

## کاربرد روش سیستم استنتاج فازی در انتخاب گزینه مناسب سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای (مطالعه موردی: طرح انتقال آب بهشت‌آباد)

عفت زمانی گندمانی<sup>۱\*</sup>، سعید گیوه‌چی<sup>۲</sup> و داوود رضا عرب<sup>۳</sup>

### چکیده

نیاز روزافزون منابع آب برای اهداف مختلف همچون کشاورزی، شرب و صنعت، دستیابی به آب در دسترس و قابل استفاده را با مشکلات و محدودیت‌های فراوانی مواجه کرده است. در چنین شرایطی، برای تأمین منابع آب جدید، طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای به بخشی از سیاست‌های مدیریتی در کشور تبدیل می‌شود. در این طرح‌ها، بعضی ظرفیت‌های حوضه مبدأ و مقصد به درستی ارزیابی نمی‌شود و با وجود روش‌های متنوع تصمیم‌گیری چندمعیاره، که با در نظر گرفتن کلیه معیارهای مؤثر در تصمیم‌گیری به تعیین گزینه برتر اقدام می‌کند، هنوز از این روش‌ها به شیوه مناسب در پروژه‌های اجرایی و زیربنایی ملی همچون انتقال آب بین حوضه‌ای استفاده نشده است. روش سیستم استنتاج فازی، یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. در این پژوهش، طرح انتقال آب بین حوضه‌ای بهشت‌آباد در استان چهارمحال و بختیاری با روش‌های سلسله‌مراتبی و سیستم استنتاج فازی بررسی شد؛ بنابراین، برای ارزیابی گزینه مناسب برای انتقال آب بین حوضه‌ای بهشت‌آباد، ۱۴ معیار کمی و کیفی بررسی شد. مقایسات زوجی براساس نظر خبرگان و متخصصان با روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد که از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است؛ سپس، ۱۴ معیار مدنظر، رتبه‌بندی و گزینه برتر برای انتقال آب براساس روش سیستم استنتاج فازی انتخاب شد. نتایج نشان داد گزینه دوم به سایر گزینه‌ها برتری دارد و معیار هزینه جاری و هزینه سرمایه، مهم‌ترین معیار بود و معیار مشکلات زمین‌شناسی مخزن به‌عنوان کم‌اهمیت‌ترین معیار معرفی شد. گزینه دوم با سطح اطمینان ۸۶/۹ درصد براساس تصمیم‌گیری به روش فازی، مطلوب است. سطح اطمینان گزینه ششم، برابر ۳۸/۹ درصد و گزینه هفتم، برابر ۲۳/۹ درصد براساس روش فازی تعیین شد. گزینه هفت، کمترین اولویت طرح انتقال آب بهشت‌آباد انتخاب شد؛ زیرا از نظر بسیاری معیارها، ارزش عددی کمی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** انتقال آب، بهشت‌آباد، تأمین آب، منابع آب، منطق فازی.

**ارجاع:** زمانی گندمانی ع. گیوه‌چی س. و رضا عرب ر. ۱۴۰۰. کاربرد روش سیستم استنتاج فازی در انتخاب گزینه مناسب سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای (مطالعه موردی: طرح انتقال آب بهشت‌آباد). مجله پژوهش آب ایران. ۴۱: ۹۹-۱۰۸.

۱- کارشناس شرکت مدیریت منابع آب، تهران.

۲- دانشیار گروه برنامه‌ریزی مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشگاه تهران.

۳- مدیر مؤسس پژوهشی، مهندسی راهبرد دانش پویا، تهران.

\* نویسنده مسئول: [efatzamani@gmail.com](mailto:efatzamani@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲

## مقدمه

مدیریت منابع آب، مجموعه‌ای از تمهیدات است که هدف آن، برقراری تعادل و توازن میان تقاضا برای آب از یک سو و تأمین آب از سوی دیگر است. نیاز روزافزون منابع آب برای اهداف مختلف همچون کشاورزی، شرب و صنعت، دستیابی به آب قابل برنامه‌ریزی را با مشکلات و محدودیت‌های فراوانی مواجه کرده است. با توجه به روند رو به افزایش جمعیت، در آینده نیز بر جوامعی که با کمبود آب مواجه هستند، افزوده می‌شود؛ بنابراین، هدف انتقال آب بین حوضه‌ای، رسیدن به تعادل و توسعه پایدار است؛ اگرچه به باور بسیاری از پژوهشگران و صاحب‌نظران، بیشتر کشورهای جهان، بیشتر از آنکه از کمبود منابع آب یا توزیع ناعادلانه منابع آب رنج ببرند، با بحران مدیریت منابع آب و نبود مدیریت یکپارچه منابع آب روبرو هستند (ضرغامی، ۱۳۸۴).

علاوه بر پیامدهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی، انتقال آب بین حوضه‌ای ممکن است مناقشات منطقه‌ای و بین‌المللی بر سر آب را نیز گسترش دهد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۵)؛ بنابراین، انتقال آب بین حوضه‌ای به شرط آنکه با محیط زیست، سازگار و از نظر اقتصادی، به صرفه باشد، در برقراری توازن و توزیع همگن‌تر منابع و نیازهای آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مؤثر است (کارآموز و همکاران، ۲۰۱۰).

در حال حاضر، تعداد زیادی طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای در جهان در حال اجرا و یا پایان یافته است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۵). در ایران نیز تعدادی طرح فعال انتقال آب بین حوضه‌ای در حال اجرا یا در مرحله مطالعه است. برخی نیز در حال حاضر پایان یافته یا در حال بهره‌برداری است. از جمله طرح‌های مهم انتقال آب بین حوضه‌ای در کشور به طرح انتقال آب بهشت‌آباد می‌توان اشاره کرد (صمدی بروجنی، ۱۳۸۹). از دیدگاه اجتماعی، سیاسی و امنیتی نیز انتقال آب، پیامدهای مثبتی دارد که به افزایش سرمایه‌های اجتماعی و جلوگیری از اختلافات و مناقشات منجر می‌شود (فریادی، ۱۳۹۷).

