



رتبه‌بندی راهبردهای مدیریت مصرف آب در شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP): (مطالعه موردی: شهر تهران)

مسعود تابش^{۱*}، احسان علی‌باریانی^۱، سید ساجد متولیان^۱، عباس روزبهانی^۲، سهیلا بیگی^۱

^۱ دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱ مهر ۱۳۹۲

بازنگری: ۱۰ اسفند ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۹ فروردین ۱۳۹۴

ارائه آنلاین: ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

مدیریت مصرف آب
روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه
نظریات کارشناسان
کاهش آب بدون درآمد
تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

چکیده: کاهش چشمگیر منابع آب تجدیدپذیر و محدودیت‌های موجود در توسعه منابع آب جدید، سبب شده است تا تمرکز رویکردهای مدیریتی در اکثر نقاط دنیا به میزان قابل توجهی از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضا تغییر کند. راهبردهای مدیریت مصرف آب به مجموعه‌ای از راهبردها گفته می‌شود که با هدف کاهش مصرف آب و برقراری یک تعادل منطقی و پایدار بین عرضه و تقاضای آب طراحی و اجرا می‌شوند. در این مقاله، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، الگویی برای انتخاب مناسب‌ترین راهبرد مدیریت مصرف آب در شبکه‌های توزیع آب شهری ارائه شده است. همچنین به منظور آزمون کارایی الگوی بالا، در قالب یک مطالعه موردی برای شهر تهران و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) و بهره‌گیری از نظریات کارشناسان و متخصصین صنعت آب و فاضلاب، راهبردهای مختلف مدیریت مصرف آب رتبه‌بندی شده‌اند. راهبردهای انتخاب‌شده در این تحقیق عبارتند از فرهنگ‌سازی در بین مصرف‌کنندگان (اجرای برنامه‌های آموزشی و تبلیغاتی)، کاهش آب بدون درآمد، افزایش آب‌بها و استفاده از ابزارآلات کاهنده مصرف. در این تحقیق، از معیارهایی مانند هزینه، زمان، رضایت مشترکین، میزان آب به حساب نیامده و تأثیر اجرای طرح در کاهش مصرف آب، برای وزن‌دهی و تعیین امتیاز راهبردها استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیر عدم قطعیت‌های موجود در مدل بر پاسخ نهایی، بر روی اوزان نظریات تصمیم‌گیرندگان و شکل اعداد فازی مورد استفاده، تحلیل حساسیت صورت گرفته است. در نهایت راهبرد کاهش آب بدون درآمد به عنوان مناسب‌ترین راهبرد از دیدگاه تصمیم‌گیرندگان شناخته شد. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهند که در شرایط عدم دسترسی به داده‌های کمی کافی و بالا بودن عدم قطعیت‌های فازی، روش ارائه‌شده می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری کارا مورد استفاده مدیران آب شهری قرار گیرد.

۱- مقدمه

و اجرا می‌شوند، راهبردهای مدیریت مصرف آب نامیده می‌شوند. در این راهبردها، تلاش بر این است که با استفاده از تجهیزات کاهنده مصرف، افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان، بکارگیری ابزارهای قانونی و تعرفه‌ای و همچنین رویکردهای مدیریتی بهینه، آب را از یک کالای مصرفی به یک کالای ارزشی تبدیل نمایند. روش‌های مختلفی برای مدیریت مصرف آب به صورت مجزا و یا ترکیبی از سوی مدیران شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها عبارتند از: مدیریت و کاهش آب بحساب‌نیامده، استفاده از لوازم و شیرآلات کاهنده مصرف، فرهنگ‌سازی مصرف‌کنندگان (از طریق اجرای برنامه‌های آموزشی و تبلیغاتی) و افزایش آب‌بها. بدیهی است هر یک از روش‌های فوق در صورتی که بسترسازی مناسبی انجام شده باشد، می‌تواند تا حدودی در کاهش مصرف مؤثر باشد. اما هزینه‌ها، زمان اجرا، میزان اثرگذاری و فرآیند تأثیر هر یک متفاوت خواهد بود. تاکنون شرکت‌های آب و فاضلاب در سطح کشور برای کاهش مصرف آب راهکارهای مختلفی را با توجه به تجربیات خود انتخاب می‌نمودند

بهره‌برداری بهینه و مدیریت صحیح منابع آب امری حیاتی است که امروزه بر اثر نبود آب آشامیدنی کافی در تمامی نقاط دنیا (به خصوص در نواحی خشک و کم‌بارش) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر با توجه به رشد روزافزون جمعیت، الگوهای نادرست مصرف آب جامعه به دلیل سهولت دسترسی به آب آشامیدنی، افزایش تجهیزات آبر و عوامل گسترده دیگر، مصرف آب با افزایش چشمگیری روبه‌رو بوده است. مقدار آب مصرفی جوامع بشری در چند دهه اخیر، ۶ بار ۲ برابر (یعنی در کل ۶۴ برابر) شده است. با توجه به کاهش محسوس منابع آب تجدیدپذیر و محدودیت‌های موجود در توسعه منابع آب جدید در اکثر نقاط دنیا، تمرکز رویکردهای مدیریتی به میزان قابل توجهی از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضا تغییر نموده است. مجموعه‌ای از راهبردها که با هدف کاهش مصرف آب و برقراری یک تعادل منطقی و پایدار بین عرضه و تقاضای آب طراحی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mtbash@ut.ac.ir

