

2nd Asian Conference on Water & Wastewater Management PROCEEDINGS

TEHRAN: I. R. IRAN 8 - 10 , MAY.2001



کاربرد تصمیم‌گیری چند معیاره در مدیریت آب شهری

احمد ابریشم‌چی: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

علی ابراهیمیان: کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مسعود تجریشی: استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این مقاله یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره بر اساس برنامه‌ریزی سازش (Compromise Programming) برای انتخاب بهترین گزینه توزیع آب در شهرهایی که طرح انتقال آب در دست مطالعه و یا اجرا می‌باشد ارائه شده است. به منظور جبران لحاظ نشدن صریح عدم قطعیتها، تعدد مراجع تصمیم‌گیری و ضرورت هماهنگی و همکاری فشرده بین برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران در مسائل واقعی، تحلیل حساسیت جامعی روی نتایج بدست آمده انجام شده است. این تحلیل شامل تغییر در مقادیر ایده آل، مقادیر برآورد شده معیارهای غیرکمی و وزنهای به کار رفته در روش برنامه‌ریزی سازش می‌باشد. کاربرد این روش برای شهر زاهدان نشان داده شده است. در این راستا با در نظر گرفتن ۸ گزینه و ۱۳ معیار، مقایسه و رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش پیشنهادی انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این روش می‌تواند در مطالعات جامع مدیریت آب شهری مورد استفاده تصمیم‌گیران قرار گیرد. روش ارائه شده در این مقاله، با توجه به شرایط خاص هر منطقه و انجام اصلاحاتی می‌تواند در برنامه‌ریزی آب شهری دیگر شهرهای کشور نیز بکار رود.

مقدمه

در دو دهه اخیر، برنامه‌ریزی منابع آب و روشهای ریاضی ارزیابی سیستمهای آبی پیشرفتهای زیادی کرده است. روشهای سنتی تحلیل سود - هزینه و مدل‌های تک هدفه به تحلیل‌های چند هدفه تغییر یافته‌اند. تحلیل چند هدفه نیز به نوبه خود باعث ترویج شاخه‌ای از برنامه‌ریزی ریاضی به نام "بهینه‌سازی برداری"^(۱) شده

است. شروع مطالعات در این زمینه را می‌توان به (Kuhn and Tucker (۱۹۵۱) و (Koopmans (۱۹۵۱) نسبت داد. لکن تکنیک برنامه‌ریزی سازش برای نخستین بار توسط (Zeleny (۱۹۷۳) در قالب یک روش برنامه‌ریزی چند هدفه خطی ارائه شد. بعد از آن، کاربرد این تکنیک در بخشهای متعددی از برنامه‌ریزی منابع آب در مطالعات مختلف نشان داده شده است. از جمله می‌توان به مطالعات (Duckstein and Opricovic (۱۹۸۰) درباره توسعه منابع آب در حوزه آبریز، (Teclé et al. (۱۹۸۸) درباره انتخاب بهترین گزینه مدیریتی فاضلاب، (Simonovic (۱۹۸۹) در زمینه تهیه طرح‌های جامع آب ملی، (Duckstein et al. (۱۹۹۱) درباره رتبه‌بندی تکنیکهای برازش سیلابهای حداکثر، (Duckstein et al. (۱۹۹۴) درباره رتبه‌بندی گزینه‌های مدیریتی آب زیرزمینی و ابریشم‌چی و تجربی (۱۳۷۶) در زمینه برنامه‌ریزی آب برای توسعه کشاورزی اشاره کرد. از آنجا که اکثر روشهای متعارف MCDM مثل برنامه‌ریزی سازش، عدم قطعیت‌های موجود در مسأله را بطور کامل و صریح در نظر نمی‌گیرند، در سالهای اخیر ایده استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی در تحلیل‌های چند معیاره مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقاتی نیز در مورد برنامه‌ریزی سازش فازی انجام شده است که به عنوان مثال می‌توان از مطالعه (Bender (۱۹۹۶) یاد کرد.

شرایط موجود در بسیاری از شهرهای کشور که طرح انتقال آب به آنها در حال مطالعه و یا اجرا می‌باشد ایجاب می‌کند که قبل از بهره برداری از آب انتقال یافته، برنامه جامعی برای شیوه تخصیص، توزیع و مصرف آب در شهر تدوین شود. یکی از موارد مهم در این برنامه، چگونگی استفاده تلفیقی از آب انتقال یافته و منابع موجود و توزیع آنها در شهر می‌باشد. به این منظور، در این مقاله یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره^(۱) (MCDM) بر اساس تکنیک برنامه‌ریزی سازش^(۲) (CP) برای انتخاب بهترین گزینه توزیع آب انتقال یافته و موجود در شهر ارائه شده است. در این روش، برنامه‌ریزی سازش در قالب یک تحلیل حساسیت جامع انجام شده است. همچنین سعی شده است تا کاربرد این روش در یک مسأله واقعی نشان داده شود. در این راستا شهر زاهدان با دارا بودن شرایط خاص جغرافیایی، اجتماعی، سیاسی و پروژه در حال اجرای انتقال آب به این شهر به عنوان مطالعه موردی این تحقیق برگزیده شده است. نتایج بدست آمده، قابلیت کاربرد این روش را برای مدیریت عرضه آب شهری نشان می‌دهد.

