DOR: https://dorl.net/dor/20.1001.1.28212606.1400.4.11.5.2

فصلنامه علمی آماد و فناوری دفاعی، سال چهارم، شماره یازدهم، پاییز ۱۴۰۰

ارزیابی عملکرد روش‌های حل مسأله‌ی ورشکستگی در حل مناقشات کیفی رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه‌ی کارون)

علی آهنی[۱]، حنیف کازرونی[۲]

تاریخ دریافت:۱۳۹۹/۰۲/۲۰ **تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۰۵/۲۲**

چکیده

حل مناقشات مربوط به منابع آب سطحی، از چالش‌برانگیزترین مسائل در حوزه‌ی مدیریت منابع است. یکی از رویکردهای تحلیلی برای حل مناقشات تخصیص منابع، نظریه‌ی ورشکستگی است. در مطالعه‌ی حاضر، کاربرد این روش‌ها برای حل مناقشات کیفی آب رودخانه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. چهار قاعده‌ی حل مسأله‌ی ورشکستگی بررسی و به‌منظور استفاده در چارچوب مدل‌های شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای حل مناقشات کیفی رودخانه‌ها در قالب روابط ریاضی بازنویسی شدند. با انتخاب رودخانه‌ی کارون به‌عنوان مطالعه‌ی موردی، مسأله‌ی شوری به‌عنوان یک از مشکلات اصلی کیفیت آب رودخانه، شناسایی شد و چهار مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی کیفی رودخانه بر حسب هدایت الکتریکی در بازه‌ی موردمطالعه، بر مبنای چهار قاعده‌ی حل مسأله‌ی ورشکستگی اجرا شدند. در مجموع بر اساس نتایج، قاعده‌ی اعطای برابر مقید، بهترین گزینه برای تأمین منافع منابع آلاینده با هدایت الکتریکی پایین در این مطالعه است. در سوی دیگر، قاعده‌ی نقصان برابر مقید، مؤثرترین گزینه برای تأمین منافع منابع آلاینده با هدایت الکتریکی بالا در مطالعه‌ی حاضر هستند. قواعد متناسب و تلمود عملکرد متعادل‌تری را نشان دادند.

[۱] علی آهنی، پژوهشگر جایگزین خدمت نظام‌وظیفه دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی، دانش‌آموخته‌ی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، نویسنده مسئول، تلفن تماس: ۰۹۳۵۲۵۰۲۲۰۵ و صندوق الکترونیکی: a_ahani@sbu.ac.ir

[۲] دکتر حنیف کازرونی، عضو هیأت علمی دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی

واژه‌های کلیدی: کیفیت آب، مناقشات کیفیت آب رودخانه، نظریه‌ی ورشکستگی

مقدمه

از آنجا که رودخانه‌ها اغلب دارای تعداد قابل‌توجهی از بهره‌برداران و ذی‌نفعان هستند، یکی از کانون‌های بالقوه‌ی شکل‌گیری مناقشات پیرامون کیفیت آب هستند. رودخانه‌ی کارون پرآب‌ترین رودخانه‌ی ایران محسوب می‌شود که در مسیر خود آب شرب مورد نیاز شهرها و روستاهای متعدد، کارخانجات صنعتی و هزاران هکتار اراضی کشاورزی، مراکز پرورش ماهی و کشت و صنعت را تأمین می‌کند. کاهش آبدهی رودخانه به علت برداشت‌های روزافزون و همچنین تخلیه پساب‌های صنعتی و کشاورزی و فاضلاب‌های شهری، این رودخانه را از حیث وضعیت کمّی و کیفی آب با مشکلاتی مواجه کرده است (کراچیان، ۱۳۹۱). ازاین‌رو، با درنظر گرفتن نقش مهم رودخانه‌ی کارون در حیات شهرهای استان خوزستان و اهمیت این رودخانه در حیات بخش کشاورزی، لزوم بررسی تغییرات کیفیت آب کارون و چاره‌اندیشی برای آن آشکار است.

یکی از روش‌های تحلیلی که می‌تواند در مناقشات تخصیص منابع استفاده شود نظریه‌ی ورشکستگی[1] است. هدف از این روش توزیع یک دارایی در میان گروهی از کارگزاران یا طلبکاران است در زمانی که این مقدار برای برآورده کردن ادعای طلب آن‌ها کافی نیست (هررو[2] و همکاران، ۲۰۰۱؛ ۳۲۸–۳۰۷). تاکنون روش‌های مختلفی برای حل مسأله‌ی ورشکستگی توسعه یافته‌اند. اغلب این روش‌ها در عین سهولت در محاسبات، نتایج قابل قبولی را نیز ارائه می‌دهند. تفاوت این روش‌ها از تعاریف متفاوت آن‌ها از عدالت در توزیع منبع میان کارگزاران ناشی می‌شود.

با توجه به کارآمدی روش‌های حل مسأله ورشکستگی در مسائل مدیریت منابع آب و حل مناقشات مربوط به منابع آب، هدف اصلی مطالعه‌ی حاضر، ارزیابی کاربرد این روش‌ها برای بررسی مسأله و حل مناقشات کیفی آب رودخانه‌ها است. از میان قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی، تعدادی از آن‌ها در این مطالعه مورد استفاده و بررسی قرار می‌گیرند و در نهایت

[1] bankruptcy theory
[2] Herrero

عملکرد کلی روش پیشنهادی و نیز هر یک از زیرمجموعه‌های آن در تعیین سیاست‌های تخلیه بار آلودگی و حل مناقشات میان بهره‌برداران مختلف رودخانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

پژوهش حاضر دو هدف فرعی را دنبال می‌کند:

الف) بررسی و ارزیابی ویژگی‌ها و کارآمدی هر یک از قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی در حل مناقشات کیفی رودخانه‌ها؛

ب) ارائه راه‌حلی مبتنی بر قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی، برای مدیریت کیفی رودخانه‌ی کارون به‌عنوان مطالعه‌ی موردی و حل مناقشات موجود پیرامون تخلیه‌ی بارآلودگی به جریان این رودخانه با تشکیل یک مدل پیوسته‌ی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای انجام تعیین سهم مجاز بار آلودگی هر یک از ذی‌نفعان.

ادبیات و مبانی نظری و پیشینه تحقیق

در چند سال گذشته، روش‌های حل مسأله‌ی ورشکستگی نظر پژوهشگران و متخصصان مدیریت منابع آب را به خود جلب کرده‌اند و پژوهش‌های گوناگونی برای مطالعه و بررسی کاربرد آن‌ها در حل مناقشات مرتبط با مدیریت منابع آب انجام شده است. یک مسأله‌ی ورشکستگی، یک مسأله‌ی توزیع است که در آن تخصیص مقدار مشخصی از منابع یا کالا به گروهی از بهره‌برداران یا کارگزاران مدنظر است، در حالی که مقدار منابع یا کالا برای ارضای کامل تمام تقاضاها کافی نیست (هررو و همکاران، ۲۰۰۱؛ ۳۲۸-۳۰۷).

در زمینه‌ی به‌کارگیری روش‌های حل مسأله‌ی ورشکستگی در مسائل مربوط به منابع آب، کمپس[1] و همکاران (۲۰۰۳؛ ۱۴۷-۱۳۵) با استفاده از راه‌حل چانه‌زنی، قوانینی مبتنی بر قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی را برای ایجاد انواع مجوز تخصیص برای حوضه‌ی آبریز کوچکی در جنوب غربی انگلستان برای کنترل آلودگی کشاورزی ارائه نمودند. نتایج حاکی از اثرگذاری متفاوت قوانین مختلف تخصیص بر اساس تفاسیر مختلفی از عدالت[2] بر حل مسأله‌ی توزیع سود حاصل از همکاری بین ذینفعان مختلف بود. به‌علاوه، نتایج مفید این مطالعه گامی در

[1] Kampas
[2] Equity

جهت کمّی کردن عدالت در زمینه‌ی مجوز تخصیص بود.

شیخ‌محمدی[1] و همکاران (۲۰۰۸؛ ۹-۱) استفاده از سه قاعده‌ی حل مسأله‌ی ورشکستگی شامل قاعده‌ی اعطای برابر مقید[2] (CEA)، قاعده‌ی متناسب[3] و قاعده‌ی متناسب تعدیل‌شده[4] را برای حل مناقشه‌ی پنج کشور پیرامون دریای خزر در ارتباط با استفاده از منابع نفت و گاز مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با توجه به قواعد انتخاب اجتماعی[5]، قاعده‌ی اعطای برابر مقید (CEA)، نسبت به دو گزینه‌ی دیگر بهترین عملکرد را دارد.

