

## استفاده مجدد از پساب، فرصتی برای توسعه بازار مجوز انتشار آلودگی

شروین جمشیدی<sup>۱</sup>، محمدحسین نیک سخن<sup>۲\*</sup>، مجتبی اردستانی<sup>۳</sup>

sh.jamshidi@ut.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران

۲. استادیار دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

ardestan@ut.ac.ir

۳. دانشیار دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۳/۲

### چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی امکان توسعه بازار مجوز انتشار بار نیتروژن با تخصیص بهینه پساب تصفیه شده در حوضه رودخانه سفیدرود و مقایسه آن با نتایج بازار در شرایط متعارف می‌باشد. بدین منظور، محدوده مورد مطالعه شبیه‌سازی شده و ضرایب تأثیر و حداکثر بار مجاز تخلیه آلودگی تعیین شد. در نهایت با استفاده از توابع هزینه، تخصیص پساب و مجوز انتشار با هدف حداقل کردن هزینه‌های کل کاهش بار آلودگی انجام شد. نتایج نشان داد که بازار مشترک مجوز و پساب تصفیه‌شده بین منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای می‌تواند سودآوری بازار را به میزان چشم‌گیری افزایش دهد. در این ساختار، با کاهش هزینه‌های حاشیه‌ای کنترل انتشار آلودگی و امکان فروش بیشتر مجوز از طریق انتقال پساب می‌توان انتظار داشت میزان صرفه‌جویی هزینه در کاهش بار نیتروژن از ۲٪ در شرایط متعارف تا ۵۷٪ افزایش یابد. همچنین نشان داده شد که توسعه بازار می‌تواند منجر به کاهش شکنندگی و آسیب‌پذیری آن نسبت به تغییر قیمت مجوز گردد. به طوری که ضرورت نظارت بر قیمت‌های توافقی بازار کاهش یافته و مبادلات از آزادی بیشتری برخوردار می‌شوند. لذا چنین نتیجه گرفته شد که موفقیت توسعه بازار مجوز انتشار بار نیتروژن در حوضه سفیدرود منوط به ایجاد سازوکار مشترک برای فروش پساب تصفیه‌شده می‌باشد.

### کلیدواژه

استفاده مجدد از پساب، تجارت کیفیت آب، سفیدرود، مجوز انتشار آلودگی، نیتروژن.

### ۱. سرآغاز

سطحی وجود دارد. در روش متعارف کنترل دستوری، میزان کاهش بار آلودگی در خروجی تمامی منابع آلاینده (به ویژه نقطه‌ای) توسط سازمان قانون‌گذار (مانند سازمان حفاظت محیط‌زیست) به صورت پیش فرض در نظر گرفته می‌شود و تخلیه مازاد بر آن مشمول جریمه خواهد شد. در استانداردهای محیط‌محور، برخلاف روش‌های کنترل دستوری، از آنجایی که نظارت و پایش کیفی در یک نقطه مشخص از پیکره آبی صورت می‌گیرد، شرایطی ایجاد

با گسترش فعالیت‌های شهری، کشاورزی و صنعتی در حاشیه رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، مدیریت و حفاظت کیفی منابع آب سطحی به یک چالش زیست محیطی 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

مورد مطالعه می‌شود (USEPA, 2004). گفتنی است تجارت کیفیت آب با استفاده از موارد قانونی و حقوقی و تعیین میزان حداکثر مجاز تخلیه بار آلودگی و جرائم زیست‌محیطی می‌تواند انعطاف‌پذیری سیستم را حفظ نماید. 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 (Eheart and Ling Ng, 2004).

تاکنون مطالعات متعددی در خصوص بازارهای تجارت کیفیت آب انجام شده است. در اکثر پژوهش‌های پیشین، مطالعات امکان‌سنجی استفاده از الگوی تجارت کیفیت آب، تعاملات منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به عنوان یکی از مزایا و نقاط قوت بازار مجوز انتشار آلودگی معرفی شده است (Ranga Prabodanie, et al., 2010; Ribaud and Gottlieb, 2011). این بدان علت است که در این چارچوب، انتشار بار آلودگی منابع آلاینده غیر نقطه‌ای برخلاف روش کنترل دستوری کنترل شده و در محاسبات مدنظر قرار می‌گیرد. بدین منظور می‌توان با استفاده از قابلیت‌های منابع آلاینده نقطه‌ای در کاهش بار آلودگی مازاد و فروش مجوز، انتشار آلودگی از منابع غیر نقطه‌ای را با صرف هزینه‌های حاشیه‌ای کمتر برای ساخت و بهره‌برداری تأسیسات تصفیه پساب جبران نمود (Collentine, 2005). به همین علت، اکثر مبادلات بر پایه تجارت آلاینده‌هایی نظیر نیتروژن و فسفر متمرکز شده‌اند. به‌عنوان نمونه، (Obropta, et al., 2008) با استفاده از سیستم‌های تصمیم‌گیری پشتیبان (DSS) نحوه تخصیص بار فسفر در الگوی تجارت کیفیت آب را بین ۲۲ منبع آلاینده نقطه‌ای یک حوضه آبریز در ایالت نیوجرسی مورد بررسی قرار داده و میزان TMDL را تعیین کردند. در مطالعاتی دیگر در همین منطقه، میزان عدم قطعیت در کیفیت نهایی پیکره آبی پذیرنده با شرایط پیشین کنترل دستوری مورد مقایسه قرار گرفت (Kardos and Obropta, 2011). نتیجه نشان می‌دهد که بازار مجوز انتشار مواد

می‌شود که در آن میزان مجاز تخلیه بار آلی در منابع آلاینده با توجه به ظرفیت خود پالایی رودخانه و محل استقرار آن‌ها تعیین گردد. بنابراین فرصتی برای تعامل و دسترسی به اقتصادی‌ترین الگوی تخلیه بار آلودگی فراهم می‌شود (Boyd and Greenwood, 2005). بدین منظور معمولاً پیشنهاد می‌شود 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 مورد استفاده قرار گیرند (Niksokhan, et al. 2009a).

تجارت کیفیت آب یکی از تعاملات نوین در عرصه مدیریت کیفی منابع آب سطحی به شمار می‌رود. این رویکرد مبتنی بر تشکیل یک بازار خرید و فروش مجوز انتشار آلودگی است و مبنای و مزایای استفاده از آن بر پایه تفاوت فنی - اقتصادی موجود بین ذینفعان در کاهش آلودگی نهفته است. به‌طور ساده، این ساختار، شامل گروهی از ذینفعان است که برای کاهش مقدار آلاینده‌های تخلیه شده به محیط و حفظ شرایط استاندارد لازم است هزینه‌گزافی پرداخت نمایند درحالی‌که گروهی دیگر می‌توانند در شرایط مشابه، و با صرف هزینه کمتر موجب 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 (USEPA, 2004، سارنگ و همکاران، ۱۳۹۳)؛ به عبارت دیگر، در این بازار، منابع آلاینده (نقطه‌ای و یا غیر نقطه‌ای) بر اساس هزینه‌های حاشیه‌ای تخمین زده شده و بر اساس ضرایب تأثیر خود بر کیفیت نقطه پایش، تصمیم می‌گیرند که فروشنده و 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 موجب کاهش هزینه‌های کل مرتبط با کنترل انتشار آلودگی در منطقه

احتمال بروز مناقشات می تواند بر دستاورد نهایی بازار تأثیر گذاشته و عملکرد آن را از حد انتظار تنزل بخشد.