برنامه‌ریزی سازش، متعلق به دسته‌ای از روشهای تحلیل چند معیاره به نام "روشهای مبتنی بر فاصله"^(۱) است. در این روش با کمینه کردن فاصله "مجموعه جوابهای غیر مغلوب"^(۲) از "نقطه ایده‌آل"^(۳)، نزدیکترین جواب غیرمغلوب به نقطه ایده‌آل (برحسب یک معیار فاصله) شناسایی و به عنوان بهترین جواب سازشی پیشنهاد می‌شود. نقطه ایده‌آل، نقطه‌ای است که مختصات آن در "فضای هدف"^(۴)، مقادیر بهینه هر یک از اهداف یا معیارها باشد. در یک مسأله چند معیاره با "معیارهای متعارض"^(۵)، این نقطه در "ناحیه جوابهای غیرممکن"^(۶) قرار دارد. هنگامی که مجموعه جوابهای ممکن X به صورت تعدادی "گزینه مجزا"^(۷) باشد، مجموعه جوابهای غیرمغلوب به مجموعه متناهی از تعدادی نقطه x تبدیل می‌شود ($x \in X$). حال اگر اندیس i نشان دهنده اهداف یا معیارهای مختلف ($i=1, \dots, I$) و $f_i(x)$ و f_i^* به ترتیب نمایانگر مقدار معیار شماره i در گزینه x و مقدار ایده‌آل معیار شماره i باشد، شکل متعارف پارامتر فاصله از ایده‌آل، $L_p(x)$ ، به صورت زیر می‌باشد:

$$L_p(x) = \left[\sum_{i=1}^I \omega_i^p (|f_i^* - f_i(x)|)^p \right]^{1/p} \quad (1)$$

روش برنامه‌ریزی سازش شامل دو نوع وزن می‌باشد. نخست پارامتر توان p ($1 \leq p \leq \infty$) که نشان‌دهنده اهمیت انحراف حداکثر از ایده‌آل و دوم، وزن ω_i که منعکس‌کننده اهمیت نسبی معیار i ام می‌باشد. مقادیر این دو پارامتر بایستی توسط تصمیم‌گیر مشخص شود. مطالعات (Freimer and Yu (۱۹۷۶) و Yu and Leitmann (۱۹۷۶) و Duckstein and Opricovic (۱۹۸۰) نشان می‌دهد که پارامتر p نقش یک عامل متعادل‌کننده را بین "مطلوبیت"^(۸) و فاصله از ایده‌آل ایفا می‌کند. به طوری‌که با افزایش p مطلوبیت کاهش می‌یابد، لکن فاصله از ایده‌آل هم کم می‌شود. در حالت $p=1$ ، مطلوبیت بیشینه و در حالت $p=\infty$ ، میزان انحراف حداکثر از ایده‌آل کمینه می‌شود.

هنگام سروکار داشتن با توابع هدف یا معیارهای "غیرهمجنس"^(۹) که نمی‌توان آنها را برحسب واحدهای

1. Distance - Based Methods

2. Nondominated Solution Set

3. Ideal Point

4. Objective Space

5. Conflicting Criteria

6. Nonfeasible Region

7. Discrete Alternatives

8. Utility

9. Noncomensurable

یکسانی بیان کرد، با نرمال سازی همه اهداف یا معیارها (معمولاً در محدوده ۱ و ۰) مقایسه بین آنها امکان پذیر می شود. این کار با تقسیم میزان انحراف هر یک از معیارها از ایده آل بر تفاضل مقادیر ایده آل و "ضدایده آل"^(۱) معیار مربوطه انجام می شود. در این حالت، پارامتر فاصله به صورت زیر تعریف می شود:

$$L_p(x) = \left[\sum_{i=1}^I \omega_i^p \left(\left| \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_{i*}} \right| \right)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

که در آن f_i^* و f_{i*} به ترتیب، مقادیر ایده آل و ضدایده آل معیار شماره i هستند.

پس از تعیین فاصله گزینه های مختلف x از ایده آل، جواب سازشی، x_{CP} ، بادر نظر گرفتن مقادیر p و ω_i از حل مسأله بهینه سازی زیر به دست می آید.

$$\text{Minimize } L_p(x) \quad (3)$$

$$\text{Subject to: } x \in X$$

در این مطالعه، تحلیل چند معیاره با استفاده از دو ایده مختلف برای مقادیر ایده آل در قالب روشهای ۱ و ۲ انجام شده است. در ادامه، اصول و فرضیات هر روش مورد اشاره قرار می گیرد. روش ۱- از آنجاکه در اکثر مسائل واقعی، به دلیل پیچیدگی مسأله، تعیین مقادیر ایده آل و ضدایده آل کار ساده ای نیست، لذا به جای این دو مقدار از مقادیر ایده آل و ضدایده آل جایگزین استفاده می شود (۱۹۸۲ و Zeleny ۱۹۷۳). این مقادیر از روابط زیر به دست می آیند:

$$f_{i,b} = f_{ij} \text{ مقدار بهترین}, i = 1, \dots, I \quad (4)$$

$$j \in J$$

$$f_{i,w} = f_{ij} \text{ بدترین مقدار}, i = 1, \dots, I \quad (5)$$

$$j \in J$$

در روابط فوق، اندیس نشان دهنده گزینه های مختلف می باشد. معیار فاصله در این روش به صورت زیر