رتبه‌بندی راهبردهای مدیریت نشت شبکه‌های توزیع آب شهری در کشور برزبل استفاده شد. در این پژوهش، با بکارگیری یک مدل تصمیم‌گیری گروهی بر اساس نظرات ۴ گروه تصمیم‌گیرنده، ۶ راهبرد کاهش نشت بر اساس ۷ معیار تصمیم‌گیری (مانند هزینه، تأثیر در میزان تولید فاضلاب، منافع زیست‌محیطی، مقبولیت اجتماعی و غیره) اولویت‌بندی شدند. از جمله راهبردهای کاهش نشت مورد استفاده می‌توان به تعویض کنتورهای فرسوده، افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان، نصب تجهیزات کنترل فشار و نوسازی اجزای شبکه اشاره نمود [۶]. روش تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی^۵ (AHP) برای ارزیابی و رتبه‌بندی راهکارهای کنترل نشت آب در کشور اسپانیا بکار برده شده است. در این پژوهش که صرفاً از نظرهای تصمیم‌گیرندگان در سطح مدیریتی استفاده شده است، دو دسته راهکارهای فعال (بازرسی کامل شبکه و تعمیر تمامی نشت‌ها اعم از گزارش شده و گزارش نشده) و انفعالی (صرفاً تعمیر نشت‌های گزارش شده)، کنترل نشت شبکه توزیع آب بر اساس معیارهایی مانند هزینه‌های برنامه‌ریزی و اجراء خسارت به اجزای شبکه، اختلال در تأمین آب و ایجاد محدودیت‌های عبور و مروری با یکدیگر مقایسه شدند و در نهایت، نشان داده شد که راهکارهای فعال گزینه مناسب‌تری هستند [۷].

بررسی سوابق مطالعاتی نشان می‌دهد که نخست در زمینه اولویت‌بندی راهبردهای مدیریت مصرف آب در کشور، تعداد مطالعات صورت گرفته بسیار محدود بوده است. در وهله دوم، روش‌های تصمیم‌گیری فازی در مطالعات قبلی با هدف مدیریت مصرف آب آشامیدنی کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در تحقیق حاضر، از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای اولویت‌بندی راهبردهای مدیریت مصرف آب در قالب یک مدل تصمیم‌گیری گروهی استفاده شده است. از جمله دلایل انتخاب این روش می‌توان به قابلیت فرموله کردن اجزای مسئله (هدف، معیار، گزینه و تصمیم‌گیرنده) در یک ساختار سلسله‌مراتبی قابل فهم، توانایی مدل فازی در لحاظ کردن اثر عدم صراحت‌های موجود در ارزیابی‌های کیفی (غیرکمی) تصمیم‌گیرندگان، کاربردی بودن این روش در مسائلی که اطلاعات کافی در دسترس نیست و نقش و تجربه خبرگان بسیار مهم است و همچنین کاربرد موفق این روش در حل مسائل برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب اشاره نمود. در ادامه، کاربرد این روش در قالب یک مطالعه موردی برای شهر تهران نشان داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی^۶ (FAHP)

در روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوطه خود در سطح بالاتر، به صورت زوجی با استفاده از مقیاس ارائه شده در جدول ۱ مقایسه شده و وزن آن‌ها محاسبه می‌شود. نتیجه این مقایسه‌ها، تعدادی ماتریس است که به آن‌ها ماتریس مقایسات زوجی^۷ گفته می‌شود.

مطالعاتی خاصی و در راستای مدیریت مصرف آب صورت نمی‌گرفت. بنابراین، با وجود کاهش مصرف آب پس از اجرای آن طرح‌ها، هیچ‌گونه اطمینانی از بهینه‌بودن این طرح‌ها و صرفه اقتصادی آن‌ها وجود نداشت. به عنوان مثال، بر اساس گزارش ارائه شده توسط شرکت آب و فاضلاب تهران تنها در سال ۲۰۰۹ بیش از ۵۰ میلیارد ریال برای کاهش مصرف آب در بخش گسترش فرهنگ مصرف صحیح آب در شهر تهران هزینه شده که بر اساس همین گزارش، بازدهی اجرای این طرح بسیار کمتر از میزان هزینه شده است. در صورتی که اجرای این طرح‌ها پس از مطالعات کارشناسی صورت گیرد، می‌توان با صرف کمترین هزینه، بهترین نتیجه ممکن را حاصل کرد [۱]. همچنین تاکنون در بخش‌های مربوط به مدیریت و کاهش آب بحساب‌نیامده و یا استفاده از تجهیزات کاهش مصرف به فراخور بودجه‌های تخصیص داده شده، فعالیت‌هایی در سطح شرکت‌های آب و فاضلاب انجام شده است. اما به دلیل مستمر نبودن این عملیات و عدم استمرار بودجه تخصیص یافته مطابق با یک برنامه زمان‌بندی، اثرهای پایداری از این فعالیت‌ها بجای نمانده است. از طرفی دیگر، در راستای طرح هدفمندسازی یارانه‌ها برای افزایش آب‌بهای مصرفی نیز اقداماتی صورت گرفت. اما با توجه به شرایط اقتصادی خاصی که کشور در سال‌های اخیر تجربه نمود، پیاده‌سازی کامل این طرح با دشواری‌هایی مواجه شد و به نظر می‌رسد که هنوز آن میزان اثربخشی در کاهش مصرف آب که انتظار آن می‌رفت تا با اجرای این طرح بدست آید، محقق نشده است. در هر صورت، برای مدیریت بهینه سامانه و کاهش هرچه بیشتر مصرف آب با در نظر گرفتن هزینه‌های هر فعالیت، لازم است تا اولویت هر کدام از راهکارها با روش‌های علمی و با توجه به هزینه‌های کارآیی، سریع‌تر بررسی شوند. بنابراین، به منظور جلوگیری از اتلاف هزینه و استفاده بهینه از منابع مالی، ضروری است تا با بهره‌گیری از یک رویکرد جامع و نظام‌مند، راهبردهای مختلفی که به منظور کاهش مصرف آب در شبکه‌های توزیع آب شهری قابل استفاده هستند، شناسایی شده و مزایا و معایب آن‌ها مقایسه شود. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ (MCDM) دسته‌ای از ابزارهای تحلیل مدلی هستند که برای یافتن جواب‌های بهینه در حل مسائل بسیاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دسته‌ای از این روش‌ها که به منظور انتخاب یک گزینه برتر از بین چند گزینه بکار می‌رود، روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه^۲ (MADM) نام دارند که در حل مسائل مدیریت منابع آب و محیط‌زیست بکار رفته‌اند.