تاکنون، مطالعات گوناگونی در کشور و در سطح بین‌المللی برای بررسی طرح‌های انتقال آب انجام شده است؛ برای مثال، بزرگ حداد و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی با نگاه حوضه‌ای و استانی، آثار انتقال آب بین حوضه‌ای را بر

منابع آب ایران بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد استان‌های غربی ایران در آینده، دچار تخلیه ذخیره‌های آبی می‌شود. مهرشاد و همکاران (۱۳۹۷) نیز آثار سناریوهای توسعه‌ای و اقلیمی را بر آینده منابع و مصارف آبی حوضه بهشت‌آباد ارزیابی کردند. نتایج نشان داد روند توسعه باعث افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های حوضه می‌شود و به بحرانی‌شدن وضعیت آبخوان‌ها می‌انجامد. با توجه به پیچیدگی طرح‌های انتقال آب به سبب تعدد عوامل درگیر، ابهام و نبود قطعیت ذاتی حاکم بر منابع آب در ارزیابی اهداف، معیارها و واحدهای تصمیم‌گیری از یک سو و ناسازگاری و بی‌دقتی در نظرات و قضاوت افراد تصمیم‌گیرنده از سوی دیگر، سبب گرایش به نظریه مجموعه‌های فازی و به دنبال آن، منطق فازی در منابع آب شده است. رضوی طوسی و همکاران (۱۳۸۶) از روش‌های چندمعیاره گروهی فازی استفاده کردند. در اولویت‌بندی گزینه‌ها، ابتدا معیارها و وزن آنها را تعیین کردند.

تاکنون، بیشتر مطالعات درباره طرح انتقال آب بهشت‌آباد با رویکرد مدل‌های شبیه‌سازی و یا رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی انجام شده است. رؤفی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل MODSIM طرح انتقال آب به فلات مرکزی را در دو شرایط لحاظ دوره هیدرولوژیک بلندمدت و خشک به صورت مجزا و در قالب شش سناریو شبیه‌سازی کردند و با توجه به خروجی‌های این مدل، تأثیر طرح انتقال آب بهشت‌آباد را بر تأمین نیازها و محیط زیست و منابع آب زیرزمینی دو حوضه مبدأ و مقصد ارزیابی کردند. زمانی‌پور و همکاران (۱۳۹۷) با رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل، سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای بهشت‌آباد را طراحی بهینه کردند. کاهش کمبودهای تأمین نیاز مصارف شرب و زیست‌محیطی حوضه‌های مبدأ و مقصد و کاهش هزینه‌های اجرای طرح، از اهداف تعریف‌شده پژوهش بود. نتایج نشان داد الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، جواب‌های منطقی و متنوع با صرف زمان کمتر و دقت مطلوب در مسئله مورد بررسی ارائه می‌دهد. مدل‌های شبیه‌سازی، امکان مقایسه بین گزینه‌های مختلف را فراهم می‌کند؛ اما بهترین گزینه را معرفی نمی‌کند؛ از این رو، پژوهشگران، کارشناسان و تصمیم‌گیران به مطالعه گزینه‌های مختلف و قابل طرح توجه می‌کنند که هدف اصلی پژوهش حاضر است.

نامطلوب طرح بهشت‌آباد از دیدگاه حوضه آبد (مبدأ) است. اطلاعات استفاده‌شده در پژوهش حاضر از شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری اخذ و برای کل دوره آماری شبکه سنجش مورد استفاده در فرایند تخصیص محاسبه شد. در جدول ۱، مشخصات کلی گزینه‌های پیشنهادی ارائه شده است.



شکل ۱- اجزا و جانمایی گزینه پیشنهادی اول طرح انتقال آب بهشت‌آباد

## مواد و روش‌ها

### معیارهای مورد مطالعه

در مطالعات اولیه طرح بهشت‌آباد فقط به یک گزینه برای انتقال آب توجه شده و گزینه‌های دیگر مطالعه نشده است (مهندسین مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۴). بدین ترتیب، تنها گزینه مطرح، احداث سد مخزنی بهشت‌آباد در پایین دست محل تلاقی دو رودخانه کوه‌رنگ و بهشت‌آباد و احداث تونلی مستقیم به طول ۶۵ کیلومتر در نزدیکی محل سد بهشت‌آباد تا حوالی شهر باغ بهادران است. براساس مطالعات مختلف، انتقاد اصلی به طرح انتقال آب بهشت‌آباد درباره برآورد آب قابل انتقال است که در محاسبات آن از فرضیات دست بالا استفاده شده است؛ بدین ترتیب که در ابتدا، اعداد ۱۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال و ۷۴۶ میلیون مترمکعب مطرح بوده است (صمدی بروجنی، ۱۳۸۹). مطالعات انجام‌شده تاکنون، به صورت تک‌گزینه‌ای و تمرکز بر حفر تونل بوده است؛ بنابراین، در پژوهش حاضر، راهکارها و گزینه‌های مختلفی برای ارزیابی طرح انتقال آب بین حوضه‌ای براساس معرفی معیارهای مختلف بررسی می‌شود تا بهترین گزینه انتقال آب از میان گزینه‌های موجود انتخاب و معرفی شود.