در نظر گرفته می شود:

$$L_p^j = \left[\sum_{i=1}^I \omega_i^p \left(\left| \frac{f_{i,b} - f_{ij}}{f_{i,b} - f_{i,w}} \right| \right)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad j = 1, \dots, J \quad (6)$$

که در آن:

$L_p^j =$ فاصله گزینۀ j تا جواب ایده آل ($j \in J$)

$\omega_i =$ وزن معیار شماره i ($i = 1, \dots, I$)

$f_{ij} =$ مقدار معیار شماره i در گزینه j

$p =$ پارامتر توان که نظر تصمیم گیر را منعکس می کند ($1 \leq p \leq \infty$)

$f_{i,b} =$ مقدار ایده آل جایگزین برای معیار شماره i

$f_{i,w} =$ مقدار ضدایده آل جایگزین برای معیار شماره i

در حالت $p = \infty$ ، برنامه ریزی سازش منجر به تعیین جواب حداقل حداکثر (min-max) می گردد. این

جواب از رابطه زیر به دست می آید:

$$\min \max \left| \frac{f_{i,b} - f_{ij}}{f_{i,b} - f_{i,w}} \right| \quad (7)$$

روش ۲ - تفاوت این روش با روش قبلی در تعریف مقادیر ایده آل جایگزین می باشد. در این روش، مقادیر ایده آل جایگزین برای معیارهای کمی از همان روابط ۴ و ۵ به دست می آید. اما این مقادیر برای آن دسته از معیارها که به صورت ذهنی برآورد می شوند، بسته به اینکه هر معیار بایستی بیشینه یا کمینه شود، برابر با حد بالایی یا پایینی در نظر گرفته شده برای مقدار آن معیار فرض می شود. در واقع، شاید در این حالت اطلاق عنوان "ایده آل" به مقادیر مورد نظر زیاد صحیح نبوده و این مقادیر به مفهوم "نقاط آرمانی"^(۱) نزدیکتر باشند. مقادیر ایده آل (یا آرمانی) مورد بحث در این قسمت با علامت $f'_{i,w}$ و $f'_{i,b}$ مشخص شده است. سایر اصول و فرضیات این روش مانند روش اول است.

تحلیل حساسیت

در روش برنامه ریزی سازش، عدم قطعیت به طور صریح در نظر گرفته نمی شود. لکن با انجام تحلیل حساسیت می توان این ضعف را تا حدودی جبران کرد. در این مطالعه، استفاده از روشهای اول و دوم در واقع به

منظور تحلیل حساسیت نتایج نسبت به مقدار ایده آل (یا آرمانی) در نظر گرفته شده می باشد. همچنین در روش مورد نظر این مطالعه، با در نظر گرفتن مقادیر مختلفی برای برآورد ذهنی معیارهای غیر کمی، تحلیل حساسیت در این زمینه انجام می شود. از طرف دیگر به دلیل تعدد مراجع تصمیم گیری در مسائل واقعی، و امکان پذیر نبودن همکاری نزدیک بین تحلیل گر و تصمیم گیر با در نظر گرفتن مقادیر مختلفی برای هر دو نوع وزن مورد نظر در برنامه ریزی سازش یعنی p و w_i ، تحلیل حساسیت در این زمینه نیز صورت می گیرد.

مطالعه موردی

در این تحقیق مطالعه موردی برای شرایط شهر زاهدان انجام شده است. این شهر با مساحتی حدود ۶۰ کیلومتر مربع، مرکز استان سیستان و بلوچستان بوده و در شمال این استان قرار دارد. این منطقه دارای آب و هوای بیابانی و نیمه بیابانی با تابستانهای بسیار طولانی، گرم و خشک و زمستانهای کوتاه سرد و خشک، پتانسیل تبخیر بالا و نزولات جوی کم می باشد. در حال حاضر آب مورد نیاز شهر زاهدان از سفره آبرفتی داخل و خارج شهر توسط ۳۸ حلقه چاه عمیق تأمین می شود. این شهر دارای دو شبکه جداگانه برای توزیع آب بهداشتی (شور) و شرب (شیرین) می باشد. شبکه آب بهداشتی این شهر حدود ۳۵ سال قدمت دارد. عمر زیاد شبکه و شوری بیش از حد آب باعث فرسودگی و از بین رفتن شبکه شده است. از طرف دیگر تنها حدود ۶۵ درصد از منازل شهر تحت پوشش این شبکه قرار دارند. شبکه آب شرب بسیار کوچک و محدود بوده و آب شرب این شبکه از طریق شیرهای برداشت عمومی واقع در سطح شهر در اختیار مردم قرار می گیرد. نارسائیهای موجود در این شبکه و کمبود آب در سالهای اخیر باعث شده تا در بسیاری از مواقع آب این شیرها قطع باشد. از اینرو، اکثر مردم آب شرب مورد نیاز خود را از تانکرهای حامل آب شیرین خریداری می کنند. این تانکرها آب شیرین را از چند حلقه چاه واقع در غرب شهر زاهدان (جاده چشمه زیارت) و جنوب شرقی این شهر (میرجاوه) برداشت و در شهر توزیع می کنند. علاوه بر مشکلات بهداشتی ناشی از این روش توزیع آب شرب، آبدهی چاههای مذکور نیز اخیراً به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. بنابراین به منظور تأمین آب مورد نیاز شهر زاهدان در سالهای آتی، پروژه انتقال آب از مخازن چاه نیمه (واقع در ۲۰۰ کیلومتری شمال شرقی زاهدان) به این شهر در دست اجراست. با نزدیک شدن به زمان بهره برداری از این طرح، مواردی مانند چگونگی توزیع آب بین مصرف کنندگان، الگوی تخصیص و مصرف آب در شهر و مشکلاتی که بعد از رسیدن آب به شهر ممکن است رخ دهد (مثل افزایش ناگهانی جمعیت و یا مصرف سرانه) از جمله مسائلی اند که بیش از پیش نمایان