در ایران نیز در مطالعات پیشین، نحوه تخصیص انتشار بار نیتروژن برای حوضه رودخانه قره سو (واقع در استان کرمانشاه) در شرایط وجود بازار مجوز انتشار آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است (Jamshidi, et al. 2014). در همین پژوهش نحوه تعاملات بهینه بازار مشترک مجوز انتشار نیتروژن و پساب تصفیه شده شهری برای دستیابی به اقتصادی پایدار نیز ارزیابی شده است. نتایج نشان می دهد که در این زیر حوضه، به دلیل تأثیر مشابه منابع آلاینده شهری و کشاورزی بر کیفیت نقطه پایش، استفاده مجدد از پساب به ویژه در انتهای دوره طرح (بلندمدت) تأثیر بسزایی بر کاهش هزینه های ساخت و بهره برداری تأسیسات تصفیه فاضلاب خواهد گذاشت. هرچند در ادامه مطالعات، جمشیدی و همکاران (۱۳۹۴) این امکان را بررسی نمودند که بازار مجوز انتشار آلودگی همواره به عنوان گزینه اقتصادی و اجرایی برای تمامی رودخانه ها و منابع آب سطحی قابل کاربرد نبوده و نمی تواند کارایی مناسبی به همراه داشته باشد؛ زیرا موفقیت بازار منوط به حجم بار آلی تخلیه شده از سوی منابع آلاینده غیر نقطه ای و قابلیت تعیین بهای عادلانه مجوز است. این در حالی است که نیازهای فصلی برخی از ذینفعان همچون بخش کشاورزی در استفاده مجدد از پساب و یا تخلیه بار آلودگی به محیط نیز می تواند بر پیچیدگی بازار و تصمیمات تخلیه بار آلودگی اثرگذار باشد (Jamshidi, et al. 2015a). همچنین Mesbah, et al. (2010) بهینه سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه زرجوب گیلان را پس از تعریف توابع غیرخطی فازی ارزیابی نمودند. قابل ذکر است که انتخاب پارامتر مبادلاتی بستگی به مشخصات منبع آبی مورد مطالعه، تنوع و پراکندگی منابع آلاینده و پارامترهای کیفی غالب در محیط دارد. به عنوان مثال، منابع آلاینده ای که موجب انتشار ترکیبات آلی فرار و دی اکسید کربن می شوند، به دلیل عدم واکنش و ترکیب آن ها با سایر مواد،

مغذی میزان عدم قطعیت را به میزان ناچیزی تغییر داده و تأثیر بارزی بر کاهش قطعیت غلظت اکسیژن محلول و کلروفیل A به عنوان بازخورد در نقاط حساس ندارد. اخیراً Caplan and Sasaki (۲۰۱۴) در محدوده یوتا آمریکا، یک الگوریتم برای تعریف سناریوهای مختلف بهینه سازی تخصیص بار آلودگی بین منابع آلاینده نقطه ای و غیر نقطه ای و تحت شرایط دینامیک ارائه نمود. مطابق تحقیقات Wittmann (۲۰۱۴)، پیشنهاد شده است پیش از تشکیل ساختار بازار مجوز انتشار آلودگی، منطقه مورد مطالعه به ناحیه ای که بیشترین آسیب پذیری را از نظر کیفی داراست محدود گردد که حتی Doyle, et al. (2014) پیشنهاد داده اند مقیاس مورد مطالعه با توجه به بازار مجوز بهینه سازی گردد. در یک نمونه تجارت مجوز انتشار آلودگی بین زمین های زراعی، Corrales, et al. (2014) تخصیص بار فسفر خروجی از این منابع را بهینه سازی کردند. همچنین O'Grady (۲۰۱۱) یک نمونه موفق اجرا شده بازار مجوز انتشار آلاینده فسفر را در منطقه انتاریو کانادا مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، وی پیش نیازهای لازم برای عملیاتی شدن موفق بازار را توافق گروهی، حمایت قانونی، شفاف سازی مالی، سهولت در برقراری تعاملات اقتصادی و وجود یک دستورالعمل مکتوب برشمرد. به طور مشابه در ایالت اوهایو، Newburn and Woodard (۲۰۱۲) بازار مجوز این منطقه را پس از پیاده سازی مورد ارزیابی مجدد قرار دادند. این در حالی است که Roberts and Craig (۲۰۱۴) به موانع و مشکلات موجود قانون گذاری در خصوص تشکیل بازار مجوز انتشار آلودگی در شرایط حضور منابع آلاینده غیر نقطه ای اشاره دارد. نتایج بررسی های Horan and Shortle (۲۰۱۱) نشان می دهد که مطالعات بیشتری لازم است تا تأثیر تعاملات اقتصادی بازار مجوز انتشار آلودگی و اثرات متقابل آن بر ظرفیت اکولوژیکی مشخص گردد. مطابق بررسی های انجام شده، موانع متعدد نظیر نوسانات جریان منابع آلاینده غیر نقطه ای در طول یک سال، تعاملات بازار در بلندمدت و

نقطه‌ای متعددی است. منبع آلاینده غیر نقطه‌ای به‌طور مشخص فعالیت‌های شالی‌کاری و کشت برنج می‌باشد که مطابق شکل ۱ از محدوده ایستگاه شماره ۸ تا بعد از ایستگاه شماره ۱۰ پراکنده می‌باشند. منابع آلاینده نقطه‌ای مشرف به رودخانه در این بررسی سه شهرک صنعتی در نزدیکی شهرهای رشت، سیاهکل و آستانه اشرفیه می‌باشند که دربرگیرنده صنایعی نظیر فرآوری‌های لبنی، کشتارگاه و مرغداری هستند. همچنین ۷ شهر اصلی مشرف به منطقه وجود دارد که می‌توان چنین فرض نمود که پساب آن‌ها پس از تصفیه مقدماتی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و کاهش بار میکروبی و آلی آن‌ها به منبع آب پذیرنده تخلیه خواهد شد. مشخصات منابع آلاینده شامل فاصله تا نقطه پایش، میزان بار آلی تخلیه شده ( $L_{it}$ )، میزان بار مجاز تخلیه روزانه ( $TMDL$ )، دبی متوسط ( $Q$ ) و هزینه احتمالی کاهش بار آلودگی تا سطح مجاز در جدول ۱ نشان داده شده است. شایان ذکر است این رودخانه از نظر کیفی با مشکلات متعددی مواجه است که به‌طور خلاصه می‌توان به وضعیت نامطلوب شاخص کیفی آب اشاره نمود (صابری، ۱۳۹۳). به همین علت ارائه گزینه‌های مدیریتی تخصیص بار آلودگی در قالب بازارهای مبادلاتی مجوز انتشار می‌تواند به بهبود این شرایط کمک نماید.

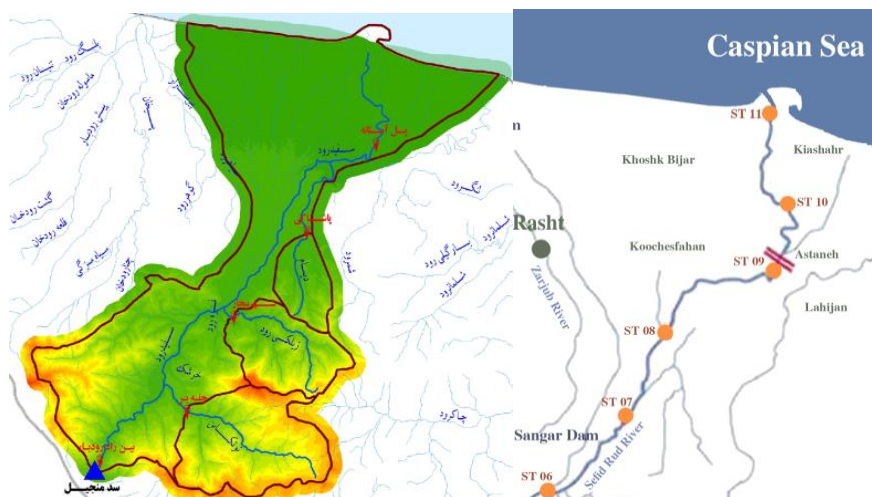
می‌توانند به‌صورت خطی و تنها بر مبنای هزینه حاشیه‌ای خود در مدل تجارت کیفیت وارد شوند اما پارامترهایی نظیر اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) و غلظت فلزات سنگین نیازمند شبیه‌سازی کیفی منبع آبی و تعیین اثرگذاری منابع آلاینده پیش از اجرای مدل تجارت هستند (Sarang, et al. 2008).

هدف از این پژوهش، ارائه راهکار ترکیب بازار مجوز انتشار آلودگی و بازار فروش پساب و ارزیابی آن به منظور دستیابی به یک تعامل بهینه در کنترل انتشار بار آلودگی مبتنی بر پارامتر نیتروژن در رودخانه سفیدرود، حدفاصل سد انحرافی سنگر تا مصب دریا می‌باشد. 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 فروشنده‌گان آن‌ها تعیین می‌شوند.