براساس بررسی‌های انجام‌شده، روش سیستم استنتاج فازی در مدیریت و تصمیم‌گیری یکپارچه منابع آب کاربردهای مختلفی داشته است؛ اما در زمینه استفاده از روش سیستم استنتاج فازی در انتخاب گزینه مناسب سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای، تاکنون مطالعات جامعی انجام نشده است. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد تاکنون، استفاده از روش ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی در تعیین وزن معیارهای مدل استنتاج فازی در ارزیابی انتقال آب بین حوضه‌ای انجام نشده است. در این مطالعه، پس از انتخاب معیارهای مؤثر و متناسب با هدف پژوهش و وزن‌دهی آنها توسط کارشناسان خبره منابع آب، ارزش هر یک از آنها مشخص و ماتریس تصمیم‌گیری چندمعیاره تشکیل شد. در این مرحله با تهیه و طراحی پرسش‌نامه، از نظرات ۱۸۰ نفر کارشناس خبره صنعت آب و بومی منطقه، که آشنایی کاملی با طرح مذکور داشتند؛ مانند استادان دانشگاه، کارشناسان آب منطقه‌ای و کارشناسان شرکت‌های مهندسی مشاور همکار در منطقه استفاده شد. در ادامه، روش سیستم استنتاج فازی به کار رفت تا گزینه‌های مختلف سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای تحلیل و گزینه برتر برای انتقال آب مشخص شود.

این پژوهش در حوضه بهشت‌آباد و کوه‌رنگ به‌عنوان حوضه مبدأ در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. حوضه بهشت‌آباد با مساحتی بالغ بر ۳۸۸۰ کیلومتر مربع در محدوده شهرستان شهرکرد، فارسان و کیار در قسمت شمال و شمال شرقی حوضه کوه‌رنگ با مساحتی بالغ بر ۱۳۱۰ کیلومتر مربع در شهرستان کوه‌رنگ واقع شده است. از جمله اشکال‌ها و ایرادهای اصلی طرح بهشت‌آباد به آثار مخرب تونل انتقال آب و تونل دسترسی با توجه به نوع و روش حفر (مهدوری و آیتی، ۱۳۹۲) و شرایط زمین‌شناسی منطقه، عدم قطعیت فنی و اقتصادی در حفر تونل، مشکلات مخزن از نظر زمین‌لرزه‌القایی (صداقت و همکاران، ۱۳۹۵) و ناپایداری دیواره‌های ماری مخزن می‌توان اشاره کرد. در شکل ۱، اجزا و جانمایی گزینه پیشنهادی اول طرح انتقال آب بهشت‌آباد ارائه شده است. همچنین، از نظر محاسبات آب قابل برنامه‌ریزی نیز به دست بالا گرفتن ظرفیت آب قابل انتقال می‌توان اشاره کرد. مشکلات اجتماعی مانند افزایش مهاجرت به علت خشک یا کم‌آب شدن چشمه‌ها، قنات‌ها و چاه‌های منطقه و زیر آب رفتن زمین‌های کشاورزی نیز از دیگر پیامدهای

جدول ۱- مشخصات کلی گزینه‌های پیشنهادی انتقال آب بهشت‌آباد

پارامتر	گزینه اول	گزینه دوم	گزینه سوم	گزینه چهارم	گزینه پنجم	گزینه ششم	گزینه هفتم
نام سد مخزنی	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
حجم مخزن	MCM	700	1800	1800	700	700	700
طول خط لوله	کیلومتر	68/1	28	48	48	68/1	68/1
طول تونل و پستتاک	کیلومتر	11/74	25/04	43/04	25/04	11/74	11/74
طول پستتاک ابتدای خط	کیلومتر	34/5	5340	5340	5340	34/5	34/5
طول پستتاک انتهای خط	کیلومتر	1/2	2400	2400	2400	1/2	1/2
کل ارتفاع پمپاژ	متر	173/1	136	84	136	173/1	173/1
قدرت پمپاژ مورد نیاز	Kw	31132/04	24459/6	15107/4	24459/6	31132/04	31132/04
قدرت برق تولیدی	Kw	26018/18	25503/45	20647/5	25503/45	26018/18	26018/18
قدرت تلمبه ذخیره	Kw	50000	50000	50000	50000	50000	50000
انرژی مصرفی تلمبه ذخیره‌ای	Mwh	55000	55000	55000	55000	55000	55000
کل مصرف خالص انرژی	Gwh	95	47	11	47	95	95
نرخ مصرف انرژی	Kwh/m <sup>3</sup>	0/30	0/15	0/03	0/15	0/30	0/30
هزینه سد	میلیارد ریال	780	780	2340	780	780	780
خسارت مخزن	میلیارد ریال	100	100	300	100	100	100
هزینه پمپاژ	میلیارد ریال	333/77	254/38	471/33	254/38	333/77	333/77
هزینه نیروگاه	میلیارد ریال	1482/35	1472/31	4132/8	1472/31	1482/35	1482/35
کل هزینه سرمایه‌ای	میلیارد ریال	8667	6290	20514	6290	8667	8667
هزینه بهره‌برداری	میلیارد ریال	71/53	68/97	194/82	68/97	71/53	71/53
هزینه برق	میلیارد ریال	96/06	46/61	31/53	46/61	96/06	96/06
جمع هزینه جاری	میلیارد ریال	167/6	115/6	226/35	115/6	167/6	167/6
هزینه تمام‌شده سالانه	میلیارد ریال	295	295	3396	295	295	295
هزینه تمام‌شده با نرخ غیرارائه‌ای	ریال بر متر مکعب	2526	1814	5436	1814	2526	2526

\* علامت منفی به این علت است که طرح تولید برق انجام می‌دهد.

