تدوین مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی تخصیص آب و بار آلودگی بر مبنای مدل چانه‌زنی بردا، مطالعه نمونه‌ای: بخشی از سامانه رودی کر

ایلناز حقیقت اصفهانی[۱]، محمدرضا نیکو[۲*]، ایوب کریمی جشنی[۳]، ناصر طالب بیدختی[۴]

چکیده

تخصیص بهینه‌ی آب و بار آلودگی از مسائل چالش برانگیز در حوزه‌ی مدیریت منابع آب است. در این تحقیق، روش‌شناسی جدیدی برای تخصیص آب و بار آلودگی در رودها با لحاظ بهره‌برندگان مختلف ارائه شده است. در این راستا، ابتدا برای شبیه‌سازی کیفی چندشاخصه‌ی رود، مدل عددی QUAL2K تدوین و واسنجی شده است. سپس برای کاهش زمان مدلسازی و ایجاد امکان اتصال به مدل بهینه سازی چند هدفه، فرامدل شبیه‌سازی کیفی در قالب وایازی چند متغیره‌ی خطی ایجاد شده است. بدین منظور پایگاه داده‌ها مورد نیاز برای ایجاد فرامدل با اجرای مکرر مدل QUAL2K صحت‌سنجی شده به ازا مقدارهای مختلف تخصیص آب و تخلیه زهاب به‌دست آمده است. در مرحله‌ی بعد، با قرار دادن فرامدل کیفی در مدل بهینه‌سازی ، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندهدفه تدوین شده است که در آن سه تابع هدف، شامل حداکثرسازی زهاب تخلیه‌شده به رود، حداکثرسازی آب تخصیص داده‌شده به آب‌بران و حداقل‌سازی میزان تخطی شاخص‌های کیفی از ملاک در نظر گرفته شده اند. مدل بهینه سازی چند هدفه منجر به یک منحنی تعامل بین اهداف می‌شود. برای تعیین بهترین سیاست تخصیص آب و بار آلودگی، مجموعه‌ی توافق براساس اولویت‌های گرودارن تشکیل شده و به‌وسیله‌ی روش‌های گزینش اجتماعی بردا، مدل بازی نش و نش-هرسنی، مطلوب‌ترین رویکرد تخصیص با لحاظ نظر تصمیم‌گیران تعیین شده است. تحلیل حساسیت‌ها نشان داد که مهم‌ترین فراسنج غیرقطعی مسئله، بده‌ی بالادست رود است. لذا با توجه به بازه‌ی تغییرات داده‌های مشاهداتی طی سال‌های ۷۵ تا ۸۵، و براساس تغییرات محتمل در بده‌ی رود در ماه بحرانی (مرداد)، ۶ نمایشنامه‌ی عدم قطعیت لحاظ، و مدل به ازا آن‌ها اجرا گردید. نتایج کاربرد مدل پیشنهادی در رود کر واقع در استان فارس، نشان‌دهنده‌ی کارائی مناسب آن در تعیین سیاست‌های تخصیص آب و بار آلودگی بوده است. بر این اساس، اعمال سیاست بهینه‌ی تخصیص آب و بار آلودگی منجر به بهبود ۴۱ درصدی مقدار شاخص DO و ۳۸ درصدی شاخص TSS در نقطه مهار کیفی پنجم شده است. همچنین وضعیت شاخص کیفی BOD در اکثر نقاط مهار کیفی به مقدار کمی بهبود یافته است.

واژه های کلیدی: تخصیص آب و بار آلودگی، شبیه‌سازی کیفی رود، گزینش اجتماعی بردا، مدل بازی نش-هرسنی، رود کر

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد محیط زیست، بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شیراز.
[۲] دانشیار بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
[۳] دانشیار بخش مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
[۴] استادتمام، بخش مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز.
* نویسنده مسئول: شماره تلفن: ۰۷۱۳۶۱۳۳۴۹۷ ایمیل: nikoo@shirazu.ac.ir

۱– مقدمه

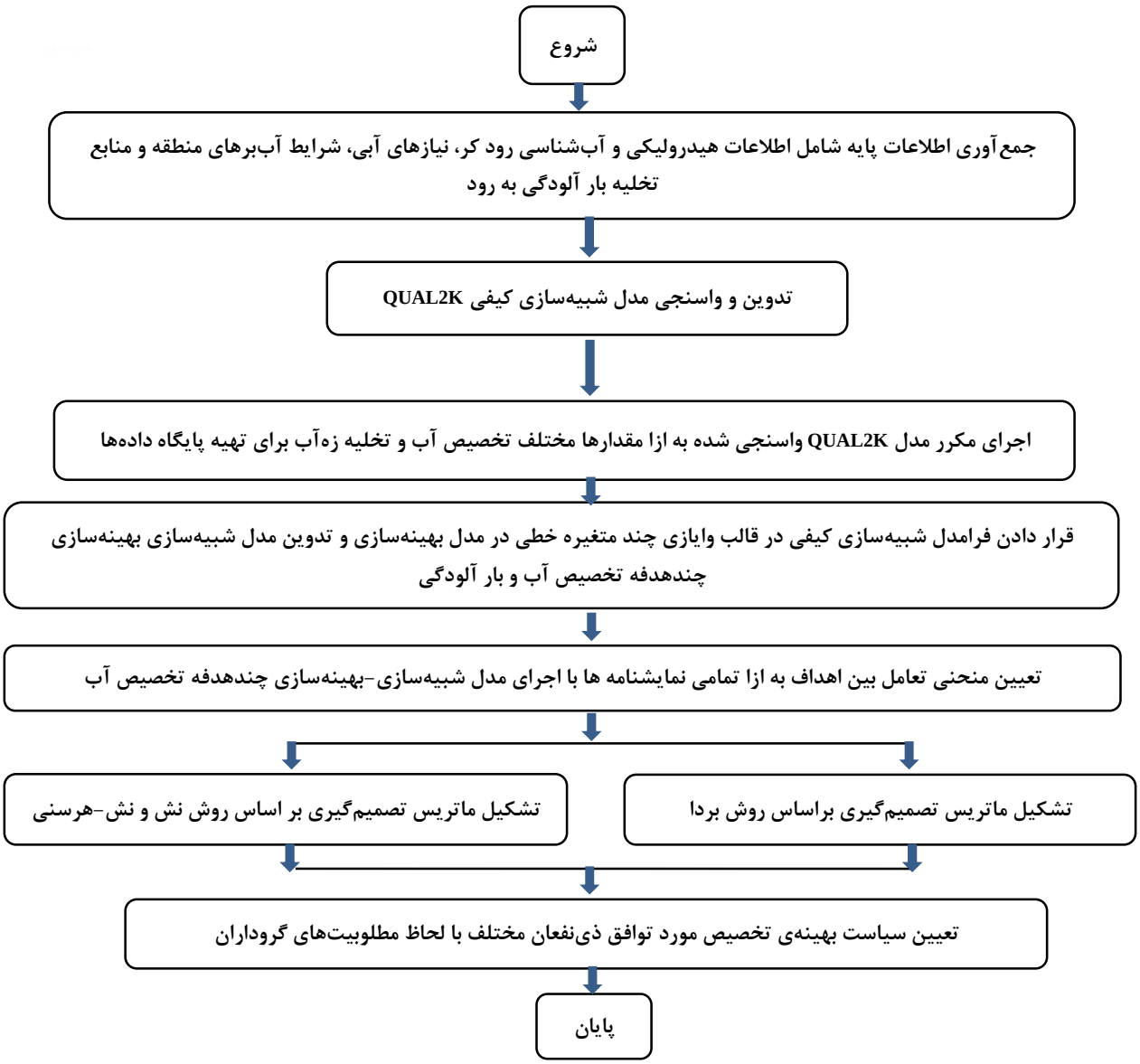
امروزه با افزایش جمعیت، مصارف گوناگون آب افزایش یافته است. این موضوع علاوه بر کاهش کمیت منابع آب، به‌دلیل توسعه‌ی شهرنشینی و افزایش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و درنتیجه، ورود زهاب‌های آلوده بخش‌های مزبور به این منابع، موجب کاهش کیفیت منابع آبی نیز شده است. برای فائق آمدن بر این چالش‌ها، اعمال مدیریت بهینه‌ی منابع آبی، در راستای تخصیص درست منابع آب با حداکثر بهره‌وری، امری ضروری است. مبحث مدیریت پایدار منابع آب، مسئله‌ی تخصیص همزمان آب و بار آلودگی با لحاظ تعاملات بهره‌برداران به‌منظور اجرائی شدن سیاست‌های تخصیص آب و بار آلودگی بهینه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر با ورود نظریه بازی‌ها به مدیریت منابع آب، این نظر مطرح شد که هریک از طرف‌های درگیر مطلوبیت‌های خود را جستجو کرده و مسئله از حالت تک تصمیم‌گیرنده-تک‌معیاره، به چند تصمیم‌گیرنده-چندمعیاره تبدیل شود (بیژنی‌منظر، ۱۳۹۲). چگونگی برداشت آب و تخلیه‌ی زهاب به رودها عوامل بسیار تأثیرگذاری در مدیریت بهینه‌ی کمی و کیفی این منابع آبی است.