## ۲. مواد و روش بررسی

### ۲-۱. محدوده مورد مطالعه

در این تحقیق، رودخانه سفیدرود حد فاصل پایاب سد سنگر تا مصب دریا در استان گیلان به طول تقریبی ۵۵ کیلومتر به عنوان محدوده مورد مطالعه برای ارزیابی تأثیر تخصیص پساب در بازار مجوز انتشار آلودگی مدنظر قرار می‌گیرد. این منطقه متشکل از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه و محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۸۹)

برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته و نقشی در تعاملات بازار مجوز انتشار بار نیتروژن ندارد. مقادیر برآورد شده بار آلودگی هر یک از منابع آلاینده و هزینه های کاهش بار آلودگی به روش تخصیص مجاز بار آلودگی در جدول ۱ و متوسط مشخصات کیفی اندازه گیری شده در ایستگاه های نمونه برداری در جدول ۲ آمده است. شایان ذکر است این مقادیر متوسط ۸ سری نمونه برداری انجام شده در طول یک سال می باشد (صابری، ۱۳۹۳).

بنابراین هدف از این بررسی، ضمن شناسایی منابع آلاینده اصلی در انتشار بار نیتروژن، امکان سنجی و تحلیل بازار مجوز انتشار آلودگی مبتنی بر پارامتر نیتروژن کل (TN) خواهد بود. بدین منظور، تخصیص بهینه پساب با هدف کمینه سازی هزینه های ساخت و بهره برداری از واحدهای تصفیه تکمیلی برای کاهش بار نیتروژن کل ورودی به رودخانه در دو سناریو صورت می پذیرد. گفتنی است سایر پارامترهای کیفی نظیر اکسیژن محلول، میزان اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) در آب رودخانه صرفاً

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

نام منبع آلاینده	نوع منبع	میزان بار آلی تولید شده (kg/d)	دبی متوسط (m <sup>3</sup> /s)	فاصله تقریبی تا نقطه پایش (km)	ضرایب تأثیر (%)	حداکثر بار مجاز تخلیه روزانه (kg/d)	هزینه تصفیه بار آلودگی (میلیون ریال در سال)
SI	صنعتی	۱۷۳	۰/۰۰۲	۴۱	۳/۲	۹	۲۲۸
RI	صنعتی	۸۶۴	۰/۰۱	۳۸	۴	۴۳	۱۱۴۱
KF	شهری	۳۱۱	۰/۰۶	۳۲	۶/۳	۹۳	۱۶۱۹
RT	شهری	۳۶۸۱	۰/۷۱	۳۰	۶/۳	۱۱۰۴	۱۲۷۷۴
SK	شهری	۳۶۳	۰/۰۷	۲۷	۸/۱	۱۰۹	۱۸۸۹
LJ	شهری	۱۶۰۷	۰/۳۱	۲۳	۸/۱	۴۸۲	۵۵۷۷
AA	شهری	۸۲۹	۰/۱۶	۲۰	۹/۶	۲۴۹	۲۸۷۹
AI	صنعتی	۴۳۲	۰/۰۰۵	۱۴	۱۰/۸	۲۲	۵۷۱
KB	شهری	۵۷۰	۰/۱۱	۵	۱۶/۴	۱۷۱	۲۹۶۹
KS	شهری	۲۰۷	۰/۰۴	۱	۱۷/۵	۶۲	۱۰۷۹
AG	کشاورزی	۱۲۹۶۰	۱۰	۵	۹/۶	۵۸۳۲	۳۹۶۰۰
مجموع							۷۰۳۲۶

جدول ۲. مشخصات کیفی متوسط ایستگاه های نمونه برداری شده

نام ایستگاه	دمای آب °C	اکسیژن محلول (mg/L)	COD کل (mg/L)	NH <sub>4</sub> (mg/L)	نیتروژن کل (mg/L)	فسفات (mg/L)	pH
تاریک (S6)	۱۹	۶	۲۳	۰/۲۶	۴/۵	۰/۱۳	۸/۳
زیلکی (S7)	۱۹	۵/۳	۲۱	۰/۲۷	۵/۶	۰/۱	۸/۱
سنگر (S8)	۱۹/۵	۵/۱	۱۹	۰/۲۵	۶/۶	۰/۱۵	۸/۱
خمامرود (S9)	۲۰	۴	۲۱	۰/۳۵	۷/۱	۰/۱۷	۸/۲
آستانه اشرفیه (10)	۲۰	۲/۳	۲۴	۰/۵۵	۹/۳	۰/۲۲	۸/۱
خشک بیجار (S11)	۲۱	۱/۶	۲۵	۰/۲۸	۱۰/۴	۰/۱۷	۸/۳

## ۲-۲. روش‌شناسی تحقیق

به منظور تخصیص بهینه پساب، مشابه مطالعات اخیر انجام شده در حوضه رودخانه قره سو این پژوهش در دو مرحله انجام پذیرفته است (Jamshidi, et al. 2014). در گام نخست، پس از برآورد بار آلی و شبیه سازی کمی و کیفی توسط مدل Qual2kw (Kannel, et al. 2007)، میزان ضرایب تأثیر تخلیه پساب هر منبع آلاینده بر کیفیت نقطه پایش (مصوب رودخانه) تعیین شده است. بدین منظور، برای هر منبع آلاینده ( $j$ )، میزان بار تخلیه به مقدار واحد (یک تن در سال) به طور فرضی افزایش داده شده و میزان تغییر غلظت نیترژن کل ( $dN$ ) در نقطه پایش (میلی گرم بر لیتر) برآورد می‌گردد. ارزیابی حساسیت نقطه پایش به میزان تغییرات بار آلودگی مطابق رابطه ۱ نرمال شده 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 نمود. میزان حذف بار نیترژن می‌تواند حداکثر بار مجاز تخلیه آلودگی را برای این منطقه مشخص نماید. در گام دوم، با در اختیار داشتن ضرایب تأثیر و میزان حداکثر بار مجاز تخلیه، می‌توان تخصیص بهینه پساب را با توجه به الگوی تجارت مجوز بار آلودگی و با هدف حداقل کردن هزینه ساخت و بهره برداری از واحدهای تصفیه تکمیلی انجام داد. درصدهای حذف بار آلودگی خروجی از این مرحله نشان می‌دهد که کدام آلاینده فروشنده و کدام یک خریدار مجوز خواهند بود و بدین ترتیب نقش هر منبع آلاینده در بازار تعیین می‌گردد.

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

در جدول ۱، ضرایب تأثیر هرکدام از منابع آلاینده نشان داده شده است. این ارقام نشان می‌دهند که منابع آلاینده نقطه ای نزدیک به نقطه پایش، اثرگذاری بیشتری نسبت به منابع آلاینده دورتر از نقطه پایش دارند. این می‌تواند به علت کاهش آلودگی‌های نیترژنی آب به علت وجود رسوبات در کف رودخانه باشد. این خاصیت مکانی

بر این نکته تأکید خواهد داشت که میزان تصفیه بار آلودگی توسط منابع آلاینده مستقر در انتهای مسیر جریان از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و بهتر است این منابع به عنوان فروشنده مجوز انتشار آلودگی معرفی گردند. پراکنندگی زمین‌های کشاورزی و شالی‌کاری به‌عنوان اصلی‌ترین عامل انتشار بار آلودگی تا نقطه پایش می‌تواند باعث کاهش انعطاف‌پذیری بازار مجوز و محدودیت مبادلات گردد.

