

کاربرد تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی فازی برای توسعه‌ی پایدار سامانه‌های آب شهری

سید ساجد متولیان^۱، مسعود تابش^{۲*}، عباس روزبهانی^۳

چکیده

در توسعه‌ی پایدار سامانه‌های آب شهری نه تنها باید به جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی توجه نمود، بلکه باید ارجحیتها و اولویتهای تمامی گروههای ذینفع و ذی‌مدخل، اعم از مصرف‌کنندگان، ارائه‌دهندگان خدمات و دیگر سازمانهای درگیر را نیز لحاظ نمود. پیچیدگی و تعدد متغیرهایی که در مسأله تصمیم‌گیری برای توسعه‌ی سامانه‌های آب شهری وجود دارد، لزوم به کارگیری روشهای نظام مند و کارا، که بتوانند علاوه بر در نظر گرفتن همه جنبه‌های تصمیم‌گیری، عدم قطعیتها و عدم صراحتهای موجود را در متغیرهای تصمیم نیز به شمار می‌رود، مشخص می‌سازد. روشهای تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی گروهی فازی (FGDM) دسته‌ای از ابزارهای تحلیل نظام مند هستند که بطور گسترده در حل مسائل برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و محیط‌زیست به کار گرفته شده‌اند. در مقاله‌ی حاضر، در قالب یک مطالعه‌ی موردی، کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) در برنامه‌ریزی برای توسعه‌ی پایدار سامانه‌های آب شهری نشان داده شده است. هدف از مطالعه‌ی موردی، انتخاب نمایشنامه‌ی پایدار توسعه برای سامانه آب شهری یک منطقه‌ی فرضی به نام شهرک می‌باشد. در این تحقیق، با به کارگیری چهار معیار و یازده شاخص تصمیم‌گیری نظرات تصمیم‌گیرندگان در قالب پرسشنامه‌های تخصصی جمع‌آوری شده و شش نمایشنامه‌ی توسعه اولویت‌بندی گردیده‌اند. نتایج اجرای شبیه، که براساس نظرات خبرگان مورد صحت‌سنجی قرار گرفته، نشان می‌دهد، که روشهای تصمیم‌گیری گروهی، مانند روش به کار رفته در این تحقیق می‌توانند به عنوان ابزارهای تحلیلی و توانمند، فرآیند تصمیم‌گیری را برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان سامانه‌های آب شهری تسهیل ساخته، و به تحقق اهداف توسعه‌ی پایدار در بخش مدیریت آب شهری کمک کنند.

کلیدواژه: برنامه‌ریزی، آب شهری، تصمیم‌گیری، کاهش مصرف آب

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران smotevallian@alumni.ut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران mtabesh@ut.ac.ir

^۳ استادیار گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران roozbahany@ut.ac.ir

مقدمه

سامانه های آب شهری از سامانه آب (تأمین و انتقال، تصفیه و توزیع)، سامانه فاضلاب (جمع‌آوری و تصفیه) و سامانه جمع‌آوری رواناب شهری تشکیل شده‌اند. با توجه به نقش مهمی که این زیرساختها در تأمین آسایش و رفاه شهروندان دارند، برنامه‌ریزی برای توسعه ی این سامانه ها یکی از دغدغه‌های مهم مدیران شهری محسوب می‌گردد. با ارائه ی مفهوم توسعه ی پایدار در اواخر دهه ی ۸۰ میلادی، یک تغییر انگاره در ادبیات فنی برنامه‌ریزی و مدیریت سامانه های آب شهری ایجاد شد. توسعه‌ی پایدار، آن گونه که در گزارش تهیه شده به وسیله ی کمیته‌ی جهانی محیط‌زیست و توسعه^۱ که در سال ۱۹۸۷ منتشر شد: "توسعه‌ای است که نیازهای اساسی نسل حاضر را تأمین می‌کند، بدون آن که توانایی نسلهای آینده را برای تأمین نیازهای اساسی‌شان به خطر بیندازد،

تا پیش از مطرح شدن مفاهیم توسعه ی پایدار و پایداری، ارزیابی سامانه های آب شهری محدود به سنجش شاخصهای عملکردی بود که عمدتاً سودآوری ارائه ی خدمات و تأمین نیازهای آبی را در افق برنامه‌ریزی نشانه گرفته بودند. از اواخر دهه ی ۹۰ میلادی، و با انجام مطالعاتی همچون لوندین و همکاران (۱۹۹۷) و هلستروم و همکاران (۲۰۰۰)، فصلی تازه در زمینه ارزیابی سامانه‌های منابع آب (از جمله سامانه ی آب شهری) بر مبنای شاخص‌های توسعه ی پایدار گشوده شد. در این رویکرد جدید، علاوه بر جنبه ی اقتصادی، جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی سامانه‌های آب شهری نیز مورد توجه قرار می‌گیرد، ضمن این که تأمین نیازهای فعلی به آب و دفع بهداشتی نباید موجب به مخاطره افتادن فرصتهای آیندگان برای تأمین نیازهای ضروریشان گردد. بر این مبنا یک سامانه ی آب شهری پایدار را می‌توان سامانه ای دانست که اهداف اصلی زیر را برآورده می‌سازد (باتلر و پارکینسون، ۱۹۹۷؛ هلستروم و همکاران، ۲۰۰۰؛ مالمکوئیست و پالمکوئیست، ۲۰۰۵؛ مارسالک و همکاران، ۲۰۰۸):

- تأمین آب شرب سالم و گوارا برای تمامی شهروندان در تمامی اوقات.

- جمع‌آوری و تصفیه ی فاضلاب به منظور محافظت از شهروندان در مقابل بیماریها.
 - مهار کردن، جمع‌آوری، انتقال و تصفیه ی رواناب شهری به منظور محافظت از محیط‌زیست و مناطق مسکونی در مقابل خطر سیل و انتشار آلودگی.
 - بازیافت و مصرف مجدد آب و مواد مغذی برای استفاده در بخش کشاورزی و یا بخش خانگی در مواقع نیاز.
 - به حداقل رساندن مصرف ناصحیح منابع طبیعی از قبیل آب، کارمایه و غیره.
 - ارائه ی خدمات آبرسانی و دفع بهداشتی به گونه‌ای که هم برای ارائه‌دهندگان خدمات سودآور بوده، و تعرفه ی خدمات آن نیز برای مصرف‌کنندگان قابل قبول باشد.
 - به کارگیری فناوری‌های قابل اعتماد و کارا که سازگار با شرایط محلی باشند.
- تاکنون طیف گسترده‌ای از روش‌های تحلیل نظام مند به منظور ارزیابی پایداری سامانه‌های آب شهری مورد استفاده قرار گرفته‌اند که مروری بر این روشها را می‌توان در نس و همکاران (۲۰۰۷) یافت. از میان روشهای مورد استفاده، روشهای تصمیم‌گیری چندمعیاره^۲ (MCDM)، به دلیل قابلیتشان در وزن‌دهی و یکپارچه‌سازی معیارهای مختلف و امکان انتخاب گزینه برتر، عملکرد مناسبتر و جامعتری را نسبت به دیگر روشها ارائه نموده‌اند. این روشها شاخه‌ای از راه‌های تصمیم‌گیری می باشند که با استفاده از روابط ریاضی و استدلالهای عقلی، فرآیند تصمیم‌گیری را تسهیل می‌سازند. از روشهای تصمیم‌گیری چندمعیاره بطور گسترده در حل مسائل برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، بویژه مدیریت آب شهری استفاده شده است. سودبرگ و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از روش تصمیم‌گیری^۳ NAIAD سه نوع سامانه ی جمع‌آوری فاضلاب را در شهر سورهامر^۴ سوئد را رتبه‌بندی کردند. ابریشمچی و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از روش برنامه‌ریزی سازشی^۵ (CP)، به

² multi-criteria decision-making methods (MCDM)

³ novel approach to imprecise assessment and decision environments (NAIADE)

⁴ Surhammer

⁵ compromise programming (CP)

¹ world commission on the environment and development (WCED)

آن را برای شبکه‌ی توزیع آب شهری ژيجانگ چین نشان دادند.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که در انتخاب شاخصها و معیارهای تصمیم‌گیری، دیدگاه‌های مبتنی بر توسعه‌ی پایدار سامانه‌های آب شهری چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. همچنین، سوابق مطالعات داخلی در این زمینه بسیار محدود بوده و عمده‌ی مطالعات انجام شده در کشورهای توسعه یافته صورت پذیرفته است، ضمن این که قابلیت‌های شبیه‌های تصمیم‌گیری فازی در نشان دادن اثر عدم‌صراحت‌های موجود در قضاوت‌های انسانی، بویژه در حالتی که تصمیم‌گیری از نوع گروهی بوده و معیارهای متعددی وجود داشته باشند، به خوبی تبیین نشده‌اند.

