



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

صفحه‌های ۲۵۹-۲۴۳

# تخصیص بهینه بار آلودگی بر مبنای الگوی تجارت کیفیت آب در پایین دست رودخانه سفیدرود

شروین جمشیدی<sup>۱</sup>، محمدحسین نیک‌سخن<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۴

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۵/۱۶

### چکیده

الگوی تجارت مجوز انتشار آلودگی، رویکردی نوین در مدیریت کیفی منابع آب سطحی به شمار می‌رود. بر همین اساس، این پژوهش به تخصیص بهینه بار آلودگی مبتنی بر پارامتر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی آب (BOD) در رودخانه سفیدرود، حفاصل سد سنگر تا مصب دریا می‌پردازد. بدین منظور، رودخانه از نظر کمی و کیفی توسط مدل Qual2kw شبیه‌سازی شده و مقدار بار مجاز تخلیه آلودگی روزانه (TMDL) تعیین شده است. همچنین به روش آنالیز حساسیت، مقدار ضرایب تأثیر هر منبع آلاینده، پس از نرمال‌سازی مشخص و تخصیص بهینه پساب با هدف حداقل کردن هزینه‌های کل تصفیه بار آلودگی تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد حفاظت از منابع آبی به روش کنترل تخلیه بار مجاز آلودگی نسبت به روش متعارف کنترل دستوری، سبب کاهش هزینه‌های کل تصفیه تا ۱۰ درصد خواهد شد. همچنین می‌توان انتظار داشت شاخص کیفی آب حدود ۲۰ واحد افزایش یابد. الگوی تجارت مجوز انتشار آلودگی، میزان صرفه‌جویی هزینه‌ها را تا ۲۶ درصد افزایش می‌دهد. با کنترل عملکرد بازار در انتهای دوره طرح، پیش‌بینی می‌شود بازار فروش مجوز BOD همچنان در بلندمدت سودآور باشد و با حجم مبادلات معادل ۴۶۶ واحد، از صرفه‌جویی ارزی ۱۰ درصد برخوردار شود.

**کلیدواژه‌ها:** اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، تجارت کیفیت آب، مجوز انتشار آلودگی، سفیدرود، تخصیص پساب.

## مقدمه

با گسترش فعالیت‌های شهری، کشاورزی و صنعتی در حاشیه رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، مدیریت و حفاظت کیفی منابع آب سطحی به چالشی زیست‌محیطی تبدیل شده است. بدین منظور، رعایت ضوابط و استانداردهای مربوط به میزان تخلیه مجاز بار آلودگی راهکاری قانونی برای کنترل این چالش به شمار می‌رود. این در حالی است که دو رویکرد کلی برای کنترل و پایش کیفی منابع آب سطحی وجود دارد. در روش متعارف کنترل دستوری، سازمان قانون‌گذار (مانند سازمان حفاظت محیط زیست) میزان کاهش بار آلودگی در خروجی تمامی منابع آلاینده (به‌ویژه نقطه‌ای) را نوعی پیش‌فرض در نظر می‌گیرد و تخلیه مازاد بر آن مشمول جریمه خواهد شد. در استانداردهای محیط‌محور، برخلاف روش‌های کنترل دستوری، از آنجایی که نظارت و پایش کیفی در نقطه‌ای مشخص از پیکره آبی صورت می‌گیرد، شرایطی ایجاد می‌شود که در آن میزان مجاز تخلیه بار آلی در منابع آلاینده با توجه به ظرفیت خودپالایی رودخانه و محل استقرار آنها تعیین می‌شود. بنابراین، فرصتی برای تعامل و دسترسی به اقتصادی‌ترین الگوی تخلیه بار آلودگی فراهم می‌شود (۷). بدین منظور معمولاً پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری برای تخصیص پساب و بار آلودگی در کنار مدل‌های شبیه‌سازی در یک منطقه، با هدف کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از تأسیسات تصفیه فاضلاب و در عین حال، با در نظر گرفتن ضوابط زیست‌محیطی استفاده شود (۲۴).

تجارت کیفیت آب یکی از تعاملات نوین در عرصه مدیریت کیفی منابع آب سطحی به شمار می‌رود. این رویکرد مبتنی بر تشکیل بازار خرید و فروش مجوز انتشار آلودگی است و مبنای و مزایای استفاده از آن بر پایه تفاوت

فنی - اقتصادی بین ذی‌نفعان در کاهش آلودگی نهفته است. به‌طور ساده، این ساختار شامل گروهی از ذی‌نفعان است که برای کاهش مقدار آلاینده‌های تخلیه‌شده به محیط و حفظ شرایط استاندارد لازم است هزینه‌گرافی پرداخت کند؛ در حالی که گروهی دیگر می‌تواند در شرایط مشابه و با صرف هزینه کمتر، سبب کاهش آلودگی در محیط شوند. بدین ترتیب، استفاده از ظرفیت‌های گروه دوم برای گروه اول، چشم‌اندازی در تحقق اهداف اقتصادی و حفاظت کیفی منابع آب فراهم می‌کند (۳۴).

به عبارت دیگر، در این بازار، منابع آلاینده (نقطه‌ای یا غیرنقطه‌ای)، براساس هزینه‌های حاشیه‌ای تخمین زده شده و براساس ضرایب تأثیر خود بر کیفیت نقطه پایش تصمیم می‌گیرند فروشنده یا خریدار مجوز انتشار آلودگی باشند. پذیرفتن این نقش‌ها در تعاملات بازار، نه تنها بین ذی‌نفعان انگیزش اقتصادی برای حضور در برنامه حفاظت کیفی منابع آب ایجاد می‌کند، بلکه خود سبب کاهش هزینه‌های کل مرتبط با کنترل انتشار آلودگی در منطقه مورد مطالعه می‌شود (۳۴). گفتنی است تجارت کیفیت آب با استفاده از موارد قانونی و حقوقی و تعیین میزان حداکثر مجاز تخلیه بار آلودگی و جرائم زیست‌محیطی، انعطاف‌پذیری سیستم را حفظ می‌کند. همچنین واضح است که تعاملات بازار مجوز انتشار آلودگی، تنها در ساختار استانداردهای محیط‌محور و پس از تعریف حداکثر بار مجاز تخلیه روزانه (TMDL) میسر خواهد بود (۱۲).

تاکنون مطالعات متعددی در خصوص بازارهای تجارت کیفیت آب انجام شده است. در اکثر پژوهش‌ها، مطالعات امکان‌سنجی استفاده از الگوی تجارت کیفیت آب و تعاملات منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای، یکی از مزایا و قوت‌های بازار مجوز انتشار آلودگی معرفی شده است (۲۸، ۲۹). این بدان علت است که در این چارچوب، انتشار

## مدیریت آب و آبیاری

زراعی، تخصیص بار فسفر خروجی از این منابع بهینه‌سازی شده‌اند (۱۰).

در نمونه موفق بازار مجوز انتشار آلاینده فسفر در منطقه انتاریو کانادا بررسی شده است (۲۶). در این پژوهش، پیش‌نیازهای لازم برای عملیاتی شدن موفق بازار، توافق گروهی، حمایت قانونی، شفاف‌سازی مالی، سهولت در برقراری تعاملات اقتصادی و وجود دستورالعملی مکتوب برشمرده شده است. به‌طور مشابه در ایالت اوهایو، بازار مجوز این منطقه نیز پس از پیاده‌سازی ارزیابی مجدد شده است (۲۱). این در حالی است که در مطالعه‌ای به مشکلات قانون‌گذاری درخصوص تشکیل بازار مجوز انتشار آلودگی در شرایط حضور منابع آلاینده غیرنقطه‌ای اشاره شده است (۳۱).

نتایج بررسی‌های محققان نشان می‌دهد مطالعات بیشتری لازم است تا تأثیر تعاملات اقتصادی بازار مجوز انتشار آلودگی و اثر متقابل آن بر ظرفیت اکولوژیکی مشخص شود. مطابق بررسی‌ها، موانع متعدد نظیر نوسانات جریان منابع آلاینده غیرنقطه‌ای در طول یک سال، تعاملات بازار در بلندمدت و احتمال بروز مناقشات، بر دستاورد نهایی بازار تأثیر می‌گذارد و عملکرد آن را از حد انتظار کاهش می‌دهد (۱۳).

