محیط‌شناسی، دورهٔ ۴۳، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۶، صفحهٔ ۱۸۰-۱۶۳

تعیین جریان رهاسازی بهینه از مخزن سد با درنظرگرفتن نیازهای کمّی و کیفی رودخانه

مصطفی فرهادیان[۱]*، امید بزرگ‌حداد[۲]، مریم پازکی[۳]، سمانه سیف‌اللهی آغمیونی[٤]

۱. کارشناس‌ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران (obhaddadsd@ut.ac.ir)

۳. استادیار، دانشکدهٔ محیط‌زیست، دانشگاه تهران (mpazoki@ut.ac.ir)

٤. دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران (Seifollahi@ut.aco.ir)

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹٤/۷/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۲/۲۲

چکیده

برای تأمین جریان محیط‌زیستی رودخانه می‌توان بخشی از جریان‌های تخصیص‌یافته به دیگر اهداف بهره‌برداری از سدها مانند صنعت، برق آبی و کشاورزی را به جریان محیط‌زیستی اختصاص داد. اما، برای ایجاد تعادلی مناسب و رعایت عدالت در میان ذی‌نفعان اهداف محیط‌زیستی و دیگر اهداف موجود، لازم است تمامی این اهداف به‌منظور تعیین جریان رهاسازی مناسب به‌طور هم‌زمان بررسی شود. بنابراین، در این تحقیق، به تعیین جریان رهاسازی بهینه از سد به‌گونه‌ای پرداخته شده است که این جریان بتواند تمامی اهداف کلان موجود در بهره‌برداری از آب رودخانه را تأمین کند. برای تعیین جریان رهاسازی بهینه، مقدارهای جریان محیط‌زیستی در رودخانه با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی محاسبه شد. سپس، اهداف کمّی و کیفی موجود در بهره‌برداری از آب رودخانه شناسایی، دسته‌بندی و تعریف شد. پس از آن، با استفاده از نظریهٔ حل اختلاف نش، از میان بازهٔ جریان محیط‌زیستی حاصل جریان رهاسازی بهینه با توجه به تمامی اهداف مختلف تعیین شد. روش ارائه‌شده روی سامانهٔ مخزن- رودخانهٔ گتوند-کارون به‌کار گرفته شد و جریان رهاسازی بهینه برای وزن‌های نسبی مساوی برای تمام اهداف، برابر با ۱۸۳/۸مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد.

کلیدواژه

جریان رهاسازی، جریان محیط‌زیستی، حل اختلاف، سامانهٔ گتوند-کارون، کنترل کیفیت آب.

۱. سرآغاز

بهره‌برداری از منابع آبی مشترک، به‌دلیل وجود محدودیت‌های مختلف همواره موجب بروز اختلاف در میان ذی‌نفعان می‌شود. بروز اختلاف موجب می‌شود که ذی‌نفعان با ترجیح منافع شخصی کوتاه‌مدت خود بر منافع عمومی، به مقداری بیش از اندازهٔ بهینهٔ عمومی از منابع آب بهره‌برداری کنند (دانش‌یزدی و همکاران، ۱۳۹۲). این موضوع ضمن وارد آوردن خسارات محیط‌زیستی، موجب وارد شدن زیان به خود ذی‌نفعان در بلندمدت نیز می‌شود. از طرف دیگر، روند توسعه و پیشرفت اقتصادی و اجتماعی در حوضهٔ رودخانه‌ها موجب کاهش جریان آب رودخانه و افزایش مقدار و غلظت تخلیهٔ آلاینده‌ها به درون رودخانه‌ها می‌شود. این عوامل کاهش جریان محیط‌زیستی و افزایش غلظت آلودگی و مدت تماس آب آلوده با محیط‌زیست می‌انجامد. این امر در نهایت از بین رفتن زیست‌بوم‌های رودخانه‌ای را به‌دنبال دارد.

لذا، با توجه به مواردی از قبیل محدودیت منابع آب در

* نویسنده مسئول: Email: farhadian.m@ut.ac.ir

دسترس، ضرورت تأمین آب مورد نیاز اهداف مختلف (نیازهای شهری، صنعتی و کشاورزی)، ضرورت تأمین جریان محیط‌زیستی رودخانه و افزایش احتمال بروز آلودگی در آب‌های سطحی، لازم است مقدار جریان رودخانه به صورتی تعیین شود که به‌طور هم‌زمان تمامی اهداف فوق را تأمین کند (اکبری و همکاران، ۱۳۹۳). جریان رهاسازی از سد یکی از منابع مهم تأمین آب لازم برای نیازهای شهری، صنعتی و کشاورزی است. اما به‌علت وجود محدودیت‌ها در مقدار آب در دسترس سد، تعیین مقدار جریان رهاسازی موجب بروز اختلافات بسیاری در میان ذی‌نفعان آب رودخانه‌ها شده است. جریان رهاسازی از سد عمدتاً با توجه به اهداف اقتصادی کوتاه‌مدت تعیین می‌شود و در تعیین آن به تأمین جریان محیط‌زیستی به‌دلیل نداشتن صرفهٔ اقتصادی بالا، توجه کافی نمی‌شود. لذا، در تعیین جریان رهاسازی از سد لازم است به اهداف بسیاری توجه شود. این اهداف به‌ترتیب اهمیت تأمین نیازها اولویت‌بندی می‌شود.

هدف از انجام تحقیق حاضر، تعیین مقدار جریان رهاسازی از سد برای رودخانه به‌صورتی است که این جریان نیازهای آبی اهداف اصلی موجود شامل نیازهای شهری، صنعتی و کشاورزی، همچنین نیازهای جریان محیط‌زیستی رودخانه را تأمین کند. علاوه‌بر آن، آسیب‌های ناشی از بروز آلودگی را تا حد ممکن کمینه سازد. لذا، در این تحقیق، جریان رهاسازی با توجه به اهداف کمّی و کیفی تعیین می‌شود. در این راستا تحقیقات زیادی صورت گرفته است که در ادامه مختصری از این تحقیقات ارائه می‌شود.

Dussaillant و همکاران (۱۹۹۷) کیفیت آب رودخانهٔ ماپوچو[1] شیلی را با استفاده از مدل QUAL-2E شبیه‌سازی کردند. این تحقیق با هدف پیش‌بینی کاهش سطح کیفیت آب این رودخانه، به‌دلیل بروز آلودگی‌های ناشی از اجرای طرح‌های آینده و ارائهٔ راهکارهای مناسب برای کاهش تبعات مضر آن انجام شد. طرح‌های آینده شامل احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در رودخانه بود. بدین ترتیب، مشخصات رودخانه و نقاط تخلیهٔ آلاینده‌های طرح‌هایی آینده برای مدل QUAL-2E تعریف و شبیه‌سازی‌های لازم انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های سناریوهای مختلف نشان داد که با انتخاب سناریویی مناسب می‌توان سطح کیفیت آب رودخانه را ارتقا داد.

Melching و Yoon (۱۹۹۶) عدم قطعیت‌های موجود در مدل QUAL-2E را در رودخانهٔ پاساییک[2] در نیوجرسی آمریکا بررسی کردند. در این تحقیق روش‌هایی را برای شناسایی داده‌هایی ارائه می‌کند که منجر به کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های انجام‌شده با مدل می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش عدم قطعیت در داده‌های سرعت هوادهی[3] و سرعت رشد جلبک[4] موجب کاهش عدم قطعیت سایر پارامترهای کیفی می‌شود.

Park و Lee (۲۰۰۲) به بررسی کارایی مدل‌های شبیه‌سازی کیفی در رودخانهٔ نکدانگ[5] کره پرداختند. در این تحقیق مدل‌های QUAL-2K و QUAL-2E برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه به‌کار گرفته شد. به‌منظور افزایش توانایی‌های مدل‌های QUAL-2K و QUAL-2E در شبیه‌سازی رودخانهٔ نکدانگ، این مدل‌ها توسعه داده و از آن برای شبیه‌سازی چند پارامتر کیفی در رودخانه استفاده شد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی‌ها با مدل QUAL-2K با نتایج حاصل از داده‌های مشاهداتی رودخانه تطابق بیشتری دارد.

آزلینو و همکاران (۲۰۰۶) برای تعیین سهم هر یک از منابع تخلیهٔ آلاینده در کاهش کیفیت آب رودخانه، مدل شبیه‌سازی QUAL-2E را با تحلیل‌های عاملی[6] رودخانه ترکیب کردند. برای مشاهدهٔ کارایی مدل ترکیبی ارائه‌شده، این مدل در دو حوضهٔ رودخانه‌ای در ایتالیا به‌کار رفت. آن‌ها با استفاده از روش ارائه‌شده توانستند سهم آلودگی هر کدام از منابع آلایندهٔ موجود در این حوضه‌ها را تعیین کنند.

Kerachian و Karamouz (۲۰۰۷) برای مدیریت کیفی

سامانه‌های مخزن- رودخانه از ترکیب مدل شبیه‌ساز کیفی و نظریهٔ حل اختلاف استفاده کردند. در این مدل، از نوع تصادفی جدید نظریهٔ حل اختلاف نش[۷] برای رفع اختلاف بین تصمیم‌گیران و ذی‌نفعانی استفاده شد که در مدیریت کیفی سامانه‌های مخزن- رودخانه اختلاف نظر دارند. اختلاف اصلی بین تصمیم‌گیران و ذی‌نفعان بر سر منافع حاصل از عرضهٔ آب برای نیازهای مختلف، کیفیت آب سامانهٔ مخزن رودخانه، همچنین تخلیهٔ بار آلاینده در رودخانه بود. برای شبیه‌سازی لایه‌های حرارتی مخزن و کیفیت آب رهاسازی‌شده از سد از مدل شبیه‌ساز استفاده شد. در این تحقیق از GA برای بهینه‌سازی قاعدهٔ بهره‌برداری از مخزن سد استفاده شد و در آن برای تولید جواب‌های اولیه برای GA، از GA با طول کروموزم متغیر[۸] (VLGA) استفاده شد. از این روش برای بهره‌برداری از سامانهٔ مخزن-رودخانهٔ قم‌رود ایران استفاده شد. نتایج نشان داد که با استفاده از این روش می‌توان از شوری آب تخصیص داده شده برای نیازهای مختلف، همچنین آب رودخانه کاست.