در مقاله‌ی حاضر، در قالب یک مطالعه‌ی موردی کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) در برنامه‌ریزی برای توسعه‌ی پایدار سامانه‌های آب شهری نشان داده شده است. هدف از مطالعه‌ی موردی، انتخاب نمایشنامه‌ی پایدار توسعه برای سامانه‌ی آب شهری یک منطقه‌ی فرضی به نام شهرک می‌باشد که براساس اطلاعات یکی از مناطق تحت پوشش ناحیه‌ی دو آب و فاضلاب منطقه‌ی دو شهر تهران، شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق، با به کارگیری چهار معیار و یازده شاخص تصمیم‌گیری، نظرات تصمیم‌گیرندگان در قالب پرسشنامه‌های تخصصی جمع‌آوری شده و شش نمایشنامه‌ی توسعه‌ی اولویت‌بندی شده‌اند. همچنین، به منظور بررسی تأثیر عدم قطعیتها بر نتایج شبیه تصمیم‌گیری، متغیرهای غیرقطعی مورد تحلیل حساسیت قرار گرفته‌اند. نتایج اجرای شبیه، که براساس نظرات خبرگان مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است، نشان می‌دهد که روشهای تصمیم‌گیری گروهی مانند روش به کار رفته در این تحقیق می‌توانند به عنوان ابزاری تحلیلی و توانمند، فرایند تصمیم‌گیری را برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان سامانه‌های آب شهری تسهیل ساخته و به تحقق اهداف توسعه‌ی پایدار در بخش مدیریت آب شهری کمک کنند.

در ادامه‌ی این مقاله به اختصار به معرفی روشهای تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد استفاده (FAHP) و

اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف تأمین آب شهری برای شهر زاهدان پرداختند. میان‌آبادی و افشار (۱۳۸۷) مسأله‌ی تصمیم‌گیری ارائه شده را در ابریشمچی و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از روشهای میانگین‌گیری وزنی مرتب‌شده استقرایی، تخصیص خطی و TOPSIS حل کردند و نتایج سه روش را با یکدیگر مقایسه نمودند.

روشهای تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی گروهی^۱ (GDM) تصمیم یافته شبیه‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فردی هستند و کاربرد آنها در مواقعی است که تعداد تصمیم‌گیرندگان بیش از یک نفر باشد. این حالت از مسأله، بخصوص برای سامانه‌های آب شهری بسیار محتمل است زیرا سامانه‌های آب شهری طیف گسترده‌ای را از تصمیم‌گیرندگان از قبیل ارائه‌دهندگان خدمات، مصرف‌کنندگان، سازمانهای نظارتی (محیط‌زیست، بهداشت و غیره) درگیر می‌سازند. در مواقعی که تعداد تصمیم‌گیرندگان قابل توجه باشند، بخش اعظمی از اطلاعات موجود در مسأله از نوع کیفی (غیرکمی) است و متغیرها نیز دارای درجه‌ی بالایی از عدم‌صراحت و ابهام می‌باشند، روشهای تصمیم‌گیری گروهی فازی^۲ (FGMCDM) یک ابزار کارآمد برای انتخاب گزینه‌ی بهینه‌اند.

از روشهای تصمیم‌گیری گروهی فازی برای حل مسائل برنامه‌ریزی و مدیریت آب شهری بطور گسترده استفاده گردیده است. شریعت و همکاران (۱۳۸۲) در قالب یک مطالعه‌ی موردی برای شهر همدان، با استفاده از روش فرایند سلسله‌مراتبی تحلیلی فازی (FAHP)، روشهای استفاده‌ی مجدد را از فاضلاب شهری تصفیه شده را رتبه‌بندی نمودند. آنها برای وزن‌دهی معیارها از روش پرسشنامه دلفی و شبیه تصمیم‌گیری گروهی استفاده کردند. ختری و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از روش FAHP، چارچوبی را برای محاسبه‌ی شاخص عملکردی زیرساختهای شهری پیشنهاد نموده و این چارچوب را در قالب یک مطالعه موردی برای سامانه آب شهری کاتماندو نپال پیاده کردند. زنگ و همکاران (۲۰۱۴) یک شبیه تحلیل خطر کردن نشت آب را در شبکه‌ی توزیع آب شهری با استفاده از روش FAHP توسعه داده و کاربرد

¹ group multi-criteria decision-making methods (GMCDM)

² fuzzy group multi-criteria decision-making methods (FGMCDM)

در ساختار سلسله‌مراتبی، هدف در بالاترین سطح تصمیم‌گیری واقع می‌شوند، سپس شاخصها و معیارهای تصمیم‌گیری قرار می‌گیرند و در انتها گزینه‌ها قرار دارند.

تعیین وزن معیارها و مهار کردن نرخ ناسازگاری

در گام اول، ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی به صورت صریح (غیرفازی) از تصمیم‌گیرندگان اخذ خواهد شد. برای تبدیل عبارات کیفی به معادله‌های کمی و تکمیل ماتریسهای مقایسه‌های زوجی، از مقیاس یک تا نه پیشنهاد شده به وسیله ی ساعتی (۱۹۸۰) مطابق جدول ۱ استفاده می‌شود. در مرحله ی بعد، نرخ ناسازگاری ماتریسهای مقایسه‌های زوجی مرتب خواهد شد. جزئیات مرتب نرخ ناسازگاری از مرجع ساعتی (۱۹۸۰) قابل مطالعه است.

پس از بررسی نرخ ناسازگاری، تک‌تک ماتریس‌ها و حصول اطمینان از قابل‌قبول بودن میزان ناسازگاریها، درایه‌های هر ماتریس به صورت جداگانه و با استفاده از توابع عضویت مثلثی به صورت اعداد فازی در خواهند آمد. توابع عضویت مثلثی دقت قابل‌قبولی در شبیه‌سازی اعداد فازی داشته و بطور گسترده در حل مسائل فازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هر عدد صریح مانند b به صورت یک عدد فازی مانند $\tilde{E} = (a, b, c)$ تعریف خواهد شد که تابع عضویت آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ - مقیاس مورد استفاده برای تبدیل عبارات کیفی به اعداد کمی (ساعتی، ۱۹۸۰)

عبارات کیفی	معادل کمی
بدون ارجحیت	۱
ارجحیت اندک	۳
ارجحیت قوی	۵
ارجحیت کاملاً قوی	۷
ارجحیت مطلق	۹
مقادیر بینابینی عبارات فوق	۲ و ۴ و ۶ و ۸

شمارش بوردا) پرداخته شده و سپس، مطالعه ی موردی انجام شده تشریح گردیده است. در انتها نیز نتایج حاصل از مطالعه موردی ارائه گردیده و نتایج حاصله مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

مواد و روشها

شبیه تصمیم‌گیری چندمعیاره فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)

نظریه ی مجموعه‌های فازی که به وسیله ی عسکرزاده (۱۹۶۵) پیشنهاد گردیده یک چارچوب ریاضی را برای حل مسائلی که دارای ابهام و عدم صراحت می‌باشند را فراهم می‌نماید (زیمرمان، ۱۹۹۱). بلمن و عسکرزاده (۱۹۷۰) برای اولین بار تصمیم‌گیری فازی را معرفی نمودند. از آن زمان، افراد مختلفی به تعمیم نوع فازی شبیه‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته‌اند. شبیه FAHP نیز تعمیم یافته فازی شبیه AHP می‌باشد که به وسیله ی ساعتی (۱۹۸۰) توسعه داده شده است. AHP روشی مبتنی بر روش تفکر منطقی انسان است که یک چارچوب سلسله‌مراتبی را برای تحلیل مسائل پیچیده تصمیم‌گیری فراهم می‌نماید (قدسی‌پور، ۱۳۸۸). در این روش از ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی برای تعیین اولویت معیارها و گزینه‌ها نسبت به یکدیگر استفاده می‌شود. از جمله دیگر ویژگیهای این روش، مهار کردن نرخ ناسازگاری^۱ نظرات است که موجب می‌گردد، قضاوت‌های انجام شده بیشتر منطقی باشند تا تصادفی. شبیه FAHP به وسیله ی اشخاص مختلفی توسعه داده شده است که در همین رابطه می‌توان به شبیه‌های پیشنهادی ون لارهون و پدریچ (۱۹۸۳)، باکلی (۱۹۸۵)، چانگ (۱۹۹۶) و دنگ (۱۹۹۹) اشاره داشت. در تحقیق حاضر، از روش پیشنهاد شده به وسیله ی باکلی (۱۹۸۵) استفاده خواهد شد که علاوه بر سادگی و قابل‌فهم بودن، یک راهکار عملی برای بررسی سازگاری ماتریسهای فازی نیز ارائه داده است. در ادامه گامهای اجرای شبیه تصمیم‌گیری چندمعیاره FAHP ارائه گردیده است.