در ایران نیز در مطالعات پیشین، نحوه تخصیص انتشار بار نیتروژن برای حوضه رودخانه قره‌سو (واقع در استان کرمانشاه) در شرایط وجود بازار مجوز انتشار آلودگی بررسی شده است (۱۶). در همین پژوهش، نحوه تعاملات بهینه بازار مشترک مجوز انتشار نیتروژن و پساب تصفیه‌شده شهری برای دستیابی به اقتصادی پایدار نیز ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد در این زیرحوضه، به دلیل تأثیر مشابه منابع آلاینده شهری و کشاورزی بر کیفیت نقطه پایش، استفاده مجدد از پساب به‌ویژه در انتهای دوره طرح (بلندمدت) تأثیر بسزایی بر کاهش

بار آلودگی منابع آلاینده غیرنقطه‌ای برخلاف روش کنترل دستوری کنترل می‌شود و در محاسبات مدنظر قرار می‌گیرد. بدین منظور، می‌توان با استفاده از قابلیت‌های منابع آلاینده نقطه‌ای در کاهش مازاد بار آلودگی و فروش مجوز، انتشار آلودگی از منابع غیرنقطه‌ای را با صرف هزینه‌های حاشیه‌ای کمتر برای ساخت و بهره‌برداری تأسیسات تصفیه پساب جبران کرد (۹). به همین علت، اکثر مبادلات بر پایه تجارت آلاینده‌هایی نظیر نیتروژن و فسفر متمرکز شده‌اند.

برای نمونه، محققانی با استفاده از سیستم‌های تصمیم‌گیری پشتیبان، نحوه تخصیص بار فسفر را در الگوی تجارت کیفیت آب، بین ۲۲ منبع آلاینده نقطه‌ای حوضه‌ای آب‌ریز در ایالت نیوجرسی بررسی و میزان TMDL را تعیین کردند (۲۷). در مطالعه دیگری در همین منطقه، میزان عدم قطعیت در کیفیت نهایی پیکره آبی پذیرنده با شرایط پیشین کنترل دستوری مقایسه شد (۲۰). نتیجه نشان می‌دهد بازار مجوز انتشار مواد مغذی میزان عدم قطعیت را به میزان ناچیزی تغییر داده است و تأثیر بارزی بر کاهش قطعیت غلظت اکسیژن محلول و کلروفیل A به‌عنوان بازخورد در نقاط حساس ندارد.

اخیراً در محدوده یوتای آمریکا، الگوریتمی برای تعریف سناریوهای مختلف بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی بین منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای و تحت شرایط دینامیک ارائه شده است (۸). مطابق تحقیقات دیگری پیشنهاد شده است پیش از تشکیل ساختار بازار مجوز انتشار آلودگی، منطقه مورد مطالعه به ناحیه‌ای محدود شود که بیشترین آسیب‌پذیری را از نظر کیفی دارد (۳۳)؛ حتی پژوهشگران دیگری پیشنهاد داده‌اند مقیاس مورد مطالعه با توجه به بازار مجوز بهینه‌سازی شود (۱۱). در نوعی نمونه تجارت، مجوز انتشار آلودگی بین زمین‌های

چارچوب بازار مجوز انتشار بار آلودگی مبتنی بر پارامتر BOD در رودخانه سفیدرود، حداقل سد انحرافی سنگر تا مصب دریا است. بدین منظور، ابتدا استاندارد محیط محور پس از شبیه‌سازی کمی و کیفی رودخانه در قالب TMDL تعریف شده و در نهایت، پس از شناسایی واحدها با قابلیت فروش مجوز، خریداران و فروشندگان آنها تعیین می‌شوند. انتظار می‌رود با تعریف حداکثر بار مجاز تخلیه آلودگی برای منابع آلاینده، میزان شاخص کیفیت آب (WQI) نیز بهبود یابد.

### مواد و روش‌ها

#### محدوده مورد مطالعه

رودخانه سفیدرود از پایاب سد سنگر تا مصب دریا به طول تقریبی ۵۵ کیلومتر است. در این محدوده، منابع آلاینده اصلی رودخانه با رویکرد تخلیه بار آلی (BOD) پساب‌های صنعتی و شهری است. منابع آلاینده غیرنقطه‌ای نظیر زهاب‌های کشاورزی نسبتاً در افزایش غلظت مواد مغذی نظیر نیتروژن مؤثرند و در تخصیص پساب مبتنی بر پارامتر BOD، به دلیل ناچیز بودن غلظت آن، می‌توان از آن صرف‌نظر کرد (۱). مشخصات منابع آلاینده اصلی در محدوده مورد مطالعه و هزینه‌های لازم برای کاهش بار آلودگی مطابق شرایط پایش کنونی، در جدول ۱ نشان داده شده است. شایان ذکر است اطلاعات هیدرودینامیکی و کیفی رودخانه برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار مطابق مطالعات پیشین (۱۷، ۱) است که آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب، ماهانه بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ از ایستگاه‌های ۶ تا ۱۱ مطابق شکل ۱ برداشت کرده است. همچنین میزان بار آلی انتشاریافته از مراکز جمعیتی براساس آمار سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۸۵ و ضرایب راهبردی (۱) تعیین شده است.

هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری تأسیسات تصفیه فاضلاب خواهد گذاشت.

در ادامه، ایشان با انجام مطالعات تکمیلی در ارتقای کارایی تجارت مجوز به صورت ترکیبی با بازار فروش پساب به این نتیجه رسیدند که تعیین بازار فصلی در مقایسه با متوسط سالانه، سبب کارایی بهتر در زمینه کنترل بار آلودگی و کاهش هزینه‌های کل خواهد شد (۱۴). به علاوه، استفاده از روش‌های هوادهی مصنوعی در مسیر رودخانه برای افزایش قابلیت خودپالایی آن می‌تواند در کنار بازار، به افزایش مبادلات و کاهش هزینه کل بینجامد (۱۷). همچنین بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه زرجوب گیلان را پس از تعریف توابع غیرخطی فازی ارزیابی شده است (۲۳).

گفتنی است انتخاب پارامتر مبادلاتی به مشخصات منبع آبی مورد مطالعه، تنوع و پراکنندگی منابع آلاینده و پارامترهای کیفی غالب در محیط بستگی دارد. برای مثال، منابع آلاینده‌ای که سبب انتشار ترکیبات آلی فرار و دی‌اکسیدکربن می‌شوند، به دلیل نداشتن واکنش و ترکیب آنها با سایر مواد، می‌توانند به صورت خطی و تنها بر مبنای هزینه حاشیه‌ای خود در مدل تجارت کیفیت وارد شوند؛ اما پارامترهایی نظیر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) و غلظت فلزات سنگین نیازمند شبیه‌سازی کیفی منبع آبی و تعیین اثرگذاری منابع آلاینده پیش از اجرای مدل تجارت هستند (۳۲). با وجود این، استفاده از هر پارامتر شاخص مانند اکسیژن در تعیین بازار مجوز چندپارامتری (مبتنی بر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی و نیتروژن) به منطقه مورد مطالعه، ظرفیت تصفیه بار آلودگی و ساختار تجارت بستگی دارد. بنابراین، لازم است این قابلیت به صورت موردی بررسی شود (۱۵).