می‌شوند. برنامه‌ریزی برای مواجهه با چنین مسائلی نیازمند انجام مطالعات جامع مدیریت آب شهری، قبل از بهره‌برداری از طرح انتقال آب، می‌باشد. در این مقاله چگونگی توزیع آب چاه نیمه‌ها و آب چاههای موجود، با استفاده از روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

معیارها: اهداف یا معیارهایی که برای هر مسأله بایستی در نظر گرفته شود به نوع، ساختار و میزان پیچیدگی مسأله بستگی دارد. در این مطالعه با توجه به نوع مسأله و پیچیدگی آن و همچنین شرایط خاص (وگاه منحصر به فرد) شهر زاهدان از نظر جغرافیایی، اجتماعی، سیاسی و پروژه در حال اجرای انتقال آب به این شهر، ۱۳ معیار مختلف برای ارزیابی گزینه‌ها در نظر گرفته شده است. این معیارها که شامل معیارهای اقتصادی، فنی، اجتماعی، سیاسی، بهداشتی و زیست محیطی می‌شوند به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- هزینه، ۲- زمان وقوع کمبود آب، ۳- سرعت اجرای طرح، ۴- امکان توسعه طرح در آینده، ۵- کیفیت آب، ۶- حفظ محیط زیست، ۷- انعطاف پذیری طرح، ۸- اشتغالزایی، ۹- اثرات جمعیتی، ۱۰- سطح رضایت مردم (مقبولیت طرح بین عامه مردم)، ۱۱- کنترل تقاضای آب (پایین نگاه داشتن مصرف سرانه)، ۱۲- اثرات بهداشتی، ۱۳- اثرات تبلیغاتی و سیاسی

وزنها: در این مطالعه، تحلیل چند معیاره با در نظر گرفتن سه مقدار ۱، ۲ و ∞ برای پارامتر توان (p) و شش مجموعه مختلف برای وزن معیارها ($W_k, k=1, \dots, 6$) انجام شده است. این مجموعه وزنها به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که دامنه وسیعی از سلیقه‌ها و اولویت‌های مورد نظر تصمیم‌گیران مختلف را تحت پوشش قرار دهند. به بیان دیگر، سعی شده است که با نزدیکی هر چه بیشتر این مجموعه‌ها به وزنه‌های مورد نظر هر یک از مراجع واقعی تصمیم‌گیری، حالت "چند تصمیم‌گیرنده"^(۱) نیز در مسأله لحاظ شود. مجموعه وزنه‌های W_k در جدول ۱ نشان داده شده است. در تنظیم این جدول، همه وزنه‌های مجموعه W_1 یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین سعی شده که مجموعه‌های W_2 و W_6 به ترتیب نشان دهنده اولویت‌های مورد نظر محلی‌ترین و کلان‌ترین مراجع تصمیم‌گیری باشد. به بیان دیگر، با حرکت از مجموعه W_2 به سمت W_6 ، به تدریج از اهمیت معیارهای فنی، اقتصادی و تأمین آب کاسته شده و به اهمیت معیارهای اجتماعی افزوده می‌شود. در این

جدول مشاهده می شود که مجموع وزنهای هر مجموعه برابر ۱۳، یعنی تعداد معیارها می باشد. از اینرو، دیگر نیازی به نرمال سازی مقادیر این جدول نیست.