ایجاد ساختار سلسله‌مراتبی

¹ Inconsistency Ratio (I.R)

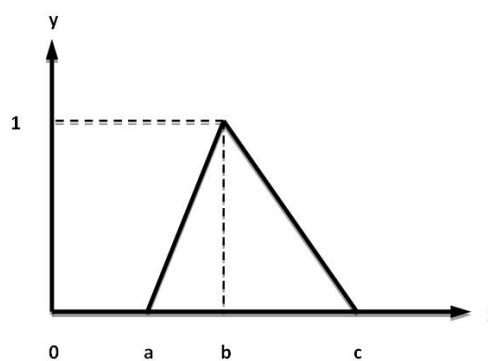
(۱)

در رابطه ی (۱)، $\tilde{A}_{ij}^k = (a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k)$ یک عدد فازی مثلثی است که درایه جِزّام از ماتریس مقایسه ی زوجی فازی اخذ شده از تصمیم‌گیرنده ی k ام محسوب می‌شود. n بُعد ماتریس مقایسه ی زوجی، m تعداد تصمیم‌گیرندگان و $\tilde{A}_{ij}^k = (a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k)$ یک عدد فازی مثلثی است که اعضای آن از میانگین هندسی اعضای متناظر در ماتریسهای اخذ شده از تصمیم‌گیرندگان به دست آمده و درایه جِزّام در ماتریس مقایسه ی زوجی تهیه شده از تلفیق نظرات تصمیم‌گیرندگان را تشکیل می‌دهد. وزن فازی معیارها از ماتریس فازی تهیه شده از تلفیق نظرات تصمیم‌گیرندگان، مطابق رابطه ی (۲) استخراج خواهد شد.

$$\begin{aligned} \forall \tilde{A}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) \Rightarrow \\ a_{ij}^t = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad b_{ij}^t = \left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad c_{ij}^t = \left(\prod_{l=1}^n c_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \\ a^t = \sum_{i=1}^n a_{ij}^t \quad b^t = \sum_{i=1}^n b_{ij}^t \quad c^t = \sum_{i=1}^n c_{ij}^t \\ \Rightarrow \tilde{W}_i = \left[\frac{a_{ij}^t}{c^t}, \frac{b_{ij}^t}{b^t}, \frac{c_{ij}^t}{a^t} \right] \\ i, j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

(۲)

در رابطه ی (۲)، n بُعد ماتریس مقایسه ی زوجی تلفیقی و $\tilde{A}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ درایه جِزّام در ماتریس مقایسه ی زوجی به دست آمده از تلفیق نظرات تصمیم‌گیرندگان است. a_{ij}^t ، b_{ij}^t و c_{ij}^t به ترتیب میانگین هندسی سطری عضو اول، دوم و سوم عدد فازی مثلثی درایه‌های ماتریس تلفیقی می باشند. a_{ij} ، b_{ij} و c_{ij} به



شکل ۱ - تابع عضویت مورد استفاده برای فازی نمودن اعداد صریح

در جدول ۲، معادل‌های فازی مورد استفاده برای تبدیل اعداد صریح به اعداد فازی نشان داده شده است.

جدول ۲ - معادل‌های فازی مورد استفاده برای تبدیل اعداد صریح به اعداد فازی

عدد صریح	معادل فازی
۱	(۱, ۱, ۱)
۲	(۱, ۲, ۳)
۳	(۲, ۳, ۴)
۴	(۳, ۴, ۵)
۵	(۴, ۵, ۶)
۶	(۵, ۶, ۷)
۷	(۶, ۷, ۸)
۸	(۷, ۸, ۹)
۹	(۸, ۹, ۹)

تلفیق وزنهای فازی

در مرحله ی بعد، با فرض یکسان بودن وزن نظرات تصمیم‌گیرندگان، درایه‌های ماتریسها با استفاده از روش میانگین هندسی مطابق رابطه ی (۱) با یکدیگر تلفیق شده و ماتریس فازی نهایی حاصل خواهد شد.

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \left(\prod_{k=1}^m a_{ij}^k \right)^{\frac{1}{m}} \\ \forall \tilde{A}_{ij}^k = (a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k) \Rightarrow b_{ij} &= \left(\prod_{k=1}^m b_{ij}^k \right)^{\frac{1}{m}} \Rightarrow \tilde{A}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) \\ c_{ij} &= \left(\prod_{k=1}^m c_{ij}^k \right)^{\frac{1}{m}} \\ i, j &= 1, \dots, n \\ k &= 1, \dots, m \end{aligned}$$

معیارهای مثبت)	معیارهای منفی)
خیلی زیاد	خیلی کم
زیاد	کم
متوسط	متوسط
کم	زیاد
خیلی کم	خیلی زیاد

تعیین امتیاز فازی گزینه‌ها

با استفاده از رابطه ی (۳)، وزن کلی هر شاخص به دست خواهد آمد.

$$\tilde{w}_i = \tilde{w}_C \times \tilde{w}'_i \quad (3)$$

در رابطه ی (۳)، \tilde{w}'_i وزن جزئی فازی شاخص λ_m ، \tilde{w}_C وزن معیار مربوط به شاخص λ_m و \tilde{w}_i وزن کلی شاخص λ_m می باشند. نهایتاً، مطلوبیت فازی نهایی هر گزینه از رابطه ی (۴)، محاسبه خواهد شد.

$$\tilde{U}_j = \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \cdot \tilde{r}_{ij} \quad (4)$$

در رابطه ی (۴)، \tilde{U}_j مطلوبیت فازی نهایی گزینه ی λ_m ، \tilde{w}_i وزن فازی شاخص λ_m و \tilde{r}_{ij} امتیاز فازی گزینه ی λ_m است که از شاخص λ_m کسب شده است.

رتبه‌بندی فازی گزینه‌ها

در تحقیق حاضر، برای رتبه‌بندی گزینه‌ها از روشی استفاده خواهد شد که قابلیت لحاظ کردن وضعیت خطرپذیری^۳ شخص تصمیم‌گیرنده را نیز دارا باشد. به همین منظور از روش پیشنهادی در مطالعه ی لی کوآنگ و جی هیونگ (۱۹۹۹) استفاده شده است.

بسته به دیدگاه فردی که اعداد فازی را رتبه‌بندی می‌کند (خنثی، خوش‌بینانه و بدبینانه)، روابط (۵) الی (۷) برای غیرفازی کردن اعداد فازی قابل استفاده است. منظور

ترتیب مجموع ستونی عضو اول، دوم و سوم اعداد فازی مثلثی به دست آمده از میانگین‌گیری سطری ماتریس تلفیقی به شمار می روند. \tilde{W}_i وزن فازی نهایی به دست آمده برای هر معیار (هر سطر) است. تعیین امتیاز گزینه‌ها با استفاده از روش درجه‌بندی (ratings)

باکلی (۱۹۸۵) برای محاسبه ی امتیاز گزینه‌ها استفاده از همان روش مقایسه ی زوجی و میانگین هندسی شرح داده شده در بخش قبل را پیشنهاد کرده، منتهی در تحقیق حاضر، به منظور تعیین امتیاز گزینه‌ها بر اساس شاخصها، از روش درجه‌بندی^۱ پیشنهاد شده به وسیله ی ساعتی (۱۹۹۰) استفاده شده است. نحوه ی اجرای روش درجه‌بندی به این صورت است که تصمیم‌گیرنده، به جای آن که مانند روش معمول ماتریس مقایسه های زوجی، گزینه‌ها را با یکدیگر دو به دو مقایسه نماید، ابتدا یک مقیاس ارزیابی (کمی یا کیفی) برای شاخص مورد نظر تعیین می‌کند. برای مثال، یک شاخص کیفی ممکن است سه حالت خوب، متوسط و بد را اختیار نماید. آن گاه تصمیم‌گیرنده اجزای این مقیاس ارزیابی (در این جا همان خوب، متوسط و بد) را دو به دو با یکدیگر مقایسه می‌کند. پس از بررسی سازگاری ماتریس و تعیین وزن هر یک از اجزای مقیاس ارزیابی، وزن هر کدام از این اجزاء بر بزرگترین وزن موجود تقسیم می‌شود تا یک بهینه سازی^۲ صورت گیرد (انجام دادن این بخش الزامی نیست). آن گاه تصمیم‌گیرنده به منظور ارزیابی گزینه‌ها بر اساس آن شاخص خاص، به هر کدام از گزینه‌ها یکی از وزنها ی بهنجار شده مربوط به مقیاس ارزیابی (خوب، متوسط و بد) را تخصیص می‌دهد. در تحقیق حاضر، برای تعیین امتیاز گزینه‌ها بر اساس شاخصها، از یک مقیاس ارزیابی کیفی پنج‌تایی مطابق جدول ۳ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که الزامی برای یکسان بودن این مقیاس برای همه شاخصها وجود ندارد، لکن برای اکثر کارشناسان مورد مراجعه در این پژوهش ایجاد چند نوع مقیاس کیفی برای شاخصها معنا و مفهوم خاصی نداشت.