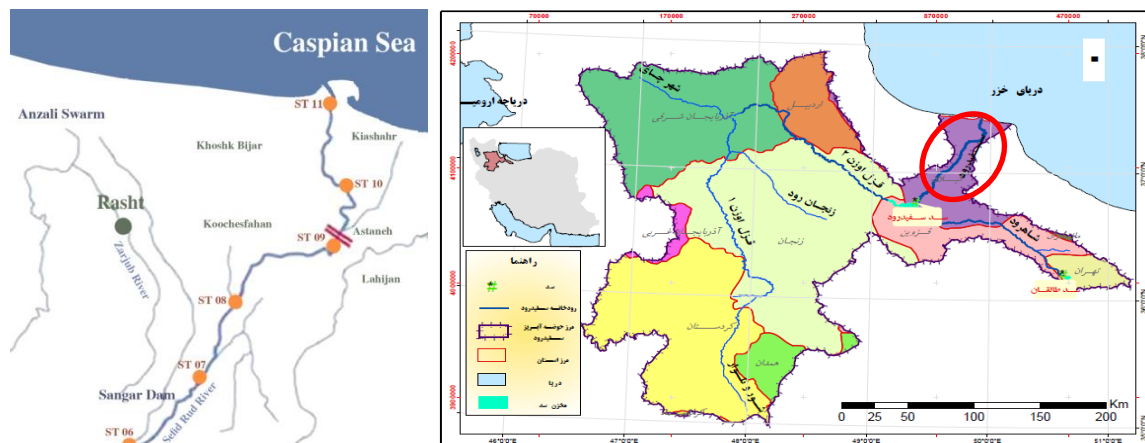
هدف از این پژوهش، دستیابی به تعاملی بهینه در

### مدیریت آب و آبیاری

تخصیص بهینه بار آلودگی بر مبنای الگوی تجارت کیفیت آب در پایین دست رودخانه سفیدرود

جدول ۱. مشخصات منابع آلاینده در محدوده مورد مطالعه و هزینه کنونی کاهش بار آلودگی

منبع آلاینده	نوع منبع	میزان بار آلی تولید شده (kg/d)	دبی متوسط (m <sup>3</sup> /s)	فاصله تقریبی تا نقطه پایش (km)	ضریب هوادهی رودخانه بر واحد روز در محل تخلیه	هزینه تصفیه بار آلودگی (میلیون ریال در سال)
SI	صنعتی	۳۶۲۹	۰/۰۰۲	۴۱	۳/۴۷	۱۰۲۲
RI	صنعتی	۱۸۱۴۴	۰/۰۱	۳۸	۳/۷۱	۵۱۱۱
KF	شهری	۱۵۵۵	۰/۰۶	۳۲	۲/۶۴	۴۱۵۳
RT	شهری	۱۸۴۰۳	۰/۷۱	۳۰	۲/۷۵	۳۲۷۶۳
SK	شهری	۱۸۱۴	۰/۰۷	۲۷	۲/۷۵	۴۸۴۵
LJ	شهری	۸۰۳۵	۰/۳۱	۲۳	۲/۹۹	۱۴۳۰۵
AA	شهری	۴۱۴۷	۰/۱۶	۲۰	۲/۶۴	۷۳۸۳
AI	صنعتی	۹۰۷۲	۰/۰۰۵	۱۴	۱/۷۳	۲۵۵۵
KB	شهری	۲۸۵۱	۰/۱۱	۵	۱/۷۶	۵۰۷۶
KS	شهری	۱۰۳۷	۰/۰۴	۱	۱/۷۴	۲۷۶۹
AG	کشاورزی	۵۱۸۴	۱۰	۵	۱/۷۶	-
						۷۹۹۸۳
						مجموع



شکل ۱. حوضه مورد مطالعه (راست) و محدوده نمونه برداری و پیاده سازی الگوی تجارت کیفیت آب (چپ)

تلاطم آب کاهش می یابد، ظرفیت خودپالایی نیز مطابق نتایج شبیه سازی شده مندرج در جدول ۱ افت چشمگیری کرده و بر افت شاخص کیفی آب اثرگذار است. بنابراین، لازم است پیاده سازی الگوی تجارت کیفیت آب به دلیل جذابیت های زیست محیطی و اقتصادی ارزیابی شود.

در پایین دست رودخانه سفیدرود، مقدار شاخص کیفی آب در حد نامطلوب و بد است. مقدار زیاد حد آلودگی تجمع یافته در این منطقه به دلیل تمرکز فراوان مراکز جمعیتی و کشاورزی است. همچنین از آنجایی که رودخانه در این منطقه وارد جلگه گیلان می شود و سرعت جریان و

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

## روش‌شناسی تحقیق

به منظور تخصیص بهینه پساب، مشابه مطالعات اخیر در حوضه رودخانه قره‌سو، این پژوهش در چهار مرحله انجام پذیرفته است (۱۷،۱۶). در گام نخست، پس از شناسایی منابع آلاینده اصلی و برآورد بار آلی، توابع هزینه کاهش بار آلودگی مطابق نتایج تجربی تخمین زده می‌شود. این توابع از نتایج آنالیز قیمت بیش از ۵۰ تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و صنعتی که بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳ در کشور طراحی و اجرا شده‌اند، برحسب اینکه از چه نوع واحد فرایندی استفاده کرده‌اند، به طور متوسط بر واحد مترمکعب جریان فاضلاب تعیین شده است (۱۷،۱۶). شایان توضیح است که برای یک دوره طرح ۳۰ تا ۳۵ ساله (T)، ابتدا هزینه متوسط ساخت سالانه مطابق دوره طرح محاسبه شده (Ca) و سپس هزینه بهره‌برداری واحدهای شهری بزرگ در سه بازه ۱۰ ساله (t)، هریک به‌طور تقریبی با احتساب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از هزینه سالانه ساخت، به‌عنوان نرخ بهره (r) در نظر گرفته شده است (۲،۱). مقادیر هزینه ساخت و بهره‌برداری، در نهایت با یکدیگر جمع شده و نتیجه به طور سالانه برحسب میلیون دلار برآورد شده است (هر دلار معادل ۲۵۰۰۰ ریال فرض شده است). برای انجام محاسبات مذکور از رابطه ۱ مطابق مطالعات پیشین استفاده شده است (۱).

$$C = C_a \left( 1 + \frac{\sum (1+r)^t}{T} \right) \quad (1)$$

به منظور برآورد اقتصادی و تعاملات بازار مجوز انتشار آلودگی، هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی به تفکیک توسط روابط ۲ و ۳ برآورد می‌شود (۱۵). بدین ترتیب و به منظور محاسبه هزینه ساخت و بهره‌برداری کل در حوضه مورد مطالعه، می‌توان مطابق رابطه ۴، میزان هریک از جریان‌های

خروجی فاضلاب در تابع هزینه مربوطه ضرب شده و مجموع آن برای این پژوهش در الگوی تجارت کیفیت آب حداقل گردد (۱۷،۱۶،۱۴).

$$C(x)_i = 22/5x^2 - 2/52x + 0/62 \quad (2)$$

$$C(x)_d = 1/7x^2 + 0/91x + 0/1 \quad (3)$$

$$TC = \sum_{j=1}^m (C(x)_j \times Q_j) \quad (4)$$

( $0 \leq x \leq 1$ )