در یک تحقیق، گزینه‌های مختلف تأمین آب شهری برای شهر زاهدان با استفاده از روش برنامه‌ریزی سازشی^۳ (CP) رتبه‌بندی شد. در آن پژوهش، با در نظر گرفتن ۵ هدف کلی اقتصادی، اجتماعی، سلامت عمومی، فنی و پایداری، ۹ معیار برای رتبه‌بندی ۸ گزینه مختلف تعریف و ارائه شد [۵]. در تحقیقی دیگر، از روش تصمیم‌گیری روش پرومته^۴ به منظور

¹ Multiple Criteria Decision Making

² Multiple Attribute Decision Making

³ Compromise Programming

⁴ Promethee

⁵ Analytic Hierarchy Process

⁶ Fuzzy Analytic Hierarchy Process

⁷ Pairwise Comparison Matrix

جدول ۱: مقیاس مورد استفاده برای انجام مقایسات زوجی [۸]

Table 1. Used scale to make pairwise comparisons

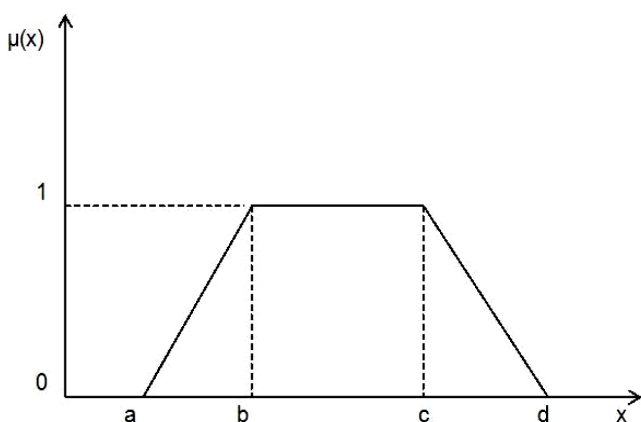
مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	Extremely Preferred کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر و یا کاملاً مطلوب‌تر
۷	Very/Strongly Preferred ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی
۵	Strongly Preferred ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی
۳	Moderately Preferred کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر
۱	Equally Preferred ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان
۲، ۴، ۶ و ۸	— ترجیحات بین فواصل فوق

این روش می‌توان به سهولت در اجرا، قابلیت کار با انواع توابع عضویت فازی (مثلثی، دوزنقه‌ای و غیره) و امکان کنترل نرخ ناسازگاری اشاره نمود. در این روش، شخص تصمیم‌گیرنده قادر است تا مقایسات زوجی اجزای هر سطح از ساختار سلسله‌مراتبی را در قالب اعداد فازی دوزنقه‌ای بیان نماید [۹]. برای نمونه، تابع عضویت عدد فازی دوزنقه‌ای (a, b, c, d) به صورت شکل ۱ نشان داده می‌شود.

مراحل گام‌به‌گام اجرای روش بوکلی به شرح زیر است [۹]:
ماتریس مقایسه زوجی زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

میانگین هندسی هر یک از سطرهای ماتریس (Z_i) در روش بوکلی به صورت زیر محاسبه می‌شود:



شکل ۱: تابع عضویت عدد فازی دوزنقه‌ای در روش بوکلی [۹]

Fig. 1. Membership function of trapezoidal fuzzy number in Buckley method

با توجه به این که قضاوت‌های انسانی کاملاً سازگار نیستند، برای اطلاع از میزان اعتبار قضاوت‌های صورت‌گرفته باید نرخ ناسازگاری نظرها محاسبه شوند تا در صورتی که میزان ناسازگاری از حد مجاز بیشتر باشد، در قضاوت‌ها تجدید نظر صورت گیرد. برای محاسبه نرخ ناسازگاری هر ماتریس مقایسه زوجی باید مراحل زیر طی شود [۸]:

الف) تشکیل ماتریس مقایسه زوجی (A)

ب) محاسبه بردار وزن ماتریس (W)

پ) تعیین بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس (λ_{max}) از رابطه (۱)

$$AW = \lambda_{max} * W \quad (۱)$$

ت) محاسبه مقدار شاخص ناسازگاری $(I.I.)$ از رابطه (۲)

$$I.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (۲)$$

که در آن، n بعد ماتریس است.

ث) محاسبه نرخ ناسازگاری $(I.R.)$ از رابطه (۳)

$$I.R. = \frac{I.I.}{I.I.R.} \quad (۳)$$

که در آن، $I.I.R.$ شاخص ناسازگاری ماتریس‌های تصادفی^۱ است که برای $n=1, 2, \dots, 10$ به ترتیب برابر با صفر، صفر، $0/58$ ، $0/9$ ، $0/12$ ، $0/24$ ، $0/32$ ، $0/41$ ، $0/45$ و $0/45$ است. بر اساس پیشنهاد ساعتی، مقدار نرخ ناسازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی باید کوچک‌تر و یا مساوی $0/1$ باشد [۸].

روش تحلیل سلسله‌مراتبی، روشی سنتی است. در این روش برای مقایسه زوجی گزینه‌ها، از اعداد فازی و برای بدست‌آوردن وزن‌ها و ارجحیت، از روش میانگین هندسی استفاده می‌شود. نوع فازی روش تحلیل سلسله‌مراتبی توسط اشخاص مختلفی توسعه داده شده که از بین روش‌های موجود، روش بوکلی^۴ [۹] برای استفاده در تحقیق حاضر انتخاب شده است. از جمله مزایای

¹ Inconsistency Index

² Inconsistency Ratio

³ Inconsistency Index of Random Matrix (I.I.R.)