مدنی[6] (۲۰۱۰؛ ۲۳۸-۲۲۵) بهره‌گیری از نظریه‌ی بازی[7] در مدیریت منابع آب و حل مناقشه از طریق مجموعه‌ای از بازی‌های غیرهمکارانه را موردمطالعه قرار داد و قابلیت آن‌ها در شناخت ماهیت و حل منازعات واقعی منابع آب را با در نظر گرفتن ساختار پویای مسائل منابع آب بررسی کرد.

آنسینک[8] و همکاران (۲۰۱۲؛ ۲۱۰-۱۸۷) مسأله‌ی بهره‌برداری مشترک از یک رودخانه را به یک مسأله‌ی ورشکستگی تبدیل کردند و سپس از قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی برای حل این مسأله استفاده کردند. آن‌ها قواعد متناسب، اعطای برابر مقید، نقصان برابر مقید[9] (CEL) و تلمود[10] را به‌کارگرفتند و عملکرد آن‌ها را مناسب ارزیابی کردند.

عملکرد تعدادی از قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی در حل مناقشات منابع آب توسط مدنی و زارع‌زاده (۲۰۱۲؛ ۲۲۵۲-۲۲٤۷) مرور و بررسی شد. قاعده‌ی متناسب، قاعده‌ی متناسب تعدیل‌شده، قاعده‌ی اعطای برابر مقید، قاعده‌ی نقصان برابر مقید، قاعده‌ی تلمود و قاعده‌ی پینایلز[11] برای حل یک مسأله‌ی مناقشه‌ی فرضی در بهره‌برداری از یک منبع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفتند و سپس عملکرد آن‌ها بررسی شد.

---

[1] Sheikhmohamady
[2] Constrained Equal Awards (CEA) rule
[3] Proportional rule
[4] Adjusted Proportional rule
[5] Social choice rules
[6] Madani
[7] Game Theory
[8] Ansink
[9] Constrained Equal Losses (CEL) rule
[10] Talmud rule
[11] Piniles rule

در مطالعه‌ای دیگر، زارع‌زاده[1] و همکاران (۲۰۱۲؛ ۲۴۱۲-۲۴۰۶)، استفاده از چهار قاعده‌ی متناسب، متناسب تعدیل‌شده، اعطای برابر مقید و نقصان برابر مقید را برای حل منازعات بین هشت استان حوضه‌ی آبریز سفیدرود با ارائه‌ی یک ساختار تخصیص منصفانه برای چندین سناریوی اقلیمی و توسعه‌ای مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که ساختار مبتنی بر قاعده‌ی نقصان برابر مقید، مقبول‌ترین پاسخ‌های تخصیصی را ارائه می‌کند.

افزون بر این، مدنی و همکاران (۲۰۱۴؛ ۳۰۶۸-۳۰۵۵) برای حل مناقشات رودخانه‌ای بین استانی که در آن‌ها مجموع تقاضای ذی‌نفعان بیش از ظرفیت منبع موجود است، یک رویکرد جدید مبتنی بر حل مسأله‌ی ورشکستگی پیشنهاد کردند که در آن تغییرات زمانی و مکانی جریان رودخانه لحاظ می‌شد. در این مطالعه، چهار مدل بهینه‌سازی مبتنی بر قاعده‌ی متناسب، قاعده‌ی متناسب تعدیل‌شده، قاعده‌ی اعطای برابر مقید، قاعده‌ی نقصان برابر مقید ارائه شدند.

میان‌آبادی[2] و همکاران (۲۰۱۴؛ ۱۵۹-۱۵۲) با لحاظ کردن مشارکت کارگزاران در کل منابع در کنار ادعای آنان، یک روش جدید مبتنی بر حل مسأله‌ی ورشکستگی ارائه کردند که عملکرد آن را روی مطالعه‌ی موردی رودخانه‌ی فرات و یک مطالعه‌ی موردی فرضی بررسی کردند. ارزیابی آنان از عملکرد روش پیشنهادی خود در حل مناقشات مربوط به مسائل تسهیم رودخانه در مقایسه با عملکرد سایر روش‌ها، حاکی از برتری روش پیشنهادی بود.

سچی[3] و همکاران (۲۰۱۵؛ ۵۵۵-۵۴۱) تمایل بالاتر مصرف‌کننده برای پرداخت هزینه را به‌عنوان اولویت بالاتر حجم درخواستی یکسان درنظرگرفتند و بر این مبنا، با به‌کارگیری قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی، روشی را برای تخصیص منابع آب در یک سیستم پیچیده تحت شرایط کمبود آب[4] معرفی کردند. آنان با استفاده از قاعده‌ی متناسب، قاعده‌ی متناسب تعدیل‌شده، قاعده‌ی اعطای برابر مقید، قاعده‌ی نقصان برابر مقید و قاعده‌ی تلمود، روش پیشنهادی را روی یک سیستم آبی ساده و روی یک سیستم آبی پیچیده و چندمنظوره در ایتالیا اعمال کردند و قاعده‌ی متناسب تعدیل‌شده و قاعده‌ی تلمود را از حیث تعادل‌بخشی منابع

[1] Zarezadeh
[2] Mianabadi
[3] Sechi
[4] water scarcity

موجود، به‌عنوان بهترین گزینه‌ها معرفی کردند.

در حوضه‌ی میان‌مرزی رودخانه‌ی نیل دگفو[1] و همکاران (۲۰۱٦؛ ۳۹٦٤–۳۹٤۹) نیز به‌کارگیری قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی را برای حل به مناقشات آبی بررسی کردند. آنان با منظور کردن ارزش نسبی هر کشور ساحلی رودخانه در شکل‌گیری یک ائتلاف همکارانه‌ی بزرگ به‌عنوان مشارکت آبی آن کشور، روشی برای محاسبه‌ی مشارکت آبی کشورهای ساحلی حوضه‌ی یک رودخانه‌ی ورشکسته پیشنهاد کردند.

افتاده[2] و همکاران (۲۰۱٦؛ ۳۵۳۳–۳۵۱۹) روش جدیدی را برای حل مسأله‌ی ورشکستگی پیشنهاد کردند و عملکرد آن را با قاعده‌ی متناسب در زیرحوضه‌ی زرینه‌رود در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه مورد مقایسه قرار دادند. این دو روش بر اساس کاهش تخصیص آب به کشاورزی آبی و تخصیص آب حاصل از این کاهش به حقابه‌ی زیست‌محیطی دریاچه‌ی ارومیه ارزیابی شدند. نتایج حاکی از عملکرد مثبت هر دو روش در جهت افزایش حقابه‌ی دریافتی دریاچه‌ی ارومیه بود، اما هیچ‌یک کمبود آب دریاچه را به‌طور کامل جبران نکردند.

دگفو و همکاران (۲۰۱۷؛ ۲٦۲٤–۲٦۲۷) با ترکیب نظریه‌ی ورشکستگی و مفهوم راه‌حل چانه‌زنی نامتقارن، یک مکانیزم یکنوای تخصیص آب برای حوضه‌های رودخانه‌های میان‌مرزی تحت شرایط کمبود آب را با تمرکز بر حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی نیل توسعه دادند که در آن طبیعت یکنوای تقاضای آبی ذی‌نفعان درنظرگرفته می‌شد.

ویکراماج[3] و همکاران (۲۰۲۰؛ ۱۵–۱) نیز در مطالعه‌ای، از پنج قاعده مبتنی بر قواعد ورشکستگی برای حل مناقشات مربوط به کمبود منابع آب بین ایالت‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه‌ی میسوری استفاده کردند و عملکرد این قواعد را ارزیابی کردند و عملکرد یک قاعده‌ی تعدیل‌شده‌ی اعطای برابر مقید و نیز قاعده‌ی متناسب را مناسب‌تر از سایر گزینه‌ها تشخیص دادند.

[1] Degefu
[2] Oftadeh
[3] Wickramage

جانوا[1] و حسن[2] (۲۰۲۰؛ ۲۳۷-۲۲٤) از قواعد ورشکستگی برای تخصیص آب موردنیاز چهار استان ساحلی رودخانه‌ی ایندوس در پاکستان استفاده کردند. آنان چهار سناریوی کمبود بحرانی را برای مقدار آب در دسترس و نیاز ادعایی این استان‌ها مورد بررسی قرار دادند. افزون بر این، یک رویکرد ورشکستگی وزنی[3] را پیشنهاد کردند که می‌تواند با تنظیمات استوکستیک به‌کار گرفته شود. نتایج حاصل نشان داد که تحت هر چهار سناریو، قواعد ورشکستگی وزنی به‌سود کارگزاران یا بهره‌بردارانی است که تولید کشاورزی بالایی دارند.

با توجه به آن‌چه بیان شد، قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی و مدل‌های مبتنی بر آن‌ها تاکنون در مطالعات مختلفی برای حل مناقشات مربوط به منابع آب به‌کار گرفته شده‌اند و در موارد قابل‌توجهی نیز نتایج مناسبی را فراهم کرده‌اند. با این حال، تا کنون چندان به استفاده از این قواعد در حل مناقشات کیفی منابع آب و کارآمدی آن‌ها در این زمینه توجهی نشده است.