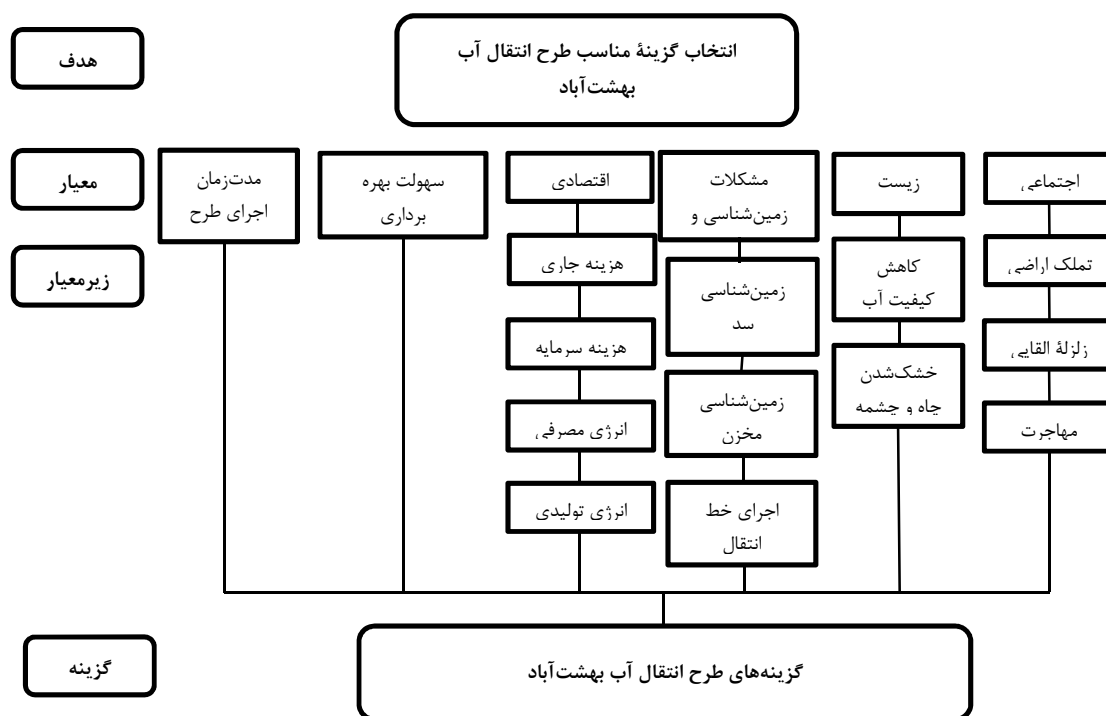
تعیین وزن معیارها با استفاده از مدل AHP

یکی از کارآمدترین تکنیک‌ها در تصمیم‌گیری، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی است که براساس مقایسه‌های زوجی بنا نهاده شده است و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران می‌دهد. برای سنجش شایستگی نسبی هر یک از گزینه‌ها معمولاً از معیارها استفاده می‌شود. از نرم‌افزار Expert choice با توجه به توانمندی آن در طراحی نمودار سلسله‌مراتبی، تصمیم‌گیری، تعیین اولویت‌ها، محاسبه وزن نهایی براساس نظرات کارشناسان خبره (۱۸۰ نفر) علمی و اجرایی و از طریق پرسش‌نامه در این پژوهش استفاده شد. با توجه به مطالعه گزینه‌ها و تعیین مقادیر هر معیار برای هر گزینه، ماتریس تصمیم‌گیری حالت دوم نیز شکل گرفت. در این پژوهش، هفت گزینه انتقال آب بررسی شد که اطلاعات ارائه‌شده در حد فاز شناسایی اولیه و برآورد هزینه‌ها بر مبنای بازه سال یکسان انجام شد. در شکل ۲، ساختار سلسله‌مراتبی انتخاب گزینه مناسب طرح انتقال آب بهشت‌آباد ارائه شده است.

مدل استنتاج فازی

در تصمیم‌گیری مربوط به مسائل مدیریت منابع آب، مهم‌ترین مسئله، وجود عدم قطعیت معیارهای تصمیم‌گیری و گاهی ماهیت متضاد در برخی از آنهاست. یکی از روش‌های در نظر گرفتن عدم قطعیت در تصمیم‌گیری، استفاده از منطق فازی است. منطق فازی، که توسط زاده (۱۹۶۵) معرفی کرد، به‌عنوان روش مناسبی برای توسعه سیستم‌های پیچیده و مبهم به کار رفته است. در این پژوهش، عدم قطعیت همراه با انتخاب گزینه مناسب طرح انتقال آب بهشت‌آباد و توانایی مجموعه فازی در فرایند تصمیم‌گیری برای بررسی و انتخاب معیارهای مناسب سیستم انتقال آب ارزیابی شد. برای یک مجموعه فازی، تابع عضویت به‌صورتی تعریف می‌شود که در فاصله بین صفر تا ۱ است (آذر و فرجی، ۱۳۸۶).

$$A = \{ (x, m - A(x)) \mid x \in X \} \quad (1)$$



شکل ۲- ساختار سلسله مراتبی انتخاب گزینه مناسب طرح انتقال آب بهشت آباد

### فازی سازی

فازی سازی<sup>۱</sup> فرایندی است که در آن، معیارها با توجه به زیرمجموعه های فازی از قبل تعریف شده به مقیاس یکسان و همانندی تبدیل می شود. به طور کلی، متغیرهای زبانی<sup>۲</sup> براساس نظرات کارشناسان تعریف می شود. در این پژوهش، از متغیرهای زبانی کم، متوسط و زیاد برای انعکاس نظرات متخصصان استفاده شد. فازی سازی به شکل های مختلفی از توابع عضویت خطی (دوزنقه ای یا مثلثی) یا غیرخطی ساخته می شود. اشکال دوزنقه ای و مثلثی، رایج ترین کارکردهای عضویت است. توسعه مدل های فازی در مطالعه حاضر، مراحل مختلفی از جمله فازی سازی ورودی پارامترها و دامنه خروجی مدل ها را طی کرده است.