جدول ۳- عبارات کیفی مورد استفاده در روش درجه‌بندی

عبارات کیفی	(برای معادل کمی)	(برای)
-------------	------------------	--------

¹ Ratings

² Idealization

³ Risk tolerance

که از رابطه‌ی (۵-۲) مشخص است، در این روش در واقع امید ریاضی^۱ گزینه‌های مختلف محاسبه خواهد شد و گزینه با بالاترین مقدار امید ریاضی، گزینه‌ی برتر خواهد بود.

مطالعه‌ی موردی

در این بخش، کاربرد روش FAHP در برنامه‌ریزی برای توسعه‌ی پایدار سامانه‌های آب شهری نشان داده شده است. هدف از مطالعه‌ی موردی، انتخاب نمایشنامه‌ی پایدار توسعه برای سامانه‌ی آب شهری یک منطقه فرضی در شهر تهران به نام "شهرک" می‌باشد. لازم به ذکر است، هر چند محل اجرای مطالعه موردی یک منطقه‌ی فرضی است، اما از اطلاعات واقعی مصرف آب مربوط به بخشی از ناحیه‌ی دو منطقه دو شرکت آب و فاضلاب شهر تهران، و همچنین ویژگیهای سامانه‌ی آب شهری شهر تهران برای شبیه‌سازی سامانه‌ی آب شهری شهرک استفاده گردیده است. در ادامه این بخش، مشخصات کلی منطقه‌ی مورد مطالعه ارائه شده و سپس نتایج حاصل از اجرای مطالعه‌ی موردی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

سامانه‌ی آب شهری تهران

سامانه‌ی آب شهری تهران متشکل از سامانه‌ی تأمین و توزیع آب، سامانه‌ی جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و سامانه‌ی جمع‌آوری رواناب شهری می‌باشد. منبع اصلی تأمین آب در تهران، پنج سد مخزنی امیرکبیر (کرج)، لتیان (جاجرود)، لار، طالقان و ماملو، و همچنین چاههای آب زیرزمینی موجود در سطح شهر می‌باشند. حداقل حداکثر آب تأمین شده‌ی سالانه به وسیله‌ی مجموع سدهای مخزنی، به ترتیب ۶۴۰ و ۹۴۰ میلیون مترمکعب است. همچنین، بسته به شرایط بارندگی، برداشت از منابع آب زیرزمینی بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال

از دیدگاه خوش‌بینانه خطرپذیری بالای تصمیم‌گیرنده، منظور از دیدگاه بدبینانه خطرپذیری پائین تصمیم‌گیرنده و منظور از دیدگاه خنثی خطرپذیری متوسط می‌باشد. توضیحات بیشتر در این رابطه در مطالعه‌ی لی کوآنگ و جی هیونگ (۱۹۹۹) قابل مطالعه است. در این روابط $E_V(A)$ معادل غیرفازی عدد فازی A و $\mu_A(y)$ تابع عضویت A است.

(۵)

دیدگاه $E_V(A) = \text{Area Center of } A$

(خنثی)

(۶)

$$E_V(A) = \frac{\int_0^1 y^2 \cdot \mu_A(y) dy}{\int_0^1 \mu_A(y) dy} \quad \text{دیدگاه خوش‌بینانه}$$

(۷)

$$E_V(A) = \frac{\int_0^1 (2y - y^2) \cdot \mu_A(y) dy}{\int_0^1 \mu_A(y) dy} \quad \text{دیدگاه بدبینانه}$$

روش تصمیم‌گیری شمارش بوردا (Borda count)

با توجه به این که پس از انجام تحلیل حساسیت، تعدادی رتبه‌بندی تولید خواهد شد، برای تعیین رتبه‌بندی نهایی نیاز به روش ساده‌ای است که بتوان با استفاده از آن، رتبه‌بندی‌های به دست آمده را با یکدیگر تلفیق نمود. در مطالعه از روش شمارش بوردا استفاده شده است. اجرای این روش بدین‌صورت است که m فرد تصمیم‌گیرنده بطور جداگانه، هر کدام n گزینه‌ی موجود را به ترتیب اولویت مورد نظر خویش مرتب می‌سازند. سپس برای تعیین گزینه‌ی برتر، به هر یک از رتبه‌ها وزنی تخصیص داده می‌شود که بالاترین وزن به رتبه‌ی اول (که بطور معمول n یا $n-1$ است) و پایینترین وزن به رتبه‌ی آخر (که بطور معمول یک یا صفر است) تعلق خواهد گرفت. امتیاز نهایی یک گزینه از رابطه‌ی (۸) به دست خواهد آمد و گزینه‌ی دارای بالاترین امتیاز، گزینه‌ی برتر خواهد بود.

$$R_T = \sum_{i=1}^n w_i \cdot R_i \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸) w_i وزن تخصیص داده شده به رتبه‌ی R_i ، R_i تعداد دفعاتی که یک گزینه خاص رتبه‌ی i ام را کسب کرده و R_t امتیاز نهایی یک گزینه است. همان طور

¹ Expected value

متغیر است. در تهران پنج تصفیه‌خانه آب اصلی وجود دارند که آب را از طریق سامانه ی تک لوله‌ای برای تأمین نیازهای شرب و غیرشرب مصرف‌کنندگان مختلف توزیع می‌کنند. در تهران تعدادی چاه عمیق و نیمه‌عمیق نیز وجود دارد که مالکیت آنها با شرکت آب و فاضلاب شهر تهران نیست و عمدتاً به مصارف غیرشرب، از جمله آبیاری فضای سبز می‌رسند. عمده ی این چاهها در تملک شهرداری تهران قرار دارند. در خصوص میزان برداشت از این چاهها اطلاعات دقیقی در دست نیست (شرکت آب و فاضلاب استان تهران، ۱۳۷۹).

برای سالیان متمادی، فاضلاب خانگی در تهران از طریق چاهکهای جذبی دفع می‌گردید، منتهی آلودگی آبخوان‌ها به نیترا، و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی، عامل اصلی برای تدوین و آغاز طرح جامع فاضلاب تهران

شد. با اجرای طرح جامع فاضلاب تهران، فاضلاب از طریق سامانه ی لوله‌کشی جمع‌آوری شده و به تصفیه‌خانه ی فاضلاب جنوب تهران انتقال داده می‌شود. رواناب شهری نیز از طریق مجاری روباز و روبسته و از طریق دو مسیل اصلی که در شرق و غرب شهر واقع شده‌اند جمع‌آوری گردیده و بدون استفاده خاصی در محل به خارج از شهر انتقال داده شده و به درون رودخانه‌های اصلی همچون جاجرود و کن در جنوب شهر تخلیه می‌گردد (تجربشی و ابریشمچی، ۲۰۰۵)

سامانه ی آب شهری شهرک

مشخصات اصلی شهرک و سامانه ی آب شهری آن در جدول ۴ آمده‌اند.

جدول ۴ – مشخصات اصلی شهرک

ردیف	مشخصات	توضیحات
۱	سهم مصرف آب	مصرف کنندگان خانگی (۸۰/۴ درصد) مصرف کنندگان غیرخانگی (۱۷/۴ درصد) آبیاری فضای سبز (۲/۲ درصد)
۲	سیستم تأمین و توزیع آب	سیستم تک‌لوله‌ای که آب را برای مصارف شرب و غیرشرب بین مصرف‌کنندگان خانگی و غیرخانگی توزیع می‌کند. همچنین تعدادی چاه آب زیرزمینی در شهرک وجود دارد که آبدی و کیفیت آن‌ها برای تأمین مصارف غیرشرب مناسب است، منتهی در حال حاضر برای آبیاری فضای سبز از آن‌ها استفاده می‌شود.
۳	سیستم جمع و آوری فاضلاب	فاضلاب و رواناب شهری از طریق سیستم لوله‌کشی جمع‌آوری و به بیرون از شهرک انتقال داده می‌شود.
۴	دیگر فرضیات	فرض شده ساکنین شهرک از نظر سطح فرهنگی و درآمدی در شرایط نسبتاً مشابه‌ای به سر می‌برند.