نیک‌سخن و کراچیان (۱۳۸۸) مدل جدیدی برای تجارت مجوزهای تخلیهٔ چند بار آلودگی شاخص در رودخانه‌ها ارائه کردند. آنها نخست، به‌کمک روش بهینه‌سازی چندهدفه، منحنی تبادل بین هزینهٔ تصفیهٔ کل و بیشینهٔ غلظت آلایندهٔ شاخص را تعیین کردند. سپس، به‌کمک روش رفع اختلاف و با استفاده از توابع مطلوبیت تصمیم‌گیرندگان، میزان تخصیص بهینهٔ بارهای آلودگی و در نتیجه میزان تخلیه و تصفیهٔ هر کدام از واحدها را مشخص کردند. در ادامه، با تعیین بیشینهٔ مقدار تخلیهٔ آلاینده‌های مورد نظر و مقایسهٔ آن با مقادیر بهینه، نحوهٔ تجارت مجوزهای تخلیهٔ بار آلودگی مشخص شد.

Hughes و Louw (۲۰۱۰) برای تعیین جریان محیط‌زیستی تحت سناریوهای مختلف مدیریتی، روش انعطاف‌پذیری ارائه کردند. در این روش، نخست شاخص تنش[۹] بر اساس پاسخ اجزای زیست‌بوم به مقدار جریان محیط‌زیستی تعریف شد. سپس، بر اساس شاخص تنش، برای اهداف محیط‌زیستی، رژیم جریان مناسبی تحت سناریوهای مختلف مدیریتی برای تأمین جریان محیط‌زیستی تعیین شد. آن‌ها این روش را در آفریقای جنوبی و در دوره‌ای چندساله به‌کار گرفتند. نتایج نشان داد که روش ارائه‌شده در ارزیابی و تعیین مقدار جریان محیط‌زیستی عملکرد خوبی دارد.

یانگ (۲۰۱۱) برای تخصیص جریان‌های محیط‌زیستی از رودخانهٔ زرد[۱۰] چین به زمین‌های پایین‌دست، از مدل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده کرد. در مدل ارائه‌شده سلامت زیست‌بوم و منافع اقتصادی ذی‌نفعان زمین‌های پایین‌دست در نظر گرفته شد. نتایج به‌کارگیری بهینه‌سازی چندهدفهٔ ارائه شده نشان داد که با استفاده از این مدل می‌توان مقدار استفاده از آب را ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش داد.

De Andrade و همکاران (۲۰۱۲) عوامل مؤثر بر تخصیص بار آلاینده را تعیین کردند. این عوامل شامل منافع اقتصادی حاصل از تخلیهٔ آلاینده‌ها، حضور ذی‌نفعان مختلف و منازعات سیاسی و اجتماعی بود. برای حل مشکل تخصیص بار آلاینده به رودخانه، مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز با ترکیب مدل QUAL-2E و الگوریتم نورد شبیه‌سازی‌شده[۱۱] (SA) ارائه شد. از این مدل برای تعیین اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی[۱۲] (BOD) در حوضهٔ رودخانهٔ سانتا ماریادا ویتوریا[۱۳] در برزیل استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز ارائه‌شده راه‌حل‌های مناسبی برای اهداف متضاد موجود ارائه می‌دهد.

دانش‌یزدی و همکاران (۱۳۹۲) برای محاسبهٔ کل سود خالص حاصل از مصرف آب درحوضهٔ آب‌ریز دریاچهٔ ارومیه مدل برنامه‌ریزی خطی را توسعه دادند. سپس، با توجه به نوع همکاری آب‌بران با یکدیگر، برخی قیدهای لازم را به مدل اضافه کردند تا بتوان سود حاصل از آن نوع همکاری را محاسبه کرد. در نهایت نیز، با به‌کارگیری هم‌زمان مدل برنامه‌ریزی منابع آب با مفاهیم نظریهٔ بازی‌ها، حالت‌های مختلف همکاری بین ذی‌نفعان را ارزیابی کردند.

نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از آن بود که به‌کارگیری نظریهٔ بازی‌ها به‌همراه مدل جامع مدیریت منابع آب به‌طور مؤثری در ارزیابی حالات مختلف همکاری در حوضهٔ آب‌ریز دریاچهٔ ارومیه استفاده می‌شود.

ضرغامی و صفاری (۱۳۹۲) منابع آب موجود و میزان منابع و مصارف در بخش‌های مختلف موجود در حوضهٔ آب‌ریز رودخانهٔ زرینه‌رود را ارزیابی و برآورد کردند. سپس، با استفاده از نظریهٔ بازی‌ها به تخصیص منابع آب و حل اختلاف بین مصرف‌کنندگان پرداختند. تابع هدف با استفاده از تابع نش نامتقارن مدل‌سازی و شکل تابع مطلوبیت ذی‌نفعان نیز به‌صورت غیرخطی تحلیل شد. در نهایت، میزان سهم بهینهٔ هر یک از ذی‌نفعان از منابع آب این رودخانه بر مبنای اهمیت بخش‌های مصرف‌کننده برای دورهٔ دوازده ماه استخراج و ترسیم شد.

Shiau و Wu (۲۰۱۳) برای تأمین جریان محیط‌زیستی قاعدهٔ جدید بهره‌برداری از مخزن را تعریف کردند. از نظر آن‌ها، تأمین جریان محیط‌زیستی از مخازن نیازمند درنظرگرفتن هم‌زمان نیازهای آبی انسان‌ها و زیست‌بوم‌هاست. هر دوی این نیازها اهدافی در نظر گرفته شد که لازم است بهینه‌سازی شود. روش ارائه‌شده در این تحقیق با نزدیک‌کردن دبی جریان رهاسازی به دبی جریان طبیعی رودخانه به تأمین جریان محیط‌زیستی می‌پردازد. برای بررسی کارایی روش ارائه شده، این روش در مخزن فیتسویی[14] تایوان به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تأمین جریان محیط‌زیستی لزوماً عملکرد مخزن در تأمین نیازهای دیگر اهدف را کاهش نمی‌دهد، زیرا رهاسازی جریان از سد در تأمین جریان محیط‌زیستی، عملکرد مخزن را در کنترل سیل افزایش می‌دهد. این افزایش کاهش عملکرد مخزن در تأمین آب نیازهای شهری و تولید برق را جبران می‌کند.

اکبری و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از GA، میزان تخصیص بهینه از آب مخزن سد حوضهٔ آب‌ریز زاینده‌رود را برای ذی‌نفعان این سد تعیین کردند شامل شهری، صنعت، کشاورزی و محیط‌زیستی. آن‌ها سود اقتصادی هر یک از ذی‌نفعان را تعیین کردند و با استفاده از بازی‌های مشارکتی به تحلیل اقتصادی تعاملات ذی‌نفعان موجود پرداختند. در نهایت نیز، منافع حاصل از تخصیص آب به هر یک از ذی‌نفعان تعیین شد.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات هیدرولوژیکی و زیست‌بومی حوضهٔ رودخانهٔ ایست[15] چین را بررسی کردند. آن‌ها در چهار ایستگاه از رودخانه و در رژیم‌های مختلفی از جریان، مشخصات هیدرولوژیکی و زیست‌بومی حوضه را اندازه‌گیری کردند. داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌ها با استفاده از نرم‌افزار نشانگر تغییرات هیدرولوژیکی[16] (IHA) تحلیل شد. نتایج آن‌ها نشان دادند که (۱) بهره‌برداری از سدهای حوضه، تعداد روزهای بیشینه و کمینهٔ جریان رودخانه نسبت به جریان طبیعی را به‌ترتیب افزایش و کاهش داده است؛ (۲) به‌علت افزایش و کاهش‌های مکرر جریان رودخانه در تولید انرژی برق‌آبی، رژیم جریان رودخانه به‌طور کامل تغییر کرده است؛ (۳) برای تعیین جریان محیط‌زیستی رودخانه باید به جنبه‌های مختلف هیدرولوژیکی و زیست‌بومی تحت تأثیر دبی جریان رودخانه توجه کرد؛ و (۴) در این رودخانه به سه مقدار متفاوت جریان برای تأمین جریان محیط‌زیستی نیاز است.

Elhatip و Hinis (۲۰۱۵) جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ ایفراتس[17] ترکیه را با استفاده از روش‌های مختلف تعیین کردند. برای این کار، از روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی مختلفی استفاده کردند. روش‌های هیدرولیکی شامل روش محیط خیس‌شده و به‌کارگیری نرم‌افزار سامانهٔ آنالیز رودخانه[18] (HEC-RAS) و روش‌های هیدرولوژیکی شامل روش جریان پایه و روش تحلیل منحنی مدت‌زمان[19] بود. آن‌ها علاوه‌بر محاسبهٔ جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ ایفراتس، جریان مورد نیاز برای تولید برق‌آبی در سد کماه[20] و جریانی را تعیین کردند که باید از این سد برای تأمین جریان محیط‌زیستی رهاسازی

شود. نتایج نشان داد که کمینهٔ جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ ایفراتس، ۱۸/۲ مترمکعب بر ثانیه است.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی علت‌های کاهش سطح کیفیت آب دریاچهٔ تیاهو[۲۱] پرداختند. آن‌ها واردشدن جریان‌های آلوده از رودخانه‌ها را علت اصلی کاهش سطح کیفیت آب این دریاچه معرفی کردند. لذا، بهبود وضعیت کیفی رودخانه‌های حوضه را شرط بهبود وضعیت کیفیت دریاچهٔ تیاهو دانستند. آن‌ها به‌منظور افزایش سطح کیفیت آب دریاچه تا سطوح استاندارد، بیشینهٔ مقادیر مجاز تخلیهٔ آلودگی در رودخانهٔ ویوجین[۲۲] را تعیین کردند که مهم‌ترین رودخانهٔ حوضه است. این کار با استفاده از مدل QUAL-2K و با سعی و خطا انجام شد. با استفاده از این روش، بیشینهٔ مقدار تخلیهٔ مجاز برای چهار شاخص آلاینده، نیتروژن کل[۲۳]، فسفر کل[۲۴]، و آمونیاک[۲۵]، نیاز اکسیژن شیمیایی[۲۶] (COD) در رودخانهٔ ویوجین تعیین شد. بررسی‌ها نشان داد که برای افزایش سطح کیفی آب دریاچه تا سطوح استاندارد لازم بود مقادیر تخلیهٔ این شاخص‌ها در رودخانهٔ ویوجین نسبت به مقادیر تخلیهٔ کنونی آن، به‌ترتیب، ۴۷/۷۵، ۳۷/۰۸، ۲۷/۲۶ و ۱۳/۳۵ درصد کاهش پیداکند.