در مسائل مربوط به تخصیص، مطلوبیت‌های گروداران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و بدیهی است که اهداف طرف‌های درگیر ممکن است در تضاد باشند. در مسئله تخصیص آب و تخلیه زهاب، آب‌بران، خواهان برداشت بیشتر آب، تخلیه‌کنندگان بار آلودگی خواهان تخلیه‌ی زهاب بیشتر، و سازمان محیط‌زیست خواهان حفظ کیفیت رود در سطح ملاک است. از این رو لازم است به مطلوبیت افراد تصمیم‌گیرنده در تعیین سیاست‌های تخصیص آب و تخلیه‌ی زهاب توجه شود. در غیر این صورت، سیاست‌های بهینه‌ی حاصله، چون سبب توافق گروداران درگیر نمی‌شوند، در عمل قابل اجرا نخواهند بود. لذا، در این تحقیق، یک روش‌شناسی جدید تخصیص آب و بار آلودگی، بر مبنای مدل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است. در روش‌شناسی پیشنهادی، برای سهولت در روند تصمیم‌گیری جمعی و انتخاب مطلوب‌ترین جواب از منظر همه‌ی گروداران، از سه مدل گزینش اجتماعی بردا[۱]، مدل بازی نش[۲] و نش-هرسنی[۳] استفاده شده است. تخصیص همزمان آب و بار آلودگی، و لحاظ عدم قطعیت در تخصیص بار آلودگی به‌وسیله‌ی محققین مختلف بررسی شده است (دای و لبدی، ۲۰۰۱; ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰; نیکو و همکاران، ۲۰۱۲; ددی و همکاران، ۲۰۱۳; توکلی، ۱۳۹۲; بیژنی‌منظر و مهجوری مجد، ۱۳۹۲; نیکو و همکاران، ۲۰۱۳; توکلی و همکاران، ۲۰۱۴; نیکو و همکاران، ۲۰۱۴; ذوالفقاری‌پور و احمدی، ۱۳۹۳; استالکی و همکاران، ; مهجوری و عباسی، ۲۰۱۵; منقسمی و همکاران، ۲۰۱۵; ذوالفقاری پور و احمدی، ۲۰۱۶; نیکو و همکاران، ۲۰۱۶; صابری و نیک‌سخن، ; شی و همکاران، ; منگ و همکاران، ۲۰۱۷; ژیا و همکاران، ۲۰۱۷; ژوو و همکاران، ۲۰۱۷ ; نصیری و همکاران، ۲۰۱۸; هوانگ و همکاران، ۲۰۱۸ و یوو و لوو، ۲۰۱۸). اما در این زمینه‌ی بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در رود با توجه به شاخص‌های کیفی و استفاده همزمان از نظریه های چانه زنی برای لحاظ تعاملات بهره‌برداران هنوز بررسی نشده است. لذا این مطالعه از نقطه نظر لحاظ همزمان عدم قطعیت‌ها، بررسی چندشاخصه‌ی بارآلودگی و به‌کارگیری مدل‌های چانه‌زنی (روش‌های بردا، نش و نش-هرسنی) در بحث تخصیص آب و بار آلودگی رود دارای نوآوری بوده و می‌تواند به عنوان یک نمونه برای کارهای آتی مدنظر قرار گیرد. بر این اساس، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه، بر مبنای چند شاخص کیفی آلودگی، برای تخصیص آب و بار آلودگی پیشنهاد شده است که همزمان سعی می‌کند مناقشه‌های بین آب‌برها و تخلیه‌کنندگان زهاب را لحاظ کند. در این مقاله با اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندهدفه‌ی تخصیص آب، منحنی تعامل بین اهداف تعیین و سپس از نظریه‌های چانه‌زنی بردا، نش و نش-هرسنی برای لحاظ تعاملات بهره‌برداران استفاده شده است. کارایی روش‌شناسی پیشنهادی در این تحقیق، در بخشی از رود کر واقع در استان فارس، ارزیابی شده است. نتایج حاصله نشان‌دهنده‌ی توانایی مدل بهینه‌سازی تدوین شده در تعیین سیاست‌های تخصیص همزمان آب و بار آلودگی بوده است.

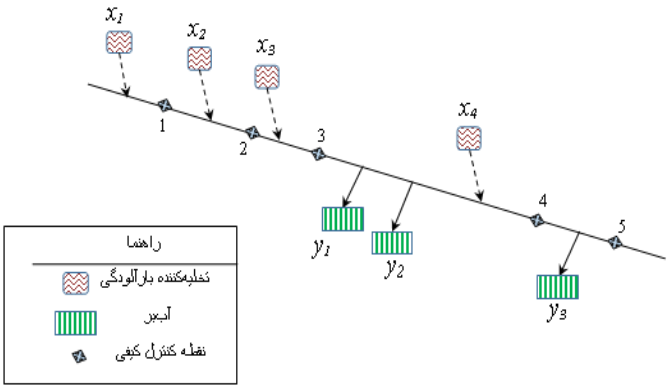
[۱] Borda
[۲] Nash
[3] Nash -Harsanye

۲-ساختار مدل پیشنهادی

در این تحقیق، پس از تدوین و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی کیفی، و همچنین تدوین مدل بهینه‌سازی تخصیص آب، مدل شبیه‌سازی QUAL2K مکرراً اجرا شد، سپس به منظور کاهش زمان اجرای مدل‌ها، فرامدل شبیه‌سازی کیفی (در قالب وایازی چند متغیره‌ی خطی) در مدل بهینه‌سازی تخصیص قرار گرفت. در مدل بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص آب و بار آلودگی، سه تابع هدف (۱- حداکثرسازی زهاب تخلیه‌شده به‌وسیله‌ی تخلیه‌کنندگان به رود، ۲-حداکثرسازی آب تخصیص داده‌شده به آب‌بران و ۳- حداقل‌سازی میزان تخطی شاخص‌های کیفی از ملاک) در نظر گرفته شده اند. پس از اجرای مدل بهینه‌سازی چندهدفه، منحنی تعامل بین اهداف تعیین شده است. هر نقطه بر روی منحنی تعامل، نشان‌دهنده‌ی مقدارها تابع هدف، به ازا یک سیاست بهینه تخصیص است. پس از تنظیم رویکردهای مختلف تخصیص، برای انتخاب مطلوب‌ترین سیاست تخصیص آب و بار آلودگی از روش‌های انتخاب اجتماعی بردا، مدل بازی نش و نش-هرسنی استفاده شده است. ساختار مدل پیشنهادی در شکل شماره ۱ ارائه شده است.