لازم به ذکر است داده‌های مصرف آب شهرک از شرکت آب و فاضلاب شهر تهران دریافت شده و مربوط به محدوده‌ای واقع در شرق تهران با جمعیت حدود ۵۵۰۰۰ نفر و ۱۳۰۲۰ مشترک آب است که از این تعداد ۱۰۶۸۳ مشترک خانگی، ۲۳۲۸ مشترک غیرخانگی و ۹ مشترک مربوط به فضای سبز می‌باشند، که حجم مصرف آب آنها در سال ۷/۸۱ میلیون مترمکعب است که حدود ۰/۸ درصد از کل مصرف آب شهر تهران را شامل می‌شود (شرکت آب و فاضلاب شهر تهران، ۱۳۸۹).

اجرای مطالعه ی موردی

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، هدف از مطالعه ی موردی حاضر، انتخاب نمایشنامه ی پایدار توسعه برای

سامانه ی آب شهری یک منطقه فرضی در شهر تهران به نام "شهرک" می‌باشد. افق زمانی مطالعات ۱۵ سال در نظر گرفته شده است. علت اصلی این انتخاب آن است که با فرض قرار دادن سال ۲۰۱۰ میلادی به عنوان ابتدای افق زمانی، سال ۲۰۲۵ سالی است که بنا به پیش‌بینی انجام شده در گزارش موسسه ی بین‌المللی مدیریت آب (IWMI)، ایران جزء کشورهای خواهد بود که میزان تقاضای آب در آنها از میزان عرضه فزونی خواهد یافت (پنینگ دیوریس و همکاران، ۲۰۰۳). در مسأله حاضر چهار گروه اصلی تصمیم‌گیرنده شناسایی شدند:

- شرکت آب و فاضلاب منطقه
- مشترکین خدمات آب و فاضلاب

(به کارگیری تعرفه‌ی آب به عنوان عامل بازدارنده و مشوق کاهش مصرف آب)

- متناسب کردن کیفیت آب مصرفی با نوع مصرف (آب با بالاترین کیفیت برای مصارف شرب و آب با کیفیت‌های پایین‌تر برای تأمین مصارف کم‌اهمیت‌تر به کار رود)

- استفاده از منابع آب زیرزمینی موجود در محل برای تأمین بخشی از مصارف غیرشرب

- استفاده از آب خاکستری تصفیه شده در برای تأمین بخشی از مصارف غیرشرب (آب خاکستری به فاضلاب منازل غیر از آنچه از دستشویی، ظرفشویی و آشپزخانه خارج می‌شود اطلاق می‌گردد)

- استفاده از پساب تصفیه شده برای آبیاری فضاهای سبز

در نهایت شش نمایشنامه‌ی توسعه‌ی طراحی گردیدند که فهرست آنها در جدول ۶ آمده است.

لازم به ذکر است، جهت مقایسه‌ی بهتر اثرات توسعه بر وضعیت پایداری سامانه، نمایشنامه‌ی اول همان نمایشنامه‌ی ادامه وضع موجود می‌باشد. پس از تدوین نمایشنامه‌های توسعه، با مشورت و همفکری کارشناسان و متخصصین یازده شاخص توسعه‌ی پایدار در قالب چهار معیار کلی اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و فنی انتخاب گردیدند که فهرست این شاخصها و معیارها در جدول ۷ ارائه گردیده اند.

- سازمان محیط‌زیست (که نقش سازمان نظارتی را دارد)

- شهرداری منطقه

برای تکمیل پرسشنامه‌ها متخصصانی در نهادها و سازمانهای مختلف از جمله شرکت آب و فاضلاب استان تهران، کمیته‌ی محیط‌زیست و توسعه پایدار شهرداری تهران، استادان دانشگاهی و متخصصین آب و فاضلاب فعال در بخش خصوصی به عنوان نمایندگان هر کدام از گروههای تصمیم‌گیرنده انتخاب شده و در مجموع حدود سی پرسشنامه تکمیل گردید. از نظرات این تصمیم‌گیرندگان نه فقط در ارزیابی معیارهای تصمیم‌گیری استفاده شد، بلکه این افراد در تدوین و انتخاب نمایشنامه‌های توسعه نیز همکاری فعال داشتند. به منظور انتخاب نمایشنامه‌های توسعه، ابتدا و براساس ادبیات فنی در دسترس، یک تحلیل وضع موجود از نوع SWOT در مورد سامانه‌ی آب شهری تهران انجام شد تا جهت‌گیریهای کلی در مورد تدوین نمایشنامه‌های توسعه برای سامانه‌ی آب شهری شهرک مشخص گردد. نتایج این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده اند. در نهایت، و براساس نتایج تحلیل وضع موجود سامانه‌ی آب شهری تهران و نظرخواهی از کارشناسان و متخصصین پنج رویکرد زیر برای تدوین و انتخاب نمایشنامه‌های توسعه سیستم آب شهری شهرک انتخاب گردیدند: استفاده از قانون هدفمندی یارانه‌ها برای تدوین نظام تعرفه‌ای جدید

جدول ۵- نتایج تحلیل وضع موجود (SWOT) سیستم آب شهری تهران (تجربشی و ابریشمچی، ۲۰۰۵؛ شرکت آب و فاضلاب استان تهران، ۱۳۷۹)

مؤلفه‌های وضع موجود	تحلیل توضیحات
نقاط قوت (S)	- تنوع در منابع تأمین آب (آب‌های سطحی، زیرزمینی و پساب تصفیه شده)
نقاط ضعف (W)	- سیستم تعرفه‌ای ناکارآمد (کشش پائین تعرفه آب) - استفاده حجم عظیمی از منابع آب خام برای آبیاری فضای سبز - تکیه بیش از حد بر راهبردهای مدیریت عرضه و ضعف در اجرای راهبردهای مدیریت تقاضای آب
فرصت‌ها (O)	- اعمال نظام تعرفه‌ای جدید با اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها - استفاده از پساب تصفیه شده به عنوان یک منبع تأمین آب جدید - بکارگیری رویکردهای مدیریتی نوین
تهدیدها (T)	- به هم خوردن تعادل کمی آبخوان به دلیل توسعه سیستم جمع‌آوری فاضلاب - رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضای آب - میزان قابل توجه هدررفت آب (حجم بالای آب بدون درآمد)