روش‌شناسی

حل مناقشه‌ی کیفی در رودخانه با استفاده از قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی

برای طرح مسأله‌ی حل مناقشه‌ی کیفی در رودخانه، ابتدا بازه‌ی مشخصی از یک رودخانه در نظر گرفته می‌شود که میزان یک متغیر کیفی مشخص در مقطع انتهایی آن بازه مورد سنجش و بررسی قرار می‌گیرد. طول بازه شامل یک جریان اصلی است که ممکن است تعدادی جریان فرعی به آن بپیوندند. هم جریان اصلی و هم هر یک از جریان‌های فرعی ورودی به جریان اصلی بسته به بار آلودگی که برحسب متغیر کیفی موردنظر در جریان کلی وارد می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان یک منبع آلاینده در نظر گرفته شوند. اگر بار آلودگی در نقطه‌ی کنترل انتهای بازه از مقدار مجاز تجاوز کند، آنگاه لازم است میزان بار آلودگی واردشده توسط منابع آلاینده به‌نحوی کاهش یابد که مقدار بار آلودگی در نقطه‌ی کنترل به مقداری کوچک‌تر یا مساوی مقدار مجاز برسد. مسئله‌ی تعیین میزان سهم مجاز هر منبع آلاینده برای ورود بار آلودگی یا به‌عبارت‌دیگر میزان تصفیه‌ای که توسط هر منبع آلاینده باید اعمال شود، یک مسئله‌ی

[1] Janua
[2] Hassan
[3] weighted bankruptcy

تخصیص منبع محدود به کارگزاران متعدد است که مجموع تقاضای آن‌ها از کل منبع موجود بیشتر است. پس می‌توان مسأله را به‌عنوان یک مسأله‌ی ورشکستگی در نظر گرفت و برای حل آن از قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی بهره گرفت.

در ادامه، معرفی مختصر، روابط ریاضی و تطبیق چهار قاعده‌ی عمده‌ی حل مسائل ورشکستگی بر مسأله‌ی حل مناقشه‌ی کیفی در رودخانه ارائه می‌شود. هر یک از این چهار قاعده بر اساس درک مشخصی از مفهوم «برابری[1]» استوار هستند.

قاعده‌ی متناسب

قاعده‌ی متناسب، منابع موجود را به‌تناسب ادعاهای کارگزاران بین آن‌ها توزیع می‌کند. در استفاده از قاعده‌ی متناسب برای حل مسئله‌ی مناقشه‌ی کیفی در رودخانه، از میزان بار آلودگی اولیه‌ی ورودی به رودخانه توسط هر یک از N منبع آلاینده به یک نسبت کاسته می‌شود. سهم بار آلودگی قابل‌تخلیه به رودخانه توسط هر منبع آلاینده به‌صورت روابط (۱) و (۲) تعیین می‌شود:

$$L_i^{\text{new}} = \lambda L_i^{\text{old}} \quad (۱)$$

$$L_{\text{control}}^{\text{new}} \leq L_{\text{all}} \quad (۲)$$

که در رابطه‌ی (۱) L_i^{old} بار آلودگی ورودی توسط منبع آلاینده‌ی i قبل از تصفیه، $(0 < \lambda \leq 1)$ نسبت بار آلودگی ورودی به رودخانه توسط منبع i پس از تصفیه به بار آلودگی ورودی به رودخانه توسط منبع i پیش از تصفیه، و L_i^{new} بار آلودگی در جریان i پس از $(1-\lambda) \times 100$ درصد تصفیه است. رابطه‌ی (۲) قیدی است که باید در نقطه کنترل آلودگی لحاظ شود و در آن $L_{\text{control}}^{\text{new}}$ مقدار بار آلودگی در نقطه‌ی کنترل پس از اعمال تصفیه در منابع آلاینده‌ی بالادست و L_{all} مقدار بار آلودگی مجاز در نقطه‌ی کنترل است.

[1] equality

قاعده‌ی اعطای برابر مقید

قاعده‌ی اعطای برابر مقید، منابع موجود را به‌طور برابر بین کارگزاران توزیع می‌کند، به این شرط که هیچ‌یک از کارگزاران بیش از ادعای خود، سهمی دریافت نکند.

برای حل مسئله‌ی مناقشه‌ی کیفی در رودخانه با استفاده از قاعده‌ی اعطای برابر مقید، مقدار بار آلودگی قابل تخلیه توسط کلیه‌ی منابع آلاینده هم‌زمان و گام‌به‌گام از صفر به‌صورت برابر افزایش می‌یابد تا به مقدار آن برای هر منبع آلاینده به بیشینه‌ی مقدار ادعا یا همان مقدار بار آلودگی ورودی اولیه به رودخانه برسد یا مقدار بار آلودگی در نقطه‌ی کنترل به مقدار مجاز برسد. مطابق رابطه‌ی (۳)، در این حالت تابع هدف بیشینه کردن بار آلودگی قابل‌تخلیه توسط هر یک از منابع آلاینده است. از رابطه‌ی (٤) نیز به‌منظور تعیین مقدار بار آلودگی قابل‌تخلیه توسط هر یک از منبع آلاینده استفاده می‌شود که مقدار آن برابر است با کمینه‌ی مقدار تخلیه‌ی برابر و مقدار بار آلودگی ورودی توسط منبع آلاینده قبل از تصفیه.

$$\text{maximize } L_{\text{EA}} \tag{۳}$$

$$L_i^{\text{new}} = \min\left(L_{\text{EA}}, L_i^{\text{old}}\right) \tag{٤}$$

در روابط (۳) و (٤) L_{EA} مقدار اعطای برابر است. برای اجرای این قاعده نیز، لحاظ کردن قید رابطه‌ی (۲) ضروری است.

قاعده‌ی نقصان برابر مقید

قاعده‌ی نقصان برابر مقید، با در نظر گرفتن این قید که سهم هیچ کارگزاری نمی تواند منفی شود، اختلاف بین مجموع ادعاها و منابع موجود را به‌صورت برابر توزیع می‌کند.

به‌منظور حل مسئله‌ی مناقشه‌ی کیفی در رودخانه با استفاده از قاعده‌ی نقصان برابر مقید، مقادیر بار آلودگی ورودی از تمامی منابع آلاینده، هم‌زمان و گام‌به‌گام به‌مقدار برابر کاهش می‌یابد. در هر گام، مقدار برابر از بار آلودگی هر یک از منابع کاهش می‌یابد تا مقدار بار آلودگی در نقطه‌ی کنترل به مقدار مجاز یا پایین‌تر از آن برسد. آن‌چنان‌که در رابطه‌ی (۵) آمده است، در این حالت، تابع هدف کمینه کردن کاهش بار آلودگی توسط هر یک از منابع است. در رابطه‌ی (۵)، L_{EL} مقدار نقصان برابر مقید یا همان مقدار کاهش برابر بار آلودگی از منابع

آلاینده است. به‌علاوه، رابطه‌ی (٦) بیانگر آن است که مقدار قابل‌تخلیه توسط هر منبع آلاینده پس از اعمال قاعده‌ی نقصان برابر مقید، مساوی بیشینه‌ی تفاضل مقدار تخلیه‌ی آلاینده پیش از تصفیه نسبت به مقدار نقصان برابر مقید، و مقدار صفر است.

$$\text{minimize } L_{\text{EL}} \quad (۵)$$

$$L_i^{\text{new}} = \max\left(L_i^{\text{old}} - L_{\text{EL}}, 0\right) \quad (٦)$$

بدیهی است که برای اجرای قاعده‌ی نقصان برابر مقید نیز اعمال قید مندرج در رابطه‌ی (۳) موردنیاز است.

قاعده تلمود

قاعده‌ی تلمود یک قاعده‌ی حل مسئله‌ی ورشکستگی مرکب از سه قاعده‌ی متناسب، اعطای برابر مقید و نقصان برابر مقید است.

در قاعده‌ی تلمود، ابتدا سهم ادعایی هر یک از کارگزاران که در این مطالعه برابر مقدار بار آلودگی ورودی به رودخانه توسط هر منبع آلاینده (L_i^{old}) است، نصف می‌شود. این مرحله، مشابه اعمال قاعده‌ی متناسب با نسبت $p = 0.5$ است. سپس مقدار بار آلودگی در نقطه‌ی کنترل جریان رودخانه ($L_{\text{control}}^{\text{new}}$) مورد سنجش یا محاسبه قرار می‌گیرد. درصورتی‌که پس از نصف کردن مقادیر L_i^{old}، مقدار $L_{\text{control}}^{\text{new}}$ از مقدار مجاز تعیین‌شده برای نقطه‌ی کنترل (L_{all}) بزرگ‌تر باشد، آنگاه با روشی مشابه قاعده‌ی CEL، باید یک مقدار برابر از تمام مقادیر بار آلودگی نصف‌شده‌ی منابع آلاینده ($0.5L_i^{\text{old}}$) کاسته شود تا مقدار $L_{\text{control}}^{\text{new}}$ به مقدار L_{all} برسد. در مقابل، اگر پس از نصف کردن مقادیر L_i^{old}، مقدار $L_{\text{control}}^{\text{new}}$ از مقدار L_{all} کوچک‌تر باشد، آنگاه با روشی مشابه قاعده‌ی CEA، باید یک مقدار برابر به تمام مقادیر $0.5L_i^{\text{old}}$ افزوده شود تا مقدار $L_{\text{control}}^{\text{new}}$ به مقدار L_{all} برسد.

مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی کیفی رودخانه مبتنی بر قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی

در این پژوهش، به‌منظور اعمال قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی برای حل مناقشه‌ی کیفی رودخانه، لازم است این قواعد در چارچوب مدل‌های شبیه‌سازی – بهینه‌سازی کیفی رودخانه

جای بگیرند. در این مدل‌ها، سهم مجاز هر یک از منابع آلاینده با استفاده از قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی در چارچوب یک مدل بهینه‌سازی تخصیص می‌یابد و برای ارزیابی اثر هر تخصیص بر تغییرات مکانی و زمانی غلظت متغیرهای کیفی در رودخانه‌ها، از مدل شبیه‌سازی کیفی استفاده می‌شود. ابتدا برای بازه‌ی مشخصی از رودخانه، مشخصات منابع آلاینده‌ای که بار آلودگی را به رودخانه تخلیه می‌کنند به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شوند. در هر بار اجرا، مقادیر تخصیص بار مجاز آلودگی هر منبع آلاینده به‌وسیله‌ی یک قاعده‌ی ورشکستگی تعیین می‌شوند و سپس با استفاده از مدل شبیه‌سازی کیفی، مقدار بار آلودگی برحسب متغیر کیفی مدنظر در نقطه‌ی کنترل رودخانه محاسبه می‌شود. شایان ذکر است که منظور از مدل شبیه‌سازی، مدل شبیه‌سازی وضعیت کیفی رودخانه بر مبنای معادله‌ی توازن جرمی است و شبیه‌سازی با استفاده از توزیع‌های آماری و تولید داده‌های تصادفی مدنظر نیست. با استفاده از مقدار محاسبه‌شده توسط مدل شبیه‌سازی کیفی، مقدار تابع هدف مدل بهینه‌سازی محاسبه می‌شود. این فرآیند محاسباتی تا کمینه‌شدن مقدار تابع هدف مدل بهینه‌سازی تکرار می‌شود. با توجه به یک‌متغیره بودن مسأله‌ی بهینه‌سازی در این مطالعه، از روش تنصیف[1] برای جست‌وجوی عددی پاسخ مسأله استفاده شده است.

تابع هدف مسأله‌ی بهینه‌سازی مطابق رابطه‌ی (۷) تعریف می‌شود:

$$\text{minimize } Dev = \left|EC_{control}^{model} - EC_{control}^{all}\right| \quad (۷)$$

که در آن Dev مقدار تابع هدف، $EC_{control}^{model}$ مقدار هدایت الکتریکی محاسبه‌شده بر اساس مدل در نقطه‌ی کنترل و $EC_{control}^{all}$ مقدار هدایت الکتریکی مجاز در نقطه‌ی کنترل است. قید رابطه‌ی (۸) در پاسخ نهایی به‌ازای هر چهار قاعده اعمال می‌شود:

$$\left(EC_{control}^{model} - EC_{control}^{all}\right) \leq 0 \quad (۸)$$

همچنین قید رابطه‌ی (۹) برای بهینه‌سازی بر مبنای قواعد متناسب و اعطای برابر مقید لحاظ می‌شود:

[1] Bisection method

$$EC_i^{new} \leq EC_i^{init} \quad (۹)$$

که در آن EC_i^{init} مقدار اولیه‌ی هدایت الکتریکی جریان ورودی از منبع آلاینده‌ی iام و EC_i^{new} مقدار هدایت الکتریکی مجاز برای جریان ورودی از منبع iام توسط مدل است.

قید رابطه‌ی (۱۰) نیز برای استفاده از قواعد نقصان برابر مقید و تلمود در نظر گرفته می‌شود.

$$EC_i^{new} \geq 0 \quad (۱۰)$$

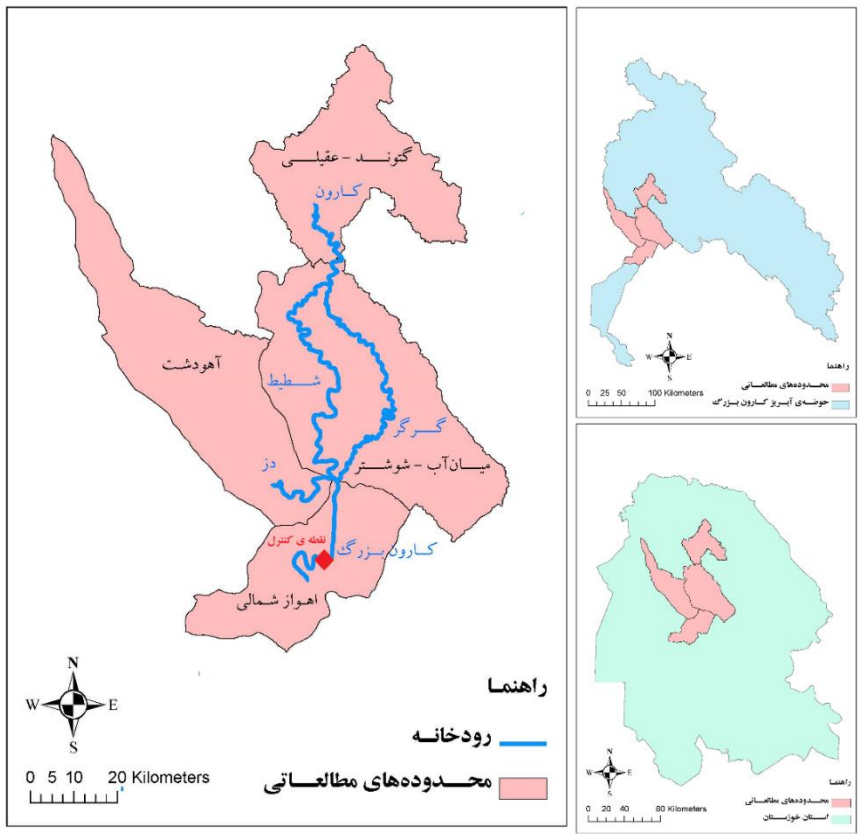
بررسی اجمالی شرایط مطالعه‌ی موردی

مسأله‌ی تغییرات شوری آب رودخانه‌ی کارون، در حال حاضر یکی از اصلی‌ترین مشکلات این رودخانه از منظر کیفیت آب است. افزایش شوری آب، با کاهش مطلوبیت کیفی آن برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی (در اغلب موارد) همراه است. شوری آب اغلب بر مبنای معیارهایی چون هدایت الکتریکی[1] (EC) سنجیده می‌شود. آب‌های مورداستفاده برای شرب انسان در بیشتر موارد دارای هدایت الکتریکی بین ۵۰ تا ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است (مهدوی، ۱۳۸٦).

در مطالعه‌ی حاضر، بازه‌ای از رودخانه‌ی کارون در فاصله‌ی پایین‌دست سد تنظیمی گتوند تا بالادست شهر اهواز (نقطه‌ی کنترل) مورد بررسی قرار گرفت. در شکل شماره ۱، موقعیت جغرافیایی ناحیه‌ی موردمطالعه نشان داده شده است.

مطابق شکل شماره ۱، بازه‌ی موردمطالعه در سه ناحیه‌ی مطالعاتی گتوند – عقیلی، میان‌آب – شوشتر و اهواز شمالی جای دارد. رودخانه‌ی دز نیز از ناحیه‌ی مطالعاتی آهودشت به رودخانه‌ی کارون می‌پیوندد. این چهار ناحیه‌ی مطالعاتی از منظر تقسیمات حوضه‌های آبریز، همگی در حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ هستند و از حیث تقسیمات کشوری در محدوده‌ی استان خوزستان قرار دارند. در شکل شماره ۲ نیز، طرح‌واره‌ی شبکه‌ی جریان‌های ورودی به رودخانه در بازه‌ی موردمطالعه نشان داده شده است.