جدول ۱ - مجموعه وزنهای در نظر گرفته شده (W_k) برای معیارهای مختلف

W_6	W_5	W_4	W_3	W_2	W_1	W_k	معیارها
۱/۳	۱	۱/۷	۱/۴	۱	۱	۱	۱
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۱/۶	۱/۴	۱	۲	۲
۰/۴	۰/۴	۰/۵	۱/۱	۱/۵	۱	۳	۳
۰/۷	۰/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۶	۱	۴	۴
۰/۹	۱/۶	۱/۱	۰/۹	۱/۴	۱	۵	۵
۰/۵	۱/۷	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۱	۶	۶
۰/۵	۰/۵	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱	۷	۷
۱/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۴	۱	۸	۸
۱/۵	۱/۶	۰/۹	۱/۲	۱/۱	۱	۹	۹
۱/۵	۱/۱	۱	۰/۵	۰/۵	۱	۱۰	۱۰
۰/۹	۰/۸	۱/۵	۱/۶	۱	۱	۱۱	۱۱
۱/۵	۱/۶	۱	۰/۵	۰/۹	۱	۱۲	۱۲
۱/۴	۱/۳	۱/۱	۰/۵	۰/۴	۱	۱۳	۱۳

گزینه ها: با توجه به شرایط و محدودیت های موجود در منطقه و همچنین با در نظر گرفتن نظرات مدیران و مسئولین بخش آب شهر زاهدان و پیروی از سیاست های کلی وزارت نیرو در بخش آب شهری، در این مرحله ۸ گزینه برای توزیع آب موجود و انتقال یافته در شهر زاهدان در نظر گرفته شده است. این گزینه ها به شرح زیر می باشند:

گزینه ۱- احداث یک شبکه جدید توزیع آب (و توزیع آب شرب و بهداشتی از طریق این شبکه)

گزینه ۲- احداث دو شبکه مجزای جدید برای آب شرب و بهداشتی

گزینه ۳- احداث شبکه جدید آب شرب و توسعه شبکه موجود آب بهداشتی

گزینه ۴- احداث شبکه کوچک جدید آب شرب (شیرهای برداشت عمومی) و توسعه شبکه موجود

آب بهداشتی

گزینه ۵- توسعه دو شبکه موجود

- گزینه ۶- احداث شبکه کوچک جدید آب شرب، توسعه شبکه موجود آب بهداشتی و تحویل آب شرب به شهروندان از طریق بطری‌های بسته بندی شده
- گزینه ۷- توسعه دو شبکه موجود و تحویل آب شرب به شهروندان از طریق بطری‌های بسته بندی شده
- گزینه ۸- توسعه دو شبکه موجود و احداث انشعابات خصوصی آب شرب (انشعابات برتر)

ارزیابی گزینه‌ها

در بین معیارهای در نظر گرفته شده، معیارهای هزینه و زمان وقوع کمبود به صورت کمی و بقیه معیارها به صورت ذهنی برآورد می‌شوند. در این قسمت به منظور تحلیل حساسیت نتایج نسبت به مقادیر برآورد شده برای برخی از معیارهای غیرکمی (معیارهای ۳ تا ۱۳)، با در نظر گرفتن فرضیات مختلف، چند مقدار متفاوت برآورد شده است. برای ارزیابی گزینه‌ها برحسب معیارهای غیرکمی از اعداد بین ۱ تا ۱۰ استفاده شده است. مقادیر برآورد شده برای معیار زمان وقوع کمبود، نشان دهنده فاصله زمانی وقوع کمبود نسبت به سال ۱۳۸۰ می‌باشد. ریز محاسبات انجام شده و فرضیات در نظر گرفته شده برای ارزیابی گزینه‌ها در مرجع شماره ۱ آمده است.

با توجه به وجود دو حالت مختلف در برآورد گزینه‌ها براساس هر یک از معیارهای شماره ۳ و ۴ و همچنین لحاظ شدن دو حالت اختصاص یا عدم اختصاص یارانه به گزینه‌های ۶ و ۷ (و تغییرات حاصله در مقادیر برآورد شده برخی از معیارها در اثر این امر)، هشت حالت مختلف ($2 \times 2 \times 2 = 8$) برای ارزیابی گزینه‌ها برحسب معیارها وجود دارد. این هشت حالت به صورت هشت ماتریس به اسامی ۱ تا ۸ TAB در نظر گرفته شده‌اند. سطرها و ستونهای این ماتریس‌ها به ترتیب نماینده معیارها و گزینه‌های مختلف می‌باشند. لذا هر یک از ماتریسهای TAB_i ($i=1, \dots, 8$) دارای ابعاد 13×8 می‌باشد ($[TAB_i] 13 \times 8$). به عنوان نمونه ماتریس ۵ TAB در جدول ۲ نشان داده شده است. "نماد ارجحیت" در ستون سوم این جدول، مشخص کننده گزینه‌هایی است که از نظر معیار مورد نظر، وضعیت بهتری دارند. به عنوان مثال در حالتی که نماد ارجحیت معیاری به صورت ">" باشد یعنی هر چه مقدار این معیار برای یک گزینه بزرگتر باشد، این گزینه از وضعیت بهتری نسبت به سایر گزینه‌ها برخوردار است. عکس این مطلب نیز برای نماد "<" صادق است.