شکل ۱-نمودار مراحل روش پیشنهادی برای تخصیص بهینه‌ی آب و بار آلودگی.



شکل ۲- طرح‌واره‌ای از رود کر، آب‌بران و تخلیه‌کنندگان بار آلودگی در منطقه مطالعه شده.

۲-۱ شماتیک مدل پیشنهادی

معادلات کلی تخصیص آب در سامانه رودای کر، با ۳ آب‌بر و ۴ تخلیه‌کننده بار آلودگی با توجه به شکل شماتیک شماره ۲ در زیر ارائه گردیده است:

$$Max \quad h_1 = (\sum_{i=1}^{4} x_i) \tag{۱}$$

$$Max \quad h_2 = (\sum_{j=1}^{3} y_j) \tag{۲}$$

$$Min \quad h_3 = W_{DO} \times (V_{DO} / DO_{Max}) + W_{BOD} \times (V_{BOD} / BOD_{Max}) + W_{TSS} \times (V_{TSS} / TSS_{Max}) \tag{۳}$$

$$-\sum_{i=1}^{4} x_i + \sum_{j=1}^{3} y_j \le q_{up} - E_d \tag{۴}$$

$$-\sum_{i=1}^{3} x_i + y_j \le q_{up} \qquad j = 1 \tag{۵}$$

$$-\sum_{i=1}^{3} x_i + \sum_{j=1}^{2} y_j \le q_{up} \tag{۶}$$

$$-\sum_{i=1}^{4} x_i + \sum_{j=1}^{2} y_j \le q_{up} \tag{۷}$$

$$C_{c,DO} \ge C_{S,DO} \quad \forall c=1,2,...,5 \tag{۸}$$

$$C_{c,TSS} \le C_{S,TSS} \quad \forall c=1,2,...,5 \tag{۹}$$

$$C_{c,BOD} \le C_{S,BOD} \quad \forall c=1,2,...,5 \tag{۱۰}$$

$$C_{c,DO} = R\left(\sum_{i=1}^{i-1} x_i, \sum_{j=1}^{j-1} y_j, q_{up}, C_{up,DO}\right) \tag{۱۱}$$

$$C_{c,BOD} = f\left(\sum_{i=1}^{i-1} x_i, \sum_{j=1}^{j-1} y_j, q_{up}, C_{up,BOD}\right) \tag{۱۲}$$

$$C_{c,TSS} = g\left(\sum_{i=1}^{i-1} x_i, \sum_{j=1}^{j-1} y_j, q_{up}, C_{up,TSS}\right) \tag{۱۳}$$

که در معادله‌های بالا مفهوم متغیرها و فراسنج‌ها به شرح زیر است:

h_1 ، h_2 و h_3: تابع هدف (حداکثرسازی تخلیه زهاب به‌وسیله‌ی تخلیه‌کننده، حداکثرسازی آب تخصیص یافته به آب‌بر و حداقل‌سازی میزان تخطی از حد ملاک)، x_i: زهاب برگشتی به رود به‌وسیله‌ی تخلیه‌کننده iام (MCM/day)، y_j: آب تخصیص داده شده به آب‌بر j ام (MCM/day)، V: مقدار تفاوت غلظت شاخص کیفی مورد بررسی نسبت به حد ملاک آن شاخص، DO_{Max}: بیشترین حد شاخص DO، BOD_{Max}: بیشترین حد شاخص BOD ، TSS_{Max}: بیشترین حد شاخص TSS، W_{DO}، W_{BOD}، W_{TSS} وزن‌های لحاظ شده برای شاخص‌های کیفی DO، BOD و TSS، q_{up}: بده‌ی روزانه جریان بالادست رود (MCM/day)، $C_{s,DO}$: غلظت ملاک شاخص کیفیت DO در بالادست (mg/L)، $C_{s,BOD}$: غلظت ملاک شاخص کیفیت BOD در بالادست رود

(mg/L)، $C_{s,TSS}$: غلظت ملاک شاخص کیفیت TSS در بالادست رود(mg/L)، $C_{c,DO}$: غلظت شاخص کیفی DO در نقطه‌ی مهار c (mg/L)، $C_{c,TSS}$: غلظت شاخص کیفی TSS در نقطه‌ی مهار c (mg/L)، $C_{s,BOD}$: غلظت شاخص کیفی BOD در نقطه ی مهار c (mg/L)، E_d: نیاز آبی زیست‌محیطی(MCM/day)، $C_{up,DO}$: غلظت DO در بالادست رود(mg/L)، $C_{up,BOD}$: غلظت BOD در بالادست رود (mg/L)، $C_{up,TSS}$: غلظت TSS در بالادست رود (mg/L)، $C_{c,DO}$، $C_{c,BOD}$، $C_{c,TSS}$ توابعی هستند که با استفاده از معادله‌های پخش و زوال آلاینده از طریق مدل QUAL2K و اجرای مکرر آن برای مقدارها مختلف آب تخصیص داده‌شده برای مصرف کنندگان و زهاب تخلیه شده به‌وسیله‌ی تخلیه کنندگان مختلف و برازش (بر اساس ضریب همبستگی) یک معادله‌ی وایازی چندمتغیره خطی (به عنوان فرامدل)، با دقت مناسب به‌دست آمده است و کیفیت زهاب بازگشتی را از نقطه نظر DO، BOD و TSS به‌دست می‌دهند. لازم به ذکر است در این مدل بهینه‌سازی، کیفیت آب در هر نقطه مهار کیفی، به کیفیت آب در نقطه مهار کیفی قبلی و مقدار آب تخصیص داده شده به آب‌بر یا تخلیه بار آلودگی به‌وسیله‌ی تخلیه‌کننده در بالادست آن نقطه بستگی دارد. همچنین E_d در این تحقیق ۱۰٪ بده بالادست رود (q_{up}) در نظر گرفته شده است (حبیب اله فخرایی، ۱۳۸۷).

جهت لحاظ عدم قطعیت، براساس تحلیل حساسیت انجام شده، بده‌ی بالادست رود مهم‌ترین و تأثیرگذارترین فراسنج غیرقطعی مسئله تخصیص است. بده‌ی استفاده شده در این تحقیق، میانگین حداقل جریان ثبت گردیده ۷روز متوالی با دوره‌ی بازگشت ۱۰ ساله ($7Q_{10}$) بوده است. با توجه به بازه‌ی تغییرات داده‌های مشاهداتی طی سال‌های ۷۵ تا ۸۵، و قضاوت مهندسی ۶ نمایشنامه‌ی مختلف، حول بازه‌ی ($7Q_{10} \pm$ ۳۰٪)، برای فراسنج غیرقطعی (بده‌ی بالادست) تعیین شده است. به ازا نمایشنامه‌های مختلف بده‌ی بالادست، مدل بهینه‌سازی اجرا شده است تا تأثیرات عدم قطعیت سامانه بر خروجی سیاست‌های تخصیص آب و بار آلودگی، شناخته شود.