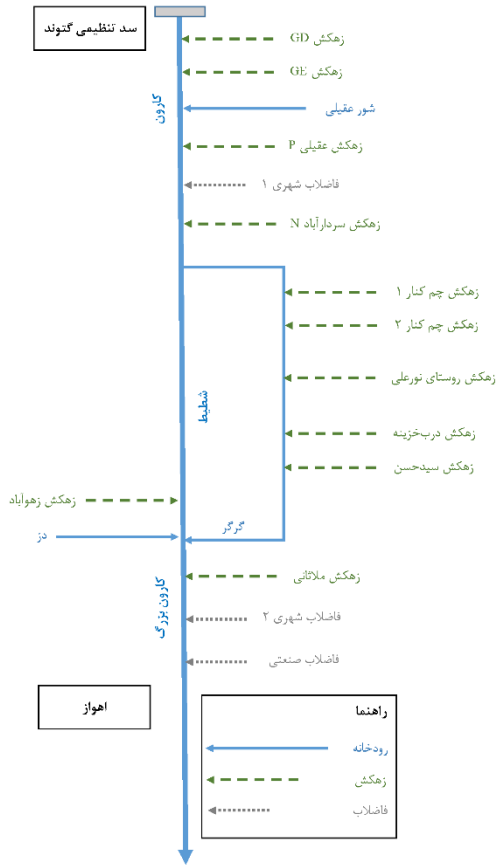
[1] Electrical Conductivity (EC)



شکل شماره ۱. موقعیت جغرافیایی ناحیه‌ی موردمطالعه (توجه: مقیاس نقشه‌ها متفاوت است.)

تجزیه و تحلیل

مدل‌سازی تغییرات کیفیت آب بر حسب EC با در نظر گرفتن مقدار جریان و EC جریان‌های ورودی و خروجی عمده در این محدوده، در محیط برنامه‌نویسی R به اجرا درآمد. در ادامه، قواعد حل مسأله‌ی ورشکستگی به‌کار گرفته شدند تا سهم مجاز EC ورودی از هر منبع آلاینده به ازای مقادیر متفاوت EC مجاز جریان در نقطه‌ی کنترل، معین شود. جدول شماره ۱ میزان EC هر یک از جریان‌های ورودی به رودخانه‌ی کارون در بازه‌ی مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۲. طرح‌واره‌ی جریان‌های ورودی به کارون در بازه‌ی مطالعه

مقادیر جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری از داده‌های شرکت مدیریت منابع آب ایران و مقادیر جریان و هدایت الکتریکی آب زهکش‌ها از مطالعه‌ی حسینی زارع و همکاران (۱۳۹۵) استخراج شده است.

در این وضعیت، بر اساس مدل‌سازی مقدار جریان و EC آب رودخانه در نقطه‌ی کنترل، یعنی در پایین‌دست ملاثانی و بالادست اهواز، به‌ترتیب در حدود ۲۹۱ مترمکعب بر ثانیه و ۲۰۶۰ میکروموس بر سانتی‌متر هستند.

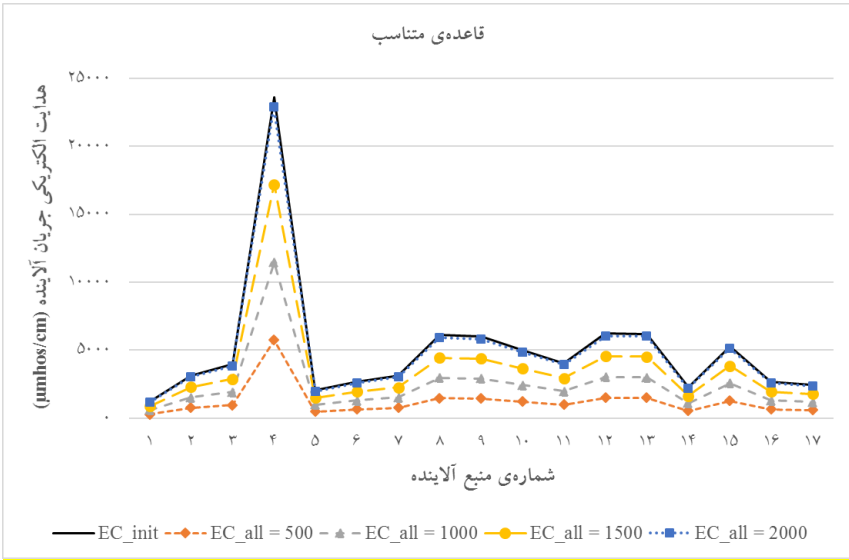
جدول شماره ۱. میزان EC جریان‌های ورودی به کارون در بازه‌ی مورد مطالعه

شماره جریان	نام جریان	دبی جریان (m^3/s)	EC (µmhos/cm)
۱	کارون، خروجی از سد گتوند	۲۱۰.۸۲	۱۲۲۰
۲	زهکش GD	۰.۶۱۹	۳۱۳۵
۳	زهکش GE	۰.۲۸۸	۳۹۷۵
٤	شور عقیلی	۵.۸۱	۲۳۶۱۳
۵	زهکش عقیلی P	۱.۷۶	۲۰۵۰
٦	فاضلاب شهری ۱	۳.۱٦	۲٦۹۱
۷	زهکش سردارآباد N	٤	۳۱۲۵
۸	زهکش چم‌کنار ۱	۰.۲۰٦	٦۱۱۵
۹	زهکش چم‌کنار ۲	۰.۰٦	٦۰۱۰
۱۰	زهکش روستای نورعلی	۰.۳۹۵	۵۰۱۰
۱۱	زهکش درب‌خزینه	۱.۵	٤۰٦۰
۱۲	زهکش سیدحسن	۱	٦۲٤۰
۱۳	زهکش زهوآباد	۲.۵	٦۲۰۵
۱٤	دز	۷۹	۲۲۷٤
۱۵	زهکش ملاثانی	۰.۱۲	۵۳۰۰
۱٦	فاضلاب شهری ۲	۳.۱٦	۲٦۹۱
۱۷	فاضلاب صنعتی	۱.۵۱۵	۲٤۳۹

پس از ورود داده‌های مورد نیاز به مدل شبیه‌سازی کیفی جریان رودخانه، بهینه‌سازی بر مبنای چهار تابع هدف مبتنی بر چهار قاعده‌ی حل مسأله‌ی ورشکستگی صورت پذیرفت. عملیات بهینه‌سازی با منظور کردن چهار آستانه ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ (µmhos/cm) برای میزان EC مجاز در نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{all}$) به اجرا درآمد.

در نخستین مرحله، قاعده‌ی متناسب (PRO)، برای تعیین سهم بار آلودگی مجاز ورودی از هر منبع آلاینده برای پنج مقدار آستانه‌ی مذکور مورد استفاده قرار گرفت. برای هر آستانه ($EC_{control}^{all}$)، تابع هدف طوری تعریف شد که اختلاف EC محاسبه‌شده به‌وسیله‌ی مدل در

نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{model}$) با آستانه‌ی مجاز مدنظر کمینه شود. نتایج حاصل در این مرحله، در شکل شماره ۳ ارائه شده است. نسبت تناسب به‌ازای چهار مقدار آستانه EC در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{all}$)، یعنی ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر به‌ترتیب برابر ۰/۲٤۳، ۰/٤۸۵، ۰/۷۲۸، ۰/۹۷۱ تعیین شد.

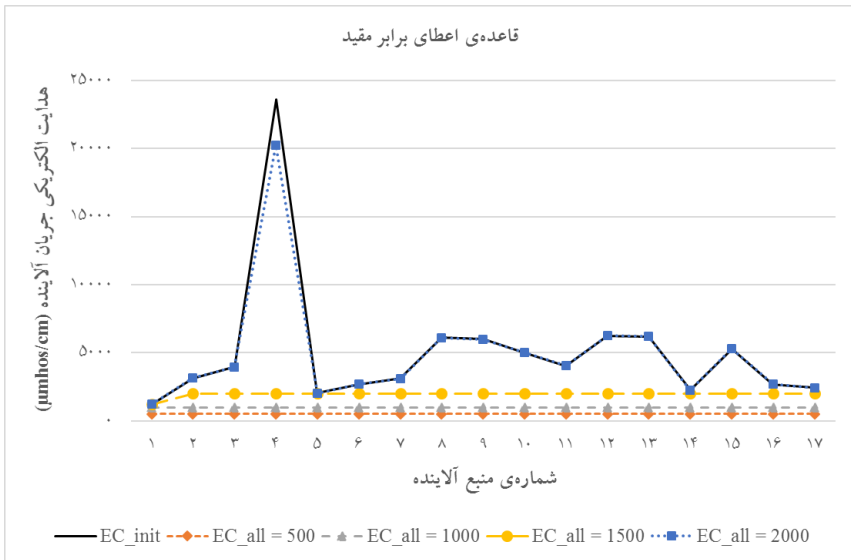


شکل شماره ۳. سهم مجاز EC جریان‌های ورودی در بازه‌ی مورد مطالعه بر اساس قاعده‌ی متناسب

واضح است که به‌کارگیری قاعده‌ی متناسب منجر به کاهش مقدار مجاز EC کلیه‌ی جریان‌های ورودی نسبت به مقدار ابتدایی آن‌ها می‌شود. همچنین می‌توان مشاهده کرد که افزایش نسبت تناسب حدود ۰/۲٤ (۲٤ درصد) به ازای هر ۵۰۰ واحد افزایش میزان EC مجاز در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{all}$) است.