### استنتاج فازی

استنتاج فازی، فرایندی است که در آن، نداشت از ورودی ها به خروجی ها با استفاده از منطق فازی ضابطه مند می شود. فرایند استنتاج فازی شامل همه بخش های تابع عضویت، عملگرهای فازی و قوانین «اگر-

انگاه» است. در این پژوهش نیز از عملگر استلزام ممدانی<sup>۳</sup> برای ارزیابی طرح انتقال آب بهشت آباد استفاده شد این مدل به سبب مقبولیت عام و سادگی کاربرد، به دیگر مدل های موجود ترجیح داده می شود (کیا، ۱۳۸۹). در مدل های استنتاج فازی، تعداد قوانین به تعداد پارامترهای ورودی و متغیرهای زبانی مورد استفاده بستگی دارد. هنگامی که تعداد قوانین فازی زیاد است، پیچیدگی مدل نیز افزایش می یابد؛ بنابراین، حذف قوانین تکراری یا کم اهمیت از مجموعه قوانین به ارائه مدل فازی فشرده تر با قابلیت های کلی بیشتر و ساده سازی کلی ساختار سیستم منجر می شود (وانگ و یو، ۱۹۹۹). پیش از اعمال روش دلالت<sup>۴</sup>، باید وزن قانون را مشخص کرد. هر قانون، وزن مشخصی (بین ۰ و ۱) دارد. به طور عمومی، مقدار وزن قوانین، برابر ۱ در نظر گرفته می شود. در این مدل نیز وزن قوانین براساس نتایج مدل AHP تهیه و در مدل استنتاج فازی اعمال شد. پس از تخصیص مقادیر مناسب به وزن هر یک از قوانین، روش دلالت پیاده سازی می شود (کیا، ۱۳۸۹). در مدل استنتاج فازی طرح انتقال آب بهشت آباد از روش دلالت حداقل min استفاده شده است.

3- Mamdani  
4- Implication

1- Fuzzification  
2- Linguistic

## غیرفازی‌سازی

غیرفازی‌سازی<sup>۱</sup>، فرایندی است که در آن، مقدار اعداد قطعی از مجموعه فازی استخراج می‌شود. ورودی فرایند غیرفازی‌سازی، مجموعه فازی است (حاصل عملیات تجمع<sup>۲</sup>) و خروجی آن، مقدار عددی است. به‌طور کلی، ۵ روش همسو با غیرفازی‌کردن مجموعه‌های فازی وجود دارد. این روش‌ها شامل مرکز جرم، نیمساز، میانه بیشینه (میانگین مقادیر بیشینه از مجموعه خروجی)، بزرگ‌ترین بیشینه و کوچک‌ترین بیشینه است. در مدل استنتاج فازی در این مطالعه از غیرفازی‌ساز مرکز جرم<sup>۳</sup> استفاده شد.

## نتایج و بحث

### معیارهای مورد مطالعه

با در نظر گرفتن ماهیت هدف و مسئله، در هر تصمیم‌گیری، پروژه‌ها باید براساس معیارهای مد نظر تصمیم‌گیرنده اولویت‌بندی شوند. هدف پژوهش حاضر، شناسایی گزینه برتر و تعیین رتبه گزینه‌ها با لحاظ کردن هم‌زمان کلیه معیارهای تصمیم‌گیری است. در پژوهش حاضر، با توجه به مطالعه گزینه‌ها و تعیین مقادیر هر معیار برای هر گزینه، ماتریس تصمیم‌گیری شکل گرفت، زیرمعیارها تعریف و هر معیار به چند زیرمعیار تقسیم و سپس ماتریس معیارها به مدل معرفی شد. زیرمعیارهای مورد مطالعه به شرح ذیل تعریف شد:

- ✓ اجتماعی: شامل ۳ زیرگروه تملک اراضی، زلزله‌القای و مهاجرت؛
- ✓ زیست‌محیطی: شامل ۲ زیرگروه کاهش کیفیت آب و آلودگی منابع و خشک شدن چاه و چشمه؛
- ✓ مشکلات زمین‌شناسی و اجرایی: شامل ۳ زیرگروه مشکلات زمین‌شناسی سد، مشکلات زمین‌شناسی مخزن و مشکلات اجرای خط انتقال؛
- ✓ اقتصادی: شامل ۴ زیرگروه هزینه جاری، هزینه سرمایه، انرژی مصرفی و انرژی تولیدی؛
- ✓ سهولت بهره‌برداری و
- ✓ مدت‌زمان اجرای طرح.

## مدل استنتاج فازی

### فازی‌سازی

برای به دست آوردن اعداد فازی معیارهای ذهنی، با طراحی پرسش‌نامه از ۵ نفر کارشناس خبره<sup>۴</sup> متخصص علوم آب و آشنا به تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی و مدل‌های منطق فازی درخواست شد براساس سیستم مقیاس زبانی، درجه عضویت ورودی مدل تصمیم‌گیری فازی را تعیین کنند. میانگین نظر این کارشناسان به‌عنوان عدد قطعی در نظر گرفته شد. در پژوهش حاضر، برای انعکاس نظرات متخصصان از توابع عضویت خطی مثلثی و متغیرهای زبانی کم، متوسط و زیاد استفاده شد. اعداد قطعی براساس نظر کارشناسان خبره برای معیارهای اجتماعی، زیست‌محیطی، زمین‌شناسی و اجرایی، اقتصادی، سهولت بهره‌برداری و مدت‌زمان اجرای طرح تعریف شد. نظرات متخصصان در بازه عددی صفر تا یک تعریف شد؛ به‌گونه‌ای که اعداد نزدیک به صفر، ارزش کمتری در مدل دارد و ارزش اعداد نزدیک به یک، در مدل تصمیم‌گیری، بیشتر است. در جدول ۳، اعداد قطعی معیارهای طرح انتقال آب بهشت‌آباد ارائه شده است. در مرحله بعدی با ترسیم اعداد قطعی استخراج‌شده در مدل استنتاج فازی، درجه عضویت توابع فازی معیارهای مورد مطالعه تعیین شد.