⁴ J. J. Buckley

۳- مدل مورد استفاده برای رتبه‌بندی راهکارهای مدیریت مصرف آب

مدل سلسله مراتبی مورد استفاده برای رتبه‌بندی راهکارهای مدیریت مصرف آب در شکل ۲ نشان داده شده است. برای انتخاب معیارهای تصمیم‌گیری، در ابتدا یک لیست اولیه از معیارها بر اساس سوابق مطالعاتی موجود تهیه شده و پس از ارائه معیارها به تصمیم‌گیرندگان و کارشناسان و دریافت بازخورد از آن‌ها، معیارهای غیرمرتبط و غیرضروری حذف شده‌اند تا ۵ معیار نهایی هزینه اجرای طرح، مدت زمان لازم برای اجرای طرح، میزان رضایت مشترکین، میزان تأثیر اجرای طرح در کاهش مصرف و میزان آب بحساب‌نیامده بمانند. همچنین برای انتخاب راهکارها نیز به شیوه مشابهی عمل شده و با غربال‌گری یک‌سری از راهکارهای عملی، راهکارهای مؤثرتر انتخاب شده‌اند.

۴- مطالعه موردی

روش ارائه‌شده در این تحقیق برای اولویت‌بندی راهکارهای کاهش مصرف آب در شهر تهران مورد استفاده قرار گرفت. تهران پایتخت کشور جمهوری اسلامی ایران، مرکز استان تهران و مرکز شهرستان تهران است. شهر تهران با مساحتی در حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع در شمال ایران، به فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب دریای خزر و در کوهپایه‌های جنوبی رشته کوه البرز در حد فاصل طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی واقع شده است. طبق سرشماری نفوس و مسکن انجام‌شده در سال ۲۰۱۱، جمعیت این شهر ۸۲۴۴۵۹۰ نفر بوده است [۲]. در جدول ۲،

$$Z_i = [\prod_{j=1}^n a_{ij}]^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

حال وزن المان i ام ماتریس مقایسه زوجی (W_i) در روش بوکلی از رابطه زیر بدست می‌آید:

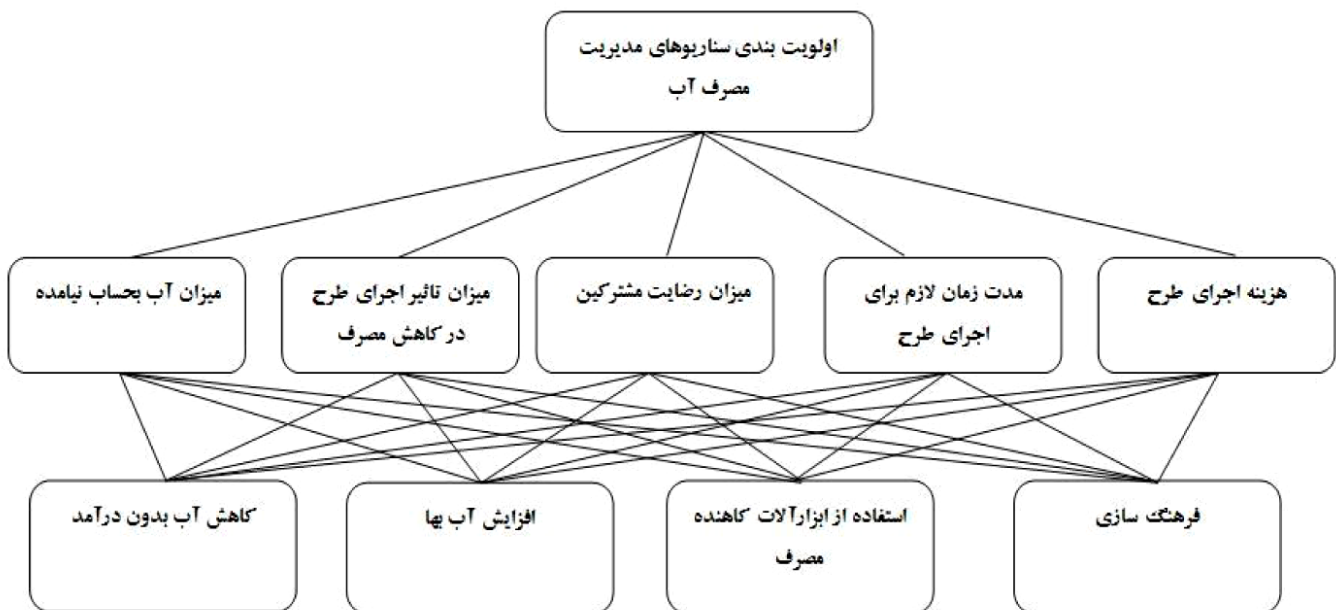
$$W_i = \frac{z_i}{(z_1 + z_2 + \dots + z_n)}, \forall i \quad (6)$$

در واقع W_i نشان‌دهنده وزن و اهمیت گزینه یا معیار i ام است. برای تعمیم روش فوق به حالت فازی، باید از یک‌سری عملگرهای حسابی فازی استفاده شود. برای این منظور، دو عدد فازی دوزنقه‌ای مانند $M_1=(a_1, b_1, c_1, d_1)$ و $M_2=(a_2, b_2, c_2, d_2)$ را در نظر بگیرید. حاصل ضرب دو عدد فازی به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود.

$$Q = M_1 \times M_2 = (a[L_1, L_2], b, c, d[R_1, R_2]) \quad (7)$$

به طوری که:

$$\begin{aligned} a &= a_1 a_2 \\ b &= b_1 b_2 \\ c &= c_1 c_2 \\ d &= d_1 d_2 \\ L_1 &= (b_1 - a_1)(b_2 - a_2) \\ L_2 &= a_2(b_1 - a_1) + a_1(b_2 - a_2) \\ R_1 &= (d_1 - c_1)(d_2 - c_2) \\ R_2 &= -[d_2(d_1 - c_1) + d_1(d_2 - c_2)] \end{aligned} \quad (8)$$



شکل ۲: مدل سلسله مراتبی مورد استفاده برای رتبه‌بندی راهکارهای مدیریت مصرف آب

Fig. 2. Hierarchical model for ranking of water consumption management strategies