در دومین مرحله، برای هر منبع آلاینده، مقدار سهم مجاز ورود بار آلودگی به ازای هر یک از چهار آستانه‌ی مدنظر بر مبنای قاعده‌ی اعطای برابر مقید (CEA) مشخص شد. در این مرحله نیز برای هر آستانه ($EC_{control}^{all}$)، تابع هدف چنان تعریف شد که تفاوت EC محاسبه‌شده

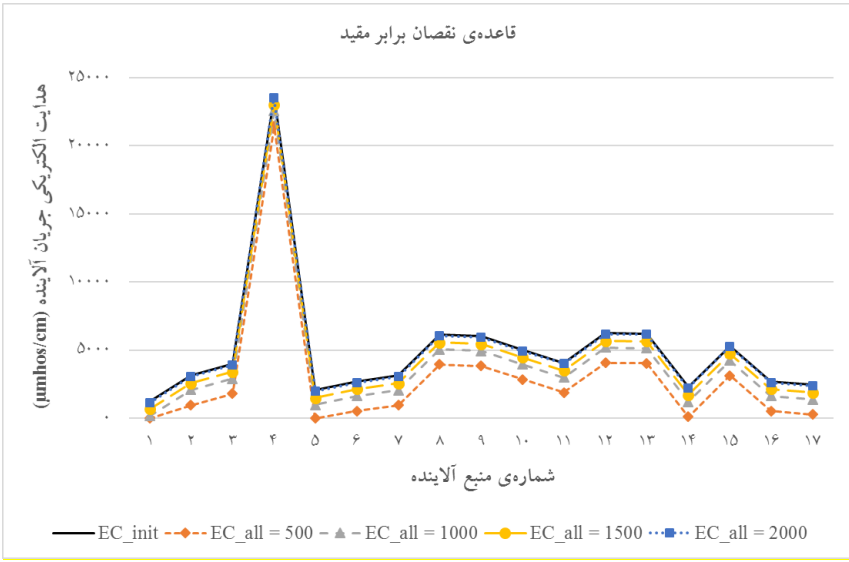
به‌وسیله‌ی مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{model}$) با آستانه‌ی مجاز کمینه شود. نتایج حاصل برای این مرحله، در شکل شماره ٤ ارائه شده است. مقدار اعطای برابر به‌ازای چهار مقدار آستانه EC در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{all}$)، به‌ترتیب برابر ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۳۱ میکروموس بر سانتی‌متر تعیین شد.



شکل شماره ٤. سهم مجاز EC جریان‌های ورودی در بازه‌ی مطالعه بر اساس قاعده‌ی اعطای برابر مقید

آن‌چنان که در شکل شماره ٤ می‌توان مشاهده کرد، هنگامی که از قاعده‌ی اعطای برابر مقید (CEA) استفاده می‌شود، جریان‌هایی با میزان آلاینده‌ی کم‌تر از مقدار CEA، نیازمند اعمال کاهش در مقدار اولیه‌ی EC خود نیستند، اما در مورد جریان‌هایی که مقدار EC آن‌ها برابر مقدار CEA یا بزرگ‌تر از آن است، EC باید کاهش یابد تا به میزان CEA برسد. آن‌چنان که مشهود است، با توجه به این‌که مقادیر EC تمام جریان‌ها بالاتر از مقادیر آستانه ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است، به‌ازای این مقادیر آستانه، EC مجاز تمام جریان‌ها به‌ترتیب مقدار برابر مقید ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تعیین می‌شود. در مورد مقدار آستانه ۱۵۰۰ هم تنها جریان اصلی رودخانه‌ی کارون که از سد گتوند رها می‌شود، از مقدار آستانه کوچک‌تر است و

ازاین‌رو، فقط EC این جریان در مقدار کنونی خود، یعنی ۱۲۲۰ باقی می‌ماند و EC مجاز سایر جریان‌های ورودی برابر ۲۰۰۷ میکروموس بر سانتی‌متر تعیین می‌شود. لذا می‌توان گفت که قاعده‌ی CEA بیشتر در جهت تأمین منافع منابع آلاینده با EC نسبتاً پایین عمل می‌کند و در مقابل، منابع آلاینده با EC بالا چندان از آن منتفع نمی‌شوند. در این مورد، در حالی که جریان ۱ نیاز به هیچ‌گونه کاهش بار آلودگی EC ندارد، مقدار EC شور عقیلی (جریان ٤) باید با ۹۱ درصد کاهش از ۲۳۳۱٦ به ۲۰۰۷ میکروموس بر سانتی‌متر کاهش یابد.



شکل شماره ۵. سهم مجاز EC جریان‌های ورودی در بازه‌ی مورد مطالعه بر اساس قاعده‌ی نقصان برابر مقید

در سومین مرحله، از قاعده‌ی نقصان برابر مقید (CEL) به‌منظور معین کردن سهم EC مجاز جریان‌های ورودی برای هر یک از چهار مقدار آستانه استفاده شد. همانند مراحل پیشین، برای هر آستانه ($EC^{all}_{control}$)، تابع هدف به‌نحوی تعریف شد که انحراف EC محاسبه‌شده به‌وسیله‌ی مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی در محل نقطه‌ی کنترل ($EC^{model}_{control}$) از آستانه‌ی مجاز مدنظر را کمینه کند. نتایج به‌دست‌آمده برای این مرحله، در شکل شماره ۵ مشاهده می‌شوند.

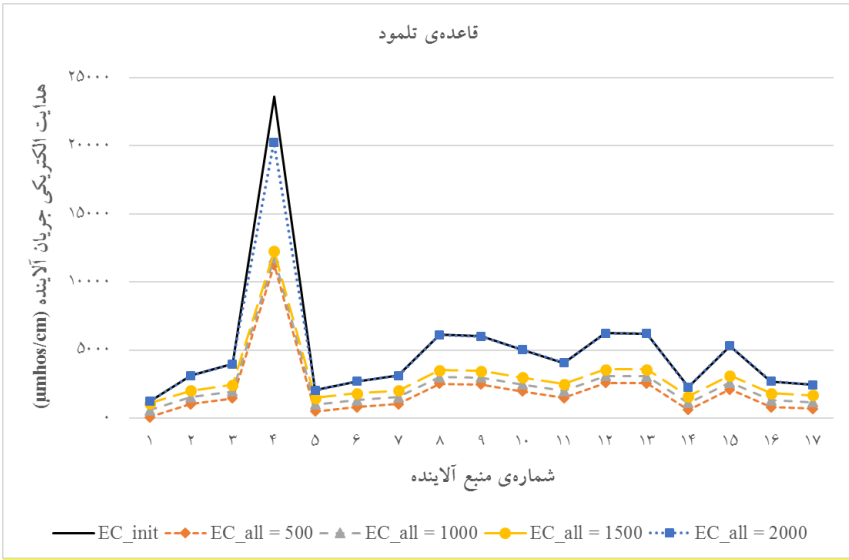
مقدار نقصان برابر به‌ازای چهار مقدار آستانه EC در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{all}$)، به‌ترتیب برابر ۲۱۷۸، ۱۰۶۰، ۵۶۰ و ۶۰ میکروموس بر سانتی‌متر تعیین شد.

آن‌گونه که در شکل شماره ۵ دیده می‌شود، با استفاده از قاعده‌ی نقصان برابر مقید (CEL)، تمامی جریان‌های ورودی با هر مقدار EC باید میزان آلایندگی خود بر حسب EC را به میزانی یکسان کاهش دهند. در این حالت، در مواقعی بعضی از منبع آلاینده‌ی کوچک باید بار آلودگی یا EC خود را به صفر کاهش دهند، حال آن که ممکن است که منابع آلاینده‌ی بزرگ فقط بخش نسبتاً کوچکی از آلایندگی خود را کم کنند. بنابراین می‌توان چنین گفت که عملکرد قاعده‌ی CEL بیشتر در جهت تأمین منافع منابع آلاینده با EC نسبتاً بالا است و منابع آلاینده با مقادیر EC پایین چندان از آن منتفع نمی‌شوند. آن‌چنان که مشاهده می‌شود بر اساس این قاعده، به‌ازای مقدار آستانه ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، در حالی که برای جریان اصلی خروجی از سد گتوند (جریان ۱) با EC اولیه‌ی ۱۲۲۰ باید مقدار EC، ۱۰۰ درصد کاهش یابد و به صفر برسد، مقدار EC جریان رودخانه‌ی شور عقیلی، فقط حدود ۹ درصد کاهش می‌یابد و از ۲۳۳۱۶ میکروموس بر سانتی‌متر به ۲۱۴۳۵ میکروموس بر سانتی‌متر می‌رسد که همچنان مقدار بسیار زیادی است. این رویه در مورد سایر مقادیر آستانه نیز صادق است.