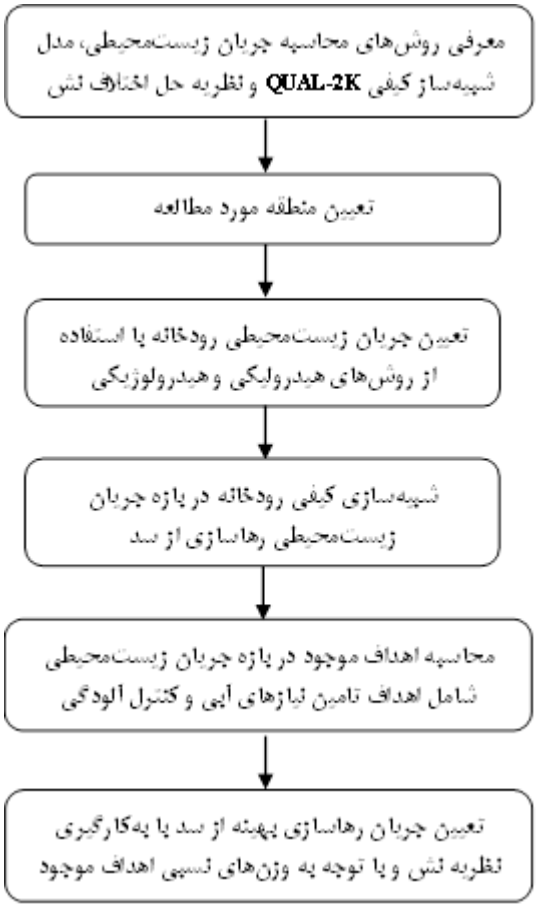
همان‌طور که در تحقیقات قبلی مشاهده می‌شود، به اهداف تأمین جریان محیط‌زیستی و کنترل آلودگی رودخانه‌ها نسبت به اهداف تأمین نیازهای شهری، صنعتی و کشاورزی سد کمتر توجه شده است. از آنجا که تمامی اهداف تأمین نیازهای شهری، صنعتی و کشاورزی، تأمین جریان محیط‌زیستی و کنترل آلودگی رودخانه‌ها با یکدیگر مرتبط است، همچنین با توجه به ضرورت تأمین آب مورد نیاز برای تمامی این اهداف، لازم است در تحقیقی تمامی این اهداف به‌طور هم‌زمان بررسی شود. بدین‌ترتیب، با درنظرگرفتن هم‌زمان این اهداف می‌توان جریان رهاسازی بهینه را به‌صورتی تعیین کرد که این جریان بهینه مناسب‌ترین راهکار در تأمین نیازهای آبی اهداف ذکر شده باشد. بنابراین، در این تحقیق، با به‌کارگیری اطلاعات در دسترس از سامانهٔ مخزن- رودخانهٔ گتوند-کارون، به تعیین جریان رهاسازی از سد با توجه به اهداف تأمین نیازهای شهری، صنعتی و کشاورزی و اهداف محیط‌زیستی و کنترل آلودگی پرداخته می‌شود.

۲- روش تحقیق

برای تعیین جریان رهاسازی بهینه، نخست بازهٔ جریان محیط‌زیستی مناسب برای رودخانه تعیین می‌شود. سپس، جریان رهاسازی بهینه از سد از میان این بازهٔ جریان محیط‌زیستی مناسب انتخاب می‌شود. در ادامه، شبیه‌سازی کیفی رودخانه برای تمام بازهٔ جریان‌های رهاسازی از سد انجام می‌شود. سپس، اهداف مورد نظر تحقیق، با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده تعریف و محاسبه می‌شود. در نهایت، با به‌کارگیری نظریهٔ نش بر اهداف تعیین‌شده، جریان رهاسازی بهینه از میان جریان‌های رهاسازی موجود تعیین می‌شود. در به‌کارگیری نظریهٔ نش لازم است که به هر کدام از اهداف وزن نسبی داده شود. در این تحقیق، برای جلوگیری از افزایش حجم مطالب، یک حالت برای وزن‌های نسبی اهداف موجود در نظر گرفته و جریان رهاسازی بهینه برای آن محاسبه می‌شود. بدیهی است که تعیین وزن هر یک از اهداف موجود، به شرایط واقع بر مسئلهٔ مورد نظر بستگی دارد. در شکل ۱، روندنمای مراحل انجام تحقیق آمده است.

۳. جریان محیط‌زیستی

با پیشرفت جوامع انسانی، مصرف آب نیز افزایش چشمگیری داشته و ساده‌ترین راه برای تأمین آن استفاده از رودخانه‌هاست. طبیعت رودخانه‌ها در اثر فعالیت‌های انسانی تغییرات بسیاری یافته است. این تغییرات حاصل فعالیت‌های بسیاری، از جمله سدسازی، برداشت آب و تخلیهٔ فاضلاب‌ها در آن است. در کنار مزایای عمده‌ای که احداث سدها برای بشر به‌ارمغان می‌آورد تبعاتی نیز وجود دارد، از جمله کاهش جریان محیط‌زیستی رودخانه و وارد آمدن صدماتی به زیست‌بوم منطقه.



شکل ۱. روندنمای مراحل انجام تحقیق

در برخی موارد، این تغییرات موجب کاهش شدید مقدار و سطح کیفیت آب رودخانه‌ها شده است. این امر موجب بروز پیامدهای محیط‌زیستی برای گونه‌های گیاهی و جانوری و حتی انسان‌ها نیز بوده است.

۳- جریان محیط‌زیستی

با پیشرفت جوامع انسانی، مصرف آب نیز افزایش چشمگیری داشته و ساده‌ترین راه برای تأمین آن استفاده از رودخانه‌هاست. طبیعت رودخانه‌ها در اثر فعالیت‌های انسانی تغییرات بسیاری یافته است. این تغییرات حاصل فعالیت‌های بسیاری، از جمله سدسازی، برداشت آب و تخلیهٔ فاضلاب‌ها در آن است. در کنار مزایای عمده‌ای که احداث سدها برای بشر به‌ارمغان می‌آورد تبعاتی نیز وجود دارد، از جمله کاهش جریان محیط‌زیستی رودخانه و وارد آمدن صدماتی به زیست‌بوم منطقه. در برخی موارد، این تغییرات موجب کاهش شدید مقدار و سطح کیفیت آب رودخانه‌ها شده است. این امر موجب بروز پیامدهای محیط‌زیستی برای گونه‌های گیاهی و جانوری و حتی انسان‌ها نیز بوده است.

مقداری از آب موجود در رودخانه که برای حفظ حیات زیست‌بوم‌های وابسته به رودخانه ضروری است جریان محیط‌زیستی نام دارد. جریان محیط‌زیستی به‌منظور تأمین آب مورد نیاز برای فعالیت‌های موجود در زیست‌بوم‌های رودخانه لازم است و در صورت عدم تأمین آن، ادامهٔ حیات زیست‌بوم رودخانه با بحران مواجه خواهد شد.

برای برآورد جریان محیط‌زیستی رودخانه‌ها روش‌های مختلف و بسیاری ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان

به چهار دستهٔ اصلی طبقه‌بندی کرد، شامل روش‌های هیدرولیکی، هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی زیستگاه‌ها و روش جامع. Tharmeو King (۱۹۹۸) ۲۰۷ روش برآورد جریان محیط‌زیستی را شناسایی کردند و در دسته‌بندی‌های فوق قراردادند. در تحقیق حاضر، به‌علت فقدان داده‌های کافی در ایران از روش‌های هیدرولوژیکی برای تعیین جریان محیط‌زیستی استفاده می‌شود.

روش‌های هیدرولوژیکی عمدتاً بر اساس داده‌های هیدرولوژیکی موجود از ویژگی‌های رودخانه‌ها طرحی شده است. مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده در این روش‌ها، داده‌های جریان طبیعی رودخانه در مقیاس‌های روزانه، ماهانه یا سالانه است. به‌علت سادگی روش‌های هیدرولوژیکی، روش‌های بسیاری در این دسته‌بندی جای می‌گیرد. از رایج‌ترین روش‌های هیدرولوژیکی می‌توان به روش Tenant (۱۹۷۶) و جریان پایهٔ آبزیان[۲۷] اشاره کرد. در ادامه شرحی از روش‌های تنانت و جریان پایهٔ آبزیان که در این تحقیق استفاده شد به اختصار آمده است.