### استنتاج فازی

معیارهای اصلی برای گزینه‌ها حاصل از ضرب وزن اهمیت معیارها در توابع عضویت فازی محاسبه می‌شود. پس از این مرحله، توابع عضویت حاصل در وزن معیارهای اصلی ضرب می‌شود تا تابع عضویت نهایی به دست آید. تابع عضویت هر یک از ورودی‌ها را مجموعه فازی تعیین می‌کند. با مشخص کردن ورودی‌های اعداد قطعی در محدوده از پیش تعیین‌شده (معیارهای طرح)، هر یک از مجموعه‌های فازی، تابع عضویتی بین صفر و یک می‌گیرد. تصمیم‌سازی سیستم استنتاج، براساس قوانین کارشناس خبره انجام می‌شود. قوانین از دو بخش «اگر- آنگاه» تشکیل شده است. در بخش «اگر»، ورودی مدل تعریف می‌شود. معیارهای اجتماعی، زیست‌محیطی، زمین‌شناسی و اجرایی، اقتصادی، سهولت بهره‌برداری و مدت‌زمان اجرای طرح به سه مشخصه زبانی کم، متوسط و زیاد

1- Defuzzification  
2- Aggregation  
3- Centroid

4- Expert

کم باشد، آنگاه سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای مطلوب است.

- اگر متغیر ورودی اجتماعی زیاد، زیست‌محیطی زیاد، زمین‌شناسی و اجرایی زیاد، اقتصادی کم، سهولت بهره‌برداری کم و مدت‌زمان اجرای طرح کم باشد؛ آنگاه سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای مطلوب است.

ترسیم شد. در بخش «آنگاه» نیز ارزیابی نهایی کیفی گزینه مناسب سیستم انتقال آب به‌صورت سه مشخصه زبانی مطلوب، قابل قبول و غیرقابل قبول ترسیم شد. در ادامه، تعدادی از قوانین استفاده‌شده در ارزیابی نهایی به‌اختصار ارائه شده است.

- اگر متغیر ورودی اجتماعی زیاد، زیست‌محیطی زیاد، زمین‌شناسی و اجرایی زیاد، اقتصادی کم، سهولت بهره‌برداری زیاد و مدت‌زمان اجرای طرح

جدول ۲- وزن اهمیت معیارها و زیرمعیارها براساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی

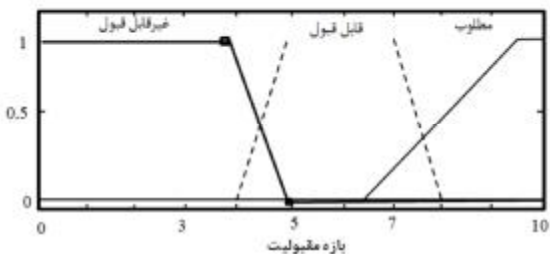
معیار	زیرمعیار	وزن اهمیت معیار	وزن اهمیت زیرمعیار
اجتماعی	تملك اراضی	۰/۱	۰/۰۳
	زلزله القایی		۰/۰۳
	مهاجرت		۰/۰۴
زیست‌محیطی	کاهش کیفیت آب و آلودگی منابع آب	۰/۱۱	۰/۰۳
	خشک‌شدن چاه و چشمه		۰/۰۸
	مشکلات زمین‌شناسی سد		۰/۰۳
	مشکلات زمین‌شناسی مخزن		۰/۰۲
زمین‌شناسی و اجرایی	مشکلات اجرای خط انتقال	۰/۱۲	۰/۰۶
	هزینه جاری		۰/۲۴
	هزینه سرمایه		۰/۲۴
	انرژی مصرفی		۰/۰۴
اقتصادی	انرژی تولیدی	۰/۵۵	۰/۰۴
	سهولت بهره‌برداری		۰/۰۴
	مدت‌زمان اجرای طرح	۰/۰۸	۰/۰۸
	جمع	۱	۱

جدول ۳- اعداد قطعی معیارهای طرح انتقال آب بهشت‌آباد

معیار	گزینه اول	گزینه دوم	گزینه سوم	گزینه چهارم	گزینه پنجم	گزینه ششم	گزینه هفتم
اجتماعی	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۰/۲
زیست‌محیطی	۰/۷	۰/۶	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۴	۰/۱
زمین‌شناسی و اجرایی	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۲	۰/۱
اقتصادی	۰/۹	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۳	۰/۲
سهولت بهره‌برداری	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۲	۰/۱
مدت‌زمان اجرای طرح	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۷

### غیرفازی‌سازی

در شکل ۳، محدوده‌های زبانی معیارهای تعیین مقبولیت مدل استنتاج فازی طرح انتقال آب بهشت‌آباد ارائه شده است. بر این اساس، متغیرهای زبانی مطلوب، قابل قبول و غیرقابل قبول در مدل تصمیم‌گیری فازی تعریف شد. در این پژوهش، روش غیرفازی‌سازی مرکز ثقل به کار رفت تا توابع عضویت متغیرهای فازی خروجی را به اعداد قطعی تبدیل کند.



شکل ۳- محدوده‌های زبانی مطلوبیت مدل استنتاج فازی طرح انتقال آب بهشت‌آباد

فازی تهیه شده، ارزیابی و گزینه مناسب مشخص شد. برتری روش فازی نسبت به روش قطعی با مقایسه داده‌های مرزی مشخص می‌شود. همچنین، در این جدول، رتبه هر یک از گزینه‌ها ارائه شده است.