هر یک از ماتریس‌های مقایسات زوجی از نظر سازگاری و ناسازگاری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و در صورت ناسازگاری بیش از حد مجاز، تغییر وزن‌ها برای سازگار نمودن ماتریس‌ها اعمال خواهد شد. در این تحقیق، ناسازگاری ماتریس‌های مقایسات زوجی برای معیارها بررسی و مشاهده شد که میزان ناسازگاری آن‌ها در محدوده مجاز (کمتر از ۰/۱) است. بنابراین، برای استفاده از این ماتریس‌ها نیازی به سازگار نمودن وجود ندارد. با مقایسه اولویت‌بندی معیارها از سوی تصمیم‌گیرندگان، معیار میزان تأثیر اجرای طرح در کاهش مصرف از نظر تمامی تصمیم‌گیرندگان در اولویت اول قرار دارد. برای اولویت‌بندی معیارهای دیگر با در نظر گرفتن نظر همه کارشناسان، می‌توان از یک روش ساده امتیازدهی به جای روش تلفیق نظرها استفاده کرد و نتایج را با نتیجه‌های حاصل از روش تلفیق نظرها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی مقایسه نمود.

روش امتیازدهی که بر اساس مفهوم امید ریاضی^۱ بنا نهاده شده، به این صورت است که به هر رتبه یک امتیاز از ۱ تا ۵ تخصیص داده شده و در انتها امتیاز هر معیار محاسبه می‌شود. امتیاز نهایی هر معیار به صورت جدول ۳ است.

در مرحله بعد، طرح‌ها از نظر تصمیم‌گیرندگان به صورت جداگانه نسبت به معیارها مقایسه می‌شوند. در مواردی که ماتریس مقایسات زوجی نیاز به سازگار شدن داشته باشند، باید ماتریس را پس از اعمال تغییرات و سازگار نمودن دوباره به تأیید تصمیم‌گیرنده رساند. زیرا ممکن است تا تغییرهای داده‌شده در وزن‌های ماتریس برای سازگار کردن، از نظر تصمیم‌گیرنده مربوطه منجر به تغییر کلی در وزن‌های ماتریس شده باشد و ماتریس مقایسه زوجی حاصل پس از سازگار شدن مورد تأیید تصمیم‌گیرنده مورد نظر نباشد. در صورتی که ماتریس پس از تغییرها همچنان از دیدگاه تصمیم‌گیرنده نظردهنده مورد تأیید بود (به آن معنی که پس از اجرای تغییرها همچنان نتایج با نتیجه‌های ماتریس پیش از اجرای تغییرها منطبق باشد)، تغییرها مورد قبول است و در غیر این صورت، باید دوباره ماتریس ناسازگار اولیه را به نحوی سازگار نمود تا نتایج مورد تأیید تصمیم‌گیرنده نظردهنده باشد.

^۱ Expected Value

جدول ۳: امتیازهای نهایی معیارها

Table 3. Final scores of criteria

ردیف	معیار	امتیاز
۱	هزینه طرح	$۱۶=(۳+۳+۴+۳+۳)$
۲	سهولت اجرای طرح	$۹=(۲+۱+۲+۲+۲)$
۳	میزان آب بحساب نیامده	$۱۹=(۴+۳+۴+۴+۴)$
۴	میزان رضایت مشترکین از اجرای طرح	$۶=(۱+۱+۱+۲+۱)$
۵	میزان تأثیر اجرای طرح در کاهش مصرف	$۲۵=(۵+۵+۵+۵+۵)$

جدول ۲: مشخصات عمومی شبکه توزیع آب شهر تهران [۳]

Table 2. General specifications of Tehran water distribution network

ردیف	مشخصات	واحد	مقدار
۱	انشعابات خانگی و مختلط	عدد	۸۰۲۹۱۹
۲	انشعابات غیرخانگی	عدد	۱۲۱۸۶۳
۳	کل انشعابات آب	عدد	۹۲۴۷۸۲
۴	طول شبکه توزیع	کیلومتر	۱۰۰۱۶
۵	طول خط انتقال	کیلومتر	۶۸۰
۶	تعداد مخازن در مدار	عدد	۶۹
۷	حجم مخازن در مدار	میلیون متر مکعب	۱/۹۹
۸	تعداد تصفیه‌خانه‌های آب	عدد	۵
۹	جمعیت زیر پوشش خدمات آب	نفر	۷۸۳۹۹۰۰

مشخصات عمومی شبکه توزیع آب شهر تهران ارائه شده است. تهران در سال‌های اخیر از نظر جمعیت و در نتیجه سامانه توزیع آب، رشد فزاینده‌ای داشته است و به عنوان بزرگ‌ترین کانون زیستی و شهری ایران شناخته می‌شود. این رشد فزاینده و تمرکز بیش از اندازه جمعیت در این منطقه، منجر به عوارض زیست‌محیطی نامطلوبی شده است و با در نظر گرفتن محدودیت منابع آب در کنار این تراکم بیش از حد جمعیت، اهمیت انجام مطالعات کاربردی و مستمر در زمینه تأمین آب و استفاده بهینه از کلیه امکانات موجود در راستای مدیریت مصرف آب از اهمیت بالاتری برخوردار خواهد شد.

۵- انتخاب تصمیم‌گیرندگان

برای استفاده از تصمیم‌گیری گروهی در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، استفاده از تصمیم‌گیرندگان مناسب از مهمترین الزامات دستیابی به نتایج بهینه و قابل استناد است. برای این منظور، از نظرهای تعدادی از مدیران ارشد صنعت آب و فاضلاب استفاده شد که با تخصص‌های مهندسی عمران و مهندسی آب و فاضلاب در سازمان‌هایی مانند معاونت امور آب و آبفای وزارت نیرو و معاونت بهره‌برداری و معاونت برنامه‌ریزی توسعه شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور و شرکت آب و فاضلاب استان تهران مشغول به کار هستند.

۶- اجرای مدل

برای تعیین وزن معیارها نسبت به هدف و همچنین راهبردها نسبت به معیارها، از تصمیم‌گیرندگان خواسته شد تا در قالب ماتریس‌های مقایسات زوجی به مقایسه اجزای مدل بپردازند.