Tenant (۱۹۷۶) روشی برای محاسبهٔ جریان محیط‌زیستی چند رودخانه در آمریکا، به‌خصوص ایالت مونتانا[۲۸] ارائه کرد. در این روش، نخست جریان طبیعی رودخانه، پیش از تأثیر هر گونه دخالت فعالیت‌های انسانی از جمله سدسازی، از روی داده‌های تاریخی جریان رودخانه به‌دست می‌آید. سپس، از جریان طبیعی به‌دست‌آمده متوسط سالانه گرفته می‌شود و درصدی از این متوسط جریان محیط‌زیستی در نظر گرفته می‌شود. به‌این ترتیب، جریان محیط‌زیستی به‌دست آمده، برای تمام ماه‌های سال یکسان درنظر گرفته می‌شود. Tenant (۱۹۷۶) بر اساس نتایج حاصل از تحقیقاتش، سه درصد آستانه از جریان طبیعی رودخانه شامل ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصد را جریان‌های محیط‌زیستی برای سه سطح مختلف حفظ سلامت زیست‌بوم‌ها معرفی کرد. ۱۰ درصد سطح کمینه، ۳۰ درصد سطح نسبتاً مساعد و ۶۰ درصد سطح مساعد برای حیات جانوران آبزی است. مزیت اصلی روش Tenant علاوه‌بر داده‌های کم مورد نیاز و سهولت در انجام محاسبات، درنظرگرفتن شرایط مناسب برای حیات آبزیان با تعیین ۱۰ درصد یا بیشتر از متوسط سالانهٔ جریان طبیعی رودخانه به‌عنوان جریان محیط‌زیستی است. از معایب عمدهٔ این روش نیز می‌توان به تکیه بر متوسط سالانهٔ جریان طبیعی رودخانه، درنظر نگرفتن تغییرات کوتاه‌مدت جریان در بازه‌های کمتر از یک سال و درنظرنگرفتن رابطه بین زیست‌بوم با خصوصیات جریان و بستر رودخانه اشاره کرد.

روش جریان پایهٔ آبزیان بر اساس این تفکر ارائه شده است که کمترین متوسط ماهانهٔ جریان طبیعی رودخانه کمینهٔ جریان مورد نیاز زیست‌بوم‌ها را تأمین می‌کند. در واقع، اگر زیست‌بوم توانسته است با کمترین جریان طبیعی رودخانه به حیات خود ادامه دهد، با تأمین همین مقدار جریان در تمام سال، زیست‌بوم دچار مشکل نخواهد شد. این روش، با توجه به نگرش آن به شرایط حیات زیست‌بوم روشی کارآمد و بسیار ساده است. اما روش جریان پایهٔ آبزیان در رودخانه‌های فصلی و فاقد جران در برخی ماه‌های سال کاریی ندارد. لذا، در استفاده از این روش در مناطق خشک و نیمه‌خشک باید دقت کافی به‌عمل آید.

در مجموع، روش‌های هیدرولوژیکی روش‌های ساده، کم‌هزینه و سریعی در برآورد جریان محیط‌زیستی است. اما، استفاده از این روش‌ها ممکن است موجب بروز خطاهایی در برآورد مقدار جریان محیط‌زیستی شود. لازم است در استفاده از این روش‌ها دقت بیشتری به‌عمل آید.

۴- تعریف اهداف موجود

هدف از بهره‌برداری از آب مخازن سدها، تأمین آب مورد نیاز اهداف مختلف موجود در حوضهٔ سد است. همان‌طور که گفتیم، هدف اصلی این تحقیق به‌حساب آوردن اهداف تأمین جریان محیط‌زیستی و کنترل آلودگی در میان اهداف بهره‌برداری، همچنین تعیین جریان‌های رهاسازی بهینه از

سد است. بنابراین، برای تعیین جریان رهاسازی بهینه، علاوه‌بر اهداف تأمین آب نیازهای شهری، صنعتی و کشاورزی، لازم است اهداف محیط‌زیستی و کنترل آلودگی نیز در نظر گرفته شود. لذا، در این قسمت، این اهداف شناسایی و تعریف می‌شود تا بتوان با استفاده از آن جریان رهاسازی بهینه‌ای تعیین کرد.

سد گتوند به‌منظور تأمین آب مورد نیاز برای اهدافی از قبیل تولید انرژی برق‌آبی، کنترل سیلاب، تنظیم آب کشاورزی پایین‌دست و ایجاد جاذبه‌های گردشگری احداث شده است. لذا، یکی از موارد مهم در تعیین جریان رهاسازی بهینه از سد گتوند، دستیابی به این اهداف است. بدین منظور، لازم است هدفی با عنوان اطمینان‌پذیری ذخیره تعریف شود تا بتوان در تعیین جریان‌های رهاسازی بهینه به اهداف سد نیز توجه کرد. به‌حساب آوردن هدف اطمینان‌پذیری ذخیره در میان اهداف سد موجب می‌شود که به نیاز آبی همگی اهداف تولید انرژی برق‌آبی، کنترل سیلاب، تنظیم آب کشاورزی پایین‌دست و ایجاد جاذبه‌های گردشگری در تعیین جریان رهاسازی بهینه توجه شود.

یکی دیگر از اهداف موجود در حوضهٔ مورد مطالعه، تأمین آب با کیفیت مناسب برای مناطق پایین‌دست است. با توجه به اینکه آب شرب شهرهای پایین‌دست منطقهٔ مورد مطالعه، از جمله کلان‌شهر اهواز، از رودخانهٔ کارون تأمین می‌شود و با توجه به اهمیت بالای کیفیت مناسب آب شرب، این موضوع نیز یکی از اهداف لازم در تعیین جریان رهاسازی بهینه در نظر گرفته می‌شود. لذا، هدف دیگری با عنوان تأمین نیاز پایین‌دست به‌منظور تأمین نیاز آب با کیفیت مناسب در مناطق پایین‌دست رودخانهٔ کارون تعریف می‌شود.

آلودگی آب‌های سطحی از پدیده‌های بسیار مهمی است که سلامت انسان‌ها، جانوران و محیط‌زیست را تهدید کرده است. ورود آلاینده‌ها موجب کاهش سطح کیفی آب و وارد آمدن آسیب‌هایی به محیط‌زیست می‌شود. از آنجا که سلامت زیست‌بوم‌ها علاوه‌بر تأمین جریان محیط‌زیستی نیازمند کیفیت مناسب این جریان است و با توجه به منابع آلایندهٔ موجود در منطقه، لازم است اهدافی برای مدیریت و کنترل آلودگی رودخانه نیز در نظر گرفته شود. با توجه به وجود دو رفتار متضاد آلودگی‌های رودخانه‌ای نسبت به جریان رهاسازی، دو هدف متضاد «متوسط غلظت» و «طول تماس» برای کنترل آلودگی‌های موجود در منطقه در نظر گرفته می‌شود. رفتار متضاد این اهداف به این علت است که افزایش جریان رهاسازی موجب افزایش حجم و سرعت جریان می‌شود که این امر موجب کاهش غلظت‌های آلودگی در طول رودخانه و افزایش طول تماس آلودگی با محیط‌زیست رودخانه می‌شود. عکس این موضوع نیز برای کاهش جریان رهاسازی وجود دارد که موجب افزایش غلظت‌های آلودگی و کاهش طول تماس آلودگی می‌شود. لذا، برای گنجاندن این دو هدف متضاد در میان اهداف تعیین جریان رهاسازی بهینه، غلظت‌های آلودگی و طول تماس آلودگی با محیط‌زیست رودخانه به‌صورت دو هدف، متوسط غلظت و طول تماس در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبهٔ متوسط غلظت از غلظت‌های بزرگ‌تر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر متوسط گرفته می‌شود و این مقدار متوسط، متوسط غلظت شاخص BOD به‌ازای جریان رهاسازی مربوط در نظر گرفته می‌شود. از غلظت‌های کوچک‌تر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر به این علت صرف‌نظر می‌شود که آبی که در آن غلظت شاخص BOD کوچک‌تر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر باشد، آب خالص در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، تعریف ریاضی رابطهٔ متوسط غلظت به‌صورت رابطه‌های Error! Reference source not found. و Error! Reference source not found. است.

$$C_{O,i} = \begin{cases} C_i - 1 & if\ C_i \geq 1 \\ 0 & else \end{cases} \quad (۱)$$

$$C_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{nt} C'_i}{nt} \quad (۲)$$

در این رابطه‌ها، $C_{O,i}$ غلظت BOD در نقطهٔ i و مقدار آن از ۱ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌تر است (mg/l)، i شمارندهٔ

نقاط محاسبهٔ غلظت آلودگی، C غلظت BOD در نقطهٔ i (mg/l)، C_{mean} متوسط غلظت‌های BOD بزرگ‌تر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر و nt تعداد کل نقاط محاسبهٔ غلظت آلودگی است. طول تماس نیز بیشینهٔ مسافتی از رودخانه محاسبه می‌شود که برای کاهش غلظت‌های آلودگی تا حد مجاز (۱ میلی‌گرم بر لیتر) لازم است.

$$x = \max(x_{C_{O,i}}) \qquad (۳)$$

که در این رابطه x طول تماس (km) و $x_{C_{O,i}}$ مسافتی از رودخانه است که در آن غلظت آلودگی بیش از ۱ میلی‌گرم بر لیتر است (km).

لذا، مجموع اهدافی که باید در تعیین جریان رهاسازی بهینه درنظر گرفت عبارت است از (۱) تأمین جریان محیط‌زیستی، (۲) اطمینان‌پذیری ذخیره، (۳) تأمین نیاز پایین‌دست، (۴) متوسط غلظت و (۵) طول تماس. این اهداف در برگیرندهٔ اهداف اصلی کمّی و کیفی موجود در منطقه است.

۵- مدل QUAL-2K

در این تحقیق از مدل QUAL-2K برای انجام شبیه‌سازی‌های کیفی لازم استفاده شده است. مدل QUAL-2K به این علت انتخاب شده است که دارای مزیت‌های بسیاری از جمله موارد زیر است و در نتیجه تطابق بیشتری با مسئلهٔ مورد نظر دارد:

۱. این مدل توانایی شبیه‌سازی منابع آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای را داراست که این مورد با توجه به وجود هر دو نوع منابع آلودگی در منطقهٔ مورد مطالعه ضروری است.

۲. روش کاربرد این مدل نسبت به دیگر مدل‌های شبیه‌ساز کیفی ساده‌تر است.

۳. در تحقیقات قبلی، این مدل به‌طور وسیعی برای شبیه‌سازی کیفی در آب‌های سطحی به‌کار گرفته شده و همواره نتایج قابل‌قبولی از آن ارائه شده است.

۴. هزینهٔ تهیهٔ مدل QUAL-2K کم است.