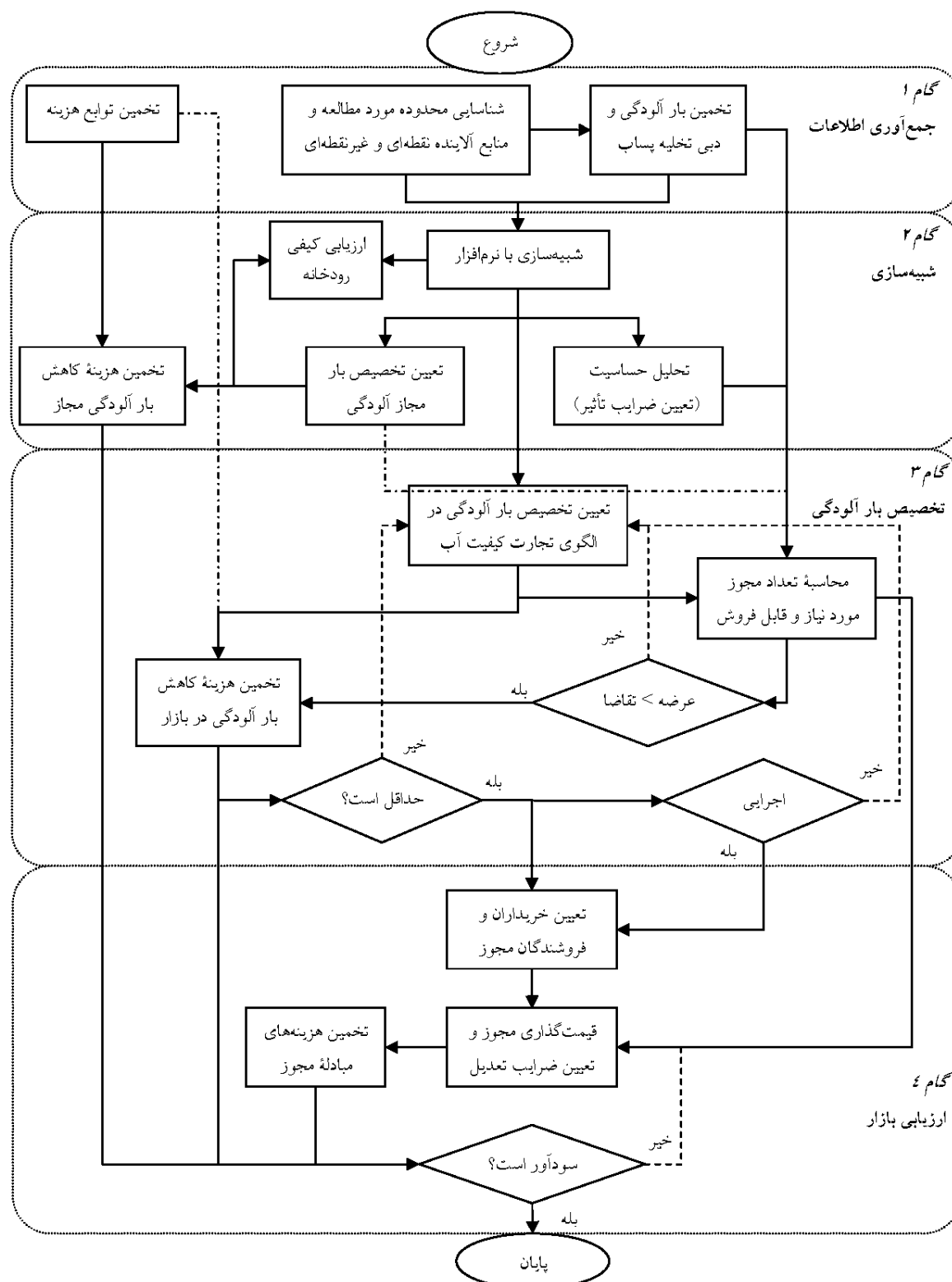
در روابط فوق،  $x$  میزان کاهش بار آلودگی توسط منابع آلاینده،  $C(x)$  توابع هزینه برای منابع آلاینده صنعتی ( $i$ ) و شهری ( $d$ ) و  $Q$  میزان متوسط جریان سالانه پساب خروجی از هریک از منابع آلاینده ( $j$ ) خواهد بود که در اینجا به تعداد ( $m$ ) برابر ۱۱ است.

در گام دوم، شبیه‌سازی کمی و کیفی رودخانه توسط مدل Qual2kw انجام می‌پذیرد (۱۹). در همین مرحله، میزان ضرایب تأثیر هر منبع آلاینده بر نقطه پایش (مصوب رودخانه) نیز تعیین شده است. بدین منظور، برای هر منبع آلاینده میزان بار تخلیه به مقدار واحد (یک تن در سال) به‌طور فرضی افزایش داده شده و میزان تغییر غلظت BOD کل در نقطه پایش (میلی گرم بر لیتر) برآورد می‌شود. ارزیابی حساسیت نقطه پایش به میزان تغییرات بار آلودگی مطابق رابطه ۵ نرمال شده (۱۷) و ضرایب تأثیر (IF) هر منبع آلاینده محاسبه می‌گردد. در نهایت، با توجه به کیفیت مورد انتظار در نقطه پایش، می‌توان میزان متوسط حذف بار آلودگی هریک از منابع آلاینده را توسط مدل تعیین کرد. میزان حذف بار BOD می‌تواند حداکثر بار مجاز تخلیه آلودگی را برای این منطقه مشخص کند.

$$IF_j = \frac{dBOD_j}{\sum_{j=1}^m dBOD_j} \quad (5)$$

## مدیریت آب و آبیاری

تخصیص بهینه بار آلودگی بر مبنای الگوی تجارت کیفیت آب در پایین دست رودخانه سفیدرود



شکل ۲. فلوچارت روش‌شناسی تحقیق

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

جمعیت شهری و افزایش بار آلودگی تخلیه‌شده به محیط در انتهای دوره طرح نیز تکرار شده و توانایی بازار ارزیابی می‌شود. در شکل ۲، روش‌شناسی تحقیق به‌صورت فلوجارت با گام‌های عملیاتی نشان داده شده است.

### نتایج و بحث

در گام نخست، به‌منظور بررسی اقتصادی و زیست‌محیطی اعمال استانداردهای محیط‌محور در چارچوب حداکثر بار مجاز آلودگی، محدوده مورد مطالعه از نظر کمی و کیفی شبیه‌سازی و مشخص شد که می‌توان با حذف ۸۰ درصد از بار آلی ورودی به رودخانه توسط تمامی منابع آلاینده نقطه‌ای (شهری و صنعتی) به کیفیت مطلوب آب در نقطه پایش رسید. بنابراین، می‌توان با احتساب ۲۰ درصد تخلیه بار به‌صورت مجاز، ضمن استفاده از قابلیت خودپالایی رودخانه، از هزینه‌های تصفیه بار آلودگی کاست؛ زیرا در حال حاضر، سیاست‌های کنترل کیفی مبتنی بر روش دستوری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی را به‌ترتیب ملزم به کاهش بار آلی تولیدشده تا ۹۰ و ۹۹ درصد می‌کند.

در جدول ۲، ضرایب تأثیر (درصد)، حدود مجاز تخلیه بار BOD (کیلوگرم بر روز) و درصد حذف مورد نیاز به همراه هزینه تقریبی ساخت و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه متناسب با آن برای هر منبع آلاینده براساس مدل شبیه‌سازی و توابع هزینه نشان داده شده است (۱۷). مطابق این جدول، استفاده از الگوی محیط‌محور کنترل آلودگی می‌تواند در مجموع تا ۱۰ درصد از هزینه‌های تصفیه بار آلودگی نسبت به شرایط کنترل دستوری بکاهد. همچنین ارقام مربوط به ضرایب تأثیر نشان می‌دهند منابع آلاینده نقطه‌ای نزدیک به نقطه پایش، اثرگذاری بیشتری از منابع آلاینده دورتر دارند. این خاصیت مکانی بر این نکته تأکید می‌کند که میزان تصفیه بار آلودگی توسط منابع آلاینده مستقر در انتهای مسیر جریان از اهمیت بیشتری برخوردار و بهتر است این منابع، فروشنده مجوز انتشار آلودگی معرفی شوند.

در گام سوم، با دراختیارداشتن ضرایب تأثیر و میزان حداکثر بار مجاز تخلیه، می‌توان تخصیص بهینه پساب را با توجه به الگوی تجارت مجوز بار آلودگی مطابق روش پیشنهادی سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (۲۰۰۴) و با هدف حداقل کردن هزینه ساخت و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه انجام داد. شایان توضیح است پس از تعیین درصدهای حذف بار آلودگی و یافتن گزینه با حداقل هزینه، باید کنترل شود که میزان مجوزهای عرضه‌شده با مقدار تقاضا متناسب باشد. تنها در صورتی که مجوزهای موجود بیش از حد تقاضا باشد، می‌توان انتظار داشت بازار مجوز انتشار آلودگی از شرایط لازم برای ایجاد روابط تعاملی برای تخصیص بهینه بار آلودگی برخوردار است. شرط کافی باید با ارزیابی بازار و قیمت‌گذاری مجوز در گام چهارم بررسی و کنترل شود. در همین مرحله، باید خاطر نشان کرد که قیمت پایه مجوز انتشار آلودگی براساس هزینه حاشیه‌ای کاهش بار آلی توسط فروشندگان تعیین می‌گردد که بایستی در شرایط مناسب، رضایت تمامی فروشندگان و خریداران را از نظر سوددهی بازار و ایجاد انگیزش اقتصادی جلب نماید.