۲-۲-مدل شبیه‌سازی QUAL2K

مدل‌های ریاضی از مهم‌ترین ابزارهای پیش‌بینی کیفیت آب رودها هستند. برای رسیدن به اهداف مذکور، در این تحقیق از مدل QUAL2K، به منظور شبیه‌سازی کیفی آب رود کر، استفاده شده است. جهت به‌کارگیری مدل کیفی QUAL2K رود به بازه‌هایی با مشخصات هیدرولیکی و کیفی مشابه تقسیم گردید. در مدل مذکور، بده جریان، عمق، دما، مقدار و موقعیت تخلیه بارآلودگی، غلظت متغیرهای کیفی شاخص (نظیر اکسیژن محلول و BOD5) آلکالینیتی، pH، پاتوژن ها، فیتوپلانکتون، مقدار فسفر معدنی و ارگانیک، نیتروژن، جامدات معدنی و دما از جمله اطلاعات ورودی به سامانه هستند. پس از تدوین مدل شبیه‌سازی کیفی رود، واسنجی مدل با تغییر فراسنج‌های مرتبط با زوال متغیرهای کیفی DO, BOD و TSS صورت پذیرفته، به نحوی که اختلاف بین مقدارها شبیه سازی شده متغیرهای کیفی مذکور و مقدارها اندازه گیری شده در فرایند اندازه گیری حداقل مقدار ممکن گردد.

در ادامه، با تعیین بازه‌ی تغییرات محتمل بر مقدارها تخصیص آب به آب‌برها و تولید اعداد تصادفی مربوط به متغیرهای ورودی به مدل کیفی رود، با توجه به این تغییرات، مدل شبیه‌سازی کیفی QUAL2K واسنجی شده به ازا ورودی‌ها اجرا گشته و غلظت متغیرهای کیفی شاخص در نقاط مهار کیفی در مسیر رود تعیین می شود. سپس اطلاعات مربوط به تخصیص‌ها و بده‌ی بالادست به همراه مشخصات غلظت بارهای آلودگی در نقاط مختلف مهار کیفی برای ایجاد یک مدل جایگزین برای مدل QUAL2K ذخیره‌سازی می گردد.

۲-۲-انتخاب نقطه توافق شده‌ی بهره‌برداران با استفاده از روش‌های بردا، نش، و نش-هرسنی

در یک فرآیند تصمیم‌گیری، چنانچه تعداد تصمیم‌گیرندگان بیش از یک نفر باشد، تصمیم‌گیری با مشکلاتی همراه خواهد بود. چرا که افراد مختلف اهداف، دیدگاه‌ها و اولویت‌های متفاوتی داشتند و تصمیم نهایی باید به گونه‌ای باشد که کلیه این اختلاف نظرات در آن لحاظ شده باشد. در این تحقیق، گزینه‌ی برتر، آن است که با توجه به هر سه هدف یادشده، از بین دیگر گزینه‌های پیش رو بهتر باشد. به‌عبارتی می‌توان گفت، در این تحقیق گزینه‌ای که مقدار آب تخصیص داده شده به آب‌بران و مقدار تخلیه‌ی زهاب به‌وسیله‌ی تخلیه‌کنندگان را حداکثر کند، اما میزان تخطی از ملاکهای کیفی رود را

حداقل سازد، به‌عنوان برترین گزینه توافق شده یا بهترین سیاست تخصیص آب و بار آلودگی، معرفی می‌شود. از آنجا که در روش‌های گزینش اجتماعی، اولویت با مطلوب‌ترین گزینه (از نظر تصمیم‌گیرنده) است، باید ماتریس توافق به‌گونه‌ای شکل گیرد که بتوان بهترین سیاست تخصیص را از بین دیگر سیاست‌ها انتخاب کرد. جهت به‌کارگیری روش بردا، نش، و نش-هرسنی تابع‌های هدف بایستی همگی از جنس حداکثرسازی یا حداقل‌سازی باشند. در این تحقیق، اهداف از جنس حداکثرسازی در نظر گرفته شده‌اند. برای تابع هدف حداقل‌سازی تخطی از ملاک نیز از معکوس تخطی استفاده شده است. در ادامه، ماتریس توافق را تشکیل داده، نقطه‌ای که روی منحنی تعامل بین اهداف حداکثر مقدار را به‌دست آورده باشد، به عنوان گزینه برتر و به‌عبارتی بهترین سیاست تخصیص آب و بار آلودگی از مجموعه‌ی سیاست‌های تخصیص، نظیر نقاط مختلف روی منحنی تعامل بین اهداف، انتخاب می‌شوند. برای جزئیات بیشتر به شیخ‌محمدی و مدنی (۲۰۰۸) مراجعه شود. در روش نش و نش-هرسنی نیز از طریق مدل ضربی نش، نمایشنامه توافق گشنه، تعیین شده است. لازم به ذکر است این وزن ها برای اهداف اول تا سوم در روش نش-هرسنی به ترتیب عبارتند از ۰/۰۷۸۰، ۰/۰۰۴۶و ۰/۹۱۷۴.

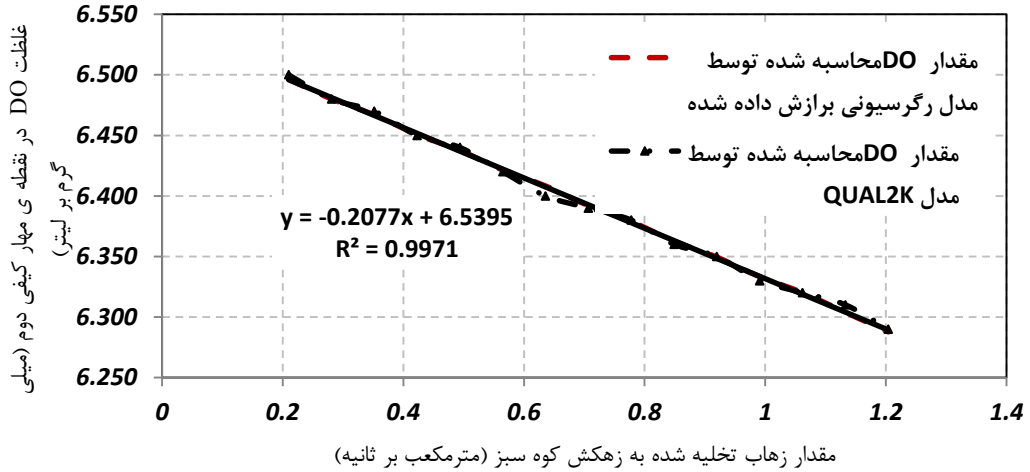
۳-۲-معرفی منطقه مطالعه شده

جهت ارزیابی کارایی روش‌شناسی پیشنهادی، بخشی از سیستم رود کر واقع در استان فارس به عنوان منطقه مطالعه شده، ارزیابی گردیده است. رود کر با حوضه‌ی مساحت ۹۶۵۰ کیلومتر مربع از ارتفاعات کوه پلنگی و برآفتاب سرچشمه گرفته، و از شهرهای سیوند، مرودشت، کناره، سیدان، قادرآب، سوریان و صفاشهر می‌گذرد. با توجه به نقش کلیدی در کشاورزی، و همچنین تامین نیاز بوم‌شناسی دریاچه‌های بختگان و طشک، مهم‌ترین رود فارس می‌باشد. رود کر ، از غرب دشت درودزن و از محل خروجی سد درودزن وارد شده و پس از طی طول دشت، از شرق خارج می‌شود. آب این رود به‌وسیله‌ی سد مخزنی درودزن تنظیم شده و بخش عمده‌ای از اراضی دشت را آبیاری کند. در ایران، بر اساس تحقیقات انجام گرفته، مهم‌ترین منابع آلاینده رودها عبارتند از ۱) زهاب‌های کشاورزی و ۲) تخلیه‌ی فاضلاب‌های شهری و صنعتی به رودها (مجنونیان ۱۳۷۸). رود کر بعد از سد درود زن و به‌ویژه در فاصله‌ی دو زهکش بزرگ کوه سبز و آهوچر، و در طول حدود ۲۶ کیلومتر پذیرای انواع گوناگون فاضلابی است که از منابع خانگی و شهری، صنعتی و کشاورزی روانه رود می گردند. سموم و آفت‌کش‌های مصرفی در بخش کشاورزی، و همچنین ورود فاضلاب‌های شهری و روستایی مرودشت و روستاهای اطراف، مهم‌ترین منابع آلاینده این رود به شمار می‌روند. بر اساس مطالعات جامع کاهش آلودگی آب، زهاب‌های کشاورزی با حدود ۴۲ درصد بالاترین سهم را در آلایندگی رود کر داراست. پس از آن فاضلاب شهری و روستایی با ۳۴ درصد، و صنایع با ۱۸ درصد در رتبه های بعد قرار دارند. مهم‌ترین منابع آلوده کننده رود کر عبارتند از فاضلاب‌های مجتمع پتروشیمی شیراز، و تصفیه خانه‌ی شهر مرودشت، زهکش آهوچر (بنان، ۱۳۸۵). محدوده مطالعه شده در پژوهش حاضر، ۷۴/۳ کیلومتر از رود کر است که شامل سه آب‌بر و چهار تخلیه‌کننده می‌باشد.