۵. این مدل قادر است با داده‌های ورودی اندک نیز شبیه‌سازی‌های لازم را انجام دهد.

۶. این مدل به‌صورت کد باز برنامه‌نویسی شده است که این قابلیت به کاربران اجازه اعمال تغییرات مورد نیاز در مدل و روش اجرای آن را می‌دهد.

QUAL-2K مدلی یک بعدی است و تنها در جهت طول رودخانه، کیفیت آب را شبیه‌سازی می‌کند. لذا، این مدل، با فرض اختلاط کامل آب و آلودگی در هر دو جهت عرض و عمق، طول رودخانه را به بازه‌هایی با اندازه‌های مورد نیاز کاربر تقسیم می‌کند. سپس، در هر یک از این بازه‌ها به‌ترتیب از بالادست به پایین‌دست رودخانه، معادلات مربوط به شاخص‌های هیدرولیکی و کیفی را حل می‌کند. بدین ترتیب، کیفیت آب رودخانه در هر بازه و در کل رودخانه به‌دست می‌آید.

۶- نظریهٔ حل اختلاف نش

در فرایند تصمیم‌گیری چنانچه تعداد ذی‌نفعان بیش از یک نفر باشد، به‌علت وجود اهداف، دیدگاه‌ها و اولویت‌های مختلف ذی‌نفعان، فرایند تصمیم‌گیری با مشکلاتی از قبیل عدم‌رضایت تمامی ذی‌نفعان همراه خواهد بود. لذا، در چنین مسائلی لازم است تصمیم‌های نهایی به‌گونه‌ای باشد که تمامی نظرات ذی‌ذنفعان در آن لحاظ شده باشد و حقوق تمامی ذی‌نفعان رعایت شود. یکی از روش‌های حل این گونه مسائل، استفاده از مدل‌های حل اختلاف است.

یکی از روش‌های حل اختلاف، نظریهٔ حل اختلاف نش است. نش مجموعهٔ مشخصی از شرایطی را مطرح کرد که جواب‌های به‌دست آمده برای مسئلهٔ مورد نظر باید آن‌ها را ارضا کند. همچنین ثابت کرد که در هر مسئله تنها یک جواب می‌تواند این شرایط را ارضا کند که آن جواب پاسخ مسئلهٔ مورد نظر درنظر گرفته می‌شود. شرایطی که در نظریهٔ نش وجود دارد شامل موارد زیر است:

۱. امکان بهره‌مندی بیش از منابع در دسترس برای ذی‌نفعان وجود ندارد.

۲. هیچ ذی‌نفعی توافقی را نمی‌پذیرد که در آن تابع مطلوبیت کمتر از کمینهٔ سطح مطلوبیت آن ذی‌نفع باشد.

۳. هیچ جواب بهتری برای ذی‌نفعان وجود ندارد.

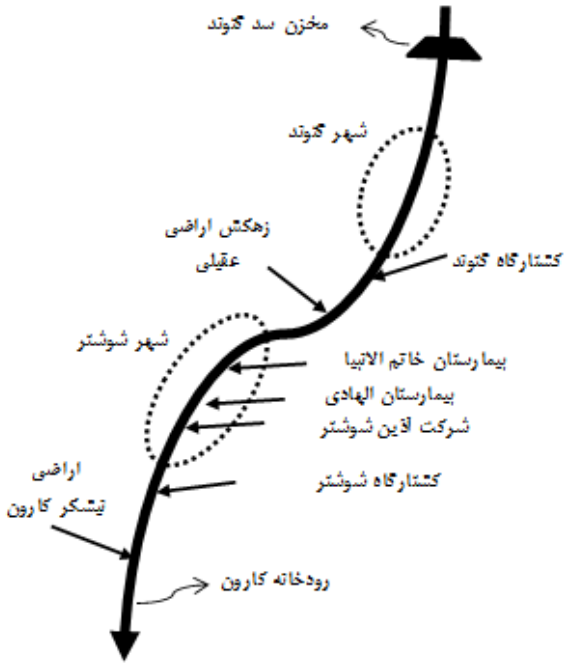
نظریهٔ حل اختلاف نش برای حل اختلاف بین دو ذی‌نفع ارائه شد. Harsanyi (۱۹۵۸) این نظریه را برای حل اختلاف بین چند ذی‌نفع توسعه داد. این نظریه به‌صورت مدل بهینه‌سازی در رابطهٔ (۱) ارائه شده است.

$$max: \prod_{i=1}^{N}(f_i - d_i)^{w_{ei}} \qquad و \quad f_i \geq d_i \tag{۱}$$

که در این رابطه i شمارندهٔ ذی‌نفعان، N تعداد تمام ذی‌نفعان، f_i تابع مطلوبیت ذی‌نفع i، d_i کمینهٔ سطح مطلوبیت قابل‌قبول برای ذی‌نفع i و w_{ei} وزن نسبی ذی‌نفع i است (اصغرپور، ۱۳۸۲). بنابراین، برای رفع اختلاف موجود میان دو یا چند ذی‌نفع با استفاده از نظریهٔ نش، نخست باید ذی‌نفعان مشخص شود. بعد از آن، کمینهٔ سطح مطلوبیت و وزن‌های نسبی آن تعیین می‌شود. سپس، با به‌کارگیری رابطهٔ (۱) می‌توان بهترین راه‌حل را برای اختلاف موجود پیدا کرد.

۷- مطالعهٔ موردی

همان‌طور که گفتیم یکی از اهداف اصلی این تحقیق، تعیین جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ کارون در بازهٔ سد گتوند تا پایین‌دست شوشتر است. رودخانهٔ کارون از مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های ایران است و از نظر حجم آبدهی، بزرگ‌ترین رودخانهٔ ایران محسوب می‌شود. طول رودخانهٔ کارون ۸۰۰ کیلومتر است. در محل احداث سد گتوند، متوسط بلندمدت جریان سالانهٔ این رودخانه، ۴۵۳ مترمکعب بر ثانیه و متوسط حجم جریان سالانهٔ آن بیش از ۱۴میلیارد مترمکعب است. برای دستیابی به اهداف مورد نظر این تحقیق، داده‌های لازم از منطقهٔ مورد مطالعه جمع‌آوری شد. این داده‌ها شامل جریان رهاسازی از سد، خصوصیات هیدرولیکی رودخانه و ویژگی‌های منابع آلاینده می‌شود. در تحقیق حاضر، به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های دقیقی از شوری آب سد گتوند، به‌جای مسئلهٔ شوری آب که از مسائل مهم کنونی این سد است، از اطلاعات آلایندهٔ BOD استفاده شد که با توجه به منابع آلاینده موجود در منطقهٔ مورد مطالعه، بعد از شوری، مهم‌ترین آلایندهٔ موجود در منطقهٔ مورد مطالعه نیز است. در شکل ۲، نمایشی از منطقهٔ مورد مطالعه آمده است.



شکل ۲. نمایشی از منطقهٔ مورد مطالعه

در جدول ۱ خصوصیات هیدرولیکی مورد نیاز رودخانهٔ کارون آورده شده است.

جدول ۱. خصوصیات هیدرولیکی رودخانه

پارامتر	مقدار	واحد
عرض بستر رودخانه	۶۰	(m)
شیب کف رودخانه	۰/۰۰۰۳	_
ضریب زبری مانینگ	۰/۰۳	_
ضریب زوال	۰/۳	(1/day)

در جدول ۲ ویژگی‌های منابع آلایندهٔ موجود در منطقهٔ مورد مطالعه آورده شده است، شامل ماهیت نقطه‌ای یا غیرنقطه‌ای بودن منبع آلاینده، دبی جریان تخلیه و غلظت آلودگی جریان تخلیه.

جدول ۲. ویژگی‌های منابع آلاینده در منطقهٔ مورد مطالعه

منبع آلودگی	نوع (نقطه‌ای یا غیرنقطه‌ای)	دبی جریان تخلیه (m^3/s)	غلظت (mg/l)	فاصله از سد گتوند (m)
فاضلاب شهر گتوند	غیر نقطه‌ای	۳/۵۱	۶/۲۷	۱۵ تا ۲۰
کشتارگاه گتوند	نقطه‌ای	۰/۰۰۰۶	۱۸۰۰۰	۲۵
زهکش اراضی عقیلی	نقطه‌ای	۵	۸/۸	۳۵
فاضلاب شهر شوشتر	غیر نقطه‌ای	۶/۳۶	۶/۲۷	۵۰ تا ۶۰
بیمارستان خاتم‌الانبیا	نقطه‌ای	۰/۵	۴۰	۵۵
بیمارستان الهادی	نقطه‌ای	۰/۵	۳۶	۵۷
شرکت آذین شوشتر	نقطه‌ای	۱	۵۰	۶۰
کشتارگاه شوشتر	نقطه‌ای	۰/۰۰۰۸	۹/۲	۶۵
اراضی نیشکر کارون	نقطه‌ای	۸/۹	۹/۲	۷۰

۸. نتایج و بحث

نخست، جریان محیط‌زیستی رودخانه تعیین می‌شود. پس از آن با استفاده از مدل QUAL-2K شبیه‌سازی‌های کیفی لازم انجام می‌شود. سپس، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌ها، اهداف متوسط غلظت و طول تماس محاسبه می‌شود. در آخر نیز نیز با استفاده از نظریهٔ حل اختلاف نش، جریان رهاسازی بهینه برای وزن‌های نسبی مساوی اهداف موجود، تعیین می‌شود.