در آخرین مرحله، یعنی مرحله‌ی چهارم، قاعده ترکیبی تلمود، به‌منظور مشخص کردن سهم EC مجاز جریان‌های ورودی برای هر یک از پنج مقدار آستانه، به‌کار گرفته شد. مانند مراحل پیشین، برای هر آستانه ($EC_{control}^{all}$)، تابع هدف به‌گونه‌ای تعریف شد که اختلاف EC محاسبه‌شده به‌وسیله‌ی مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{model}$) از آستانه‌ی مجاز مدنظر حداقل شود. نتایج این مرحله در شکل شماره ۶ مشاهده می‌شود.

لازم به توضیح است که در به‌کارگیری قاعده‌ی تلمود، به ازای مقادیر آستانه ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، پس از نصف کردن میزان EC هر جریان و اجرای مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی، میزان EC محاسبه‌شده در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{model}$) از آستانه‌ی مجاز در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{all}$) بیشتر بود و در نتیجه، به‌ترتیب مقادیر ۵۳۰ و ۳۰ میکروموس بر سانتی‌متر به‌عنوان نقصان برابر از هریک از مقادیر EC نصف‌شده کاسته شد تا سهم مجاز

جدید EC هر جریان معین شود. در سوی دیگر، به‌ازای مقادیر آستانه ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، پس از نصف کردن میزان EC هر جریان و اجرای مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی، میزان EC محاسبه‌شده در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{model}$) از آستانه‌ی مجاز در محل نقطه‌ی کنترل ($EC_{control}^{all}$) کمتر بود و در نتیجه، به‌ترتیب مقادیر ٤٧٠ و ٨٤٢٤ میکروموس بر سانتی‌متر به‌عنوان اعطای برابر به هریک از مقادیر EC نصف‌شده افزوده شد تا سهم مجاز جدید EC هر جریان معین شود.



شکل شماره ۶. سهم مجاز EC جریان‌های ورودی در بازه‌ی مورد مطالعه بر اساس قاعده‌ی تلمود

مطابق شکل شماره ٦، استفاده از قاعده‌ی تلمود به‌ازای مقادیر آستانه EC مجاز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر که با به‌کارگیری قاعده‌ی CEL همراه می‌شود، به‌صورت نسبی بیشتر به تأمین منافع منابع آلاینده‌ی با EC بالا منجر می‌شود، اما به‌ازای مقادیر آستانه EC مجاز ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر که با به‌کارگیری قاعده‌ی CEA همراه می‌شود، به‌صورت نسبی بیشتر به تأمین منافع منابع آلاینده‌ی با EC پایین می‌انجامد. با این حال در مقایسه با اعمال هر یک از قواعد CEA و CEL به‌صورت منفرد، به‌نظر می‌رسد که

به‌کارگیری قاعده‌ی تلمود به تأمین نسبی منافع هر دو گروه منابع آلاینده‌ی بزرگ و کوچک (با EC بالا و پایین) منتج می‌شود.

در مجموع بر اساس نتایج مندرج در شکل‌های شماره ۳، ٤، ٥ و ٦ قواعد تلمود، اعطای برابر مقید، متناسب و نقصان برابر مقید، به‌ترتیب بهترین گزینه‌ها برای تأمین منافع منابع آلاینده با EC پایین در این مطالعه هستند. در سوی دیگر، قواعد نقصان برابر مقید، متناسب، تلمود و اعطای برابر مقید به‌ترتیب مؤثرترین گزینه‌ها برای تأمین منافع منابع آلاینده با EC بالا در مطالعه‌ی حاضر هستند.

مطابق شکل‌های شماره ۳ تا ٦، با افزایش مقادیر آستانه‌ی مجاز هدایت الکتریکی در نقطه‌ی کنترل، مقادیر مجاز محاسبه‌شده برای بار آلودگی منابع آلاینده به‌وسیله‌ی قواعد ورشکستگی افزایش می‌یابند و به یکدیگر نزدیک می‌شوند، به‌طوری که به‌ازای آستانه‌ی مجاز هدایت الکتریکی ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر در نقطه‌ی کنترل، مقادیر مجاز بار آلودگی منابع محاسبه‌شده توسط سه قاعده‌ی متناسب، اعطای برابر مقید و نقصان برابر مقید، جز در مورد رودخانه‌ی شور عقیلی با هدایت الکتریکی بالا (جریان ٤)، در سایر موارد بسیار به هم نزدیک هستند.

همچنین با دقت در شکل‌ها مشخص می‌شود که عملکرد این قواعد به‌میزان قابل‌توجهی نیز وابسته به مقدار آستانه‌ی مجاز است، چرا که با افزایش مقدار آستانه به ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، روش اعطای برابر مقید که به‌ازای سه مقدار آستانه‌ی قبلی، تقریباً برای همه‌ی منابع بار آلودگی مجاز یکسانی را تعیین کرده بود، این‌بار برای منابع مختلف، مقادیر مجاز متفاوتی را تعیین کرده است، به‌طوری که این مقدار برای منبع یا جریان ۱ برابر ۱۲۲۰ میکروموس بر سانتی‌متر و برای منبع یا جریان ٤، برابر ۲۰۲۳۱ میکروموس بر سانتی‌متر تعیین شده است.

افزون بر این، مقادیر بار مجاز آلودگی تعیین‌شده به‌وسیله‌ی دو قاعده‌ی متناسب و تلمود برای منابع مختلف، اغلب بین مقادیر تعیین‌شده به‌وسیله‌ی دو قاعده‌ی اعطای برابر مقید و نقصان برابر مقید قرار می‌گیرد. البته، در حالی که به‌ازای آستانه‌ی مجاز هدایت الکتریکی ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر در نقطه‌ی کنترل، اغلب مقادیر حاصل از اعمال قاعده‌ی تلمود

بزرگ‌تر هستند، به‌ازای آستانه‌ی مجاز هدایت الکتریکی ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر در نقطه‌ی کنترل، مقادیر مربوط به استفاده از قاعده‌ی متناسب بزرگ‌تر هستند. به‌ازای آستانه‌ی مجاز هدایت الکتریکی ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، نتایج حاصل از اعمال هر دو روش تقریباً یکسان هستند.

نکته‌ی قابل‌توجه در مورد آستانه‌ی مجاز هدایت الکتریکی ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر در نقطه‌ی کنترل، آن است که مقدار بار آلودگی مجاز تعیین‌شده به‌وسیله‌ی قاعده‌ی تلمود برای جریان یا منبع ۱ که همان جریان اصلی رودخانه‌ی کارون در پایین‌دست سد تنظیمی گتوند است، از مقدار اولیه‌ی ۱۲۲۰ میکروموس بر سانتی‌متر به ۱۵۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر افزایش می‌یابد. این مورد تنها مورد افزایش مقدار بار آلودگی مجاز یک منبع آلاینده نسبت به مقدار بار آلودگی اولیه‌ی آن در این مطالعه است. این جریان پایین‌تر مقدار اولیه‌ی بار آلودگی را در میان جریان‌های مورد بررسی دارد، اما در مقابل دارای بالاترین دبی در میان جریان‌های موجود است و از این حیث اثر تغییر کیفیت آن بر کیفیت کلی جریان در نقطه‌ی کنترل نیز مؤثر است.

همچنین با توجه به نتایج ارائه‌شده، میزان هدایت الکتریکی جریان رهاسازی‌شده از سد گتوند علیا و سد تنظیمی گتوند بر مبنای نتایج حاصل از اعمال دو قاعده‌ی متناسب (PRO) و نقصان برابر مقید (CEL) به‌ازای هر چهار مقدار آستانه باید کاهش یابد. همچنین با اعمال قاعده‌ی تلمود (TAL) نیز، به‌ازای سه مقدار آستانه‌ی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، باید مقدار هدایت الکتریکی این جریان کاهش یابد. در نهایت، در مورد قاعده‌ی اعطای برابر مقید (CEA)، فقط به‌ازای دو مقدار آستانه‌ی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، کاهش در مقدار هدایت الکتریکی این جریان لازم است. برای کاهش مقدار هدایت الکتریکی جریان رهاسازی‌شده از مخزن سد گتوند علیا در هر یک از این موارد، لازم است نسبت جریان خروجی از ترازهای بالایی مخزن، یعنی ترازهای بالاتر از ۱۵۹ و ۱۵۸/۵ متر (به‌وسیله‌ی آبگیر نیروگاه و تخلیه‌کننده‌ی تحتانی) به جریان خروجی از ترازهای پایینی مخزن، یعنی ۱۲۳ و ۹۰ متر (به‌وسیله‌ی تخلیه‌کننده‌ی تحتانی و لوله‌ی GRP) افزایش یابد تا

بدین‌وسیله کیفیت نهایی آب رهاسازی‌شده در رودخانه بهبود یابد و به مقادیر موردنظر نزدیک شود. البته روشن است که کاهش هدایت الکتریکی به مقادیری مانند ۰ و ۱۶۰ میکروموس بر سانتی‌متر بر مبنای قاعده‌ی نقصان برابر مقید (CEL) به‌ازای مقادیر آستانه‌ی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و نیز مقدار ۸۰ میکروموس بر سانتی‌متر بر مبنای قاعده‌ی تلمود (TAL) به‌ازای آستانه‌ی ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر با شرایط واقعی و کاربردهای عملی سازگاری ندارد و با توجه به حجم بالای جریان، اعمال قواعد اعطای برابر مقید (CEA) و متناسب (PRO) در این موارد، نتایج منطقی‌تری را فراهم می‌کند.