۳-نتایج و بحث

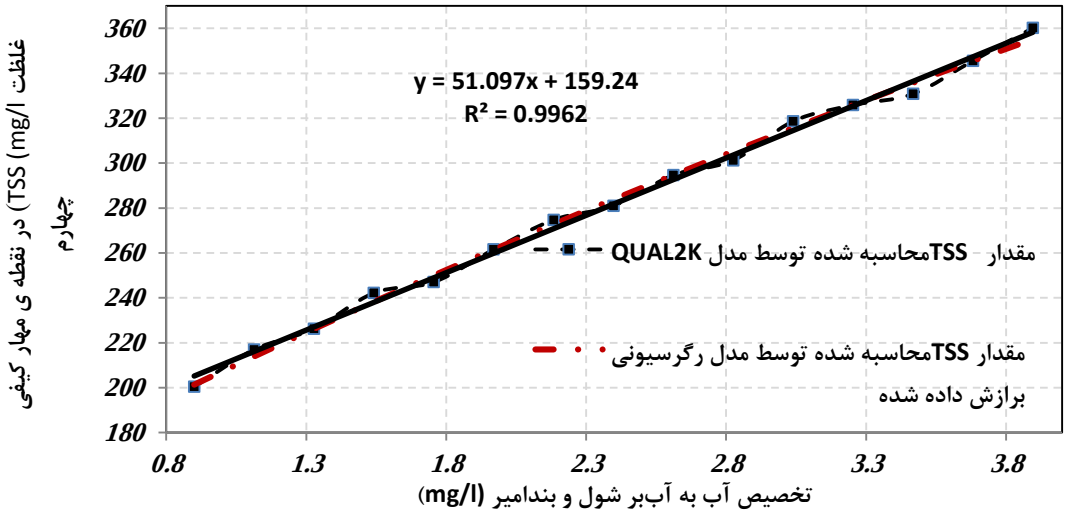
در این قسمت، نتایج مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی تخصیص آب و بار آلودگی با لحاظ چندین آلاینده‌ی شاخص کیفیت آب در شرایط عدم قطعیت، ارائه شده اند. شاخص‌های کیفی در نظر گرفته شده در این مطالعه DO ، BOD و TSS هستند. در این تحقیق، برای کاهش زمان اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پیشنهادی، مدل واسنجی شده‌ی QUAL2K با یک فرامدل جایگزین شده است. به این صورت که مدل QUAL2K به صورت مکرر برای مقدارها مختلف آب تخصیص داده‌شده برای مصرف کنندگان و زهاب تخلیه شده به‌وسیله‌ی تخلیه کنندگان مختلف اجرا گردیده است و یک تابع چندجمله‌ای به گروه اطلاعات ورودی-خروجی حاصله، برازش داده شده است. فرامدل رابطه‌ی بین برداشت آب و تخلیه‌ی زهاب بالادست را بر غلظت آلاینده‌های شاخص مشخص در هر نقطه مهار کیفی نشان می‌دهد. شکل شماره‌ی ۳ به عنوان نمونه‌ی مقایسه غلظت شاخص کیفی DOرا به‌وسیله‌ی مدل QUAL2K و فرامدل وایازیی چند متغیره‌ی خطی نشان می‌دهد. همان‌طور که روند نزولی شکل نشان می‌دهد با تخلیه‌ی بیشتر زهاب به‌وسیله‌ی زهکش کوه‌سبز، میزان

DO آب کاهش می‌یابد. از طرفی مقدار R^2 برابر با ۰/۹۹۷ به‌دست آمده است که بیانگر دقت مناسب تابع برازش داده شده است.



شکل۳-مقایسه غلظت DO در زهاب برگشتی از زهکش کوه سبز به‌وسیله‌ی مدل QUAL2K و فرامدل وایازیی چندمتغیره‌ی خطی در نقطه‌ی مهار کیفی دوم.

در شکل شماره ۴ مقدار شاخص کیفی TSS به ازا مقدارها مختلف تخصیص به آب‌بر شول و بندامیر آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش تخصیص آب به آب‌بر مذکور، مقدار TSS در رود در نقطه‌ی مهار کیفی چهارم افزایش یافته است. همچنین، مقدار بالای R^2 نشان دهنده‌ی دقت تابع برازش داده شده است.



شکل ۴- مقایسه غلظت TSS در رود، در تخصیص آب به آب‌بر شول و بندامیر به‌وسیله‌ی مدل QUAL2K و فرامدل وایازیی چندمتغیره‌ی خطی در نقطه‌ی مهار کیفی چهارم.

در این تحقیق، برای ایجاد مدل بهینه سازی چند هدفه از مدل NSGA-II استفاده شده است. مقدار جمعیت و تعداد نسل ها به نحوی تنظیم شده اند که منحنی اطمینان از همگرایی به بهینه‌ی عمومی مسئله در قالب منحنی تعامل بین اهداف بهینه حاصل گردد. بدین معنی که با اجرای مدل بهینه یابی به ازا مقدارها جمعیت و نسل های بالاتر تغییری در منحنی تعامل بین اهداف بهینه ایجاد نگردد. لازم به ذکر است که مدل NSGA-II

مدلی کاملا پر کاربرد و صحت سنجی شده بوده و بر مبنای تحقیقات دب و همکاران (۲۰۰۲) توسعه یافته است. برای رعایت اختصار در مقاله، از نام مدل بهینه سازی استفاده شده و خوانندگان می توانند برای توضیحات بیشتر به مقاله (Deb et al. 2002) مراجعه کنند. پس از اجرای مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی تخصیص آب و بار آلودگی، و استخراج منحنی تعامل بین اهداف، بهترین سیاست تخصیص آب و بار آلودگی، از مجموعه سیاست‌های تخصیص نظیر نقاط مختلف روی منحنی تعامل بین اهداف، با استفاده از روش‌های گزینش اجتماعی بردا، مدل بازی نش و نش-هرسنی انتخاب شده و به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. مقایسه‌ی گزینه برتر با استفاده از سه روش مذکور نشان می‌دهد که روش گزینش اجتماعی بردا و مدل بازی نش-هرسنی، هر دو نقطه‌ی شماره‌ی ۱ روی منحنی تعامل بین اهداف را انتخاب کرده‌اند. پس، نقطه مزبور، حتی از نقطه‌ی شماره ۷ (نقطه روی منحنی تعامل بین اهداف برگزیده به‌وسیله‌ی روش نش) نیز مطلوب‌تر است، گرچه مقدارهای تخصیص به آب‌بران و تخلیه‌کنندگان در گزینه‌ی برتر انتخابی به‌وسیله‌ی هر سه روش، بسیار نزدیک به هم هستند.