به منظور برآورد اقتصادی و تعاملات بازار مجوز انتشار آلودگی، هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری واحدهای تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی به ترتیب با روابط ۲ و ۳ برآورد می‌شود. این توابع از آنالیز مبالغ قراردادی پیمانکاران و هزینه‌های ساخت بیش از ۵۰ تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و صنعتی صورت گرفته است. این تأسیسات انواع فرآیندهای تصفیه تکمیلی همچون MLE،  $A_2O$ ، IFAS، SBR، MBR و برکه تثبیت را شامل شده و بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳ در کشور ساخته شده‌اند. هزینه‌های ساخت واحدهای تصفیه برحسب اینکه از چه نوع واحد فرآیندی استفاده شده است به طور متوسط بر واحد مترمکعب جریان فاضلاب تعریف شده است. همچنین در این مرحله فرض شده است که تأسیسات با فناوری پیشرفته تر و فرآیندهای بیشتر از قابلیت حذف بالاتر نیترژن نسبت به روش‌های متعارف نظیر برکه تثبیت و لجن فعال برخوردار است. لازم به توضیح است که برای یک دوره طرح ۳۰ تا ۳۵ ساله، هزینه بهره‌برداری واحدهای شهری بزرگ در سه بازه ده ساله هرکدام به طور تقریبی با احتساب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از هزینه سالانه ساخت در نظر گرفته شده (صابری، ۱۳۹۳؛ جعفری و همکاران، ۱۳۸۸) و در نهایت با هزینه ساخت جمع و نتیجه آن به طور سالانه برحسب میلیون دلار برآورد شده است (هر دلار معادل ۲۵۰۰۰ ریال فرض شده است). به منظور محاسبه هزینه ساخت و بهره‌برداری کل می‌توان مطابق رابطه ۵، میزان جریان فاضلاب در تابع هزینه ضرب شده و مجموع آن برای این پژوهش حداقل گردد (Jamshidi, et al. 2014).

توضیح است این فرض صرفاً برای انجام محاسبات اقتصادی بازار مجوز انتشار آلودگی بوده و روش پیشنهادی محققین نیست.

برای تخصیص مجوز انتشار و درصد اقتصادی بهینه کاهش بار آلودگی نیتروژن، رابطه ۶ برای کنترل شرط مرحله بهینه سازی تک هدفه مورد استفاده قرار گرفته است. میزان مجوز قابل مبادله ( $L_j$ ) با توجه به این رابطه تعیین می شود. اگر مقدار  $L_j$  منفی باشد به این معناست که تصفیه خانه  $j$  بیشتر از مقدار مورد نیاز بار نیتروژن را کاهش داده است ( $x$ ) و می توان این مقدار را به عنوان مجوز در بازار به فروش رساند. در شرایطی که این مقدار مطابق رابطه ۶ مثبت باشد به این معناست که منبع آلاینده همچنان نیاز به کاهش بار آلی بوده و باید مجوز خریداری نماید. مشخصاً در مدل بهینه سازی تابع هزینه، شرط تأمین مجوزهای مورد نیاز برای خرید توسط فروشندگان مطابق دستورالعمل آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA, 2004) رعایت شده است.

$$L_j = (L_{d_j} - x \times L_{d_j} - TMDL_j) \times IF_j \quad (6)$$

در نهایت، برای تعیین بازه قیمت گذاری پساب و مجوز و شناسایی ظرفیت بازار پیشنهادی در آزادسازی قیمت ها، لازم است رابطه ۵ برای هر کدام از منابع آلاینده ( $j$ ) مطابق رابطه ۷ بسط داده شود. در این رابطه، هزینه های کل ( $TC$ ) حوضه سفیدرود با توجه به میزان تخصیص پساب برابر با هزینه کل محاسبه شده توسط رابطه ۵ خواهد بود اما هزینه های مربوط به هر کدام از منابع آلاینده می تواند با توجه به هزینه های مبادلاتی مجوز (رابطه ۸) و پساب (رابطه ۹) متغیر باشد. در این دو رابطه، مقادیر تعرفه پایه مجوز ( $P_j$ ) و پساب ( $R$ ) با توجه به حداقل سودآوری ممکن منبع آلاینده غیر نقطه ای که تنها خریدار مجوز است تعیین می شود؛ بنابراین، محدوده مناسب این دو تعرفه می تواند از خود بازار پیشنهادی تعیین شود به طوری که هزینه های کل هر کدام از منابع آلاینده نباید از هزینه های کل روش متعارف کنترل انتشار آلودگی که در اینجا مبتنی

$$C(x)_i = -11x^3 + 17x^2 - 1.3x \quad (2)$$

$$C(x)_d = -2.8x^3 + 4.1x^2 - 0.3x \quad (3)$$

$$C(x)_a = 0.3x \quad (4)$$

$$TC = \sum_{j=1}^m (C(x) \times Q)_j \quad (5)$$

$$(0 \leq x \leq 1)$$

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

با توجه به اینکه جوامع روستایی و زمین های کشاورزی در سطح گسترده ای پراکنده شده و هزینه های جمع آوری پساب و زهاب ها بسیار بالا می باشد، معمولاً روش های ساده طبیعی نظیر دفع زیرسطحی، رقیق سازی با جریان آب، ساخت حوضچه های ماند، استفاده از پوشش گیاهی و در بهترین شرایط ساخت نيزارهای مصنوعی برای کنترل انتشار بار آلودگی این منابع می تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین تخلیه زهاب های کشاورزی به صورت مقطعی در بازه های زمانی متفاوتی صورت می پذیرد. این در حالی است که مواد آلی کربنی موجود در جریان ورودی این آلاینده ها (BOD) معمولاً پائین بوده و غلظت نیتروژن به دلیل مصرف کود شیمیایی و دامی در زمین های کشاورزی بالاست. تمامی این عوامل استفاده از روش های متعارف و پیشرفته تصفیه برای زهاب های کشاورزی را با مشکل مواجه ساخته و محدود می کند. در این پژوهش از آنجایی که سطح کشت برنج گسترده بوده و در حوضه وسیعی از محدوده استان پراکنده است، دبی خروجی زهاب بالاست و آب کافی رودخانه برای رقیق سازی زهاب های کشاورزی وجود دارد می توان چنین فرض کرد که ساخت حوضچه های ماند و رقیق سازی می تواند تنها روش کاهش بار آلودگی به شمار آید و هزینه های مربوط به آن ( $C_a$ ) به دلیل ارتباط با هزینه ساخت حوضچه ها و خرید آب به صورت خطی خواهد بود (رابطه ۴). لازم به

ترتیب در نقطه پایش تا ۴/۵ و ۲ میلی گرم بر لیتر کاهش یابد. پیاده سازی چنین تخصیص بار آلودگی و کنترل انتشار آن مطابق جدول ۱ تقریباً نیازمند سالانه ۷۰ میلیارد ریال هزینه در کل حوضه خواهد بود که از روابط ۲ تا ۵ محاسبه شده است. در این شرایط و با فرض احداث و وضعیت کیفی کنونی رودخانه و با فرض احداث و بهره‌برداری صحیح از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی با هدف کاهش مناسب BOD و ضمن گندزایی پساب می‌توان انتظار داشت شاخص کیفی رودخانه افزایش یابد (Javid, et al. 2014). لازم به توضیح است استفاده از روش‌های نظارت زیست‌محیطی محیط محور به‌طور کلی اقتصادی‌تر از روش‌های کنترل دستوری محسوب شده و این امکان را فراهم می‌سازد تا ذینفعان برای کاهش هزینه‌های کنترل بار آلودگی خود در تعامل سازنده اقتصادی با یکدیگر قرار گیرند (Wainger and Shortle, 2013). همچنین تعیین درصد حذف بار آلودگی متعادل بین ذینفعان خود می‌تواند منجر به کاهش شاخص بی‌عدالتی مطابق نتایج مطالعات Feizi Ashtiani et al. (2015) شود.