در گام چهارم، پس از تعیین نقش مشارکت‌کنندگان در بازار و تعیین خریداران و فروشندگان با توجه به مقدار مجوز مورد نیاز برای مبادله، مجوز انتشار آلودگی به‌گونه‌ای قیمت‌گذاری می‌شود تا سودآوری هر یک از مشارکت‌کنندگان در بازار (خریدار یا فروشنده) در برابر تخصیص مجاز بار آلودگی مثبت گردد و این انگیزه همواره وجود داشته باشد که بازار مجوز انتشار آلودگی گزینه‌ای اقتصادی است. اگر این شرط برقرار شود، می‌توان فرض کرد که بازار پیشنهادی نه‌تنها دارای تخصیص بار آلودگی اقتصادی است، بلکه از نظر زیست‌محیطی نیز مخرب نیست و بازار مبادلاتی دارای استواری حداقلی خواهد بود. با وجود این، فرایند پیشنهادی یک بار دیگر برای شرایط با رشد



تخصیص بهینه بار آلودگی بر مبنای الگوی تجارت کیفیت آب در پایین دست رودخانه سفیدرود

جدول ۲. تخصیص پساب و هزینه‌های تصفیه بار آلودگی با تعریف حداکثر بار مجاز روزانه

منبع آلاینده	ضریب تأثیر (%)	حداکثر بار مجاز تخلیه (kg/d)	هزینه تصفیه بار آلودگی (میلیون ریال در سال)
SI	۲/۵	۷۲۶	۶۵۲
RI	۳/۳	۳۶۲۹	۳۲۶۱
KF	۵/۷	۳۱۱	۳۴۷۱
RT	۶/۹	۳۶۸۱	۲۷۳۸۴
SK	۸	۳۶۳	۴۰۵۰
LJ	۸/۲	۱۶۰۷	۱۱۹۵۶
AA	۹/۱	۸۲۹	۶۱۷۱
AI	۱۰/۷	۱۸۱۴	۱۶۳۰
KB	۱۷/۴	۵۷۰	۴۲۴۳
KS	۱۸/۴	۲۰۷	۲۳۱۴
AG	۹/۷	۳۶۲۹	۷۰۹۶
مجموع			۷۲۲۲۷

متوسط بهبود یابد (۱۸). این در حالی است که روش پیشنهادی اقتصادی‌تر از روش کنترل دستوری است و تعیین درصد حذف بار آلودگی برابر برای تمامی منابع آلاینده، خود سبب کاهش شاخص بی‌عدالتی شود (۶).

بر اساس شکل‌های ۳ و ۴، با اعمال سیاست تخصیص بار مجاز آلودگی و صرف هزینه سالانه معادل ۷۲ میلیارد ریال برای کاهش انتشار بار آلودگی، می‌توان انتظار داشت شرایط کیفی رودخانه در مصب دریا از نظر غلظت اکسیژن محلول و BOD تا ۴ برابر شرایط کنونی بهبود یابد. ارتقای کیفیت آب رودخانه در پایین دست معادل آن است که نیاز به تخلیه آب برای بهبود شرایط زیست‌محیطی از مخازن بالادست، یعنی سد سنگر یا سفیدرود کاهش خواهد یافت. برای مثال، در صورتی که در شرایط کنونی، غلظت اکسیژن محلول آب در بالادست ۵/۸ میلی‌گرم بر لیتر باشد، لازم است حداقل ۳۳ مترمکعب در ثانیه به‌عنوان آب خاکستری، به جریان رودخانه اضافه شود تا به روش رقیق‌سازی،

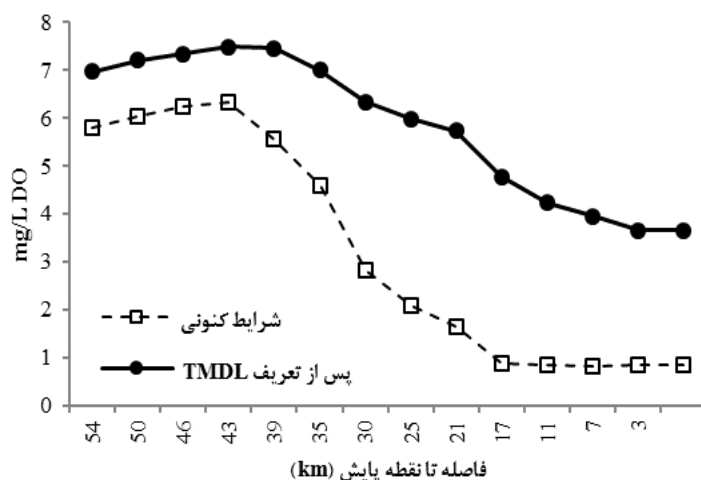
شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب روند تغییرات غلظت اکسیژن محلول و BOD کل در طول رودخانه را نشان می‌دهند (۱۷). مشخص است که پس از اعمال سیاست‌های نظارتی و کنترلی مبتنی بر TMDL می‌توان انتظار داشت که وضعیت کیفی رودخانه در محدوده مورد مطالعه بهبود چشمگیری داشته باشد. برای نمونه، غلظت BOD در مصب رودخانه حدود ۶ میلی‌گرم بر لیتر کاهش و اکسیژن محلول تا ۳/۷ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یابد. منحنی‌ها نشان می‌دهند این بهبود کیفیت، به‌صورت تدریجی در محدوده مورد مطالعه انجام می‌پذیرد. اگر تغییرات پارامترهای BOD و اکسیژن محلول مطابق نتایج مدل شبیه‌سازی شود و الگوی TMDL در تعیین شاخص کیفی آب (NFSWQI) در نظر گرفته شود، در صورت گندزدایی پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها، میزان شاخص کیفی از ۳۷ در شرایط فعلی به ۵۶ ارتقا می‌یابد. به عبارت دیگر، انتظار می‌رود وضعیت کیفی به میزان یک درجه، از شرایط بد به شرایط

### مدیریت آب و آبیاری

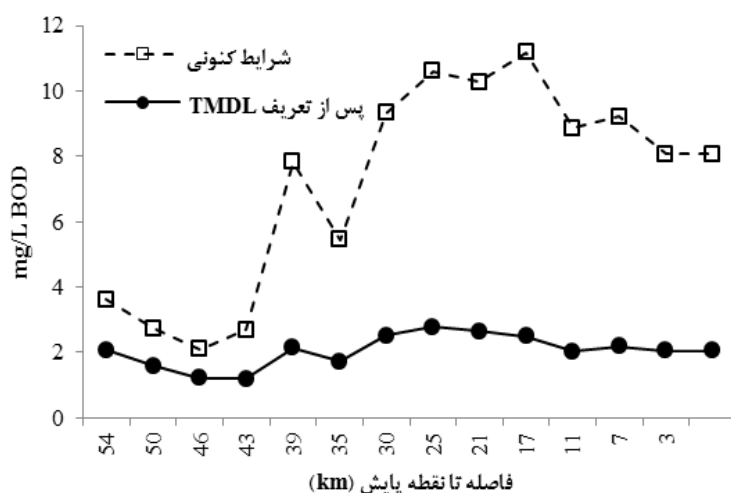
دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

می‌رساند که روش پیشنهادی ممکن است سبب صرفه‌جویی ارزی معادل نرخ تولید ناخالص ملی کنونی در منطقه شود؛ زیرا آب ذخیره‌شده در مخازن برای تولید بیشتر همچنان در دسترس خواهد بود.