جدول ۴: اوزان نهایی طرح‌ها در حالتی که وزن تصمیم‌گیرندگان برابر است.

Table 4. The final weights of alternatives when the weight of the decision makers is equal

امتیاز	طرح
۰/۴۹۹	کاهش آب بدون درآمد
۰/۴۸۹	فرهنگ‌سازی
۰/۴۱۱	استفاده از ابزارآلات کاهنده
۰/۴۳۹	افزایش آب‌بها

این حالت وزن‌دهی به عنوان حالت مبنا انتخاب شده است و سپس در مراحل بعدی، هر یک از امتیازدهندگان از وزن متفاوتی برخوردار هستند. در ابتدا وزن یک تصمیم‌گیرنده افزایش داده شده و وزن بقیه تصمیم‌گیرندگان به طور یکسان کاهش داده می‌شود. سپس همین روند برای دیگر تصمیم‌گیرندگان ادامه خواهد یافت تا اثر تغییر وزن نظرهای هر تصمیم‌گیرنده از حالت مبنا تا حالت‌های حدی بر رتبه‌بندی نهایی مشاهده شود.

۷- تحلیل حساسیت

به منظور بررسی اثرهای عدم قطعیت‌ها بر پاسخ نهایی، تحلیل حساسیت بر روی اجزای غیرقطعی مدل صورت گرفته است که عبارتند از:
الف) تغییر وزن نظرهای تصمیم‌گیرندگان
ب) تغییر شکل اعداد فازی دوزنقه‌ای

۷-۱- تغییر وزن نظرهای تصمیم‌گیرندگان

در این روش، وزن یک تصمیم‌گیرنده در حالی که وزن بقیه برابر است، افزایش می‌یابد تا زمانی که اولویت‌بندی سناریوها (و یا حتی یکی از سناریوها) تغییر یابد. وزن تصمیم‌گیرنده‌ای که وزن آن در حال تغییر است، در زمانی که اولویت‌بندی‌ها در حال تغییر هستند، به عنوان وزن مرزی در نظر گرفته می‌شود. این روند برای تمامی تصمیم‌گیرندگان تکرار می‌شود و در نهایت با بررسی نتایج و مقایسه آن‌ها با نتیجه‌های اولویت‌بندی سناریوها توسط تصمیم‌گیرندگان به صورت انفرادی، میزان تأثیر افزایش وزن تصمیم‌گیرندگان سنجیده خواهد شد. باید توجه نمود که مجموع اوزان تصمیم‌گیرندگان باید برابر با ۱ باشد. بنابراین، با افزایش وزن یک تصمیم‌گیرنده، وزن دیگر تصمیم‌گیرندگان به صورت برابر کاهش خواهد یافت. نظرهای تصمیم‌گیرندگان به صورت انفرادی در جدول ۵ نشان داده شده است.

در جدول ۵ مشاهده می‌شود که بیشترین امتیاز به طرح کاهش آب

بهترین روش برای سازگار نمودن ماتریس‌های مقایسات زوجی در صورت ناسازگاری، تعامل با شخص تصمیم‌گیرنده و ایجاد تغییرها در وزن‌ها به همراه شخص تصمیم‌گیرنده است. در صورت حضور تصمیم‌گیرنده در حین سازگار نمودن، نتایج بسیار قابل اعتماد است.

دو روش متداول در روش‌های تصمیم‌گیری گروهی فازی وجود دارد که هر دو روش، دارای کاربرد بوده و نتایج آن‌ها بسیار به یکدیگر شبیه هستند. در روش اول، در ابتدا ماتریس‌های مقایسات زوجی فازی شده و در مرحله بعد نیز نظرهای فازی شده تصمیم‌گیرندگان با یکدیگر تلفیق می‌شوند. در روش دیگر، ماتریس‌ها در ابتدا با یکدیگر تلفیق شده و در مرحله بعد، نتایج فازی می‌شوند. در این تحقیق، از روش دوم (یعنی ابتدا تلفیق و سپس فازی‌سازی) استفاده شده است. در این مرحله، نظرهای تصمیم‌گیرندگان برای معیارها به منظور دستیابی به یک ماتریس مقایسه زوجی که نظرهای تمامی تصمیم‌گیرندگان در آن دخیل باشد، با یکدیگر تلفیق می‌شوند.

در بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری، ارزش و اهمیت گزینه‌های مختلف به صورت اعداد فازی بیان می‌شود. به دلیل عدم قابلیت اولویت‌بندی اعداد در حالت فازی، برای نشان دادن ارجحیت گزینه‌ها نسبت به یکدیگر باید اعداد فازی را مانند اعداد صریح رتبه‌بندی نمود. اما از آنجایی که تغییرهای توابع عضویت اعداد فازی نسبت به یکدیگر خطی نیست، بنابراین اعداد فازی را نمی‌توان مانند اعداد معمولی به صورت مستقیم با یکدیگر مقایسه نمود. روش‌های متعددی برای رتبه‌بندی اعداد فازی وجود دارد که هر یک کاربرد خاصی دارند. به طور کلی، سه رویکرد مختلف می‌توان برای دسته‌بندی روش‌های رتبه‌بندی در نظر گرفت [۴].

الف) رتبه‌بندی بر اساس مقایسه مقادیر غیرفازی شده
ب) رتبه‌بندی بر اساس مقایسه گزینه‌ها با مجموعه فازی شاخص
پ) رتبه‌بندی بر اساس مقایسه زوجی گزینه‌ها
روش‌های مختلفی برای مقایسه مقادیر غیرفازی شده وجود دارند که از آن جمله می‌توان به روش‌های برش آلفا، آدامو^۱ و یاگر^۲ اشاره کرد. در این روش‌ها، متغیرهایی مانند مساحت زیر نمودار، گشتاور دوم سطح، مقدار متناظر با ۰/۵ در تابع عضویت عدد فازی و غیره به عنوان معادل غیرفازی در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق، به دلیل سادگی، کاربردی بودن و منطق قابل فهم به علت استفاده از مرکز سطح به عنوان نماینده عدد فازی، از شاخص یاگر استفاده می‌شود [۱۰].