بر TMDL است (جدول ۱) بیشتر باشد. در رابطه  $L_r$ ،  $L_r$  و  $L_r$  به ترتیب بار آلودگی مبادله شده به صورت مجوز و پساب است. مقادیر  $K_r$  و  $K_r$  نیز دو ضریب سودآوری (و یا تخفیف) است که به ترتیب برای فروش مجوز و پساب ممکن است توسط فروشنده مورد استفاده قرار گیرد. حاصل ضرب این ضرایب در قیمت پایه مجوز و پساب، تعرفه مبادلاتی هر منبع آلاینده را نشان می‌دهد.

$$TC_j = C_j \times Q_j \pm T_{ij} \pm T_{ij} \quad (7)$$

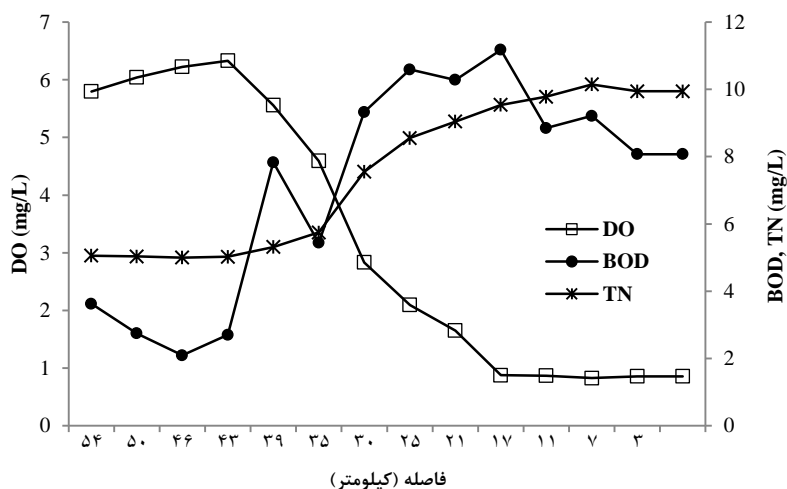
$$(TC_j < TC_{TMDLj})$$

$$T_{ij} = (P_r \times K_r \times L_r)_j \quad (8)$$

$$T_{ij} = (R \times K_r \times L_r)_j \quad (9)$$

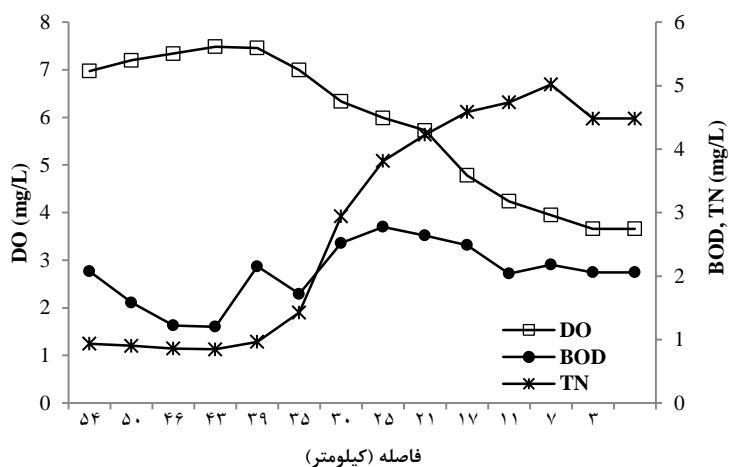
### ۳. نتایج و بحث

در گام نخست، با در نظر گرفتن مشخصات بار آلی تخلیه شده به محیط و ویژگی‌های هیدرولیکی رودخانه، محدوده مورد مطالعه از نظر کمی و کیفی شبیه‌سازی شده و مشخص گردید که غلظت نیتروژن کل و BOD در نقطه پایش در شرایط کنونی به ترتیب ۹/۹ و ۸ میلی گرم بر لیتر می‌باشد (شکل ۲). در شرایطی که ضوابط محیط محور زیست محیطی مبتنی بر حداکثر بار مجاز تخلیه روزانه اجرا گردد انتظار می‌رود مطابق شکل ۳، غلظت این ترکیبات به



شکل ۲. غلظت شاخص‌های کیفی (mg/L) خروجی مدل شبیه‌سازی قبل از پیاده‌سازی تخصیص بار آلودگی مجاز





شکل ۳. غلظت شاخص‌های کیفی (mg/L) پیش‌بینی شده بعد از پیاده‌سازی تخصیص بار آلودگی مجاز

توسط سایر منابع آلاینده تأمین خواهد شد. تفویض بخشی از وظیفه کاهش بار آلودگی منابع آلاینده غیر نقطه‌ای به نقطه‌ای منجر به کاهش هزینه‌های کل تخصیص بار آلودگی به میزان ۱۳۴۱ میلیون ریال در سال (تفاوت هزینه بازار شماره ۱ با جدول ۱) خواهد شد. هرچند این میزان تنها در حدود ۲٪ هزینه‌های مربوط به تصفیه متعارف بار آلودگی است و تعامل ذینفعان در این سناریو (بازار ۱) به نظر می‌رسد سودآوری اقتصادی قابل ملاحظه‌ای به همراه نداشته باشد. این مشخصاً بدان علت است که نیاز بخش کشاورزی به مجوز انتشار آلودگی به دلیل ضریب تأثیر و حجم بار آلی تخلیه شده بالای این منبع آلاینده و هزینه‌های نسبتاً زیاد تصفیه بار نیتروژن در منابع آلاینده نقطه‌ای، کسب سود از بازار را با محدودیت مواجه می‌سازد. همچنین از طرف دیگر، منابع آلاینده نقطه‌ای بایستی با حداکثر ظرفیت خود و با پیشرفته‌ترین روش‌ها، بار نیتروژن را به طور کامل از پساب خروجی حذف نمایند. این ظرفیت به دلیل حجم کم پساب و هزینه‌های بالای تصفیه نمی‌تواند منجر به ایجاد انگیزش قوی اقتصادی در بین ذی‌نفعان شود. این در حالی است که بازار مشابه بین منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای در رودخانه قره‌سو واقع در استان کرمانشاه، حاکی از سودآوری بازار مجوز دارد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد این منطقه می‌تواند در حدود

در گام دوم، با استفاده از ضرایب تأثیر و میزان حداکثر بار مجاز تخلیه آلودگی (رابطه ۶) و بر اساس روش پیشنهادی (USEPA, 2004)، میزان تخصیص بهینه پساب با هدف حداقل نمودن هزینه کل تصفیه برای منابع آلاینده تعیین گردید. در این مرحله، معمولاً منابع آلاینده با هزینه حاشیه‌ای پایین‌تر و یا ضرایب تأثیر بالاتر به عنوان فروشنده مجوز و سایر منابع به عنوان خریدار تعیین می‌شوند تا بدین شکل برای کاهش یک واحد بار آلودگی در منطقه، هزینه کل کمتری پرداخت گردد (سارنگ و همکاران، ۱۳۹۳). در این گام، دو سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سناریو اول، بازار مجوز انتشار آلودگی به صورت متعارف مبتنی بر آمار برآورد شده تخلیه پساب انواع منابع آلاینده و حدود مجاز تخلیه تعیین می‌شود (بازار ۱). در سناریو دوم، با فرض بازچرخانی پساب تصفیه شده شهری در آبیاری زمین‌های کشاورزی میزان تأثیر این روش بر پویایی بازار مجوز مورد بررسی قرار می‌گیرد (بازار ۲).

مطابق نتایج مندرج در جدول ۳ می‌توان مشاهده نمود که استفاده از بازار مجوز انتشار آلودگی موجب می‌شود که یک تعامل اقتصادی بین منابع آلاینده نقطه‌ای (شهری) و منبع آلاینده غیر نقطه‌ای (کشاورزی) صورت پذیرد. بدین ترتیب، در حدود ۱۵۰ مجوز توسط بخش کشاورزی مطابق تخصیص بهینه پساب مورد نیاز خواهد بود که

این مورد برای حوضه‌های با منابع آلاینده غیر نقطه‌ای کوچک و شهرهای بزرگ مناسب‌تر به نظر می‌رسد؛ بنابراین بزرگی و یا کوچکی حوضه مورد مطالعه در بازار الزاماً تعیین‌کننده قدرت تعاملات در آن نیست بلکه وجود عرضه و تقاضای متعادل و متناسب مجوز و قیمت‌گذاری پویا تضمین‌کننده تعامل کارساز بازار خواهد بود.

اما توجه به این نکته حائز اهمیت است که نیتروژن موجود در پساب شهری برای زمین‌های زراعی می‌تواند به‌عنوان یک کود و حاصلخیزی خاک به شمار رفته و ضمن افزایش بازدهی محصول منجر به کاهش مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی ازته، کاهش هزینه‌های بخش کشاورزی در تأمین کود و مواد مغذی و نهایتاً کاهش بار آلی تخلیه‌شده به محیط گردد. این نکته در مطالعات گسترده به ویژه با هدف هم‌زمان تأمین آب و ارتقای کیفی آن در منابع آب سطحی پیشنهاد شده و لزوم لحاظ اثرات کمی و کیفی بازیافت آب در مدیریت یکپارچه منابع آب تأکید شده است (Axelrad and Adewumi, et al. 2010; Feinerman, 2009).