کیفیت نقطه پایش تقریباً هم‌تراز کیفیت آب در شرایط تخصیص بار مجاز آلودگی گردد. این میزان تخلیه مخازن در بالادست برای حفاظت زیست‌محیطی تقریباً معادل دبی رودخانه در دوره خشک‌سالی است و این مفهوم را



شکل ۳. غلظت اکسیژن محلول (میلی‌گرم بر لیتر) در طول رودخانه در شرایط کنونی و پس از اعمال سیاست‌های مدیریتی مبتنی بر حداکثر بار مجاز روزانه



شکل ۴. غلظت BOD (میلی‌گرم بر لیتر) در طول رودخانه در شرایط کنونی و پس از اعمال سیاست‌های مدیریتی مبتنی بر حداکثر بار مجاز روزانه

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

تخصیص بهینه بار آلودگی بر مبنای الگوی تجارت کیفیت آب در پایین دست رودخانه سفیدرود

جدول ۳. تخصیص پساب و هزینه‌های تصفیه بار آلودگی در الگوی تجارت مجوز انتشار آلودگی

منبع آلاینده	درصد حذف بار آلودگی	هزینه تصفیه بار آلودگی (میلیون ریال در سال)	تعداد مجوز (kg/d)		نقش در بازار	سودآوری نسبت به شرایط دستوری (%)
			تقاضا	عرضه		
SI	۹۹	۱۰۱۲	-	۱۷	فروشنده	۲۶/۹
RI	۹۹	۵۰۵۸	-	۱۱۴	فروشنده	۴۷/۴
KF	۳۰	۹۷۷	۴۴	-	خریدار	۴۲/۴
RT	۷۰	۲۲۴۸۶	۱۲۷	-	خریدار	۱۳/۵
SK	۵۰	۲۰۹۰	۴۴	-	خریدار	۲۶/۱
LJ	۷۵	۱۰۸۶۱	۳۳	-	خریدار	۱۰/۲
AA	۷۵	۵۶۰۶	۱۹	-	خریدار	۹/۵
AI	۹۹	۲۵۲۹	-	۱۸۴	فروشنده	۲۳۶/۴
KB	۹۵	۵۵۲۱	-	۷۴	فروشنده	۲۵/۱
KS	۹۵	۳۰۱۱	-	۲۹	فروشنده	۱۲/۲
AG	-	-	۱۵۱	-	خریدار	۴۱/۸
مجموع		۵۹۱۵۰	۴۱۸	۴۱۸		

برای فروش مجوز به واحدهای متقاضی فراهم شود. جدول ۳ نشان می‌دهد در مجموع، ۴۱۸ واحد مجوز قابل خرید و فروش خواهد بود که سبب کاهش هزینه‌های کل تصفیه تا کمتر از ۶۰ میلیارد ریال می‌شود. این هزینه معادل ۱۸ درصد کاهش هزینه نسبت به مدل تخصیص بار آلودگی مبتنی بر TMDL و ۲۶ درصد صرفه‌جویی نسبت به شرایط کنترل دستوری در زمینه کنترل بار BOD و حفظ اکسیژن محلول در رودخانه می‌شود. همچنین در ساختار الگوی تجارت مجوز انتشار آلودگی این فرصت فراهم می‌شود تا منابع آلاینده غیرنقطه‌ای نظیر زمین‌های زراعی، به‌جای ساخت سامانه‌های زهکشی و تصفیه‌خانه‌های پیچیده، از مجوزهای موجود در بازار برای تأمین الزامات زیست‌محیطی خود استفاده کنند. با وجود این، به دلیل میزان بار آلودگی ناچیز BOD برای مصارف

در گام دوم، با استفاده از ضرایب تأثیر و میزان حداکثر بار مجاز تخلیه آلودگی و براساس روش پیشنهادی سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (۲۰۰۴) و مطالعات پیشین، میزان تخصیص بهینه پساب با هدف حداقل کردن هزینه کل تصفیه برای منابع آلاینده مطابق جدول ۳ تعیین شد. در این مرحله، معمولاً منابع آلاینده با هزینه حاشیه‌ای کمتر یا ضرایب تأثیر بیشتر، فروشنده مجوز و سایر منابع خریدار در نظر گرفته می‌شوند تا برای کاهش هر واحد بار آلودگی در منطقه، هزینه کل کمتری پرداخت شود. در محدوده مورد مطالعه، مدل تخصیص بهینه پساب نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی (SI, RI, AI) به دلیل هزینه حاشیه‌ای کمتر و فاضلاب شهرهای خشک‌بیجار و کیشهر به دلیل ضرایب تأثیر بیشتر، باید بیش از میزان پیشنهادی جدول ۲ حذف شود تا ظرفیت

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

قیمت‌گذاری، به عملکرد بازار مجوز انتشار آلودگی اعتبار می‌بخشد.

در محدوده مورد مطالعه و با توجه به الگوی تخصیص بهینه پساب، پیشنهاد می‌شود هزینه مجوز به ازای هر کیلوگرم بار تخلیه‌شده در روز، ۳ دلار (۷۵ هزار ریال) در نظر گرفته شود. در این شرایط، مطابق ستون آخر جدول ۳، تمامی ذی‌نفعان از سودآوری مثبت بهره‌مند خواهند بود. با وجود این، خریداران مجوز LJ و AA و فروشندگان مجوز KS سودآوری بسیار کمی دارند. افزایش اندک قیمت مجوز پیشنهادی سبب خروج خریداران مذکور خواهد شد. برعکس، کاهش اندک قیمت فروشندگان را ناراضی و متضرر خواهد ساخت. در این شرایط که بازار شکننده است، معمولاً فروشندگان، مشتریان مخصوص به خود را پیدا کرده و با فروش مجوز همراه با تخفیف، دست بالا را در معاملات پیدا می‌کنند. برای مثال، فروشنده AI به دلیل سودآوری بسیار خود، می‌تواند ۱۷۹ مجوز خود را با قیمت ۱ دلار به LJ، AA و RT بفروشد که در این شرایط سودآوری این چهار عضو به ترتیب ۴۸، ۶/۷، ۶/۴ و ۱۳/۷ درصد خواهد شد. همچنین KS نیز در شرایط مناسب می‌تواند مجوزهای خود را با قیمت بیشتر (۵ دلار) به KF بفروشد که بیشترین سودآوری را بین خریداران دارد.

بنابراین، ضریب تعدیل قیمت نقش مؤثری در حفظ انگیزش اقتصادی ذی‌نفعان در بازار مجوز به همراه دارد. البته تعیین ضرایب تعدیل و قیمت توافقی می‌تواند در مطالعات آتی و حتی در چارچوب روش‌های چانه‌زنی و نظریه‌بازی‌ها بررسی شود (۲۵). همچنین در کنار ضرایب تعدیل قیمت پیشنهاد می‌شود نقش توابع جریمه‌های تخطی زیست‌محیطی (۱) یا سایر عوامل محدودکننده بازار مجوز انتشار آلودگی نظیر قابلیت‌های اجرایی و اقتصادی نیز بر نوسانات قیمت توافقی مجوز انتشار آلودگی بررسی شود (۳۰).

کشاورزی، در اینجا بازار مجوز بیشتر بر ایجاد تعامل بین منابع آلاینده نقطه‌ای متمرکز خواهد بود. به عبارت دیگر، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد پارامترهای کیفی مبادلاتی تأثیر بسزایی بر میزان فعالیت منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای در بازار خواهد گذاشت.

از طرف دیگر، باید خاطر نشان کرد تخصیص بهینه پساب برای محدوده‌های مورد مطالعه، به‌طور ضمنی به نحوه تصفیه فاضلاب در این مناطق اشاره خواهد داشت. به عبارت دیگر، اگر گفته می‌شود منبع آلاینده باید ۳۰ درصد حذف بار آلی داشته باشد، می‌تواند از فرایندهای ساده و کم‌هزینه برای کاهش بار آلی خود استفاده کند و اگر این میزان ۹۰ درصد باشد، ساخت تصفیه‌خانه‌های متمرکز و پیشرفته ضرورت خواهد یافت. این بدان معنی است که الگوی تجارت کیفیت آب، ساختاری یکپارچه برای طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های تصفیه پساب فراهم می‌کند؛ به‌طوری که به‌عنوان یکی از مراحل ارزیابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای ارتقا و به‌سازی به شمار می‌رود (۳) و از آن در مطالعات مربوط به تعیین ارزش راهکارهای مدیریتی استفاده می‌شود (۵).

