر تاب‌آوری منابع آب زیرزمینی در دشت مشهد، تعیین گردد. به‌طورکلی، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش که بخش عمده شاخص‌های اثرگذار آن در بخش کشاورزی است پیشنهاد می‌شود که سیاست‌هایی برای صرفه‌جویی و ذخیره منابع آب در فصول پر آب و رفع نیازهای موجود در فصول کم‌آب در محدوده مطالعاتی دشت مشهد مورداستفاده قرار گیرد. هم‌چنین محصولاتی با صرفه اقتصادی بالاتر و نیاز آبی کم‌تر و بهره‌وری اقتصادی بیش‌تر تولید شود و با توجه به افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی استفاده از روش‌های نوین آبیاری همراه با اعمال سیاست‌های کاهش منابع آب در دسترس پیشنهاد می‌گردد. به‌طورکلی و با توجه به اولویت‌های متغیرها که به‌صورت ذیل است، می‌توان راه‌کارهای زیر را برای کاهش خروجی و تخلیه از منابع آب زیرزمینی را ارائه کرد.

متغیر نرخ تخلیه آب‌های زیرزمینی در کشاورزی

راهکار: جلوگیری از برداشت‌های بی‌رویه آب از طریق مدیریت حفر چاه و برخورد با خاطیان این موضوع و ...

متغیر منابع آب زیرزمینی موجود کشاورزی

راهکار: تغییر الگوی کشت و روی آوردن به کشت محصولات کم‌آب بر و مدیریت در مصرف آب با اجرای روش‌های نوین آبیاری و ... .

متغیر میزان تلفات آب سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی

راهکار: اجرای روش‌های نوین آبیاری و زهکشی مناسب زمین‌ها و ... .

شاخص بهره‌وری آب در بخش صنعتی.

راهکار: ممیزی آب، استفاده از آب اصلاح شده، مفهوم تجارت آب مجازی، بازیافت و استفاده مجدد آب در واحد [۵] و ... .

نرخ جریان آب زیرزمینی خروجی کشاورزی.

راهکار: ترویج کشت‌های گلخانه‌ای در مناطق بحرانی، مدیریت حفر چاه و ... .

پی‌نوشت‌ها

1. Analytical Hierarchy Process (AHP)
2. Best Worst Method (BWM)

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان "الگوسازی تاب‌آوری دشت مشهد نسبت به کاهش منابع آب زیرزمینی" به سفارش شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی می‌باشد. از همکاری ریاست محترم و معاونین گرامی این سازمان، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

۱. آل محمد.، س. ملک محمدی، ب. یاوری، ا. ر. و یزدان پناه، م. (۱۳۹۵). تحلیلی بر تاب‌آوری منابع آب در فرایند حکمرانی سرزمین فلات ایران. راهبرد. ۸۱ (٤): ۱٤٥-۱۷٦.

۲. باریکانی، ا.، احمدیان، م. و خلیلیان، ص. (۱۳۹۰). بهره‌برداری بهینه پایدار از منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی: مطالعه موردی زیربخش زراعت دشت قزوین. اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۲): ۲۵۳-۲٦۲.

۳. درخشان، ه.، داوری، ک. هاشمی‌نیا، م. و ضیائی، ع.ن. (۱۳۹٦). حداکثر خشکسالی محتمل مبنایی برای تخمین و حفظ ذخایر استراتژیک آب زیرزمینی. آب و توسعه پایدار. ٤ (۲): ۱۳۰-۱۲۱.

٤. غفوری خرانق، س.، بنی حبیب، م. ا. و جوادی، س. (۱۳۹۸). ارزیابی سناریوهای حکمرانی آب زیرزمینی. مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۲): ۳۰٥-۳۱۹.

٥. فرزانه، م. ر.، باقری، ع. و مومنی، ف. (۱۳۹۸). نقد رویکرد حاکم بر طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی و پیشنهاد راهکار جایگزین جهت پیاده سازی در محدوده‌ی مطالعاتی رفسنجان. پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۲٦ (۱): ۱٦۹-۱۸٥.

٦. مسعودیان، م.، و داوودی نژاد، م. (۱۳۹۳). روش‌ها و مدل‌های کاهش مصرف آب در بخش صنعت. دومین همایش ملی بازیافت آب راهبردی اصولی برای بحران آب. دفتر طرح کلان ملی دانش وفناوری بازیافت پساب‌های شهری صنعتی و کشاورزی دانشگاه تهران. تهران- ایران.

۷. مهر آذر، آ.، مساح بوانی، ع.ر. مشعل، م. و رحیمی خوب، ح. (۱۳۹٥). مدل سازی یکپارچه سیستم‌های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی دشت هشتگرد با رویکرد دینامیک سیستم‌ها. مدیریت آب و آبیاری. ٦ (۲): ۲٦۳-۲۷۹.