۳۷٪ به روش بازار مجوز و با خرید و فروش تقریباً ۱۴۰ مجوز، از هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری واحدهای تصفیه در خصوص پارامتر نیتروژن کم نماید. این مسئله احتمالاً بدین خاطر است که بار نیتروژن تخلیه‌شده پساب شهری و کشاورزی در حوضه سفیدرود به ترتیب ۷۵۶۸ و ۱۲۹۶۰ کیلوگرم بر روز است اما این مقادیر برای حوضه قره سو ۸۲۰ و ۱۱۵۰ کیلوگرم بر روز می‌باشد. به عبارتی نسبت پساب به زهاب در سفیدرود ۰/۵۸ و در قره سو ۰/۷۱ است. این خود می‌تواند عامل اصلی ایجاد محدودیت برای تولید مجوز در حوضه سفیدرود نسبت به قره سو باشد (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۴). به‌طور مشابه Ribaldo and Nickerson (۲۰۰۹) به این موضوع اشاره داشتند که وجود هزینه‌های جابجایی و جانبی در بازار مجوز انتشار آلودگی در مناطقی که منابع آلاینده غیر نقطه‌ای نسبتاً زیاد است عامل محدودکننده و مخرب روابط تعاملی ذی‌نفعان بوده و منجر به شکست بازار خواهد شد. این مسئله و محدودیت تولید مجوز می‌تواند چنین نتیجه‌ای به همراه داشته باشد که بازارهای مجوز انتشار آلودگی در شرایط حضور منابع آلاینده غیر نقطه‌ای گسترده آسیب‌پذیر است.

جدول ۳. تخصیص پساب و هزینه‌های تصفیه انتشار بار نیتروژن در الگوی تجارت کیفیت آب در دو سناریو

نقش تعاملی	تعداد مجوز (kg/d)		هزینه تصفیه بار آلودگی (میلیون ریال در سال)		درصد حذف بار آلودگی		نام منبع آلاینده	
	بازار (۱)	بازار (۲)	بازار (۱)	بازار (۲)	بازار (۱)	بازار (۲)		
-	-	-	-	۲۲۸	۲۲۸	۹۵	۹۵	SI
-	-	-	-	۱۱۴۱	۱۱۴۱	۹۵	۹۵	RI
فروشنده	-	۶	-	۱۴	۱۶۱۹	-	۷۰	KF
فروشنده	فروشنده	۵۸	۵۸	۱۷۰	۱۶۲۰۶	۹۵	۹۵	RT
فروشنده	فروشنده	۹	۷	۱۷	۲۳۹۷	-	۹۵	SK
فروشنده	فروشنده	۳۹	۳۳	۷۴	۷۰۷۶	-	۹۵	LJ
فروشنده	فروشنده	۲۴	۲۰	۳۸	۳۶۵۲	-	۹۵	AA
-	-	-	-	۵۷۱	۵۷۱	۹۵	۹۵	AI
فروشنده	فروشنده	۲۸	۲۳	۲۶	۳۷۶۶	-	۹۵	KB
فروشنده	فروشنده	۱۱	۹	۱۰	۱۳۷۰	-	۹۵	KS
خریدار	خریدار	۱۷۵	۱۴۹	۲۸۰۸۰	۳۰۹۶۰	۳۹	۴۳	AG
				۳۰۳۷۰	۶۸۹۸۵			مجموع

ملاحظه هزینه‌های آن خواهد شد. در این شرایط می‌توان انتظار داشت که افزایش رشد جمعیت و حجم پساب تخلیه شده شهری، امکان تأمین مجوز مورد نیاز در سال‌های آتی را نیز فراهم نماید. حتی در برخی حوضه‌ها نظیر رودخانه قره‌سو می‌توان شاهد رشد میزان صرفه‌جویی هزینه نیز بود که بیانگر اعتمادپذیری بالای سیستم پیشنهادی است.

این نکته بایستی مدنظر قرار گیرد که انتقال پساب از تصفیه‌خانه به زمین‌های زراعی می‌تواند از طریق خرید و فروش پساب در یک بازار مجزا و یا همگام با بازار مجوز انتشار آلودگی صورت پذیرد. در حالت دوم، انتظار می‌رود که دو کالا در بازار مشترک به طور هم‌زمان به فروش رسیده (مجوز و پساب برگشتی) و تعاملات اقتصادی گسترده‌تر و پیچیده‌تر گردد. مشخصاً در این ساختار، فروشندگان مجوز و پساب، قیمت بازار را با توجه به میزان تقاضا که در طول فصول سال متفاوت خواهد بود تنظیم خواهند نمود. همچنین برای دستیابی به شرایط و انعطاف‌پذیری مناسب بازار پیشنهاد می‌شود در طراحی و ارتقای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری بازنگری صورت پذیرد زیرا این تصفیه‌خانه‌ها واحد اصلی تولیدکننده بازار بوده و برای دستیابی به شرایط بهینه اقتصادی لازم است تولیدات خود را که پساب و مجوز است، متناسب با نیاز متغیر و فصلی بازار به‌ویژه منبع آلاینده غیر نقطه‌ای تنظیم نمایند و به صورت یکپارچه با نیاز زیست‌محیطی و کیفی منابع آبی پذیرنده طراحی و اجرا شوند (Molinos-Senante, 2014). این بدان معنی است که الگوی تجارت کیفیت آب می‌تواند با در نظر گرفتن انگیزش‌های اقتصادی، محدودیت‌های زیست‌محیطی و قابلیت اجرایی، ساختاری یکپارچه برای طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های تصفیه پساب فراهم می‌کند به طوری که به‌عنوان یکی از مراحل ارزیابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای ارتقا و بهسازی به شمار می‌رود. این پژوهش می‌تواند با در نظر گرفتن سایر پارامترهای کیفی نظیر BOD، فسفر یا اکسیژن

از طرفی در صورتی که پساب تصفیه شده شهری حاوی مقادیر بالای مواد مغذی و ترکیبات نیتروژن به‌جای تخلیه مستقیم به منبع آب پذیرنده برای آبیاری زمین‌های زراعی استفاده شود معادل این خواهد بود که از انتشار ۱۰۰٪ پساب شهری حاوی نیتروژن بدون صرف هزینه هنگفت تصفیه ممانعت به عمل آمده است؛ بنابراین ظرفیتی مازاد با حداقل هزینه برای تجارت ایجاد خواهد شد که می‌تواند منجر به کاهش معایب و نقاط ضعف بازار ناشی از کمبود عرضه مجوز شود. لذا به نظر می‌رسد سه‌ذی‌نفع اصلی در بازیافت پساب، یعنی شرکت‌های آب و فاضلاب به‌عنوان تولیدکننده، کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده و محیط‌زیست از منافع بازیافت پساب شهری بهره‌مند خواهند شد.

همان‌طور که در سناریو بازار شماره ۲ در جدول ۳ نشان داده شده است، پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها بدون احداث واحدهای تصفیه تکمیلی و تنها با صرف هزینه ناچیز انتقال پساب قادر خواهند بود تعداد مجوزهای موجود را حداکثر تا ۱۷۵ واحد افزایش دهند. افزایش تعداد مجوزهای موجود می‌تواند نیاز بخش کشاورزی به خرید آب برای رقیق‌سازی یا پرداخت جریمه زیست‌محیطی را به همان نسبت کاهش داده و با حذف هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری، مجموع هزینه‌ها به ۳۰۳۷۰ میلیون ریال در سال کاهش یابد. این رقم معادل صرفه‌جویی ۵۷٪ هزینه‌های کل در همان حوضه‌ای است که مطابق سناریو اول، استفاده از بازار متعارف مجوز در برآورد انگیزش اقتصادی ناتوان گزارش شده است. به‌طور مشابه نتایج مطالعات پیشین در شرایط رودخانه قره‌سو نشان داده است که استفاده از بازیافت پساب در زمین‌های زراعی منجر به کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در کاهش بار نیتروژن تا ۶۳٪ خواهد شد (Jamshidi, et al. 2014)؛ بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که کاهش هزینه‌های حاشیه‌ای کنترل انتشار آلودگی از طریق بازیافت پساب تصفیه شده حاوی مواد مغذی، انعطاف‌پذیری بیشتری به بازار مجوز انتشار آلودگی می‌دهد و منجر به کاهش قابل

پیشنهاد می‌شود نقش توابع جریمه‌های تخطی زیست محیطی (صابری، ۱۳۹۳) و یا سایر عوامل محدود کننده بازار مجوز انتشار آلودگی نظیر قابلیت های اجرایی و اقتصادی (Ribaud and Savage, 2014) و همچنین سایر روش‌های غیر سازه‌ای بهبود کیفیت آب در تعامل با بازار مجوز تحلیل گردد (جابری، ۱۳۹۳).