۱.۸. تعیین بازهٔ جریان محیط‌زیستی رودخانه

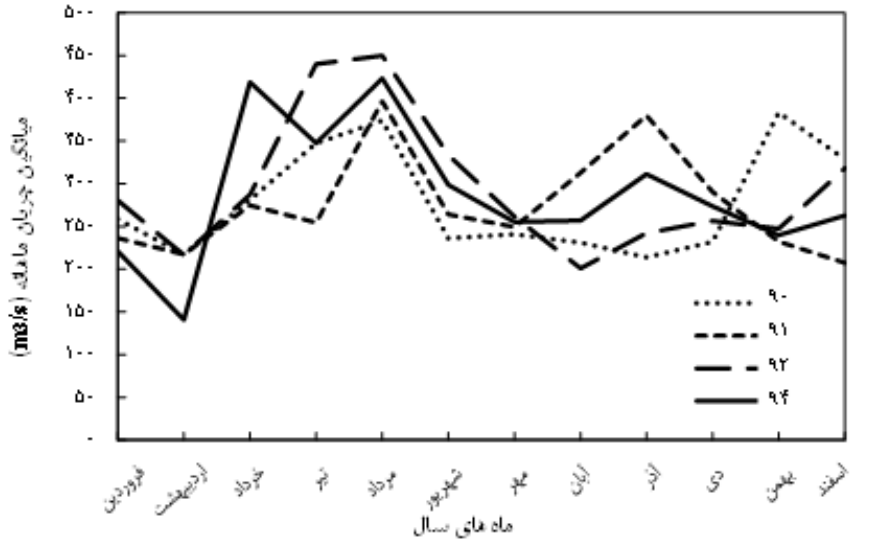
وجود داده‌های لازم برای محاسبهٔ جریان محیط‌زیستی امری ضروری است. با فقدان داده‌های هیدرولیکی و زیست‌بومی از منطقهٔ مورد مطالعه، به ناچار باید از روش‌های هیدرولوژیکی استفاده کرد که نیازمند داده‌های کمتری است. همان‌طور که گفتیم، از میان روش‌های هیدرولوژیکی، روش‌های Tenant و جریان پایهٔ آبزیان مرسوم‌ترین روش‌های موجود است که شرایط پیشنهادی استفاده از آن به‌علت دائمی بودن رودخانه در منطقهٔ مورد مطالعه، همچنین نوسانات کوتاه‌مدت اندک در میزان جریان رودخانه، تطابق خوبی با شرایط رودخانهٔ کارون دارد. لذا، در ادامه از این دو روش برای محاسبهٔ جریان محیط‌زیستی رودخانه استفاده می‌شود.

۱.۱.۸. روش Tenant

برای استفاده از روش Tenant به میانگین سالانهٔ جریان طبیعی رودخانه در زمان قبل از احداث سد نیاز است. میانگین سالانهٔ جریان طبیعی رودخانه با توجه به اطلاعاتی که در قسمت مطالعهٔ موردی آورده شده است، ۴۵۳/۹ مترمکعب بر ثانیه است. Tenant (۱۹۷۶) جریان محیط‌زیستی را به‌صورت بازه‌ای ۱۰ تا ۶۰ درصدی از جریان میانگین رودخانه پیشنهاد کرده است. لذا، مقدار جریان محیط‌زیستی بر اساس درصدهای معرفی‌شده بین ۴۵/۴ تا ۲۷۲ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود. جریان ۴۵/۴ کمترین مقدار ممکن برای جریان محیط‌زیستی است و برای مقادیر کمتر از آن، زیست‌بوم‌های رودخانه دچار بحران شدیدی خواهد شد. جریان ۲۷۲ مترمکعب بر ثانیه نیز بیشترین مقدار مناسب جریان محیط‌زیستی است و رهاسازی جریان با مقداری بیش از ۲۷۲ مترمکعب بر ثانیه، ضرورت چندانی ندارد.

۲.۱.۸. روش جریان پایهٔ آبزیان

در روش جریان پایهٔ آبزیان، جریان محیط‌زیستی برابر با کمترین متوسط ماهانهٔ جریان طبیعی رودخانه در نظر گرفته می‌شود. لذا، برای استفاده از این روش باید از داده‌های جریان ورودی به سد گتوند، میانگین ماهانه تهیه شود و از میان میانگین‌های ماهانه، کمترین مقدار جریان محیط‌زیستی انتخاب می‌شود. میانگین جریان‌های ماهانه در سال‌های آماری ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳ محاسبه و در شکل ۳ ترسیم شده است.



شکل ۳. میانگین ماهانهٔ جریان ورودی به سد گتوند در دورهٔ آماری مورد مطالعه

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، کمترین میانگین سالانه مربوط به اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۳ با مقدار جریان ۱۴۰/۷۵ مترمکعب است. لذا، این مقدار جریان محیط‌زیستی روش جریان پایهٔ آبزیان درنظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که سد گتوند در سال ۱۳۹۱ بهره‌برداری شد. بنابراین، در زمان انجام این تحقیق، تنها سه سال آمار از مقادیر جریان رهاسازی این سد در دسترس بود.

بنابراین، جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ کارون با استفاده از روش‌های Tenant و جریان پایهٔ آبزیان در منطقهٔ مورد مطالعه مشخص شد. مقدار جریان ۱۴۰/۷۵ مترمکعب بر ثانیه از روش جریان پایهٔ آبزیان به‌دست آمد. با توجه به این مقدار در بازهٔ جریان محیط‌زیستی تعیین‌شده از روش Tenant نیز وجود دارد، از بازه به‌دست آمده از روش تنانت به‌عنوان بازه جریان زیست‌محیطی رودخانه استفاده می‌شود.

۲.۸. شبیه‌سازی شاخص BOD در تمام بازهٔ جریان رهاسازی از سد

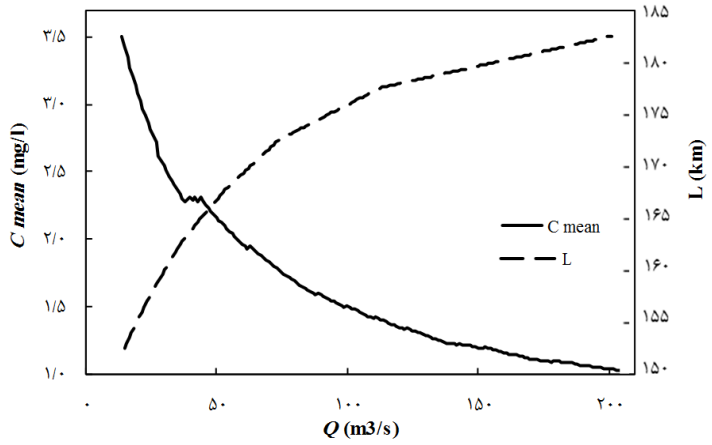
برای انجام شبیه‌سازی‌های مورد نیاز، نخست باید زمان لازم را برای هر شبیه‌سازی تعیین کرد. با توجه به دائمی‌بودن ورود آلاینده‌ها از طرف منابع آلاینده به رودخانه، لازم است هر شبیه‌سازی تا زمانی ادامه یابد که مقدار غلظت آلودگی در رودخانه به تعادل برسد. غلظت آلودگی در رودخانه زمانی به تعادل می‌رسد که آلایندهٔ تخلیه‌شده از نخستین منبع آلاینده در پایین‌دست سد، مدت زمان لازم برای طی‌کردن تمام مسیر رودخانهٔ شبیه‌سازی‌شده را داشته باشد. لذا، مدت زمان لازم برای حرکت جریان آب از مکان نخستین منبع آلاینده که کشتارگاه گتوند است تا پایان مسیر شبیه‌سازی کمینهٔ زمان لازم برای انجام دورهٔ شبیه‌سازی است. این زمان، با داشتن

سرعت جریان و با استفاده از رابطهٔ مانینگ توسط QUAL-2K، ۱/۹ روز به‌دست آمد. بنابراین، برای اطمینان از به تعادل رسیدن غلظت‌های آلودگی در رودخانه، طول مدت زمان هر شبیه‌سازی دو روز در نظر گرفته شد.

با توجه به ضرورت افزایش سطح کیفی آب رودخانه و محاسبهٔ اهداف متوسط غلظت و طول تماس، لازم است شبیه‌سازی برای جریان‌های بین بازهٔ ۱۳/۷ تا ۴۵۸ مترمکعب بر ثانیه که کمینه و بیشینهٔ جریان رهاسازی از سد گتوند است با فواصل یک واحدی برای جریان رهاسازی انجام شود. برای انجام این تعداد بالای شبیه‌سازی لازم است که QUAL-2K بیش از ۴۰۰ اجرا را انجام دهد و نتایج لازم را استخراج کند. برای انجام این کار، برنامه‌ای به مدل QUAL-2K اضافه شد تا این مدل بتواند این تعداد اجرا را به‌طور خودکار انجام دهد و نتایج آن را استخراج و ذخیره کند. با به‌کارگیری برنامهٔ اضافه‌شده به QUAL-2K، شبیه‌سازی به دفعات لازم انجام و غلظت‌های شاخص BOD در طول رودخانه برای هر یک از جریان‌های رهاسازی استخراج شد.

۳.۸. محاسبهٔ اهداف متوسط غلظت و طول تماس

با اتمام مرحلهٔ شبیه‌سازی کیفی رودخانه، به‌ازای هر مقدار جریان رهاسازی از سد، غلظت‌های شاخص BOD در طول رودخانه به‌دست می‌آید که با استفاده از این غلظت‌ها می‌توان متوسط غلظت و طول تماس آلودگی با رودخانه را محاسبه کرد. به‌این ترتیب، مقادیر متوسط غلظت به‌ازای مقادیر مختلف جریان رهاسازی از سد محاسبه شد. تغییرات مقادیر متوسط غلظت‌ها و طول تماس‌های به‌دست‌آمده به‌ازای مقدار جریان نظیرشان در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲. تغییرات متوسط غلظت و طول تماس به‌ازای تغییرات جریان رهاسازی

در شکل ۲، برای جریان‌های رهاسازی بیش از ۲۰۶/۸ مترمکعب بر ثانیه، مقدار متوسط غلظت به کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. لذا، بر اساس رابطه‌های Error! Reference source not found. و Error! Reference source not found.، ضرورتی برای محاسبهٔ غلظت متوسط و طول تماس در جریان‌های رهاسازی بیش از ۲۰۶/۸ مترمکعب بر ثانیه وجود ندارد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش جریان رهاسازی، به‌علت افزایش مقدار حجم آب و رقیق‌شدن غلظت‌های آلودگی، متوسط غلظت کاهش می‌یابد و برعکس. همچنین، در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش جریان رهاسازی، به‌علت افزایش سرعت جریان، غلظت‌های غیرمجاز، طول بیشتری از رودخانه را طی می‌کند و طول تماس افزایش می‌یابد و برعکس. این

موضوع اهمیت بالایی در تعیین مکان‌های مناسب برای استحصال آب از رودخانه دارد. این امر به‌خصوص در مناطقی از پایین‌دست اهمیت دارد که به‌منظور تأمین نیاز شرب، از آب رودخانه استفاده می‌شود. در پایین‌دست منطقهٔ مورد مطالعه نیز، شهرها و روستاهای زیادی از قبیل شهر اهواز وجود دارد که لازم است جریان رهاسازی به‌گونه‌ای تعیین شود که میزان غلظت آلودگی آب رودخانه، قبل از رسیدن به مناطق استحصال آب، تا حد مجاز کاهش یافته باشد.