جدول ۲- یک حالت از ماتریس سیستم - معیار

معیارها	واحد	جهت ارجحیت	گزینه‌ها								
			۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	
TAB ۵	۱	میلیون ریال	<	۸۹۳۶۰	۱۷۸۷۲۰	۱۱۵۶۱۰	۳۱۰۲۰	۲۸۶۳۵	۱۳۱۳۹۵	۱۲۹۰۱۰	۲۸۶۳۵
	۲	سال	>	۰	۰	۰	۱/۹۷	۱/۹۷	۳/۲۲	۳/۲۲	۰
	۳	۱-۱۰	>	۴	۲	۳	۷	۸	۷	۸	۶
	۴	۱-۱۰	>	۷	۸	۵	۳	۱	۴	۲	۹
	۵	۱-۱۰	>	۴	۷	۶	۳	۲	۹	۸	۵
	۶	۱-۱۰	>	۶	۴	۵	۷	۹	۳	۳	۸
	۷	۱-۱۰	>	۷	۸	۶	۳	۱	۴	۲	۵
	۸	۱-۱۰	>	۴	۶	۵	۲	۱	۷	۷	۳
	۹	۱-۱۰	<	۹	۹	۹	۳	۳	۷	۷	۵
	۱۰	۱-۱۰	>	۹	۱۰	۸	۴	۳	۶	۵	۱
	۱۱	۱-۱۰	>	۳	۵	۵	۷	۷	۹	۹	۴
	۱۲	۱-۱۰	>	۵	۷	۶	۳	۱	۹	۸	۲
	۱۳	۱-۱۰	>	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۵	۸	۸	۱

نتایج و بحث

محاسبات روش اول برای حالت ۲ و ۱ و $p = \infty$ براساس روابط ۳ تا ۶ و برای حالت $p = \infty$ براساس رابطه ۷ انجام شده است. برای انجام محاسبات روش دوم، مقادیر ایده آل و ضدایده آل جایگزین برای معیارهای غیرکمی که بایستی بیشینه شوند به صورت $f'_{i,b} = 10$ و $f'_{i,w} = 1$ و برای معیارهای غیرکمی که بایستی کمینه شوند به صورت $f'_{i,b} = 1$ و $f'_{i,w} = 10$ در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این فرض، محاسبات روش دوم نیز بر اساس همان روابط ۳ تا ۷ انجام شده است. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد به منظور تحلیل حساسیت نتایج نسبت به مقادیر p ، ω_i و f_{ij} ، برای هر یک از مقادیر یاد شده به ترتیب ۳، ۶ و ۸ حالت مختلف در نظر گرفته شده است. لذا تعداد حالات موجود در هر روش برابر $3 \times 6 \times 8$ یا ۱۴۴ حالت می باشد. برای انجام تحلیل چند معیاره در هر حالت و براساس هر یک از دو روش یاد شده، یک برنامه کامپیوتری به نام CPUM تهیه شده است. نمونه‌ای از نتایج بدست آمده برای حالت‌های مختلف روش‌های اول و دوم در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳- تأثیر مقادیر مختلف p و W_k بر رتبه بندی بهترین گزینه ها

در حالت ۱ از روش اول

	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6
$p=1$	۶	۶	۶	۶	۶	۶
	۷	۷	۷	۲	۲	۲
	۲	۴	۴	۷	۴	۷
$p=2$	۶	۶	۶	۶	۴	۶
	۴	۷	۴	۳	۳	۳
	۷	۴	۷	۴	۱	۱
$p=\infty$	۴	۴	۴	۴	۴	۴
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-

جدول ۴- تأثیر مقادیر مختلف p و W_k بر رتبه بندی بهترین گزینه ها

در حالت ۱ از روش دوم

	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6
$p=1$	۶	۶	۶	۶	۲	۲
	۷	۷	۷	۲	۶	۶
	۲	۴	۴	۱	۳	۳
$p=2$	۶	۶	۶	۶	۳	۳
	۴	۷	۴	۱	۴	۶
	۷	۴	۷	۳	۱	۱
$p=\infty$	۶	۶	۶	۶	۶	۶
	۴ و ۷	۴ و ۷	۴ و ۷	۴ و ۷	۴ و ۷	۴ و ۷
	-	-	-	-	-	-

مراجعه به ریز نتایج بدست آمده نشان می دهد که برای حالت $p=\infty$ در روش اول، گزینه ۴ در تمام حالات دارای رتبه اول بوده و سایر گزینه ها از وضعیت یکسانی برخوردارند. این در حالی است که در همین حالت از روش دوم، گزینه ۶ در تمام حالات دارای رتبه اول بوده و گزینه های ۴ و ۷ در جای دوم قرار گرفته اند. لذا می توان گفت که گزینه های ۴، ۶ و ۷ از وضعیت بهتری برخوردارند.

نکته قابل توجه دیگر این که با فاصله گرفتن از سیاستهای محلی و منطقه ای بخش آب شهری و نزدیک

شدن به سیاستهای کلان دولت در این زمینه (حرکت از وزن W_4 به سمت W_6)، گزینه‌های مربوط به احداث شبکه سراسری آب شرب اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. چنانکه در نتایج هر دو روش مشاهده می‌شود که موارد قرار گرفتن گزینه ۳ در رتبه اول تا سوم، مربوط به وزنهای W_4 تا W_6 بوده است.