در این مرحله، امتیازهای نهایی فازی بدست آمده برای اولویت‌بندی با استفاده از شاخص یاگر به اعداد صریح تبدیل می‌شود. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طرح‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی رتبه‌بندی شدند. در این مرحله، تمامی امتیازدهندگان از اوزان یکسانی برخوردار هستند.

^۱ Adamo

^۲ Yager

جدول ۵: امتیازهای طرح‌ها توسط تصمیم‌گیرندگان

Table 5. Alternatives' scores by decision makers

طرح	کاهش آب بدون درآمد	فرهنگ‌سازی	استفاده از ابزارآلات	افزایش آب‌بها
تصمیم‌گیرنده اول	۰/۴۷۸	۰/۴۵۶	۰/۴۹۸	۰/۴۳۹
تصمیم‌گیرنده دوم	۰/۴۵۱	۰/۴۶۷	۰/۴۸۱	۰/۴۸۹
تصمیم‌گیرنده سوم	۰/۵۰۹	۰/۴۵	۰/۴۷۸	۰/۴۹۲
تصمیم‌گیرنده چهارم	۰/۴۸۹	۰/۴۶۵	۰/۵۱۱	۰/۴۸۸
تصمیم‌گیرنده پنجم	۰/۴۸۸	۰/۴۷۸	۰/۴۶۹	۰/۴۷۵

جدول ۷: امتیاز طرح‌ها در حالت تغییر شکل اعداد فازی ذوزنقه‌ای

Table 7. Alternatives' scores in the case of the transformation of fuzzy trapezoidal numbers

طرح	امتیاز
کاهش آب بدون درآمد	۰/۴۹۱
فرهنگ‌سازی	۰/۴۸۶
استفاده از ابزارآلات کاهنده	۰/۴۳۴
افزایش آب‌بها	۰/۴۵۶

بدون درآمد توسط تصمیم‌گیرنده سوم داده شده است. با توجه به این که این تصمیم‌گیرنده در بخش آب بدون درآمد شرکت آب و فاضلاب شهر تهران فعالیت می‌نماید، توجه خاص این تصمیم‌گیرنده به این طرح و قائل شدن بیشترین امتیاز برای آن از سوی این تصمیم‌گیرنده، امری بدیهی است. شاید انتخاب یک طرح از سوی یک تصمیم‌گیرنده به عنوان طرح برتر، انتخاب صحیحی باشد. اما با استفاده از روش تصمیم‌گیری گروهی می‌توان امیدوار بود تا احتمال دخالت سلیقه‌های شخصی و تصمیم‌گیری‌های نادرست تا حد قابل توجهی کاهش یابد. وزن‌های مرزی تصمیم‌گیرندگان در جدول ۶ نشان داده شده است.

۷-۲- تغییر شکل اعداد فازی ذوزنقه‌ای

یکی دیگر از راه‌های بررسی و مقایسه نتایج، تغییر فاصله گزاره‌های اعداد فازی است. برای مثال، طول ضلع کوچک ذوزنقه برابر با ۱ و طول ضلع بزرگ نیز برابر با ۲ فرض می‌شود. در این حالت، عدد صریح ۲ در شکل فازی به صورت (۳، ۲/۵، ۱/۵، ۱) خواهد شد. در این حالت، دقت نسبت به حالت قبل افزایش پیدا می‌کند. زیرا هرچه فاصله کم‌تر شود، بازه تغییرها کوچک‌تر خواهد شد؛ یعنی عدم قطعیت کاهش می‌یابد و اطمینان تصمیم‌گیرنده در مورد ارزیابی خویش افزایش می‌یابد. در ادامه، ماتریس‌های صریح اولیه

به این صورت فازی می‌شوند و نتایج با حالت صریح و فازی اولیه مقایسه می‌شود. در این حالت، جدول امتیازهای طرح‌ها به صورت جدول ۷ است. طرح کاهش آب بدون درآمد در این حالت، بالاترین امتیاز را کسب نمود. همان‌طور که در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود، فاصله امتیازهای طرح‌های کاهش آب بدون درآمد و فرهنگ‌سازی بسیار کم‌تر از فاصله بین دیگر سناریوها است. این فاصله کم امتیاز، این قابلیت را به کارشناسان و مجریان طرح‌های شرکت آب و فاضلاب می‌دهد تا در صورت بروز هر گونه مشکل در اجرا و یا برنامه‌ریزی برای اجرای طرح کاهش آب بدون درآمد، از طرح فرهنگ‌سازی استفاده نمایند. امتیازدهی عددی به طرح‌ها، یکی از امتیازهای روش تحلیل سلسله‌مراتبی است که علاوه بر معرفی طرح برتر، قابلیت جایگزینی برای اجرای یک طرح به جای طرح دیگر را میسر می‌کند.

۸- نتایج

به منظور ارائه یک اولویت‌بندی برای طرح‌ها (به نحوی که کلیه این جداول را پوشش دهد)، از روش امتیازدهی پیشنهادی استفاده شده است. سپس رتبه‌بندی‌های بدست آمده با یکدیگر تلفیق شده و نتایج این امتیازدهی در جدول ۸ ارائه شده است. در این روش، به هر یک از رتبه‌هایی که یک طرح در اولویت‌بندی‌های

جدول ۶: اوزان مرزی تصمیم‌گیرندگان

Table 6. Boundary weights of decision makers

تصمیم‌گیرنده	وزن مرزی تصمیم‌گیرنده
اول	۰/۳۷
دوم	۰/۲۱
سوم	۰/۱۸
چهارم	۰/۲۵
پنجم	۰/۲۱

در تحقیق حاضر، از میان راهبردهای مختلف مدیریت مصرف آب، دو گزینه کاهش آب بدون درآمد و فرهنگ‌سازی بر اساس امتیازهایی که تصمیم‌گیرندگان به معیارهای تصمیم‌گیری تخصیص داده‌اند، در مجموع در اولویت‌های بالا قرار دارند. پیشنهاد می‌شود تا در مطالعات بعدی بر روی گزینه‌های اولویت‌بندی شده در تحقیق حاضر، ارزیابی‌ها و تحلیل‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دقیق‌تری صورت گیرد.