۴.۸. تعیین جریان رهاسازی بهینه با استفاده از مدل حل اختلاف نش

اهدافی که تعریف کردیم، در مقدار جریان رهاسازی اختلاف دارد. برای اهداف تأمین جریان محیط‌زیستی، تأمین نیاز پایین‌دست و متوسط غلظت، رهاسازی جریان با بیشینهٔ مقدار ممکن از سد مطلوب است. اما، برای اهداف اطمینان‌پذیری ذخیره و طول تماس، رهاسازی جریان از سد با کمینهٔ مقدار ممکن مطلوب است. برای رفع این اختلاف لازم است از مدل‌های حل اختلاف استفاده کرد. همان‌طور که گفتیم، می‌توان از نظریهٔ نش، به‌دلیل برخورداری از توانایی لازم، برای رفع اختلاف‌های موجود در سامانه‌های منابع آب استفاده کرد.

۱.۴.۸. نرمال‌سازی اهداف

اهدافی که در تعیین جریان رهاسازی گفته شد ابعاد مختلفی دارد. برای آنکه بتوان این اهداف را در تابع بهینه‌سازی نش به‌کار گرفت باید آن را به‌طریقی بی‌بعد کرد. با نرمال‌سازی تمامی اهداف ابعاد همهٔ اهداف ازبین‌می‌رود و می‌توان آن را در تابع بهینه‌سازی نش به‌کار گرفت. برای نرمال‌سازی هر کدام از اهداف، از رابطهٔ (۵) استفاده می‌شود. با استفاده از این رابطه برای نرمال‌سازی اهداف، مقادیر تابع هدف برای تمامی اهداف در بازهٔ صفر تا یک قرارمی‌گیرد.

$$q_{n,i,j} = \frac{q_{i,j} - Min_j}{Max_j - Min_j} \qquad (۲)$$

که در این رابطه، j شمارندهٔ اهداف، i شمارندهٔ داده‌های هر هدف j، $q_{i,j}$ دادهٔ i هدف j، $q_{n,i,j}$ نرمال‌شدهٔ دادهٔ $q_{i,j}$ هدف j، Min_j کوچک‌ترین دادهٔ موجود در هدف j و Max_j بزرگ‌ترین دادهٔ موجود در هدف j است.

۲.۴.۸. کمینهٔ سطح قابل‌قبول اهداف

بر اساس نظریهٔ نش، پیش از اجرای مدل بهینه‌سازی حل اختلاف لازم است برای هر کدام از اهداف، کمینهٔ سطح قابل‌قبول آن تعیین شود تا بتوان مطلوبیت به‌دست‌آمده برای هر هدف را برای هر مقدار جریان رهاسازی مشخص کرد. لذا، در ادامه، کمینهٔ سطح قابل‌قبول هر کدام از پنج هدف ذکرشده در قسمت‌های قبلی تعیین می‌شود.

کمینهٔ سطح قابل‌قبول برای جریان محیط‌زیستی کمینهٔ جریانی است که با روش Tenant برابر ۴۵/۴ مترمکعب تعیین شد. این مقدار از جریان موجب وارد آمدن بیشترین صدمات به حیات گونه‌های جانوری و محیط‌زیستی می‌شود. لذا، انتخاب جریان ۴۵/۴ مترمکعب بر ثانیه مناسب کمینهٔ سطح قابل‌قبول برای این هدف است.

در هدف اطمینان‌پذیری ذخیره، کمینهٔ سطح قابل‌قبول را می‌توان مقدار میانگین جریان ورودی به سد در نظر گرفت که ۴۵۳/۹ مترمکعب بر ثانیه است. در این مقدار، هیچ ذخیره‌ای در سد صورت نمی‌گیرد و تمامی آب ورودی به سد از آن خارج می‌شود. در نتیجه، هیچ‌یک از اهداف تأمین نیازهای شهری، صنعتی و کشاورزی سد تحقق نمی‌یابد.

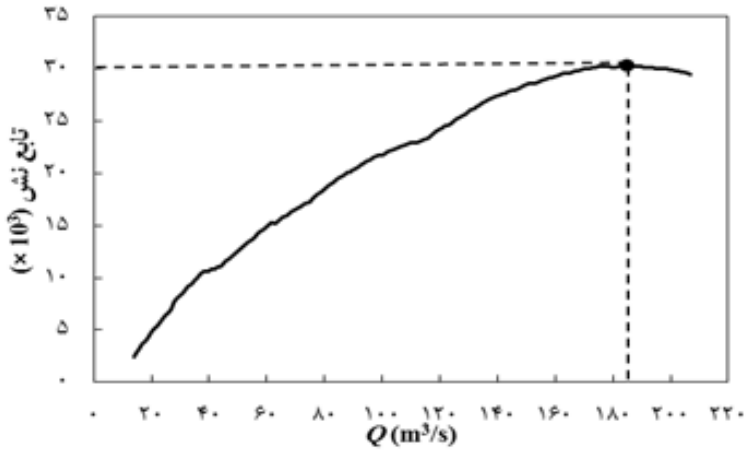
برای هدف تأمین نیاز پایین‌دست، با توجه به حجم و کیفیت مناسب آب مورد نیاز، کمینهٔ سطح قابل قبول را می‌توان کمینهٔ جریان رهاسازی از سد درنظرگرفت. با توجه به اینکه یکی از علل اصلی کاهش کیفیت آب شهرهای پایین‌دست، کاهش جریان رودخانه است، کاهش جریان رودخانه علاوه‌بر کاهش سطح کیفیت آب رودخانه، تأمین حجم مورد نیاز برای مصارف پایین‌دست را نیز با مشکل مواجه می‌سازد. لذا، با انتخاب کمینهٔ جریان

رهاسازی به‌عنوان کمینهٔ سطح قابل‌قبول برای این هدف، هیچ‌کدام از نیازهای کمّی و کیفی پایین‌دست نیز تأمین نخواهد شد.

کمینهٔ سطح قابل‌قبول برای اهداف متوسط غلظت و طول تماس، رسیدن مقدار آن به بیشترین مقدار ممکن است. بیشترین مقدار ممکن این اهداف موجب وارد آمدن بیشترین خسارات به زیست‌بوم‌ها می‌شود. لذا، برای تعیین مقدار کمینهٔ سطح قابل‌قبول مناسب این اهداف، لازم است عددی متناسب با بیشینهٔ مقدار رخ‌دادهٔ هر کدام از این اهداف درنظرگرفته شود. لذا، برای آنکه مقدار انتخاب‌شده با شرایط موجود در منطقهٔ مورد مطالعه تطابق داشته باشد، از جمع بزرگ‌ترین دادهٔ موجود در اهداف متوسط غلظت و طول تماس با مقداری به اندازهٔ یک واحد از انحراف معیار داده‌های هر یک از این اهداف، به‌عنوان کمینهٔ سطح قابل‌قبول استفاده می‌شود. مقادیر متوسط غلظت و طول تماس در بخش‌های قبلی به‌ازای مقادیر مختلف جریان رهاسازی محاسبه شده است و با استفاده از آن، انحراف معیار هر کدام از این اهداف محاسبه می‌شود. بدین‌ترتیب، به اندازهٔ یک واحد انحراف معیار به بزرگ‌ترین دادهٔ موجود در هر یک از اهداف متوسط غلظت و طول تماس اضافه می‌شود تا کمینهٔ سطح قابل‌قبول این اهداف به‌دست آید.

۳.۴.۸. وزن‌های نسبی اهداف و محاسبهٔ مقدار تابع نش

پس از نرمال‌سازی داده‌های اهداف مورد نظر و تعیین کمینهٔ سطح قابل‌قبول آن، باید برای هر کدام از این اهداف با توجه به اهمیت آن وزن‌های نسبی تعیین کرد. اما، وزن‌های نسبی به شرایط زیادی از جمله شرایط اقتصادی، اجتماعی و اقلیمی (ترسالی یا خشکسالی) بستگی دارد. لذا، همواره ممکن است این شرایط در هر مقطع زمانی تغییر کند و لازم شود وزن‌های نسبی اهداف تغییر یابد. از وزن‌های نسبی برای اهداف مختلف به‌منظور نشان‌دادن تأثیر وزن‌های نسبی در تعیین میزان جریان رهاسازی از سد استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، وزن نسبی اهداف بر اساس تجارب نویسندگان استفاده شده است، لذا برای به‌کارگیری نتایج این تحقیق، لازم است وزن‌های نسبی هر یک از اهداف با توجه به شرایط زمانی و انتظارات موجود تعیین شود. در ادامه، به‌منظور جلوگیری از افزایش حجم تحقیق، تنها یک سناریوی وزن‌های نسبی مساوی برای اهداف تعریف می‌شود. در این سناریو، وزن‌های نسبی تمامی اهداف با یکدیگر برابر و مساوی ۱ درنظرگرفته می‌شود. با محاسبهٔ تابع بهینه‌سازی نش، به‌ازای مقادیر مختلف جریان رهاسازی، مقدار این تابع به‌دست می‌آید که تغییرات آن به‌ازای جریان‌های رهاسازی در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. تغییرات مقدار تابع نش برای وزن‌های نسبی مساوی اهداف

در این نمودار، بیشینهٔ مقدار تابع نش تعیین و جریان رهاسازی نظیر آن جریان رهاسازی بهینه انتخاب می‌شود. مقدار این جریان برابر ۱۸۳/۸ مترمکعب بر ثانیه است که این مقدار بر اساس پیشنهادهای Tenant (۱۹۷۶) جریان محیط‌زیستی در منطقهٔ مورد مطالعه را در حدود عالی تا بسیار عالی تأمین می‌کند. بنابراین، می‌توان گفت این مقدار جریان رهاسازی برای تأمین نیازهای محیط‌زیستی مناسب است. جریان رهاسازی ۱۸۳/۸ مترمکعب بر ثانیه همچنین در حدود ۴۰ درصد از بیشینهٔ جریان رهاسازی و میانگین جریان طبیعی رودخانه را شامل می‌شود که این مقدار برای هدف اطمینان‌پذیری ذخیره مقدار مطلوبی است، اما برای هدف تأمین نیاز پایین‌دست چندان مناسب نیست. در واقع، این مقدار جریان رهاسازی موجب افزایش ذخیرهٔ سد می‌شود، ولی در عوض به نیاز پایین‌دست، جریان کمتری خواهد رسید. اهداف متوسط غلظت و طول تماس نیز به‌ازای این مقدار رهاسازی به‌ترتیب برابر ۱/۰۸ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۸۱/۲۵ کیلومتر خواهد بود. برای برداشت آب از رودخانه باید به این ارقام توجه کرد.