نتایج بدست آمده از هر دو روش نشان می‌دهد که موارد قرارگیری گزینه ۲ در مکانهای اول تا سوم فقط مربوط به حالت $p=1$ می‌باشد. از طرف دیگر موارد قرارگیری گزینه شماره ۳ در رتبه اول تا سوم روش اول، محدود به حالت $p=2$ می‌شود. توجیه این امر شاید با توجه به نقش متعادل کننده پارامتر p (که قبلاً به آن اشاره شد) امکان پذیر باشد.

برای انتخاب نهایی بهترین گزینه، اگر حالت خاصی از i TAB، W_k ، p مدنظر تصمیم‌گیران باشد، با مراجعه به نتایج به دست آمده برای آن حالت خاص، جواب نهایی را می‌توان انتخاب کرد. لکن در مسائل واقعی به دلیل پیچیدگی مسأله و تعدد تصمیم‌گیران، انتخاب یک گزینه به عنوان جواب بهینه، کاری بسیار مشکل است. از اینرو، در چنین مواردی بهتر است به جای جستجوی گزینه بهینه، جستجو برای یافتن "پایدارترین گزینه" صورت گیرد. منظور از پایدارترین گزینه، گزینه برتری است که کمترین حساسیت را نسبت به تغییر در مقادیر p ، W_k و i TAB و نیز نسبت به تغییر در روش مورد استفاده از خود نشان دهد. به بیان دیگر، گزینه‌ای که در بین حالات در نظر گرفته شده، تعداد دفعات بیشتری در رتبه اول قرار گیرد، پایدارترین گزینه است. به همین منظور و برای پیدا کردن پایدارترین گزینه، نتایج به دست آمده از ترکیبات مختلف i TAB و W_k در هر دو روش برای $p=1$ و $p=2$ در جدول ۵ و برای $p=\infty$ در جدول ۶ ارائه شده است. در این جدولها، n نشان دهنده تعداد دفعاتی است که هر گزینه در رتبه مورد نظر قرار می‌گیرد.

جدول ۵ - جستجوی پایدارترین گزینه برای حالت‌های $p=1$ و 2

گزینه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	n
رتبه ۱	۰	۸	۸	۴	۰	۱۷۲	۰	۰	
رتبه ۲ و ۳	۳۳	۵۷	۴۴	۵۹	۰	۱۲	۱۴۰	۱۴	
رتبه ۴ تا ۸	۱۵۹	۱۲۷	۱۴۰	۱۲۹	۱۹۲	۸	۵۲	۱۷۸	

جدول ۶ - جستجوی پایدارترین گزینه برای حالت $p = \infty$

گزینه n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
رتبه ۱	۰	۰	۰	۸	۰	۸	۰	۰
رتبه ۲ و ۳	۰	۰	۰	۸	۰	۰	۸	۰
رتبه ۴ تا ۸	۱۶	۱۶	۱۶	۰	۱۶	۸	۸	۱۶

با توجه به جدولهای فوق مشخص می شود که گزینه ۶ در بین گزینه های موجود، پایدارترین گزینه است. حساسیت این گزینه نسبت به تغییرات انجام شده به قدری کم است که این گزینه در ۹۰ درصد کل حالات (۱۷۲ حالت) در رتبه اول و در ۹۶ درصد کل حالات (۱۸۴ حالت) نیز در رتبه اول تا سوم قرار داد. گزینه ۶ از نظر معیار حداقل حداکثر نیز وضعیت بدی نداشته و در نیمی از حالت های در نظر گرفته شده برای این معیار، در رتبه اول قرار می گیرد. همچنین با وجود اینکه گزینه ۷ در هیچ یک از حالت های بررسی شده، در رتبه اول قرار نگرفته، لکن در ۷۳ درصد حالات (۱۴۰ حالت) در رتبه دوم یا سوم جای می گیرد. این گزینه در ۵۰ درصد حالت های در نظر گرفته شده برای معیار حداقل حداکثر نیز در رتبه دوم قرار گرفته است. از اینرو، این گزینه در انتخاب نهایی نباید از نظر دور بماند. گزینه های ۵، ۸ و ۱ بدترین وضعیت را در بین گزینه ها دارند. گزینه ۵ در کل حالات دو روش حتی یک بار هم در رتبه اول تا سوم قرار نگرفته است.

جمع بندی

در این مقاله، تحلیل حساسیت در قالب چهار مورد تغییر در مقادیر ایده آل و ضد ایده آل (I_i^* و I_i^*)، مقدار برآورد شده معیارهای غیرکمی (TAB_i)، مقدار پارامتر توان (p) و مقدار وزن معیارها (W_k) انجام شده است. به دلیل پیچیدگی مسأله مورد بحث و تعدد تصمیم گیران، انتخاب یک گزینه به عنوان جواب بهینه، کاری بسیار مشکل و بعضاً امکان ناپذیر است. به همین دلیل به جای جستجوی گزینه بهینه، جستجو برای یافتن پایدارترین گزینه صورت گرفته است.

نتایج بدست آمده نشان می دهد که روش پیشنهادی در این مقاله، قابلیت خوبی برای کاربرد در مسائل مدیریت آب شهری دارد. همچنین با توجه به شرایط خاص هر منطقه و با در نظر گرفتن تغییراتی در ساختار

مسئله، این روش می‌تواند در برنامه‌ریزی آب شهری شهرهای دیگری از کشور نیز که طرح انتقال آب به آنها در حال مطالعه یا اجرا می‌باشد بکار رود.