جدول۱- مقدارها تخصیص آب و بار آلودگی توافق شده‌ی بهره‌برداران با استفاده از روش‌های بردا، نش و نش-هرسنی.

روش چانه‌زنی	برگشت زهاب به‌وسیله‌ی تخلیه‌کنندگان*(MCM)			تخصیص آب به آب‌بران**(MCM)		
	x_1	x_2	x_3	x_6	x_4	x_5	x_7
بردا	۱/۵۲۸	۰/۳۵۷	٤/۸۹۷	۵/۷۲۱	۹/۱۷٦	٦/٤۸۵	۲/۲۱۹
نش	۱/٦۰۳	۰/۳۵۷	۵/۰۲۷	۵/۷۹۱	۹/۰۷۷	٦/٤۵۱	۱/۹۸۳
نش-هرسنی	۱/۵۲۸	۰/۳۵۷	٤/۸۹۷	۵/۷۲۱	۹/۱۷٦	٦/٤۸۵	۲/۲۱۹

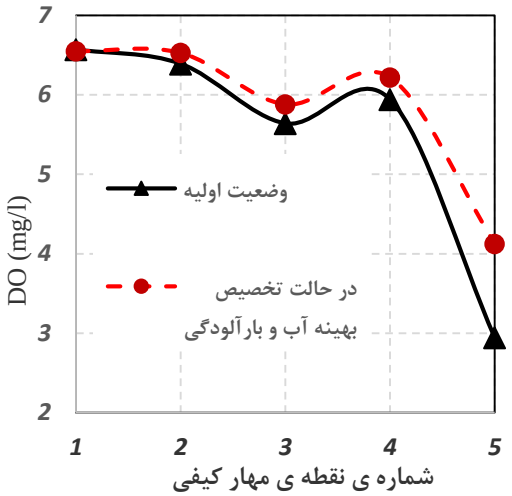
* x_1، x_2، x_3 و x_6 تخلیه‌کننده زهاب هستند.

** x_4، x_5 و x_7 آب‌بران سامانه رودی هستند.

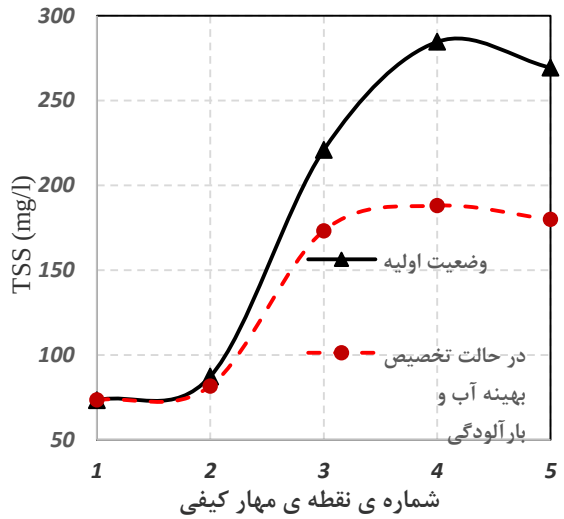
در شکل ۵ مقایسه‌ای بین غلظت شاخص کیفی DO در حالت اولیه (وضع فعلی برداشت‌ها و تخلیه‌ی زهاب) و بعد از تخصیص گزینه برتر به وسیله‌ی روش بردا انجام شده است. با توجه به اینکه در بالادست نقاط مهار کیفی اول و دوم آبی برداشت نشده و بازگشت زهاب به‌وسیله‌ی دو تخلیه‌کننده، بسیار ناچیز است، در نقاط مهار کیفی اول و دوم، غلظت شاخص کیفی DO تغییر ناچیزی داشته است. اما در نقطه‌ی مهار کیفی آخر، غلظت DO از ۲/۹ mg/l به ۴/۱mg/l رسیده است و بهبودی در حدود ۴۱٪ را نشان می‌دهد.

در شکل ۶، وضعیت شاخص کیفی TSS در حالت اولیه (وضع فعلی برداشت‌ها و تخلیه‌ی زهاب) و بعد از تخصیص آب و بار آلودگی طبق گزینه‌ی برگزیده به‌وسیله‌ی روش نش-هرسنی نشان داده شده است با توجه به اینکه در بالادست نقاط مهار کیفی اول و دوم، دو تخلیه‌کننده وجود دارند که از نظر شاخص کیفی TSS در بار آلودگی تخلیه‌شده به‌وسیله‌ی این دو تخلیه‌کننده، مشکلی وجود نداشته است، تأثیر اعمال تخصیص بهینه در نقاط مهار یک و دو ناچیز بوده اما همان‌طور که دیده می‌شود، بهبود چشم‌گیری در وضعیت این شاخص کیفی در نقاط مهار کیفی سه، چهار و پنج، بعد از تخصیص رخ داده است، به‌گونه‌ای که شاخص کیفی TSS در این نقاط مهار به ترتیب ۲۳٪، ۳۳٪ و ۳۳٪ کاهش یافته است. که همین مسئله به‌طور قطع موجب بهبود کیفیت رود، تا حد زیادی خواهد شد.

مقایسه وضعیت سامانه مطالعه شده، از نظر غلظت شاخص کیفی BOD، قبل و بعد از تخصیص آب و بار آلودگی طبق گزینه‌ی انتخابی برتر به‌وسیله‌ی روش نش، در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، بعد از تخصیص آب و بار آلودگی وضعیت شاخص کیفی BOD در نقاط مهار دو، سه و چهار بهتر شده است، به‌طوریکه در نقطه‌ی مهار دوم، شاخص کیفی BOD بهبودی در حد ۲۵٪ داشته است. به‌طور کلی بهبود چشمگیری در وضعیت شاخص کیفی DO و BOD دیده نمی‌شود. دلیل پدیده مزبور این است که در مدل بهینه‌سازی چندهدفه، وزن شاخص کیفی TSS (W_{TSS})، بیشتر از وزن دو شاخص کیفی دیگر، یعنی DO و BOD، در نظر گرفته شده است بنابراین تخصیص بهینه بیشتر در جهت کاهش TSS بوده است.



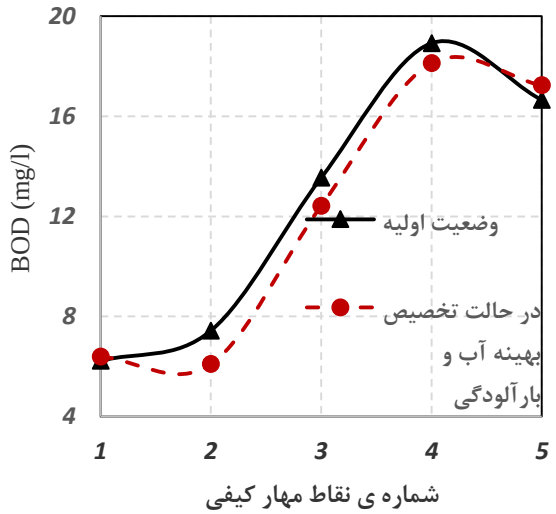
شکل ۵-مقایسه‌ی شاخص کیفی DO در حالت تخصیص اولیه (وضعیت فعلی برداشت‌ها و تخلیه‌ی زهاب) و بعد از تخصیص نمایشنامه‌ی برتر روش بردا.