در جدول ۴، توابع عضویت غیرفازی گزینه‌های مختلف پیشنهادی انتقال آب بهشت‌آباد به تفکیک معیارها ارائه شده است. تمامی گزینه‌های مختلف پیشنهادی با وارد کردن مقادیر عددی و قطعی معیارهای طرح در مدل

جدول ۴- توابع عضویت نهایی و امتیازبندی گزینه‌های مختلف طرح انتقال آب بهشت‌آباد

رتبه	تصمیم‌گیری به روش قطعی			تصمیم‌گیری به روش فازی	گزینه
	"زیاد"	"متوسط"	"کم"		
۲	زیست‌محیطی، اقتصادی، سهولت بهره برداری	اجتماعی، زمین‌شناسی و اجرایی	مدت زمان اجرای طرح	مطلوب (۸۴/۸)	اول
۱	زیست‌محیطی	اجتماعی، زمین‌شناسی و اجرایی، اقتصادی، سهولت بهره‌برداری، مدت زمان اجرای طرح		مطلوب (۸۶/۹)	دوم
۳	اجتماعی، زیست‌محیطی	سهولت بهره برداری، مدت زمان اجرای طرح	زمین‌شناسی و اجرایی، اقتصادی	قابل قبول (۷۱/۱)	سوم
۴		اجتماعی، زیست‌محیطی، اقتصادی، سهولت بهره‌برداری	زمین‌شناسی و اجرایی، مدت زمان اجرای طرح	قابل قبول (۶۰)	چهارم
۶		اقتصادی، سهولت بهره‌برداری، مدت زمان اجرای طرح	اجتماعی، زیست‌محیطی، زمین‌شناسی و اجرایی	غیر قابل قبول (۳۸/۶)	پنجم
۵		اجتماعی، زیست‌محیطی	زمین‌شناسی و اجرایی، اقتصادی، سهولت بهره‌برداری، مدت زمان اجرای طرح	غیر قابل قبول (۳۸/۹)	ششم
۷	مدت زمان اجرای طرح		اجتماعی، زیست‌محیطی، زمین‌شناسی و اجرایی، اقتصادی، سهولت بهره‌برداری	غیر قابل قبول (۲۳/۹)	هفتم

### مقایسه نتایج

گرفت. گزینه‌های پنج، شش و هفت براساس روش فازی، در رده غیرقابل قبول قرار گرفت. سطح اطمینان گزینه پنجم، برابر ۳۸/۶ درصد، گزینه ششم، برابر ۳۸/۹ درصد و گزینه هفتم، برابر ۲۳/۹ درصد براساس روش فازی تعیین شد. گزینه هفت، به‌عنوان پایین‌ترین اولویت طرح انتقال آب بهشت‌آباد انتخاب شد؛ زیرا از نظر بسیاری معیارها، ارزش عددی کمی دارد.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر با آنچه پیش‌تر در ارزیابی گزینه‌های مختلف سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره در زمینه انتقال آب بین حوضه‌ای در بهشت‌آباد انجام گرفته بود، همخوانی دارد؛ بدین‌صورت که گزینه‌های ۱ و ۲ پیشنهادی برای انتقال آب در طبقه‌بندی فازی در گروه مطلوب و گزینه‌های ۳، ۴ و ۶ جزء موارد قابل قبول و گزینه ۵ و ۷ در دسته غیرقابل قبول قرار گرفته است. گفتنی است معیارهای در نظر گرفته شده در سیستم استنتاج فازی برای انتخاب گزینه‌های مناسب سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای عبارت است از: معیار اجتماعی، زیست‌محیطی، زمین‌شناسی و اجرایی، اقتصادی، سهولت بهره‌برداری، مدت‌زمان اجرای طرح و مقبولیت طرح. براساس مرور

همانگونه که در جدول ۴ ارائه شده است، نتایج مدل استنتاج فازی با روش قطعی مقایسه شده است. بر این اساس، گزینه اول با سطح اطمینان ۸۴/۸ درصد براساس تصمیم‌گیری به روش فازی مطلوب تعیین شده است. در روش قطعی نیز مدت‌زمان اجرای طرح در رده «کم» و معیار اجتماعی و زمین‌شناسی و اجرایی در رده «متوسط» قرار گرفت. براساس نتایج روش استنتاج فازی، گزینه دوم به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه طرح انتقال آب بهشت‌آباد انتخاب شد. مقایسه نتایج امتیاز معیارهای مورد مطالعه نشان می‌دهد، گزینه دوم، بیشترین امتیاز را از نظر معیار زیست‌محیطی و سهولت بهره‌برداری دارد؛ بنابراین، از نظر این دو معیار، گزینه مناسب‌تر و دارای اولویت اول است. گزینه دوم با سطح اطمینان ۸۶/۹ درصد براساس تصمیم‌گیری به روش فازی، مطلوب است. در این گزینه، بیشتر معیارهای ورودی به‌جز معیار زیست‌محیطی به روش قطعی در رده «متوسط» قرار گرفته است. گزینه‌های سه و چهار، به‌ترتیب با سطح اطمینان ۷۱/۱ و ۶۰ درصد در رده قابل قبول قرار گرفت. در این دو گزینه، بیشتر معیارها براساس روش قطعی در رده «متوسط» قرار



۲. رضوی طوسی س. سامانی م. و کوره‌پزان دزفولی ا. ۱۳۸۶. اولویت‌بندی پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه‌ای گروهی فازی. تحقیقات منابع آب ایران. ۳(۲): ۹-۱.

۳. رؤفی ی. شوریان م. و عطاری ج. ۱۳۹۴. طراحی ابعاد سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای با لحاظ شاخص‌های تصمیم‌گیری در حوضه‌های آبریز مبدأ و مقصد. علوم و مهندسی منابع آب. ۱۱(۱): ۴۹-۶۱.

۴. زمانی پور م. سعادت‌پور م. و ذهبیون ب. ۱۳۹۷. رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در طراحی بهینه سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۱): ۱۹۸-۲۱۵.