محلوس بسط و توسعه یافته و تعاملات بازار در این ساختارهای ترکیبی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین مطالعات اقتصادی با در نظر گرفتن ضرایب تعدیل و قیمت توافقی می‌تواند در مطالعات آتی و حتی در چارچوب روش‌های چانه‌زنی و نظریه بازی‌ها نیز مورد بحث و بررسی قرار گیرد (Niksokhan, et al. 2009b). به‌علاوه

جدول ۴. قیمت‌گذاری و ارزیابی بازار مجوز انتشار بار نیتروژن در شرایط متعارف (سناریو ۱)

میزان صرفه‌جویی هزینه نسبت به TMDL (%)	هزینه تصفیه و مبادلاتی		هزینه مبادلاتی با ضرایب سوددهی متفاوت (فروش با علامت منفی و خرید با علامت مثبت)				$L_t$	هزینه تصفیه (جدول ۳)	هزینه کاهش آلودگی TMDL	منبع آلاینده	
	حالت (۱)	حالت (۲)	$TC(2)_j$	$TC(1)_j$	$T_t(2)$	$T_t(1)$					$K_t(2)$
-	-	۲۲۸	۲۲۸	-	-	-	-	-	۲۲۸	۲۲۸	SI
-	-	۱۱۴۱	۱۱۴۱	-	-	-	-	-	۱۱۴۱	۱۱۴۱	RI
-	-	۱۶۱۹	۱۶۱۹	-	-	-	-	-	۱۶۱۹	۱۶۱۹	KF
۳	-۲	۱۲۳۹۵	۱۳۰۳۱	-۳۸۱۱	-۳۱۷۶	۱/۲	۱	۵۸	۱۶۲۰۶	۱۲۷۷۴	RT
۳/۵	-۶/۶	۱۸۲۲	۲۰۱۴	-۵۷۵	-۳۸۳	۱/۵	۱	۷	۲۳۹۷	۱۸۸۹	SK
۶	۶	۵۲۶۹	۵۲۶۹	-۱۸۰۷	-۱۸۰۷	۱	۱	۳۳	۷۰۷۶	۵۵۷۷	LJ
۵	۱۱	۲۷۲۱	۲۵۵۹	-۹۳۱	-۱۰۹۵	۰/۸۵	۱	۲۰	۳۶۵۲	۲۸۷۹	AA
-	-	۵۷۱	۵۷۱	-	-	-	-	-	۵۷۱	۵۷۱	AI
۷	۱۶	۲۷۵۹	۲۵۰۷	-۱۰۰۷	-۱۲۵۹	۰/۸	۱	۲۳	۳۷۶۶	۲۹۶۹	KB
۷	۱۹	۱۰۰۰	۸۷۷	-۳۷۰	-۴۹۳	۰/۷۵	۱	۹	۱۳۷۰	۱۰۷۹	KS
۰/۴	۱/۱	۳۹۴۶۰	۳۹۱۷۳	+۸۵۰۰	+۸۲۱۳	-	۱	۱۴۹	۳۰۹۶۰	۳۹۶۰۰	AG
٪۲	٪۲	۶۸۹۸۵	۶۸۹۸۵	-	-				۶۸۹۸۵	۷۰۳۲۶	مجموع

است که سودآوری منبع آلاینده غیر نقطه‌ای (تنها خریدار مجوز) حداقل باشد تا انگیزه لازم برای مشارکت در بازار فراهم آید. بدین ترتیب، تعرفه هر واحد کیلوگرم بار تخلیه شده روزانه (هر مجوز) ۱۵۰ هزار ریال فرض شده است. به عنوان مثال، منبع آلاینده SK و LJ به ترتیب با فروش ۷ و ۳۳ واحد مجوز (بدون لحاظ ضریب سوددهی) می‌توانند

حال به منظور بررسی مقایسه‌ای و تحلیلی و تعاملات بازار مجوز انتشار آلودگی در دو سناریو، در جداول ۴ و ۵، مجموع هزینه‌های تصفیه و مبادلاتی مطابق رابطه ۷ و به تفکیک و ترتیب مراحل محاسبه شده است. پیش از انجام محاسبات و مطابق شرط مذکور در رابطه ۷، مقدار تعرفه پایه مجوز انتشار آلودگی در بازار ۱ به گونه‌ای تعیین شده

خواهد خورد. در این شرایط، سایر منابع آلاینده که در حال حاضر سودآوری مثبت دارند می توانند مجوز خود را با ۱۵ تا ۲۵٪ تخفیف ( $K_r$ ) بفروشند تا این امکان فراهم آید منابع متضرر با افزایش هزینه مبادلاتی مجوز خود تا ۲۰ و ۵۰ درصد به سودآوری مطلوب و حداقلی برسند. همان طور که در حالت (۲) جدول ۴ نشان داده شده است، با تغییر ضریب سوددهی و تخفیف هر منبع آلاینده، مجموع هزینه مبادلاتی به گونه ای تغییر کرده است که نهایتاً سودآوری (صرفه جویی) تمامی منابع آلاینده فروشنده مجوز تقریباً یکنواخت و مثبت شده است. در این شرایط، مجموع هزینه ها ثابت است اما با این ضریب، رضایت حداقلی تمامی منابع آلاینده برای مشارکت در بازار فراهم شده است. باید توجه داشت تغییر این ضرایب در طول زمان می تواند مشارکت فعال را کاهش دهد. شکنندگی تعاملات در بازار شماره (۱) می تواند با نتایج بازار شماره (۲) مقایسه گردد.

سالانه ۳۸۳ و ۱۸۰۷ میلیون ریال درآمد داشته باشند. کسر این میزان درآمد از مجموع هزینه های ساخت و بهره برداری واحدهای تصفیه این منابع آلاینده منجر به کاهش مجموع هزینه مبادلاتی به ترتیب تا ۲۰۱۴ و ۵۲۶۹ میلیون ریال در سال خواهد شد. این میزان در مقایسه با مجموع هزینه های ساخت و بهره برداری در شرایط TMDL (بدون بازار) برای منبع SK ۶/۶ درصد ضرر و ۶ درصد سودآوری برای منبع LJ به همراه خواهد داشت؛ بنابراین نتایج حاکی از آن است که مشارکت منبع SK در بازار مجوز در حالت (۱) و بدون در نظر گرفتن ضرایب سوددهی، سودمند نبوده و باعث ترک این ذینفع از بازار خواهد شد. بالطبع خروج منبع آلاینده SK و RT به دلیل ضرر احتمالی در بازار مجموعاً باعث عدم تأمین ۶۵ واحد مجوز مورد نیاز خواهد شد. این بدان معناست که به دلیل محدودیت تأمین مجوز از سایر منابع، بخش کشاورزی باید به همین میزان هزینه بیشتری برای رقیق سازی زهاب خود پردازد و در نتیجه سودآوری اقتصادی بازار کاهش خواهد یافت و شکست

جدول ۵. قیمت گذاری و ارزیابی بازار پساب و مجوز انتشار بار نیتروژن در شرایط بازار ترکیبی (سناریو ۲)

میزان صرفه جویی هزینه نسبت به TMDL (%)	هزینه تصفیه و مبادلاتی $TC_j$ (علامت منفی نشان دهنده درآمد خالص است)	هزینه مبادلاتی با ضرایب سوددهی ثابت برای مجوز و پساب (فروش: - و خرید: +)				$L_r$	$L_t$	منبع آلاینده
		$T_r$	$T_t$	$K_r$	$K_t$			
-	۲۲۸	-	-	-	-	-	-	SI
-	۱۱۴۱	-	-	-	-	-	-	RI
۱۰۳	-۵۲	-۶۶	-	۱	-	۶	-	KF
۱۲۴	-۳۰۰۶	۰	-۳۱۷۶	۱	۱	۰	۵۸	RT
۱۲۱	-۳۸۸	-۲۲	-۳۸۳	۱	۱	۲	۷	SK
۱۳۲	-۱۷۹۸	-۶۶	-۱۸۰۷	۱	۱	۶	۳۳	LJ
۱۳۸	-۱۱۰۱	-۴۴	-۱۰۹۵	۱	۱	۴	۲۰	AA
-	۵۷۱	-	-	-	-	-	-	AI
۱۴۳	-۱۲۸۸	-۵۵	-۱۲۵۹	۱	۱	۵	۲۳	KB
۱۴۷	-۵۰۵	-۲۲	-۴۹۳	۱	۱	۲	۹	KS
۸	۳۶۵۶۶	+ ۲۷۴	+ ۸۲۱۳	۱	۱	۲۶	۱۴۹	AG
۵۷٪	۳۰۳۷۰	-	-					مجموع