جدول ۶ - مشخصات سناریوهای توسعه سیستم آب شهری شهرک

نام سناریو	مشخصات
یک (S ₁)	در این سناریو، شرایط قبل از اجرای طرح هدفمندی یارانه‌ها تا پایان افق زمانی ادامه می‌یابد (عدم اجرای طرح هدفمندی یارانه‌ها)، به طوری که مقدار تعرفه ی آب در ابتدای افق زمانی برابر تعرفه سال ۸۸ خواهد بود. هر چند در این گزینه تغییرات تدریجی مقدار تعرفه ی آب در طول افق زمانی محتمل است، منتهی فرض می‌شود تا پایان افق زمانی، تعرفه ی آب حداکثر برابر یک چهارم هزینه‌های تمام شده برای تأمین و توزیع آب (یعنی برابر تعرفه ی آب تعیین شده در مرحله اول طرح هدفمندی یارانه‌ها) شود. این فرض نشان‌دهنده ی این وضعیت است که در این سناریو، عملاً هیچ عامل بازدارنده ی قوی برای کاهش مصرف آب وجود ندارد. در این گزینه فرض بر آن است که تنها راهکارهای اجرا شده در راستای کاهش مصرف آب، همان برنامه‌های معمول شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور مانند برنامه‌های بازسازی و نوسازی شبکه ی توزیع آب، توزیع ابزارآلات کاهنده ی مصرف آب در میان مصرف‌کنندگان و اجرای برنامه‌های فرهنگی و آموزشی در رسانه‌ها خواهند بود.
دو (S ₂)	در این سناریو مقدار تعرفه ی آب لوله‌کشی برای تمام مشترکین در طی پنج سال اول به تدریج افزایش یافته و حداکثر تا پایان سال پنجم، برابر قیمت واقعی تمام‌شده برای آب خواهد شد. ضمناً تا پایان افق زمانی (انتهای سال پانزدهم)، تعرفه ی آب بر اساس قیمت واقعی تمام شده، محاسبه خواهد شد. در این سناریو در ساختار فیزیکی سامانه ی تأمین و توزیع آب تغییرات اساسی رخ نخواهد داد.
سه (S ₃)	در این سناریو مقدار تعرفه ی آب لوله‌کشی برای تمام مشترکین در طی پنج سال اول به تدریج افزایش یافته و حداکثر تا پایان سال پنجم، برابر قیمت واقعی تمام‌شده برای آب خواهد شد. ضمناً تا پایان افق زمانی (انتهای سال پانزدهم)، تعرفه ی آب بر اساس قیمت واقعی تمام شده محاسبه خواهد شد. از ابتدای سال ششم، شرکت آب و فاضلاب بهره‌برداری از طرحی را آغاز می‌کند که با استفاده از سامانه ی تصفیه ی آب خاکستری و اصلاح تأسیسات لوله‌کشی برای مشترکین مسکونی، آب مورد نیاز برای آبیاری باغچه منازل و سیفون سرویس بهداشتی واحدهای مسکونی از طریق آب تولیدی توسط سامانه ی تصفیه ی آب خاکستری تأمین می‌شود. به دلیل آن که این سامانه ی جدید در یک چرخه ی کاملاً بسته عمل می‌کند، تعرفه ی مجزایی بابت این سامانه تعیین نخواهد شد، منتهی شرکت آب و فاضلاب سالانه یک مبلغ ثابت (آبونمان) بابت هزینه‌های نگهداری از مشترکین اخذ خواهد کرد. فرض بر آن است که با توجه به واقعی بودن قیمت آب، صرفه‌جویی ایجاد شده در هزینه ی آب‌بها در درازمدت، جبران هزینه ی اولیه پرداخت شده برای سامانه ی تصفیه ی آب خاکستری و هزینه‌های آبونمان را کرده و همین امر به علاوه امکان پس‌انداز بیشتر مبلغ یارانه، به عنوان دو عامل مشوق، مشترکین مسکونی را جهت نصب این سامانه ترغیب خواهند کرد. در مورد مشترکین غیرمسکونی و فضای سبز، تغییری در ساختار فیزیکی سامانه ی تأمین و توزیع آب رخ نخواهد داد.
چهار (S ₄)	در این سناریو مقدار تعرفه ی آب لوله‌کشی برای تمام مشترکین در طی پنج سال اول به تدریج افزایش یافته و حداکثر تا پایان سال پنجم، برابر قیمت واقعی تمام‌شده برای آب خواهد شد. ضمناً تا پایان افق زمانی (انتهای سال پانزدهم)، تعرفه ی آب بر اساس قیمت واقعی تمام شده محاسبه خواهد شد. از ابتدای سال ششم، شهرداری و شرکت آب و فاضلاب به طور توافقی بهره‌برداری از طرحی را آغاز می‌کنند که در آن شهرداری در ازای واگذاری مالکیت چاه‌های آب خود به شرکت آب و فاضلاب، پساب تصفیه شده با قیمت مناسب دریافت می‌کند و صرفاً از همان پساب تصفیه شده جهت آبیاری فضای سبز منطقه استفاده می‌نماید. در این حالت شرکت آب و فاضلاب، آب آن دسته از چاه‌های منطقه که قبلاً متعلق به شهرداری بود را برای تأمین مصارف غیرشرب بخش غیرمسکونی تخصیص می‌دهد و با نصب تأسیسات لوله‌کشی جدید، مصارف شرب و غیرشرب این مشترکین از یکدیگر جدا خواهد شد. در این سناریو مشترکین مسکونی کماکان از سامانه قبلی و بدون هیچ تغییری استفاده می‌کنند و هیچ اقدامی در راستای جداسازی مصارف شرب و غیرشرب مشترکین مسکونی انجام نخواهد شد.
پنج (S ₅)	در این سناریو، مقدار تعرفه ی آب لوله‌کشی برای تمام مشترکین در طی پنج سال اول به تدریج افزایش یافته و حداکثر تا پایان سال پنجم، برابر قیمت واقعی تمام‌شده برای آب خواهد شد. ضمناً تا پایان افق زمانی (انتهای سال پانزدهم)، تعرفه ی آب بر اساس قیمت واقعی تمام شده، محاسبه خواهد شد. از ابتدای سال ششم، سناریو های سوم و چهارم به طور همزمان اجرا می‌شوند.
شش (S ₆)	در این سناریو، مقدار تعرفه ی آب لوله‌کشی برای تمام مشترکین در طی پنج سال اول به تدریج افزایش یافته و حداکثر تا پایان سال پنجم، برابر قیمت واقعی تمام‌شده برای آب خواهد شد. ضمناً تا پایان افق زمانی (انتهای سال پانزدهم)، تعرفه ی آب بر اساس قیمت واقعی تمام شده محاسبه خواهد شد. از ابتدای سال ششم، شهرداری بهره‌برداری از یک شبکه ی لوله‌کشی جدید در شهرک را آغاز می‌کند که منبع تأمین آب این شبکه، آب خام برداشتی از چاه‌های تحت مالکیت شهرداری است. از آب این شبکه ی جدید، برای تأمین آب مورد نیاز برای آبیاری فضای سبز منطقه، آبیاری فضای سبز و سیفون سرویس‌های بهداشتی واحدهای مسکونی و غیرمسکونی استفاده می‌شود. شهرداری ضمن نصب کنتور مجزا، بابت آب تحویل داده شده به مشترکین مسکونی و غیرمسکونی، هزینه ی واقعی خدمات ارائه شده را دریافت خواهد کرد. ضمناً آب مورد نیاز برای مصارف شرب و غیرشرب مشترکین مسکونی و غیرمسکونی، کماکان از طریق سامانه ی لوله‌کشی قبلی و توسط شرکت آب و فاضلاب و با قیمت واقعی توزیع خواهد شد. مصرف‌کنندگان برای پرداخت تعرفه ی آب دریافتی از هر دو سامانه، از دولت یارانه دریافت می‌کنند.

با بهره‌گیری از نظرات یک فرد کارشناس، نحوه ی چینش و سازمان‌دهی سؤالات انتخاب گردید. سپس براساس بازخورهای دریافت شده از تصمیم‌گیرندگان

پس پرسشنامه‌هایی برای ارزیابی نمایشنامه های توسعه بر مبنای شاخصهای توسعه ی پایدار طراحی گردیدند. پیش از ارسال پرسشنامه‌ها برای تصمیم‌گیرندگان، این پرسشنامه‌ها معیارسازی شدند، یعنی

اول رتبه‌ی دوم را کسب کرده‌اند. در نهایت، با توجه به این که عدم قطعیت‌های فراوانی در اجزای مختلف مدل نهفته‌اند، در مورد اجزای غیرقطعی شبیه تحلیل حساسیت صورت گرفته است. تحلیل حساسیت انجام شده شامل سه بخش می‌باشد. بخش اول مربوط به میزان خطرپذیری تصمیم‌گیرنده (خوش‌بین، بدبین و خنثی) در انتخاب تابع مورد استفاده برای غیرفازی نمودن امتیاز نمایشنامه هاست که قبلاً در بخش مواد و روشها به آن پرداخته شده است. در بخش دوم وزن نظرات تصمیم‌گیرندگان از حالت فعلی (وزنهای مساوی ۰/۲۵) به مقادیر حدی (۰/۱۵، ۰/۵۵ و ۰/۸۵) تغییر داده شده و اثرات آن بر رتبه‌بندی مشاهده می‌گردد. در بخش سوم شکل تابع عضویت مورد استفاده برای فازی نمودن اعداد صریح تغییر داده می‌شود که طی آن مقدار متغیر δ (دامنه‌ی تابع عضویت مثلثی شکل) از یک به صفر کاهش و از یک به دو افزایش داده شده و اثر آن بر رتبه‌بندی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای پرهیز از حجیم شدن محاسبات، صرفاً حالاتی که میزان تغییر رتبه‌بندی در آنها محسوس بوده در نظر گرفته شده‌اند. در مجموع ۴۰ حالت تحلیل حساسیت انجام شده که به همراه رتبه‌بندی اولیه ۴۱ حالت رتبه‌بندی را تشکیل می‌دهند.

برای انتخاب رتبه‌بندی نهایی از روش شمارش بوردا استفاده شده است. در این روش، رتبه‌ی اول ۵ امتیاز، رتبه‌ی دوم ۴ امتیاز و همین‌طور تا رتبه‌ی آخر یک امتیاز کسب می‌کنند. در جدول ۱۰، رتبه‌بندی نهایی به دست آمده از روش شمارش بوردا ارائه شده است.