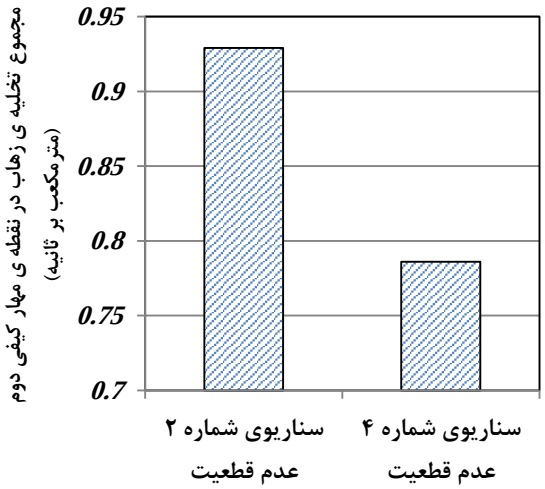
شکل۶- مقایسه‌ی شاخص کیفی TSS در حالت تخصیص اولیه (وضعیت فعلی برداشت‌ها و تخلیه‌ی زهاب) و بعد از تخصیص نمایشنامه‌ی برتر روش نش-هرسنی.

۳-۲-۱- نتایج لحاظ عدم قطعیت در مدل بهینه سازی چندهدفه

به ازا تعریف نمایشنامه‌های مختلف عدم قطعیت، مدل بهینه‌سازی چندهدفه اجرا شده است. سپس گزینه توافق شده با استفاده از روش بردا، نش و نش-هرسنی انتخاب گردیده و در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، هر سه روش بردا، نش و نش-هرسنی، نقطه‌ی شماره ۸ روی منحنی تعامل را به عنوان برترین سیاست تخصیص آب و بار آلودگی معرفی کرده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی تأکید بیشتر بر بهترین بودن سیاست تخصیص آب و بار آلودگی طبق نقطه‌ی شماره‌ی ۸ روی منحنی تعامل است. در شکل ۸، مجموع مقدار تخلیه زهاب تا نقطه‌ی مهار کیفی دوم، به ازا اجرای نمایشنامه‌های شماره دو و چهار عدم قطعیت ارائه شده است.



شکل۷- مقایسه‌ی شاخص کیفی BOD در حالت تخصیص اولیه (وضعیت فعلی برداشت‌ها و تخلیه‌ی زهاب) و بعد از تخصیص نمایشنامه‌ی برتر روش نش.



شکل۸- مجموع زهاب تخلیه‌شده تا نقطه‌ی مهار کیفی دوم، در نمایشنامه‌های شماره دو و چهار عدم قطعیت.

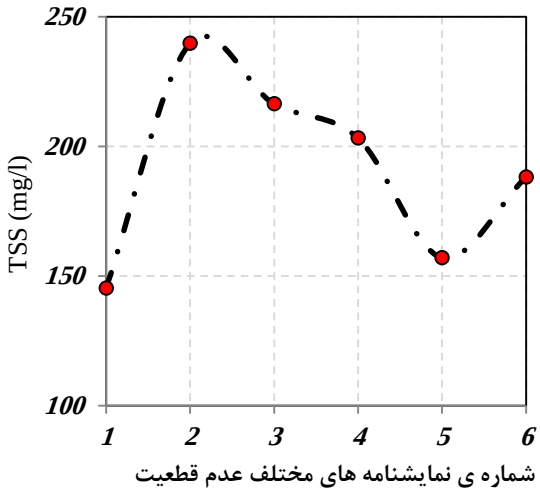
جدول۲- مقدارها تخصیص توافق شده‌ی ذی‌نفعان با استفاده از روش‌های بردا، نش و نش-هرسنی در شرایط عدم قطعیت.

روش چانه‌زنی	برگشت زهاب به‌وسیله‌ی تخلیه‌کنندگان*(MCM)				تخصیص آب به آب‌بران**(MCM)		
	x_1	x_2	x_3	x_6	x_4	x_5	x_7
بردا	۱/۷۳۲	۰/۲۷٤	٦/۱۸٤	٥/۸٦٦	۱/۸۳۸	٦/٥۳٤	۰/۲٤۳
نش	۱/۷۳۲	۰/۲۷٤	٦/۱۸٤	٥/۸٦٦	۱/۸۳۸	٦/٥۳٤	۰/۲٤۳
نش-هرسنی	۱/۷۳۲	۰/۲۷٤	٦/۱۸٤	٥/۸٦٦	۱/۸۳۸	٦/٥۳٤	۰/۲٤۳

* x_1 ، x_2 ، x_3 و x_6 تخلیه‌کننده زهاب هستند.

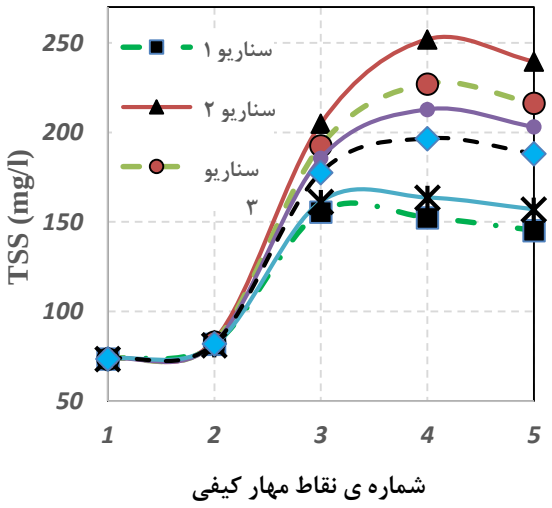
** x_4 ، x_5 و x_7 آب‌بران سامانه رودی هستند.

در شکل ۹، تغییرات غلظت شاخص کیفی *TSS* در نقطه‌ی مهار کیفی پنجم، در نمایشنامه‌های مختلف عدم قطعیت آورده شده است. با توجه به شکل، در نمایشنامه‌ی عدم قطعیت شماره‌ی یک، حداقل مقدار *TSS* و در نمایشنامه‌ی عدم قطعیت شماره‌ی دو افزایش مقدار *TSS*، در نقطه‌ی مهار کیفی پنجم را شاهدیم. در شکل ۱۰، مقدار غلظت شاخص کیفی *TSS* در همه‌ی نقاط مهار کیفی، به ازا اجرای نمایشنامه‌های مختلف عدم قطعیت،



شکل۹- غلظت TSS تا نقطه‌ی مهار کیفی پنجم در شرایط نمایشنامه‌های مختلف عدم قطعیت.

آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که اثرات تغییرات بده در نمایشنامه‌های مختلف عدم قطعیت بر غلظت *TSS* در نقاط مهار کیفی اول تا سوم بسیار ناچیز است، اما اثر آن در نقاط مهار کیفی چهارم و پنجم بیشتر می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهند که وقتی از بالادست رود به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنیم، کیفیت آب بدتر می‌شود.



شکل۱۰- مقایسه‌ی مقدار شاخص کیفی TSS در نقاط مهار کیفی مختلف در نمایشنامه های مختلف عدم قطعیت در بالادست رود.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رویکرد جدیدی جهت تخصیص بهینه‌ی آب و بار آلودگی بر مبنای یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه، مدل شبیه‌سازی QUAL2K و سه روش گزینش اجتماعی بردا، مدل بازی نش و نش-هرسنی ارائه شده اند.

جهت کاهش زمان اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پیشنهادی، از فرامدل به جای مدل QUAL2Kاستفاده شده است. همبستگی بالای نتایج حاصله از مدل شبیه‌سازی کیفی QUAL2K و تابع وایازیی برازش داده شده به عنوان فرامدل، دقت مناسب فرامدل را نشان می‌دهد.