به‌علاوه، بر اساس نتایج می‌توان نتایج حاصل از قاعده‌ی اعطای برابر مقید به‌ازای آستانه‌های ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و قاعده‌ی تلمود به‌ازای مقدار آستانه‌ی ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر را مناسب‌ترین گزینه‌ها از منظر کاهش هزینه‌های مدیریت مخزن سد دانست که هیچ‌گونه کاهشی را متوجه مقدار میزان هدایت الکتریکی کنونی جریان خروجی از مخزن سد گتوند (۱۲۲۰ میکروموس بر سانتی‌متر) نمی‌کنند.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

نتیجه‌گیری

بنا بر نتایج این مطالعه، در صورت استفاده از قاعده‌ی متناسب، مقدار مجاز EC کلیه‌ی جریان‌های ورودی، نسبت به مقدار اولیه‌ی آن‌ها به نسبت یکسانی کاهش می‌یابد. همچنین به ازای هر ۵۰۰ واحد در افزایش مقدار مجاز EC در نقطه‌ی کنترل $(EC_{control}^{all})$ ، حدود ۲۴ درصد افزایش در نسبت محاسبه‌شده مشاهده شد.

همچنین نتایج نشان داد که با به‌کارگیری قاعده‌ی اعطای برابر مقید (CEA)، در مورد جریان‌هایی که دارای میزان آلایندگی کم‌تر از مقدار CEA محاسبه‌شده هستند، این امکان وجود دارد که کاهشی نسبت به مقدار اولیه‌ی EC آن‌ها اعمال نشود، اما آلایندگی جریان‌هایی که مقدار EC آن‌ها بزرگ‌تر از CEA است، باید تا رسیدن به مقدار CEA کاهش یابد. در نتیجه، قاعده‌ی CEA، منافع منابع آلاینده با EC پایین را بیش از منابع آلاینده‌ی دارای EC بالا تأمین می‌کند.

افزون بر این، با اعمال قاعده‌ی نقصان برابر مقید (CEL)، میزان EC کلیه‌ی جریان‌های ورودی باید به مقدار یکسانی کاهش یابد و در این میان گاهی ممکن است برخی آلاینده‌های کوچک مجبور شوند میزان آلایندگی یا EC خود را به صفر برسانند. در مقابل، ممکن است که آلاینده‌های بزرگ تنها نسبت نه‌چندان قابل‌توجهی از آلایندگی خود را کاهش دهند. از این رو به‌نظر می‌رسد که قاعده‌ی CEL، منافع منابع آلاینده با EC بالا را بیش از منابع آلاینده‌ی دارای EC پایین تأمین می‌کند.

همچنین قاعده‌ی تلمود عملکردی بینابین دارد. استفاده از این قاعده، نسبت به قاعده‌ی CEA در این مطالعه، بیشتر منجر به تأمین منافع منابع آلاینده با EC بالا می‌شود، اما نسبت به قواعد متناسب (PRO) یا نقصان برابر مقید (CEL) کمتر برای تأمین منافع آن‌ها مطلوب خواهد بود.

پیشنهاد

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، توصیه می‌شود که در مطالعات آتی با توسعه‌ی روش‌های حل مسأله‌ی ورشکستگی و اعمال آن‌ها بر مناقشات مختلف کیفیت آب در نقاط کشور، عملکرد این روش‌ها بیش از پیش مورد ارزیابی قرار گیرد تا نقط قوت و ضعف هر یک از آن‌ها بیشتر نمودار گردد و امکان بهره‌برداری بهینه از آن‌ها بسته به شرایط، مسائل و مناقشات مختلف فراهم شود. همچنین پیشنهاد می‌شود چگونگی انطباق هر یک از این قواعد با شرایط بومی و محیطی و نیز قوانین کشوری و اصول فرهنگی و اعتقادی کشور حتی‌الامکان بررسی شود. افزون بر این، تلاش برای توسعه‌ی قواعد جدید متناسب با شرایط بومی و اجتماعی نیز می‌تواند در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد. به‌علاوه، شاید با در نظر گرفتن کیفیت آب دریافتی هر یک از منابع آلاینده از بالادست خود و لحاظ کردن آن در محاسبات مدل‌ها بتوان به نتایج منصفانه‌تر و راه‌حل‌های عادلانه‌تری دست یافت.

منابع

حسینی زارع، نادر؛ غلامی، علی؛ پناه‌پور، ابراهیم؛ جعفرنژادی، علیرضا (۱۳۹۵)، شناسایی و تعیین بار آلودگی آلاینده‌های کشاورزی در حوضه آبریز رودخانه‌های کارون و دز. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹(۳).

شکری، ساناز (۱۳۹٤)، کاربرد مدل QUAL2KW در پایش کیفی منابع آب سطحی، تهران، انتشارات صبورا.

علیزاده، امین (۱۳۸۸)، اصول هیدرولوژی کاربردی، مشهد، انتشارات دانشگاه امام رضا.

کراچیان، رضا (۱۳۹۱)، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی کاربرد تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی در مدیریت کیفی سامانه‌های رودخانه‌ای، دانشگاه تهران.

مؤسسه آب دانشگاه تهران (۱۳۹٤)، مطالعه و بررسی راهکارهای رفع شوری آب مخزن سد گتوند و انتخاب راهکار برتر، گزارش شناخت، دانشگاه تهران.

مهدوی، محمد (۱۳۸٦)، هیدرولوژی کاربردی، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

Ansink, E. and Weikard, H-P. (2012), "Sequential Sharing Rules for River Sharing Problems", Social Choice and Welfare, Vol. 38.

Degefu, D. M. and He, W. (2016), "Allocating water under bankruptcy scenario", Water Resources Management, Vol. 30. No. 11.

Degefu, D. M., He, W. and Yuan, L. (2017), "Monotonic bargaining solution for allocating critically scarce transboundary water", Water Resources Management, Vol. 31, No. 9.

Herrero, C. and Villar, A. (2001), "The three musketeers: four classical solutions to bankruptcy problems", Mathematical Social Sciences, Vol. 42. No. 3.

Janua, S. and Hassan, I. (2020), "Transboundary water allocation in critical scarcity conditions: a stochastic bankruptcy approach", Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA, Vol. 69, No. 3. 224-237.

Kampas, A. and White, B. (2003), "Selecting permit allocation rules for agricultural pollution control: a bargaining solution", Ecological Economics, Vol. 47. No. 2-3.

Madani, K. (2010). "Game theory and water resources", Journal of Hydrology, Vol. 381. No. 3-4.

Madani, K. and Zarezadeh, M (2012), "Bankruptcy methods for resolving

water resources conflicts", World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries, 2247-2252
Madani, K., Zarezadeh, M. and Morid, S. (2014), "A new framework for resolving conflicts over transboundary rivers using bankruptcy methods", Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 18.
Mianabadi, H., Mostert, E., Zarghami, M. and Giesen, N. (2014), "A new bankruptcy method for conflict resolution in water resources allocation", Journal of Environmental Management, Vol. 144.
Oftadeh, E., Shourian, M. and Saghafian, B. (2016), "Evaluation of the bankruptcy approach for water resources allocation conflict resolution at basin scale, Iran's Lake Urmia experience", Water Resources Management, Vol. 30, No. 10.
Sechi, G. M. and Zucca, R. (2015), "Water resource allocation in critical scarcity conditions: A bankruptcy game approach", Water Resources Management, Vol. 29.
Sheikhmohammady, M. and Madani, K. (2008), Bargaining over the Caspian Sea - The Largest Lake on the Earth, World Environmental and Water Resources Congress 2008, Ahupua'A.
Wickramage, H.M., Roberts, D.C. and Hearne, R.R. (2020), "Water Allocation Using the Bankruptcy Model: A Case Study of the Missouri River", Water, Vol. 12, No. 619.

Zarezadeh, M., Madani, K. and Morid, S. (2012), "Resolving Transboundary Water Conflicts: Lessons Learned from the Qezelozan-Sefidrood River Bankruptcy Problem", World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries, 2406-2412.