۵. صادقی س.ج. کاظمی کیا س. و حزبوای ز. ۱۳۹۵. تجارب و پیامدهای انتقال آب بین حوضه‌ای در جهان. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۲(۲): ۱۲۰-۱۴۰.

۶. صداقت م. شیرانی ک. و قاضی فرد ا. ۱۳۹۵. بررسی فعالیت گسل‌ها در محل ساختگاه سد بهشت‌آباد به کمک نهشته‌های کوتاه‌تر. کواترنری ایران. ۲(۲): ۱۳۵-۱۴۲.

۷. صمدی بروجنی ح. ۱۳۸۹. انتقال آب بین حوضه‌ای (فرصت‌ها و چالش‌ها). شهرکرد: دانشگاه شهرکرد. چاپ اول. ۳۶۰ ص.

۸. ضرغامی م. ۱۳۸۴. مدل اولویت‌بندی طرح‌های انتقال آب از حوضه‌های آبریز مشترک در ایران. دومین همایش تبادل تجربه‌های پژوهشی، فنی و مهندسی. آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، استان آذربایجان شرقی، تبریز، آبان ماه، ۱۲ ص.

۹. فریادی م. ۱۳۹۷. انتقال میان حوضه‌ای آب: مبانی و چالش‌های حقوقی. پژوهش حقوق عمومی. ۶۱(۲۰): ۱۱۵-۱۴۲.

۱۰. کیا م. ۱۳۸۹. منطق فازی در MATLAB. تهران: انتشارات کیان رایانه سبز. ۳۰۴ ص.

۱۱. مهدوری س. و آیتی ف. ۱۳۹۲. بررسی تراست لازم حفاری در تونل انتقال آب بهشت‌آباد. زمین‌شناسی مهندسی. ۷(۱): ۱۷۰۷-۱۷۲۴.

۱۲. مهرشاد ف. اسماعیلیان م. و رحیمی د. ۱۳۹۷.

منابعی که نویسندگان مقاله انجام دادند، پژوهش مشابهی مشاهده نشد که روش تحلیل سلسله‌مراتبی و سیستم استنتاج فازی را مقایسه کند.

### نتیجه‌گیری

به سبب عدم قطعیت ذاتی، همیشه مشکلاتی در ارزیابی طرح‌های انتقال آب وجود دارد و عدم قطعیت زیادی در فرایند تعیین گزینه مناسب طرح انتقال آب دیده می‌شود. در این مطالعه از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره سیستم استنتاج فازی، که روشی مبتنی بر منطق فازی است، برای ارزیابی گزینه‌های سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای از بهشت‌آباد به فلات مرکزی ایران بهره گرفته شد. با توجه به تأثیر ۱۴ زیرمعیار کمی و کیفی مختلف در انتقال آب بین حوضه‌ای و لحاظ کردن نظر کارشناسان تصمیم‌گیرنده با نگرش‌های مختلف، معیارهای تصمیم‌گیری شامل معیارهای اجتماعی، زیست‌محیطی، مشکلات زمین‌شناسی و اجرایی، اقتصادی، سهولت بهره‌برداری و مدت‌زمان اجرای طرح انتخاب شد. براساس نتایج مدل استنتاج فازی، گزینه دوم به‌عنوان گزینه منتخب طرح انتقال آب بهشت‌آباد در نظر گرفته شد. گزینه اول با سطح اطمینان ۸۴/۸ درصد براساس تصمیم‌گیری به روش فازی مطلوب تعیین شده است. در روش قطعی نیز مدت‌زمان اجرای طرح در رده «کم» قرار گرفت و معیار اجتماعی و زمین‌شناسی و اجرایی در رده «متوسط» قرار گرفت. گزینه دوم با سطح اطمینان ۸۶/۹ درصد براساس تصمیم‌گیری به روش فازی، مطلوب است. گزینه هفتم برابر ۲۳/۹ درصد براساس روش فازی تعیین شد. گزینه هفت، به‌عنوان پایین‌ترین اولویت طرح انتقال آب بهشت‌آباد انتخاب شد. گزینه دوم، بیشترین امتیاز را از نظر معیار زیست‌محیطی دارد. همچنین، گزینه هفت، به‌عنوان پایین‌ترین اولویت طرح انتقال آب بهشت‌آباد برگزیده شد. انتقال آب بین حوضه‌ای به‌عنوان واپسین راهکار و مدیریت مصرف، آموزش عمومی و تغییر الگوی کشت به‌عنوان راهکار برون‌رفت بحران آب انتخاب شد.

### منابع

۱. آذر ع. و فرجی ح. ۱۳۸۶. علم مدیریت فازی. تهران: انتشارات مؤسسه کتاب مهربان نشر. ۳۰۸ ص.

ارزیابی اثرهای سناریوهای توسعه‌ای و اقلیمی بر آینده منابع و مصارف آبی حوضه بهشت‌آباد با استفاده از رویکرد پویایی سیستم. پژوهش آب ایران. ۱۲(۴): ۱۱-۲۴.

۱۳. مهندسین مشاور زاینداب. ۱۳۸۴. گزارش مطالعات انتقال آب به فلات مرکزی ایران (۱۴ جلد).

14. Bozorg-Haddad O. Abutalebi M. Chu X. and Loáiciga H.A. 2020. Assessment of potential of intraregional conflicts by developing a transferability index for inter-basin water transfers and their impacts on the water resources. *Environmental Monitoring Assessment*. 192(1): 40-56.
15. Karamouz M. Mojahedi S.A. and Ahmadi A. 2010. Interbasin water transfer: Economic water quality-based model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 136(2): 90-98.
16. Wang L. and Yen J. 1999. Extracting fuzzy rules for system modeling using a hybrid of genetic algorithms and Kalman filter. *Fuzzy Sets and Systems*. 101(3): 353-362.
17. Zadeh L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*. 8(3): 338-353.