در ساختار بازار مجوز انتشار آلودگی، می‌توان قیمت حدودی مجوز را نیز مطابق با تخصیص بهینه برآورد کرد. شرط تعیین قیمت آن است که هر منبع آلاینده نسبت به هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری در شرایط کنترلی دستوری از سودآوری برخوردار باشد. در صورتی که خریدار یا فروشنده مجوز نسبت به شرایط دستوری، سودآوری درخور ملاحظه‌ای نداشته باشد یا از نظر اقتصادی ضرر کند، به‌ناچار بازار را ترک خواهد کرد و برای شرکت در این تعامل انگیزه نخواهد داشت. قیمت‌های هنگفت مجوز خریداران را محدود می‌کند و قیمت‌های کم فروشندگان را ناراضی (۲۲). بنابراین، یافتن بازه مناسب برای

تخصیص بهینه بار آلودگی بر مبنای الگوی تجارت کیفیت آب در پایین دست رودخانه سفیدرود

جدول ۴. تخصیص پساب و هزینه‌های تصفیه بار آلودگی در الگوی تجارت مجوز انتشار آلودگی در انتهای دوره طرح

منبع آلاینده	درصد حذف بار آلودگی	هزینه تصفیه بار آلودگی (میلیون ریال در سال)	تعداد مجوز (kg/d)		نقش در بازار	سودآوری نسبت به شرایط دستوری (%)
			تقاضا	عرضه		
SI	۹۹	۱۰۱۲	-	۱۶	فروشنده	۲۱/۶
RI	۹۹	۵۰۵۸	-	۱۰۸	فروشنده	۴۰/۳
KF	۶۹	۲۷۹۲	۳۷	-	خریدار	۰/۷
RT	۵۹	۱۷۶۵۴	۲۶۷	-	خریدار	۱۷/۷
SK	۸۶	۴۵۱۸	۱۲	-	خریدار	۰
LJ	۹۳	۱۵۰۵۱	-	۶۳	فروشنده	۰
AA	۹۵	۸۰۳۰	-	۳۸	فروشنده	۰/۱
AI	۹۹	۲۵۲۹	-	۱۷۵	فروشنده	۱۰/۱/۲
KB	۹۵	۵۵۲۱	-	۵۰	فروشنده	۹/۵
KS	۹۵	۳۰۱۱	-	۱۹	فروشنده	۱/۲
AG	-	-	۱۵۱	-	خریدار	۴۳/۷
مجموع		۶۵۱۷۵	۴۶۶	۴۶۸		

صورت ممکن است در میان مدت و پس از گذشت چند سال از شروع طرح، آن را ترک کنند. این بدان معنا است که بازار مجوز انتشار آلودگی همچنان می‌تواند در بلندمدت کارایی اقتصادی و انگیزش مالی برای مشارکت کنندگان فراهم آورد و سبب صرفه‌جویی اقتصادی در حوضه آبریز گردد. به علاوه، در بلندمدت حجم مبادلات به میزان اندکی از مقدار ۴۱۸ واحد (جدول ۳) به ۴۶۶ واحد (جدول ۴) افزایش می‌یابد که نشان از پویایی بازار دارد. با وجود این، لازم است برای مدیریت بهتر آن تعرفه‌های فروش مجوز تنظیم شده و ضرایب تعدیل مناسب لحاظ گردد.

همان‌طور که در گزارش سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (۲۰۰۴) آمده و در این پژوهش تأیید شده است، استفاده از سیاست تجارت کیفیت آب، نتایج اقتصادی و زیست‌محیطی به همراه خواهد داشت. این روش سبب

حال برای انتهای دوره طرح و با احتساب رشد انتشار بار آلودگی به میزان دو برابر شرایط فعلی توسط منابع آلاینده نقطه‌ای، چنین برآورد می‌شود که میزان کاهش بار آلودگی و هزینه‌های ناشی از آن به نسبت افزایش یابد. براساس جدول ۴، این میزان تقریباً به حدود ۶۵ میلیارد ریال در سال می‌رسد که نسبت به شرایط تخصیص مجاز بار آلودگی، تنها ۱۰ درصد از صرفه‌جویی اقتصادی بهره‌مند خواهد بود. در این شرایط، مقدار قیمت پایه مجوز انتشار آلودگی در بازار مبادلاتی ۲/۹ دلار (۷۲۵۰۰ ریال) فرض شده است.

در این ساختار پیشنهاد می‌شود AI با تخفیف، مجوزهای خود را حداکثر ۱/۷ دلار (۴۲۵۰۰ ریال) به فروش برساند تا دیگر منابع آلاینده نظیر LJ و AA بتوانند با فروش مجوز خود تا سقف ۳/۷ دلار (۹۲۵۰۰ ریال)، به سودآوری حداقلی بازار دست پیدا کنند. در غیر این

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

مدیریتی و سازه‌ای ساده و کم‌هزینه برای کاهش بار آلودگی رودخانه‌ها و منابع آب سطحی برای بهبود کیفیت آب استفاده کرد که خود بر میزان TMDL و تخصیص بهینه بار آلودگی تأثیر خواهد گذاشت.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از حداکثر بار مجاز تخلیه روزانه (TMDL)، ضمن حفظ و ارتقای کیفیت آب مطابق نتایج شبیه‌سازی، سبب کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه فاضلاب تا ۱۰ درصد نسبت به شرایط کنترل دستوری می‌شود. این روش نیاز به برداشت از منابع آب سطحی بالادست را برای احیای زیست‌محیطی در شرایط خشک‌سالی کاهش می‌دهد. به‌علاوه، پیاده‌سازی الگوی تجارت کیفیت آب مبتنی بر TMDL، به دلیل بهره‌مندی از ظرفیت‌های مازاد فروشندگان مجوز، به صرفه‌جویی بیشتر هزینه تا ۲۶ درصد درخصوص کاهش بار آلودگی منتهی می‌شود که خود انگیزشی اقتصادی برای مشارکت ذی‌نفعان به همراه خواهد داشت.

بر اساس آنچه گفته شد، پیشنهاد می‌شود مشوق‌های اقتصادی نظیر ضرایب تعدیل و جرایم زیست‌محیطی، پس از تعیین تخصیص بهینه بار آلودگی و با هدف افزایش انگیزش مشارکت در بازار مجوز برآورد شوند. این موارد به‌طور ضمنی بر بررسی موردی بازار مجوز انتشار آلودگی و ارزیابی توان زیست‌محیطی و اقتصادی بازار مبتنی بر پارامتر شاخص تأکید می‌کنند. به عبارت دیگر، اگر پارامتر مبادلاتی، محل یا زمان پیاده‌سازی تجارت آلودگی به دلیل نیاز متفاوت ذی‌نفعان تغییر کند، لازم است تعاملات و سوددهی بازار ارزیابی مجدد شود. در این پژوهش برای کسب رضایت ذی‌نفعان، قیمت پایه مجوز انتشار آلودگی مبتنی بر BOD به مقدار تقریبی ۳ دلار تنظیم شده است.

ایجاد گزینه‌ای مبادله‌پذیر و جایگزین می‌شود که با ایجاد تعامل و انگیزه بین ذی‌نفعان، به کاهش هزینه‌های کل تصفیه آلودگی در عین حفظ رشد اقتصادی واحدهای صنعتی می‌انجامد.

از دیدگاه زیست‌محیطی، دستیابی به اهداف کنترل کیفیت آب در نقاط کلیدی و پیشگیری از انتشار آلودگی میسر است و منابع آلاینده غیرنقطه‌ای نیز می‌توانند در این الگو دخیل شوند. با این حال، امکان‌سنجی استفاده از بازار مجوز انتشار آلودگی وابسته به شرایط حوضه آبریز، میزان مجاز تخلیه بار آلودگی و تنوع آلاینده‌ها، پارامترهای بررسی شده و انگیزه‌های اقتصادی ذی‌نفعان است. برای نمونه، در این پژوهش، الگوی تجارت مجوز انتشار آلودگی تک‌پارامتره مبتنی بر BOD در حوضه پایین‌دست سفیدرود مطالعه شد که نشان می‌دهد بازار و پیامدهای تخصیص بار آلودگی باید به‌صورت حوضه‌ای و براساس نوع پارامتر مبادلاتی به‌صورت موردی ارزیابی گردد. این پژوهش پیشنهاد می‌کند ارزیابی یادشده در بلندمدت و انتهای دوره طرح بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیز بازبینی شود؛ زیرا در این دوره، بنا بر تغییرات حجم بار ورودی و تمایلات اقتصادی مشارکت‌کنندگان، لازم است میزان تعرفه فروش مجوز، ضرایب تعدیل و سودآوری آن‌ها کنترل و میزان حجم مبادلات بررسی شود. اگر بازار مجوز نتواند در کوتاه‌مدت یا بلندمدت نیاز ذی‌نفعان را برطرف کند، از پتانسیل کافی برای جلب اعتماد سیاست‌گذاران برخوردار نخواهد بود. همچنین سیاست‌گذاری‌های اقتصادی برای تنظیم قیمت و بازار مجوز انتشار آلودگی، بر میزان انگیزش اقتصادی ذی‌نفعان تأثیر می‌گذارد. هر یک از این عوامل می‌تواند در محدوده‌های مختلف بررسی شود و ضعف‌ها و قوت‌های پیاده‌سازی الگوی تجارت کیفیت آب مشخص گردد. همچنین مطابق سایر مطالعات (۱۷،۴) می‌توان از روش‌های