نتایج کلی به دست آمده از مطالعه موردی را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- با توجه به نتایج به دست آمده در حالت‌های مختلف برای گزینه‌های ۶ و ۷، اهمیت موضوع بسته بندی آب شرب در بطری نمایان می‌شود. به عبارت دیگر، بسته‌بندی آب شرب در بطری، موردی است که در تصمیم‌گیری‌های آتی همواره بایستی مدنظر قرار گیرد. البته به کار کارشناسی بیشتری راجع به این موضوع و به خصوص راجع به بحث اختصاص یارانه به این بخش و تأثیر آن در ارزیابی معیارهای مختلف نیاز است.

۲- بحث احداث انشعابات برتر و نیز یک شبکه‌ای کردن سیستم توزیع آب در شهر زاهدان مناسب به نظر نمی‌رسد. ضمن اینکه در حالت دو شبکه‌ای نیز، گزینه توسعه دو شبکه موجود، به تنهایی گزینه مناسبی نیست.

۳- به طور کلی با در نظر گرفتن معیار پایداری گزینه‌ها، جهت تصمیم‌گیری‌های آتی در این زمینه بایستی بیشتر به سمت توسعه و بازسازی شبکه موجود بهداشتی، احداث شبکه توزیع آب شرب به صورت شیرهای برداشت عمومی (در نقاط مختلف شهر و به صورت سامان یافته‌تر) و توزیع آب شرب در بطری متمایل باشد. در واقع، پیشنهاد نهایی این مطالعه، بررسی بیشتر روی موارد یاد شده در بالا و ایجاد گزینه‌های جدید بر مبنای این موارد است.

در مطالعات آتی، با تحلیل دقیقتر هزینه‌های مربوط به هر گزینه و بررسی بیشتر راجع به بحث اختصاص یارانه به بطری‌های آب شیرین از یک طرف و در نظر گرفتن حالت‌های بیشتر و کاملتر برای ارزیابی‌های ذهنی، وزن معیارها و مقادیر آرمانی از طرف دیگر می‌توان به جواب‌های قابل اعتمادتری دست یافت. به عبارت دیگر، انجام تحلیل حساسیت کاملتری توصیه می‌شود. همچنین برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مسأله، استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی چندمعیاره فازی و مقایسه جواب‌های به دست آمده با جواب‌های این مطالعه پیشنهاد می‌شود.

- ۱- ابراهیمیان، علی، کاربرد تصمیم‌گیری چند معیاره در مدیریت آب شهری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۹.
- ۲- ابریشم‌چی، احمد و تجریشی، مسعود، "تصمیم‌گیری چندمعیاره در برنامه‌ریزی آبیاری"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، جلد چهارم، ص ۷۹-۸۸، اردیبهشت ۱۳۷۶.
- 3- Bender, M. J., "A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty", Third IHP/IAHS George Kovacs Colloquium, UNESCO, Paris, Sept. 1996.
- 4- Bogardi, J. J., and Nachtnebel, H. P., Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management, International Training Centre (PHLO) and the Department of Water Resources of the Wageningen Agricultural University, the Netherlands, 1992.
- 5- Cohon, J. L., and Marks, D. H., "A review and evaluation of multiobjective programming techniques", Water Resources Research, Vol. 11, No. 2, 208-220, 1975.
- 6- Cordeiro Netto, O., Parent, E., and Duckstein, L., "Multicriterion design of long-term water supply in southern France", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 122, No. 6, 403-413, 1996.
- 7- David, L., and Duckstein, L., "Multi-criterion ranking of alternative long-range water resource systems", Water Resources Bulletin, Vol. 12, No. 4, 731-754, 1976.
- 8- Duskstein, L., Bobee, B., and Ashkar, F., "A multiple criteria decision modeling approach to selection of estimation techniques for fitting extreme floods", Stochastic Hydro. and Hydr., Vol. 5, No. 3, 227-238, 1991.
- 9- Duckstein, L., and Opricovic, S., "Multiobjective optimization in river basin development", Water Resources Research, Vol. 16, No. 1, 14-20, 1980.
- 10- Duckstein, L., Treichel, W., and El Magnouni, S., "Ranking ground-water management alternatives by multicriterion analysis", Journal of Water Resources Planning and

Management, ASCE, Vol. 120, No. 4, 546-565, 1994.

- 11- Freimer, M., and Yu, P.L., "Some new results on compromise solutions for group decision problems", *Management Science*, Vol. 22, No. 6, 688-693, 1976.
- 12- Roy, B., Slowinski, R., and Treichel, W., "Multicriteria programming of water supply systems for rural areas", *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, No. 1, 13-31, 1992.
- 13- Simonovic, S., "Application of water resources systems concept to the formulation of a water master plan", *Water International*, Vol. 14, 37-50, 1989.
- 14- Teclé, A., Fogel, M., and Duckstei, L., "Multi-criterion selection of wastewater management alternatives", *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 114, No. 4, 383-398, 1988.
- 15- Zeleny, M., *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, New York, 1982.