۹. جمع‌بندی

افزایش روزافزون تعداد ذی‌نفعان و نیازها به آب، موجب بروز اختلافات در بهره‌برادری از منابع آبی مشترک شده است. با بروز اختلافات، معمولاً ذی‌نفعان به علت‌های مختلفی از قبیل نداشتن اعتماد به دیگر ذی‌نفعان یا فقدان بینش کافی در مسئلهٔ بهره‌برداری از منابع آبی مشترک، ترجیح می‌دهند منافع کوتاه‌مدت خویش را با بهره‌برداری بیشتر از منابع آب افزایش دهند. بدین‌ترتیب، علاوه‌بر اینکه به محیط‌زیست آسیب وارد می‌شود، در بلندمدت موجب زیان خود ذی‌نفعان نیز خواهد شد. در چنین شرایطی، تصمیم‌های سازمان‌های ذی‌ربط که به‌عنوان تصمیم‌گیرندهٔ ارشد در اختلاف حضور دارند، نقش مهمی در ایجاد تعادل بین ذی‌نفعان دارد. شایان ذکر است که تصمیم‌گیرندهٔ ارشد باید عدالت در بهره‌مندی پایدار از منابع آبی مشترک را فراهم آورد.

در تحقیقات قبلی که در زمینهٔ حرکت آلودگی در رودخانه انجام شده است، یکی از روش‌های مؤثری که پس از ورود آلاینده به رودخانه و اختلاط کامل آلودگی با آب در عمل از غلظت آلودگی می‌کاهد، رهاسازی جریان در رودخانه است. انواع دیگر روش‌های کاهش غلظت مانند حذف قسمت آلوده‌شده، به‌علت حرکت سریع آلودگی و نبود فرصت و امکانات کافی، قابلیت اجرایی پایین و کارایی کمّی دارد.

در نظر گرفتن سلامت محیط‌زیست به‌عنوان ذی‌نفعی در برنامه‌ریزی‌های منابع آب موجب افزایش سود کلی برای تمامی ذی‌نفعان در بلندمدت خواهد شد، درحالی‌که شاید به‌نظر برسد که تخصیص کمتر آب به سایر ذی‌نفعان موجب کاهش سود آن‌ها می‌شود (اکبری و همکاران، ۱۳۹۳). بر این اساس، در این تحقیق، به تعیین جریان رهاسازی بهینهٔ رودخانهٔ کارون در منطقهٔ مورد مطالعه پرداختیم و سعی کردیم تمامی اهداف کلان بهره‌برداری از منابع آب منطقه گنجانده شود تا در نهایت به تعادلی جامع میان ذی‌نفعان منطقه منجر شود.

برای این منظور، نخست منابع آلایندهٔ رودخانهٔ کارون در پایین‌دست سد گتوند شناسایی شد. سپس، جریان محیط‌زیستی لازم در این بازه از رودخانهٔ کارون تعیین شد. پس از آن در بازهٔ جریان رهاسازی از سد به شبیه‌سازی کیفی رودخانه با استفاده از مدل QUAL-2K برای شاخص BOD پرداختیم تا الگویی از وضعیت کیفی رودخانه در منطقهٔ مورد مطالعه به‌دست آید. سپس، اهداف مهم کمّی و کیفی موجود تعیین و تعریف شد. در نهایت نیز، با استفاده از نظریهٔ حل اختلاف نش، جریان بهینهٔ رهاسازی از سد تحت وزن‌های نسبی مساوی اهداف تعیین شد و مقدار آن ۱۸۳/۸ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد.

یادداشت‌ها

1. Mapocho
2. Passaic
3. Aeration
4. Algae
5. Nakdong
6. factor analysis
7. Nash conflict resolution
8. Varying Chromosome Length GA
9. stress
10. Yellow
11. simulated annealing
12. biological oxygen demand
13. Santa Maria da Vitória
14. Feitsui
15. East
16. Indicators of Hydrological Alteration
17. Euphrates
18. River Analyses Systems
19. Duration Curve Analysis
20. Kemah
21. Taihu
22. Wujin
23. total Nitrogen
24. total Phosphor
25. Ammonia
26. Chemical Oxygen Demand
27. aquatic base flow method
28. Montana

منابع

اصغرپور، م.ج. ۱۳۸۲. تصمیم‌گیری گروهی و نظریهٔ بازی‌ها با نگرش تحقیق در عملیات. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم، تهران، ایران.

اکبری، ن.، نیک‌سخن، م.ح. و اردستانی، م. ۱۳۹۳. تخصیص بهینهٔ آب با استفاده از تئوری بازی‌های همکارانه (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز زاینده‌رود. محیط‌شناسی، ۴۰(۴): ۸۷۵-۸۸۹.

دانش‌یزدی، م.، ابریشم‌چی، ا. و تجریشی، م. ۱۳۹۲. حل مناقشات در مدیریت تخصیص منابع آب با استفاده از نظریهٔ بازی، مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه. آب و فاضلاب، ۲: ۴۸-۵۷.

ضرغامی، م. و صفاری، ن. ۱۳۹۲. تخصیص بهینهٔ آب به بخش کشاورزی حوضهٔ زرینه‌رود به کمک روش نش نامتقارن. اقتصاد کشاورزی، ۷(۲): ۱۰۷-۱۲۵.

نیک‌سخن، م.ح. و کراچیان، ر. ۱۳۸۸. مدیریت کیفیت آب رودخانه بر اساس چند آلایندهٔ شاخص با استفاده از مدل‌های تجارت مجوزهای تخلیهٔ بار آلودگی و رفع اختلاف. هشتمین کنگرهٔ بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت.

Azzellino, A., Salvetti, R., Vismara, R. and Bonomo, L. 2006. Combined use of the EPA-QUAL-2E simulation model and factor analysis to assess the source apportionment of point and non point loads of nutrients to surface waters. Science of the Total Environment, 371(1): 214-222.

De Andrade, L.N., Mauri, G.R. and Mendonça, A.S.F. 2012. General multiobjective model and simulated annealing algorithm for waste-load allocation. Journal of Water Resources Planning and Management, 139(3): 339-344.

Dussaillant, A., Mucoz, J.F., Saez, P. and Pantoja, C. 1997. Water quality modelling of Mapocho river, Chile, using QUAL2E-UNCAS. International conference on water pollution: modelling, measuring, and prediction, Lake Bled, Slovenia, June 4.

Elhatip, H. and Hinis, M.A. 2015. Statistical approaches for estimating the environmental flows in a river basin: case study from the Euphrates river catchment, Eastern Anatolian part of Turkey. Environmental Earth Sciences, 73(8): 4633-4646.

Harsanyi, J.C. 1958. A bargaining model for the cooperative n-person game. Department of Economics, Stanford University.

Hughes, D.A. and Louw, D. 2010. Integrating hydrology, hydraulics and ecological response into a flexible approach to the determination of environmental water requirements for rivers. Environmental Modelling and Software, 25(8): 910-918.

Kerachian, R. and Karamouz, M. 2007. A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir–river systems. Advances in Water Resources, 30(4): 866-882.

Melching, C.S. and Yoon, C.G. 1996. Key sources of uncertainty in QUAL-2E model of Passaic river. Journal of Water Resources Planning and Management, 122(2): 105-113.

Park, S.S. and Lee, Y.S. 2002. A water quality modeling study of the Nakdong river, Korea. Ecological Modelling, 152(1): 65-75.a

Shiau, J.T. and Wu, F.C. 2013. Optimizing environmental flows for multiple reaches affected by a multipurpose reservoir system in Taiwan: Restoring natural flow regimes at multiple temporal scales. Water Resources Research, 49(1): 565-584.

Tennant, D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries, 1(4): 6-10.

Tharme, R.E. and King, J.M. 1998. Development of the building block methodology for instream flow assessments, and supporting research on the effects of different magnitude flows on riverine ecosystems. Water Research Commission, No. 576/1/98. 452 pp.

Zhang, Q., Xiao, M., Liu, C.L. and Singh, V.P. 2014. Reservoir-induced hydrological alterations and environmental flow variation in the East river, the Pearl river basin, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 28(8): 2119-2131.

Zhang, R., Gao, H., Zhu, W., Hu, W. and Ye, R. 2015. Calculation of permissible load capacity and establishment of total amount control in the Wujin river catchment: a tributary of Taihu lake, China. Environmental science and pollution research, 22(15): 11493-11503.

Yang, W. 2011. A multi-objective optimization approach to allocate environmental flows to the artificially restored wetlands of China’s Yellow river delta. Ecological Modelling, 222(2): 261-267.