### مدیریت آب و آبیاری

## تخصیص بهینه بار آلودگی بر مبنای الگوی تجارت کیفیت آب در پایین دست رودخانه سفیدرود

6. Ashtiani EF Niksokhan MH and Jamshidi S (2015) Equitable Fund Allocation, an Economical Approach for Sustainable Waste Load Allocation. Environmental Monitoring and Assessment. DOI 10.1007/s10661-015-4739-4.
7. Boyd B and Greenwood R (2005) Water quality trading: Assessment methods and lessons. Environmental Quality Management. 14(14): 23-29.
8. Caplan AJ and Sasaki Y (2014) Benchmarking an optimal pattern of pollution trading: The case of Cub River, Utah. Economic Modelling. 36:502-510.
9. Collentine D (2005) Including non-point sources in a water quality trading permit program. Water science and technology. 51(3-4):47-53.
10. Corrales J Melodie Naja G Bhat MG and Miralles-Wilhelm F (2014) Modeling a phosphorous credit trading program in an agricultural watershed. Journal of Environmental Management. 143:162-172.
11. Doyle MW Patterson LA Chen Y Schneir K and Yates AJ (2014) Optimizing the scale of markets for water quality trading. Water Resources Research. 50(9):7231-7244.
12. Eheart JW and Ling Ng T (2004) Role of effluent permit trading in total maximum daily load programs: Overview and uncertainty and reliability implications. Journal of environmental engineering (ASCE). 130(6): 615-621.
13. Horan RD and Shortle J (2011) Economic and ecological rules for water quality trading. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA). 47(1):59-69.
- همچنین در این پژوهش، تصفیه‌خانه‌های کارخانه‌ها و شهرک‌های صنعتی منطقه به‌عنوان فروشندگان بالقوه مجوز شناسایی شده‌اند؛ زیرا از پتانسیل بسیاری برای تولید و فروش مجوز انتشار بار BOD دارند و می‌توانند با اعمال ضرایب تعدیل مناسب، رضایت خریداران مجوز را در کوتاه‌مدت و بلندمدت جلب کنند. به عبارت دیگر، برای بهبود شرایط کیفی رودخانه با اعمال سیاست کنترل انتشار آلودگی مبتنی بر بار آلی کربنی، پیشنهاد می‌شود تمرکز اصلی در منطقه بر منابع آلاینده نقطه‌ای و صنعتی قرار گیرد.

## منابع

۱. صابری ا. (۱۳۹۳) تخصیص بار آلودگی با رویکرد حل اختلاف در تصمیم‌گیری چندمعیاره. دانشگاه تهران. تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۲. جعفری ع.، طاهریون م.، یآوری ا. و باغوند ا. (۱۳۸۸) تجارت آلودگی به روش مجوزهای تخلیه قابل مبادله در رودخانه و ارزیابی آن از نظر کارایی هزینه. فصلنامه محیط‌شناسی. ۵۱: ۱۰۱-۱۱۰.
۳. اکبرزاده ع. و جمشیدی ش. (۱۳۹۳) ارتقا و بهسازی تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب. چاپ اول، انتشارات خانیران، تهران.
4. Akbarzadeh A Jamshidi S and Vakhshouri M (2015) Nutrient uptake rate and removal efficiency of *Vetiveria zizanioides* in contaminated waters. Pollution. 1:1-8.
5. Ashtiani EF Jamshidi S Niksokhan MH Feizi Ashtiani AF (2015) Value Index, a Novel Decision Making Approach for Waste Load Allocation. International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. 9(6): 624-628.

14. Jamshidi S Ardestani M and Niksokhan MH (2016) Seasonal Waste Load Allocation Policy within Integrated Discharge Permits and Reclaimed Water Market. *Water Policy*. DOI:10.2166/wp.2015.30120.
15. Jamshidi S and Niksokhan MH (2015) Multiple Pollutant Discharge Permit Markets, A Challenge for Wastewater Treatment Plants. *Journal of Environmental Planning and Management*. DOI 10.1080/09640568.2015.1077106
16. Jamshidi S Niksokhan MH and Ardestani M (2014) Surface Water Quality Management Using Integrated Discharge Permit and Reclaimed Water Market. *Water Science and Technology*. 70(5):917-924.
17. Jamshidi S Niksokhan MH Ardestani M and Jaber H (2015) Enhancement of Surface Water Quality Using Trading Discharge Permits and Artificial Aeration. *Environmental Earth Sciences*. DOI: 10.1007/s12665-015-4663-5.
18. Javid A Yaghmaeian K Abbasi E and Roudbari A (2014) An evaluation of water quality from Mojen River, by NSFQI index. *Journal of Ecological Engineering*. 15(4):1-6.
19. Kannel PR Lee S Lee YS Kanel SR and Pelletier GJ (2007) Application of automated Qualt2kw for water quality modelling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*. 202:503-517.
20. Kardos JS and Obropta CC (2011) Water quality model uncertainty analysis of a point-point source phosphorous trading program. *Journal of the American Water Resources Association*. 47(6):1317-1337.
21. Newburn DA and Woodward RT (2012) An ex post evaluation of Ohio's Great Miami water quality trading program. *Journal of the American Water Resources Association* (JAWRA). 48(1):156-169.
22. Massarutto A (2007) Water pricing and full cost recovery of water services: economic incentives or instrument of public finance?. *Water Policy*. 9(6):591-613.
23. Mesbah SM Kerachian R and Torabian A (2010) Trading pollutant discharge permits in rivers using fuzzy nonlinear cost functions. *Desalination*. 250(1):313-317.
24. Niksokhan MH, Kerachian R and Amin P (2009) A stochastic conflict resolution model for trading pollutant discharge permits in river systems. *Environmental Monitoring and assessment*. 154:219-232.
25. Niksokhan MH Kerachian R and Karamouz M (2009) A game theoretic approach for trading discharge permits in rivers. *Water Science and Technology*. 60(3):793-804.
26. O'Grady D (2011) Sociopolitical conditions for successful water quality trading in the south nation river watershed, Ontario, Canada. *Journal of the American Water Resources Association*. 47(1):39-51.
27. Obropta CC Niazi M and Kardos JS (2008) Application of an environmental decision support system to a water quality trading program affected by surface water diversions. *Environmental Management*. 42:946-956.
28. Ranga Prabodanie RA Raffensperger JF and Milke MW (2010) A pollution offset system for trading non-point source water pollution permits. *Environmental and Resource Economics*. 45:499-515.
29. Ribaldo MO and Gottlieb J (2011) Point-Nonpoint Trading – Can it Work? *Journal of the American Water Resources Association* (JAWRA). 47(1):5-14.



تخصیص بهینه بار آلودگی بر مبنای الگوی تجارت کیفیت آب در پایین‌دست رودخانه سفیدرود

30. Ribaud MO and Savage J (2014) Controlling non-additional credits from nutrient management in water quality trading programs through eligibility baseline stringency. *Ecological Economics*. 105:233-239.
31. Roberts AM and Craig RK (2014) Regulatory reform requirements to address diffuse source water quality problems in Australia: learning from US experiences. *Australasian Journal of Environmental Management*. 21(1):102-115.
32. Sarang A Lence BJ and Shamsai A (2008) Multiple Interactive Pollutants in Water Quality Trading. *Environmental Management*. 42:620-646.
33. Wittmann N (2014) A note on distortional distributional effect in river basin discharge permits trade. *Water Resource Management*. 28(1):279-285.
34. USEPA (2004) Water quality trading assessment handbook. 120 p.