۸. مولوی، ح.، لیاقت، ع.م. و نظری، ب. (۱۳۹٥). ارزیابی سیاست‌های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم‌آبیاری با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم (مطالعه موردی: حوضه‌ی آبریز ارس). مدیریت آب و آبیاری. ٦ (۲): ۲۱۷-۲۳٦.

9. Boysen, F. (2002). An overview and evaluation of composite indices of development. *Journal of Social Indicators Research*. 59: 115-151.
10. Cuthbert, M. O., Taylor, R. G., Favreau, G., Todd, M. C., Shamsudduha, M., Villholth, K. G. & Lawson, F. M. (2019). Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa. *Nature*. 572 (7768): 230-234.
11. Fuchs, E. H., Carroll, K. C., & King, J. P. (2018). Quantifying groundwater resilience through conjunctive use for irrigated agriculture in a constrained aquifer system. *Journal of hydrology*. 565: 747-759.
12. Hashimoto, t., Stedinger, J.R. & Loucks, D.P. (1982). Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation. *Water Resources Research*. 10(1): 14-20.
13. Hund, S. V., Allen, D. M., Morillas, L., & Johnson, M. S. (2018). Groundwater recharge indicator as tool for decision makers to increase socio-hydrological resilience to seasonal drought. *Journal of Hydrology*. 563 (5): 1119-1134.
14. Derakhshan, H., Davari, k. Hasheminia, S.M. & Naghi A. (2018). Protecting strategic growndwater reserves is essential for sustainable development. Second Conference on Non-Agent Defense and Sustainable Development. Bejing, China.

15. Intharathirat, R., & Salam, P. A. (2020). Analytical Hierarchy Process-Based Decision Making for Sustainable MSW Management Systems in Small and Medium Cities. In *Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies*. Springer, Singapore.
16. Izady A., Davary K., Alizadeh A., MoghaddamNia, A., Ziaei A.N. and Hasheminia, S.M. (2013). Application of NN-ARX model to predict groundwater levels in the Neishaboor Plain, Iran. *Water Resources Management*. 27(14): 4773–4794.
17. Kotir, J. H., Smith, K. Brown, G. Marshall, N. & Johanstone. R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *Science of the Total Environment*. 573: 444-457.
18. Li., R. & Merchant, J.W. (2013). Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: A case study in North Dakota, USA. *Science of the Total Environment* 447: 32-45.
19. Loucks, D.P. (1997). Quantifying Trends in System Sustainability. *Hydrological Science Journal*. 42(4): 513-530.
20. MacDonald, A. M., Bell, R. A., Kebede, S., Azagegn, T., Yehualaeshet, T., Pichon, F. & Calow, R. C. (2019). Groundwater and resilience to drought in the Ethiopian Highlands. *Environmental Research Letter*s. 14(9): 1-9.
21. Madani, K. (2010). Towards Sustainable Watershed Management: Using System Dynamics for Integrated Water Resource Planning VDM Publishing.
22. Madani, k. (2016). Editorial. "Water Crisis in Iran: A Desperate Call for Action". Tehran Times. May7 http://www.tehrantimes.com/news/301198/Water-crisis-in-Iran-A-desperate-call-for-action.
23. Mohammadi, M., & Rezaei, J. (2019). Bayesian best-worst method: A probabilistic group decision making model. *Omega*. 96 (10):1-9.
24. Nadiri, A. A., Gharekhani, M., Khatibi, R., Sadeghfam, S., & Moghaddam, A. A. (2017). Groundwater vulnerability indices conditioned by supervised intelligence committee machine (SICM). *Science of the Total Environment*. *574*: 691-706.
25. Parsons, M., & Thoms, M. C. (2017). From academic to applied: Operationalising resilience in river systems. *Geomorphology*. 305(3): 242-251.
26. Roach, T., Kapelan, Z. & Ledbetter, R. (2018). Resilience-based performance metrics for water resources management under uncertainty. *Advances in Water Resources*. 116: 18-28.
27. Samani., N. (2017). Management of Surface and Groundwater Relationship to Adapt to Water Crisis, Analytical Modeling, First Conference on Shiraz Ecological Resilience, Shiraz, Shiraz Municipality. Davos, Switzerland.
28. UNESCO-WWAP. (2012). Managing water under un- certainty and risk. The United Nations World Water Development report (WWDR). Part of the UN World Water Assessment Program me (WWAP), UNESCO. Paris.
29. Vrba., J. & Verhagen, B. (2011). Groundwater for Emergency Situations A Methodological Guide. IHP-VII Series on Groundwater. *International Hydrological Programme Division of Water Sciences.* (3): 1-317.