جدول ۱۰ - رتبه‌بندی نهایی نمایشنامه‌ها با استفاده از روش شمارش بوردا

رتبه	نمایشنامه	امتیاز بوردا
۱	۲	۲۴۵
۲	۱	۱۹۷
۳	۳	۱۶۲
۴	۵	۱۵۲
۵	۴	۹۱
۶	۶	۵۱

پرسشنامه‌ها مورد صحت‌سنجی^۱ قرار گرفتند. هدف از صحت‌سنجی پرسشنامه این می‌باشد که هر سؤال دقیقاً همان تغییری را اندازه‌گیرد که برای آن پرسشنامه طراحی شده است (اصغری‌پور، ۱۳۸۲).

برای اجرای شبیه تصمیم‌گیری گروهی فازی، تصمیم‌گیرندگان در دو سطح متفاوت به ارزیابی معیارها و نمایشنامه‌های توسعه پراختند. در سطح اول، نمایندگان گروههای چهارگانه تصمیم‌گیرنده (آب و فاضلاب، مصرف‌کننده، محیط‌زیست، شهرداری) هر یک به وزن‌دهی معیارهای توسعه‌ی پایدار (اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی) پرداختند. در سطح دوم و برای جلوگیری از ایجاد قضاوت‌های سلیقه‌ای و غیرعینی^۲، یک فرد کارشناس خبره به امتیازدهی نمایشنامه‌ها بر مبنای شاخصها و معیارهای تصمیم‌گیری پرداخت. و در نهایت، نتایج به دست آمده از شبیه تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی فازی با بهره‌گیری از نظرات افراد در جایگاه مدیریتی (مدیران کلان) مورد صحت‌سنجی نهایی^۳ قرار گرفت. اهمیت این صحت‌سنجی نهایی در آن است که هر کارشناس باید نظرات سازمان خود، و نه نظرات خود را به عنوان یکی از مصرف‌کنندگان بیان می‌نمود.

در ادامه این بخش نتایج حاصل از اجرای شبیه FAHP و تحلیل حساسیت انجام شده ارائه گردیده است.

نتایج و بحث

پس از تکمیل پرسشنامه‌ها و تلفیق ماتریسهای مقایسه‌های زوجی، مقدار وزن فازی معیارهای توسعه‌ی پایدار به صورت زیر به دست آمد:

$$\tilde{W} = \begin{bmatrix} \text{Weight of Social Criterion} = (0.17, 0.25, 0.36) \\ \text{Weight of Economic Criterion} = (0.18, 0.25, 0.37) \\ \text{Weight of Environmental Criterion} = (0.16, 0.23, 0.34) \\ \text{Weight of Technical Criterion} = (0.18, 0.26, 0.38) \end{bmatrix}$$

همچنین ماتریس تصمیم‌گیری فازی نهایی مطابق جدول ۸ حاصل شد.

در نهایت امتیازهای فازی نمایشنامه‌ها، غیرفازی شده و رتبه‌بندی اولیه مطابق جدول ۹ تعیین گردیدند. همان‌طور که از جدول ۹ قابل مشاهده است، نمایشنامه‌ی دوم در مجموع رتبه‌ی اول و نمایشنامه‌ی

¹ validation

² subjective judgments

³ verification

جدول ۸- ماتریس تصمیم‌گیری فاز ی

شاخص						ناریوها
(0.15,0.27,0.4)	(0.28,0.47,0.7)	(0.15,0.27,0.4)	(0.15,0.27,0.4)	(0.08,0.14,0.2)	(0.03,0.04,0.0)	
(0.08,0.14,0.2)	(0.08,0.14,0.2)	(0.08,0.14,0.2)	(0.08,0.14,0.2)	(0.15,0.27,0.4)	(0.29,0.47,0.7)	
(0.15,0.27,0.4)	(0.28,0.47,0.7)	(0.15,0.27,0.4)	(0.15,0.27,0.4)	(0.08,0.14,0.2)	(0,0,0)	
(0.02,0.03,0.0)	(0.04,0.06,0.0)	(0.09,0.13,0.1)	(0.09,0.13,0.1)	(0.37,0.51,0.6)	(0.37,0.51,0.6)	
(0.04,0.06,0.0)	(0.09,0.13,0.1)	(0.09,0.13,0.1)	(0.37,0.51,0.6)	(0.37,0.51,0.6)	(0.37,0.51,0.6)	
(0.02,0.03,0.0)	(0.04,0.06,0.0)	(0.09,0.13,0.1)	(0.09,0.13,0.1)	(0.37,0.51,0.6)	(0.37,0.51,0.6)	
(0.04,0.06,0.0)	(0.09,0.13,0.1)	(0.09,0.13,0.1)	(0.15,0.22,0.3)	(0.15,0.22,0.3)	(0.15,0.22,0.3)	
(0.09,0.13,0.1)	(0.09,0.13,0.1)	(0.09,0.13,0.1)	(0.15,0.22,0.3)	(0.42,0.56,0.7)	(0.42,0.56,0.7)	
(0.03,0.04,0.0)	(0.04,0.06,0.0)	(0.04,0.06,0.0)	(0.39,0.53,0.7)	(0.39,0.53,0.7)	(0.39,0.53,0.7)	
(0.09,0.13,0.1)	(0.38,0.53,0.7)	(0.17,0.24,0.3)	(0.09,0.13,0.1)	(0.04,0.06,0.0)	(0.03,0.04,0.0)	I
(0.2,0.22,0.2)	(0.35,0.39,0.4)	(0.24,0.26,0.2)	(0.17,0.21,0.2)	(0.06,0.08,0.0)	(0,0,0)	I

جدول ۹- رتبه‌بندی اولیه سناریوها بر اساس دیدگاه‌های خنثی، خوش‌بینانه و بدبینانه

سناریو	نوع دیدگاه (وضعیت ریسک‌پذیری)	امتیاز	رتبه
۱	خنثی	۰/۴۳	۲
	خوش‌بینانه	۰/۲	۲
	بدبینانه	۰/۶۶	۲
۲	خنثی	۰/۴۵	۱
	خوش‌بینانه	۰/۲۵	۱
	بدبینانه	۰/۶۸	۱
۳	خنثی	۰/۳۶	۳
	خوش‌بینانه	۰/۱۴	۳
	بدبینانه	۰/۵۸	۳
۴	خنثی	۰/۲۶	۵
	خوش‌بینانه	۰/۰۷	۵
	بدبینانه	۰/۴۴	۵
۵	خنثی	۰/۳۳	۴
	خوش‌بینانه	۰/۱۲	۴
	بدبینانه	۰/۵۴	۴
۶	خنثی	۰/۱۹	۶
	خوش‌بینانه	۰/۰۴	۶
	بدبینانه	۰/۳۴	۶

همان‌طور که مشخص است، رتبه‌بندی نهایی مشابه رتبه‌بندی اولیه می‌باشد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت اثر متغیرهای غیرقطعی بر نتایج شبیه، چندان قابل توجه نبوده است.

با توجه به این که نمایشنامه‌ی اول صرفاً جهت مقایسه به کار رفته است، رتبه‌ی این نمایشنامه دلیلی بر

قابل توصیه بودن آن نیست. کسب رتبه‌ی اول به وسیله‌ی نمایشنامه‌ی دوم که صرفاً استفاده از ابزار تغییر قیمت آب را به عنوان عامل کاهنده‌ی مصرف آب شامل می‌شود، نشان می‌دهد یکی از رویکردهایی که می‌تواند بطور جدی مورد توجه مدیران و تصمیم‌گیرندگان آب شهری قرار گیرد، ابزارهای تعرفه‌ای است.

هدف از مطالعه موردی، انتخاب نمایشنامه ی برتر توسعه برای سامانه ی آب شهری یک منطقه ی فرضی می‌باشد که براساس اطلاعات یکی از مناطق تحت پوشش ناحیه ی دو آب و فاضلاب منطقه دو تهران شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق، با به کارگیری چهار معیار و یازده شاخص تصمیم‌گیری نظرات تصمیم‌گیرندگان در قالب پرسشنامه‌های تخصصی جمع‌آوری شده و شش نمایشنامه ی توسعه اولویت‌بندی شده‌اند. نمایشنامه های توسعه، پایداری سامانه را حول تعادل‌بخشی به عرضه و تقاضا و کاهش مصرف آب دنبال می‌نمایند. در رتبه‌بندی نهایی، نمایشنامه ی دوم، که صرفاً در آن افزایش تدریجی تعرفه ی آب اعمال شده بهترین رتبه را کسب کرده است. همچنین، به منظور بررسی تأثیر عدم قطعیتها در مورد نتایج شبیه تصمیم‌گیری، متغیرهای غیرقطعی مورد تحلیل حساسیت قرار گرفته‌اند. نتایج اجرای شبیه که براساس نظرات خبرگان مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است نشان می‌دهد که الگوی پیشنهادی در تحقیق حاضر می‌تواند به عنوان یک ابزار تحلیلی توانمند، فرایند تصمیم‌گیری را برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان سامانه های آب شهری تسهیل سازد و به تحقق اهداف توسعه ی پایدار در بخش مدیریت آب شهری کمک کند.