تشکر و قدردانی

به این وسیله، از کلیه متخصصین و کارشناسان صنعت آب و فاضلاب که به طور مستقیم و یا غیرمستقیم با محققین این مقاله همکاری داشتند، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید. همچنین مولفین لازم می‌دانند تا از شرکت مهندسی آب و فاضلاب استان تهران به موجب حمایت مالی که از این تحقیق به عمل آورد، مراتب قدردانی خود را اعلام دارند.

مراجع

- [1] <http://www.amar.org.ir/nofos1385/default-2505.aspx>. Iranian Center of Statistics, 2006 census results for Tehran province. 2006. (In Persian)
- [2] <http://www.nww.co.ir>. News site of Water and Wastewater Company of Iran. 2010 (In Persian).
- [3] http://www.tppww.co.ir/abfa_content/media/image/2011/02/15069_orig.pdf. 2010. Water and Wastewater Company of Tehran Province, Tehran Water and Wastewater Company's Facilities Report. 2010. (In Persian)
- [4] A., Abrishamchi; A., Ebrahimi; M., Tajrishi; M. A., Marino; Case Study: Application of Multicriteria Decision Making to Urban Water Supply, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 4, pp. 326-335, 2005.
- [5] J. J., Buckley; Fuzzy Hierarchical Analysis, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 17, No. 3, pp. 223-247, 1985.
- [6] X., Delgado-Galvan; R., Perez-Garcia; J., Izquierdo; J., Mora-Rodriguez; An Analytic Hierarchy Process for Assessing Externalities in Water Leakage Management, *Journal of Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 52, pp. 1194-1202, 2010.
- [7] Koorepazan Dezfuli A. Principles of Fuzzy Sets Theory and its Application in Modeling of Water Engineering. Tehran: Jahad Daneshgahi Press, *Amirkabir University of Technology*; 2004. (In Persian)
- [8] D. C., Morais; A. T., Almedia; Group Decision Making for Leakage Management Strategy of Water Network, *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52, pp. 441-459, 2007.

جدول ۸: اولویت‌بندی بدست‌آمده از روش پیشنهادی

Table 8. Obtained ranking from proposed method

اولویت	امتیاز	طرح
اولویت اول	۳۴	کاهش آب بدون درآمد
اولویت دوم	۲۷	فرهنگ‌سازی
اولویت سوم	۲۳	افزایش آب‌بها
اولویت چهارم	۱۵	استفاده از ابزارآلات کاهنده مصرف

جدول‌های ذکر شده بدست آورده است، یک عدد تعلق می‌گیرد و برای رتبه یک عدد ۵، رتبه دو عدد ۴، رتبه سه عدد ۳ و برای رتبه چهار عدد ۲ در نظر گرفته می‌شود.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگویی برای انتخاب مناسب‌ترین راهبرد مدیریت مصرف آب در شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه ارائه شده است. همچنین با بهره‌گیری از نظرهای کارشناسان، اولویت برتر مدیریت مصرف آب برای شهر تهران معرفی شده است. با استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت و تغییر در اوزان اهمیت کارشناسان، چند اولویت‌بندی مختلف بدست آمد. بکارگیری روش تحلیل سلسله‌مراتبی با توجه به کمبود اطلاعات مناسب با توجه به نتایج بدست‌آمده، یکی از راه‌های مناسب تصمیم‌گیری برای انتخاب طرح‌های بهینه در راستای مدیریت مصرف است. امتیازهای داده‌شده به طرح‌ها تنها بر پایه وزن‌های داده‌شده توسط تصمیم‌گیرندگان به وسیله نظرسنجی است و این موضوع، می‌تواند دربرگیرنده همان ضعف‌های تصمیم‌گیری توسط کارشناسان بدون استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری و صرفاً با استفاده از تجربیات باشد. اما با استفاده از نظر چند کارشناس به صورت تلفیقی، می‌توان دقت تصمیم‌گیری را افزایش داد و از انتخاب‌های شخصی پرهیز نمود. برای افزایش دقت نتایج، پیشنهاد می‌شود تا از نظر کارشناسان بیشتری استفاده شود.

در شرایطی که اطلاعات کمی کافی در دسترس نیست و تصمیم‌گیرندگان نیز نمی‌توانند ارجحیت‌های خود را بر مبنای قضاوت‌های کمی و صریح بیان نمایند (مانند مسئله مورد بررسی در تحقیق حاضر)، روش‌های فازی مانند روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ضمن لحاظ کردن اثرهای عدم صراحت‌های موجود در نظرهای تصمیم‌گیرندگان، می‌توانند یک رتبه‌بندی اولیه از گزینه‌های موجود را ارائه دهند. این رویکرد در ابتدای امر برنامه‌ریزی برای اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف آب (که هنوز میزان عدم قطعیت‌ها قابل توجه است)، می‌تواند مدیران بخش آب و فاضلاب را در کاهش ابعاد مسئله تصمیم‌گیری، حذف گزینه‌های غیربهینه و دستیابی به مجموعه‌ای از گزینه‌های بهینه یاری دهد.

Fuzzy Sets and Systems Journal, Vol. 4, pp. 235-242, 1980.

[9] T. L., Saaty; *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill International, NY, 1980.

[10] R. R., Yager; On a General Class of Fuzzy Connectives,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M., Tabesh, E., Ali-Bariany, S. S., Motevallian, A., Roozbahani, S., Beygi, "Prioritization of Water Consumption Management Strategies in Water Distribution Networks Using Multiple Criteria Decision Making Method of Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Case Study: Tehran)". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(1) (2017) 47-55.

DOI: 10.22060/ceej.2015.379