در مدل بهینه‌سازی چندهدفه، حداکثرسازی زهاب برگشتی به‌وسیله‌ی تخلیه‌کنندگان، حداکثرسازی آب تخصیص یافته به آب‌بران، و حداقل‌سازی میزان تخطی از ملاک کیفی به عنوان سه تابع هدف مدل بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته شدند. در مدل بهینه‌سازی تخصیص آب و بار آلودگی، به دلیل وزن بیشتری که برای شاخص کیفی *TSS* در نظر گرفته شده، بهبود چشمگیری در وضعیت این شاخص کیفی، مخصوصاً در نقاط مهار کیفی سوم، چهارم و پنجم ملاحظه گردید. به‌وسیله‌ی مدل‌های حل اختلاف، گزینش اجتماعی بردا، مدل بازی نش و نش-هرسنی، مطلوب‌ترین نقطه روی منحنی تعامل بین اهداف مشخص گردید. نتایج حاصله از وضعیت شاخص کیفی *DO* و *TSS* بعد از اعمال تخصیص بهینه، نشان داد که اعمال سیاست تخصیص طبق روش‌های بردا، نش و نش-هرسنی، قادر است در نقطه‌ی مهار کیفی آخر، مقدار *DO* را تا ۴۱٪ ، و مقدار *TSS* را تا ۳۸٪ بهبود بخشد. وضعیت *BOD* در اکثر نقاط مهار به مقدار کمی بهبود یافته است. در این مقاله بحث عدم قطعیت در غالب نمایشنامه‌سازی دیده شده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی جهت بررسی دقیق‌تر از رویکرد نظریه مجموعه‌های فازی و بهینه‌سازی بازه‌ای برای لحاظ عدم قطعیت استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که بررسی در سامانه رود-مخزن نیز صورت پذیرد، افزون بر آنها می‌توان با توجه به وضعیت منطقه، متغیرهای کیفی بیشتری را مد نظر قرار داد.

منابع

۱) بنان, نگار؛ امید طبیعی و امیرعباس بنان، ۱۳۸۵، منابع آلاینده رود کر و سیوند، اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست، https://www.civilica.com/Paper-CEE01-

۲) بیژنی‌منظر م. ۱۳۹۲. کاربرد چانه‌زنی بازگشتی با بن‌بست در تخصیص بار آلودگی در رودها. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشکده مهندسی شهید نیکبخت. زاهدان

۳) بیژنی منظر م و مهجوری ن. ۱۳۹۲. تخصیص بار آلودگی در رود زرجوب: کاربرد روش‌های گزینش اجتماعی بردا و چانه‌زنی نش. نشریه تحقیقات منابع آب ایران. سال نهم. شماره ۳

۴) توکلی ع. ۱۳۹۲. تدوین مدل تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در رودها در شرایط عدم قطعیت: کاربرد تحلیل فاکتوریل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمای دکتر رضا کراچیان. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه تهران

۵) ذوالفقاری‌پور م.ا و احمدی آ. ۱۳۹۳. تدوین سیاست‌های تخصیص بار آلودگی در رودها با استفاده از رویکرد گزینش اجتماعی. نشریه آب و فاضلاب. شماره ۶

۶) فخرایی ح. تعیین ظرفیت خودپالایی رود های کر و سیوند و تخصیص بار آلودگی به منابع آلاینده آن پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز، ۱۳۸۷

۷) مجنونیان، هنریک، ۱۳۷۸. حفاظت رود ها، انتشارات سازمان حفاظت محیط زیست

8) Dai T and Labadie J.W. 2001. River basin network model for integrated water quantity/quality management. Journal of Water Resources Planning and Management. 127(5):295-305.

9) Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T., 2002, A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 6(2), PP. 182-197.

10) Dedi L, Shenglian G, Quanxi S and Yunzhong J. 2014. Optimal allocation of water quantity and waste load in the northwest Pearl river delta, China. Stock environ res risk assess. 28:1525-1542.

11) Estalaki, S.M., Abed-Elmdoust, A. and Kerachian, R., 2015. Developing environmental penalty functions for river water quality management: application of evolutionary game theory. Environmental Earth Sciences, 73(8), pp.4201-4213.

12) Huang, X., Chen, X. and Huang, P., 2018. Research on Fuzzy Cooperative Game Model of Allocation of Pollution Discharge Rights. Water, 10(5), p.662.

13) Mahjouri, N. and Abbasi, M.R., 2015. Waste load allocation in rivers under uncertainty: application of social choice procedures. Environmental monitoring and assessment, 187(2), p.5.

14) CEE01_033.html Meng, C., Wang, X. and Li, Y., 2017. An Optimization Model for Waste Load Allocation under Water Carrying Capacity Improvement Management, A Case Study of the Yitong River, Northeast China. Water, 9(8), p.573.

15) Monghasemi, S., Nikoo, M.R., Fasaee, M.A.K. and Adamowski, J., 2015. A novel multi criteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off

problems in construction projects. Expert systems with applications, 42(6), pp.3089-3104.
16) Nasiri-Gheidari, O., Marofi, S. and Adabi, F., 2018. A robust multi-objective bargaining methodology for inter-basin water resource allocation: a case study. Environmental Science and Pollution Research, 25(3), pp.2726-2737.
17) Nikoo M.R, Kerachian R and Karimi A. 2012. A nonlinear interval model for water and waste load allocation in river basins. Water Resources Management. 26(10): 2911-2926
18) Nikoo, M.R., Kerachian, R., Karimi, A. and Azadnia, A.A., 2013. Optimal water and waste-load allocations in rivers using a fuzzy transformation technique: a case study. Environmental monitoring and assessment, 185(3), pp.2483-2502.
19) Nikoo, M.R., Kerachian, R., Karimi, A., Azadnia, A.A. and Jafarzadegan, K., 2014. Optimal water and waste load allocation in reservoir–river systems: a case study. Environmental Earth Sciences, 71(9), pp.4127-4142.
20) Nikoo, M.R., Beiglou, P.H.B. and Mahjouri, N., 2016. Optimizing multiple-pollutant waste load allocation in rivers: an interval parameter game theoretic model. Water resources management, 30(12), pp.4201-4220.
21) Saberi, L. and Niksokhan, M.H., 2016. Expression of Concern-Optimal waste load allocation using graph model for conflict resolution. Water Science and Technology, p.wst2016429.
22) Sheikhmohammady M and Madani K. 2008. Bargaining over the Caspian sea-the largest lake on the earth. Proceeding of the 2008 world environmental and water resources congress. Honolulu. Hawaii. 1-9
23) Shi, G.M., Wang, J.N., Zhang, B., Zhang, Z. and Zhang, Y.L., 2016. Pollution control costs of a transboundary river basin: Empirical tests of the fairness and stability of cost allocation mechanisms using game theory. Journal of environmental management, 177, pp.145-152.
24) Tavakoli A, Kerachian R and Nikoo M. R. 2014. Water and waste load allocation in rivers with emphasis on agricultural return flows: application of fractional farctorial analysis. Environmental Monitoring and Assessment . 186(9): 5935-5949
25) Xia, B., Qian, X. and Yao, H., 2017. An improved risk-explicit interval linear programming model for pollution load allocation for watershed management. Environmental Science and Pollution Research, 24(32), pp.25126-25136.
26) Xu, J., Hou, S., Yao, L. and Li, C., 2017. Integrated waste load allocation for river water pollution control under uncertainty: a case study of Tuojiang River, China. Environmental Science and Pollution Research, 24(21), pp.17741-17759.
27) Yu, S. and Lu, H., 2018. Integrated watershed management through multi-level and stepwise optimization for allocation of total load of water pollutants at large scales. Environmental Earth Sciences, 77(10), p.373.
28) Zhang W, Wang Y, Peng H, Li Y and Tang J. 2010. A coupled water quantity-quality model for water allocation analysis. Water Resources Management. 24(3): 485-511.
29) Zolfagharipoor, M.A. and Ahmadi, A., 2016. A decision-making framework for river water quality management under uncertainty: Application of social choice rules. Journal of environmental management, 183, pp.152-163.