سپاسگزاری

اجرای مطالعه موردی حاضر بدون همکاری صمیمانه محققین و کارشناسان بخشهای مختلف، که پرسشنامه‌ها را تکمیل نمودند، ممکن نبود. نویسندگان مقاله از همکاری کارشناسان شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، شرکت آب و فاضلاب استان تهران، شرکت آب و فاضلاب ناحیه ی دو منطقه ی دو تهران، کمیته ی محیط‌زیست و توسعه ی پایدار شهرداری تهران، شورای شهر تهران، استادان دانشگاهی و متخصصین آب و فاضلاب فعال در بخش خصوصی، که به نحوی در به نتیجه رسیدن این تحقیق نقش داشتند، تقدیر و تشکر به عمل می‌آورند.

نمایشنامه ی ششم پایینترین رتبه را کسب نموده، که علت اصلی آن دریافت امتیازات پایین از شاخصهای اقتصادی (هزینه‌های بالا) و شاخصهای فنی (استفاده از آب خام برای آبیاری فضای سبز) است.

در گفتگو با کارشناسان و متخصصین در خصوص رتبه‌بندی نهایی به دست آمده، این نکته کسب گردید که به هنگام برنامه‌ریزی برای توسعه ی سامانه ی آب شهری، ذهنیت غالب مدیران و تصمیم‌گیرندگان آب شهری انتخاب رویکردهای سازه‌ای است در حالی که تحقیق حاضر نشان داد، رویکردهای غیرسازه‌ای، همچون ایجاد تنوع در منابع تأمین آب، برقراری تناسب در کیفیت آب تأمین شده و نوع مصرف آب، ایجاد مشوقهای مالی برای مصرف‌کنندگان ابزارهای توانمندی می‌باشند که مغفول مانده‌اند.

این تحقیق به دنبال آن است که چارچوبی نظام‌مند را برای وارد ساختن همه گروههای تصمیم‌گیرنده در زمینه ی توسعه ی سامانه های آب شهری با تأکید بر اهمیت لحاظ نمودن دیدگاه توسعه ی پایدار فراهم سازد.

به رغم آن که مطالعه موردی انجام شده در این تحقیق، یک مطالعه موردی فرضی است، منتهی نتایج کاربردی و عملی را نیز می‌توان از آن برداشت نمود. از جمله این که مزایا و معایب یک نمایشنامه توسعه باید از دیدگاه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی و با حضور همه ی گروههای تصمیم‌گیرنده، و به صورت یکپارچه، سنجیده شود، ضمن این که اجرای رویکردهایی همچون استفاده از آب خاکستری تصفیه شده برای مشترکین مسکونی شاید در نگاه اول ناشدنی و دشوار به نظر برسد، منتهی در صورتی که تعرفه ی ارائه ی خدمات آبرسانی در کشور برابر یا نزدیک به هزینه‌های تمام شده باشد، و مزایای این رویکردهای جدید نیز به درستی به مصرف‌کننده شناسانده شوند، نمایشنامه های توسعه همچون نمایشنامه ی ارائه شده در این تحقیق عملی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در مقاله ی حاضر، در قالب یک مطالعه ی موردی کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) در برنامه‌ریزی برای توسعه ی پایدار سامانه های آب شهری نشان داده شده است.

منابع

11. Chang, D. Y. 1996. Application of the extent analysis method on fuzzy AHP. *Eur. J. Oper. Res.* 95: 649-665.
12. Deng, H. 1999. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison. *Proceedings of IEEE International Fuzzy Systems Conference, Seoul, Korea*, 726-731.
13. Hellström D., Jeppsson, U., and Kärman, E. 2000. A framework for system analysis of sustainable urban water management. *Environ. Impact Assess. Rev.* 20: 311-321.
14. Khatri, K. B., Vairavamoorthy, K., and Akinyemi, E. 2011. Framework for computing a performance index for urban infrastructure systems using a fuzzy set approach. *J. Infrastruct. Syst.* 17: 163-175.
15. Lee-Kwang, H., and Jee-Hyong, L. 1999. A method for ranking fuzzy numbers and its applications to decision-Making. *IEEE Trans. Fuzzy Sys.* 7: 677-685.
16. Lundin, M., and Molander, S., Morrison, G. M. 1997. Indicators for development of sustainable water and wastewater systems. *Proceedings of Sustainable Development Research Conference, Manchester, UK*.
17. Malmqvist, and P. A., Palmqvist, H. 2005. Decision support tools for urban water and wastewater systems – focusing on hazardous flows assessment. *Water Sci. Technol.* 51: 41-49.
18. Marsalek, J., Jiménez-Cisneros, B., Karamouz, M., Malmqvist, P. A., Goldenfum, J., and Chocat, B. 2008. *Urban water cycle processes and interactions*. Jointly published by UNESCO and Taylor & Francis, Leiden, The Netherlands.
19. Ness, B., Urbel-Pillrsalu, E., Anderberg, S., and Olsson, L. 2007. Categorising tools for sustainability assessment. *Ecol. Econ.* 60: 498-508.
20. Penning de Vries, F. W. T., Acquay, H., Molden, D., et al. 2003. Integrated land and water management for food and environmental security: Comprehensive assessment of water management in agriculture. *International Water*
۱. اصغری‌پور، م. ج. ۱۳۸۲. *تصمیم‌گیری گروهی و نظریه‌ی بازی‌ها با نگرش تحقیق در عملیات*، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.
۲. شرکت آب و فاضلاب استان تهران. ۱۳۷۹. *گزارش آب شرب تهران: گذشته، حال و آینده*. واحد روابط عمومی و آموزش همگانی.
۳. شرکت آب و فاضلاب شهر تهران. ۱۳۸۹. *اطلاعات و آمار اخذ شده از واحد امور مشترکین و نظارت بر درآمد شرکت آب و فاضلاب منطقه‌ی دو شهر تهران*.
۴. شریعت، م.، آذر، ع.، ریاحی، خرم، م. ۱۳۸۲. *اولویت‌بندی روش‌های استفاده‌ی مجدد از فاضلاب شهری تصفیه شده با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)*. نمونه موردی: فاضلاب شهری همدان. *مجموعه مقالات ششمین همایش کشوری بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران*.
۵. قدسی پور، س. ج. ۱۳۸۸. *فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)*. چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۶. میان‌آبادی، ح.، افشار، ع. ۱۳۸۷. *تصمیم‌گیری چندشاخصه در رتبه‌بندی طرح‌های تأمین آب شهری*. *مجله آب و فاضلاب*، ۶۶: ۳۴-۴۵.
7. Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., Tajrishi, and M., Mariño, M. A. 2005. Case study: application of multicriteria decision making to urban water supply. *J. Wat. Resour. Plan. Mgmnt.* 131: 326-335.
8. Bellman R. E., Zadeh L. A. 1970 Decision-making in a fuzzy environment management *Sci.* 17: 141-164.
9. Buckley, J. J. 1985. Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets. Syst.* 17: 223-247.
10. Butler, D., and Parkinson, J. 1997. Towards sustainable urban drainage. *Water Sci. Technol.* 35: 53-63.

- Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.
21. Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw Hill International, NY, USA.
 22. Saaty, T. L. 1990. Ratio scales derived from perturbations of consistent judgments. *Behaviormetrika*. 17: 1-21.
 23. Söderberg, H., Kain, J. H., Åberg, H., Kärrman, E., and Van Moeffaert, D. 2004. Evaluating NAIADe with respect to stakeholder participation: Case studies of sustainable urban water management. *Proceedings of the 4th International Conference on Decision Making in Urban and Civil Engineering*, Porto, Portugal .
 24. Tajrishy, M., and Abrishamchi, A. 2005. Integrated approach to water and wastewater management for Tehran, Iran. In *Water Conservation, Reuse, and Recycling: Proceedings of an Iranian-American Workshop*, The National Academies Press, Washington, D.C, USA.
 25. Van Laarhoven, P. J. M., and Pedrycz, W. 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets. and Syst.* 11: 199-227.
 26. WCED (World Commission on Environment and Development). 1987. *Our common future*. Oxford University Press, Oxford, UK.
 27. Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Inf. Control*. 8: 338-353.
 28. Zeng, W., Pan, Y. T., and Huang, H. M. 2014. Risk analysis model for water pipeline leakage based on FAHP and BPNN, *Applied Mechanics and Materials*, 441: 1093-1096.
 29. Zimmermann, H. J. 1991. *Fuzzy sets theory and its application*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.