مقادیر مازاد مجوز فراهم شده از طریق فروش پساب ( $L_r$ ) در جدول ۵ نشان داده شده است و این مقادیر می‌تواند با تعرفه‌ای متفاوت ( $R$ ) از مجوز به فروش برسد. این تعرفه مشابه تعرفه  $P_r$  محاسبه شده و رقم آن ۳۰ هزار ریال در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، در بازار شماره (۲) از آنجایی که هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از واحدهای تصفیه تکمیلی تقریباً حذف می‌شود و با ایجاد درآمد ناشی از فروش پساب و مجوز، مقدار هزینه‌های کل تصفیه و مبادلاتی معکوس شده و به درآمد خالص (نشان داده شده با علامت منفی در جدول ۵) تبدیل می‌شود. در این شرایط، مقدار صرفه جویی منابع آلاینده فروشنده مجوز و پساب بیش از ۱۰۰ درصد شده و کشاورزی نیز می‌تواند سودآوری بیشتری نسبت به بازار (۱) داشته باشد. سودآوری بالای منابع آلاینده نقطه‌ای این امکان را فراهم می‌سازد تا فروشندگان مجوز بتوانند برای کمک به بخش کشاورزی، تخفیف قابل ملاحظه‌ای در تعرفه‌های مجوز اعمال نمایند. به عنوان مثال، کاهش ۹۹٪ تعرفه مجوز تا ۱۵۰۰ ریال نیز همچنان برای منابع آلاینده نقطه‌ای سودآوری صد درصد را به همراه خواهد داشت اما صرفه جویی هزینه در بخش کشاورزی می‌تواند تا ۲۸٪ افزایش یابد. انعطاف پذیری بالای بازار ترکیبی قطعاً مزیت این سناریو را نسبت به بازار متعارف نمایان می‌سازد.

لازم به ذکر است موفقیت بازار مشترک پساب و مجوز منوط به ایجاد انعطاف لازم در حوضه آبریز، بازار مبادلات و شرایط بهره‌برداری مناسب از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است. مطالعات اخیر در محدوده پائین دست رودخانه سفیدرود به روش‌های نوینی اشاره می‌کند تا بازار مجوز انتشار آلودگی و پساب با چالش کمتری مواجه شده و کارایی آن افزایش یابد. به عنوان مثال، احداث سازه‌هایی به منظور هوادهی مصنوعی در طول رودخانه و یا بهره‌مندی از فرآیند گیاه‌پالایی در نقاط معین می‌تواند ضمن افزایش قابلیت خود پالایی، ظرفیت مازاد برای تجارت فراهم آورد؛ بنابراین پیشنهاد شده است این روش بیشتر در

رودخانه‌های دائمی، با آب و هوای معتدل، با محدودیت در کاهش بار آلودگی در مراکز آلاینده و برای بازارهای مجوز مبتنی بر پارامتر BOD انجام پذیرد. در این شرایط استفاده از بازار ترکیبی مجوز انتشار و پساب می‌تواند به طور موازی و در صورت امکان با تمرکز بر کنترل نیتروژن صورت پذیرد (Jamshidi, et al. 2015b). همچنین به منظور کنترل جامع کیفی منابع آب سطحی مبتنی بر دو پارامتر BOD و نیتروژن، نشان داده شده است در منطقه سفیدرود و به دلایل اجرایی و عملیاتی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، امکان تأمین مجوز کافی و یا اقتصادی بدین منظور وجود ندارد. لذا پیشنهاد می‌شود از پارامتر اکسیژن محلول به عنوان شاخص بازار و مبادلات استفاده گردد. در این شرایط، به طور مثال اگر مراکز آلاینده قادر به کاهش نیتروژن نباشند، می‌توانند با کاهش بیشتر غلظت BOD، سهم خود را در بازار مبتنی بر پارامتر ثالث، یعنی اکسیژن محلول، رعایت نمایند. علیرغم امکان موفقیت این روش، پیشنهاد می‌شود به خاطر عدم قطعیت بالا و پیچیدگی در بهره‌برداری و اجرای بازار، این روش صرفاً برای مناطق و حوضه‌های کوچک و با حداقل کاربری غیر نقطه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در این شرایط، همچنان استفاده از بازار یکپارچه مجوز و پساب می‌تواند برای این ساختار انعطاف پذیری لازم و امکان کاهش هزینه بیشتر را فراهم آورد (Jamshidi and Niksokhan, 2015). با وجود قابلیت‌های بازار ترکیبی پساب و مجوز، همچنان تأکید می‌شود تخصیص مجوز و بار آلودگی در ساختار بازار ترکیبی به صورت فصلی تعیین گردد. این بدان علت است که بخش کشاورزی به عنوان خریدار مجوز، نیاز فصلی و متغیر به آب، مواد مغذی و بالطبع مجوز دارد. در نتیجه، عدم کنترل صحیح پساب می‌تواند منجر به آلودگی رودخانه در فصول غیر کشت گردد؛ بنابراین پیشنهاد شده است در طراحی واحدهای تصفیه‌خانه و انتخاب فرآیند، نکات اجرایی و عملیاتی مربوط به نیاز متغیر بخش کشاورزی مدنظر قرار گیرد و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

آسیب پذیری بازار و احتمال شکست آن افزایش خواهد یافت و نشان داده شد که بازار متعارف مجوز در حوضه سفیدرود، برخلاف رودخانه قره سو، نمی تواند دستاورد اقتصادی قابل ملاحظه‌ای به همراه داشته باشد. هرچند در این بازار نشان داده شد که در شرایطی که با تغییر ضرایب سوددهی می توان تعادل را به صورت اجباری در بازار متعارف کنترل نمود. هرچند به منظور کاهش نقاط ضعف موجود در بازار متعارف، در این پژوهش، رویکرد نوین ترکیب بازار مجوز انتشار آلودگی و فروش پساب حاوی مواد مغذی در دو حوضه سفیدرود و قره سو به عنوان سناریو دوم بررسی شد و نشان داد که فروش پساب می تواند با کاهش هزینه‌های حاشیه‌ای، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در بازار ایجاد نموده و با افزایش عرضه، انعطاف پذیری لازم را برای بازار جهت قیمت گذاری و ایجاد انگیزش‌های اقتصادی فراهم آورد؛ بنابراین دیگر لزومی به کنترل قیمت مجوز بازار وجود نداشته و شرایط بازار آزاد برای تعامل و کسب سود بهینه فراهم می‌گردد.

به صورت انعطاف پذیر در عملیات طراحی و اجرا شوند؛ بنابراین انتخاب تخصیص بهینه بار آلودگی در هر منطقه می تواند در یک ساختار نظریه بازی با هدف شناسایی راهکار مناسب و تعرفه بهینه مجوز صورت پذیرد.

#### ۴. نتیجه گیری

تجارت کیفیت آب راهکاری اقتصادی و گزینه ای مبادله پذیر و جایگزین برای مدیریت کیفی منابع آب به شمار می‌رود. در این پژوهش، نشان داده شده است که استفاده از بازارهای مجوز انتشار آلودگی می تواند ضمن کاهش هزینه های کل مرتبط با انتشار بار آلودگی، به بهبود کیفیت آب منتهی شود. در ساختار پیشنهادی، فرصت و گزینه ای فراهم می‌شود تا منابع آلاینده غیر نقطه‌ای، نظیر بخش کشاورزی، بجای ساخت و راهبری سامانه های زهکشی و تصفیه‌خانه‌های پیچیده، از مجوزهای موجود در بازار برای تأمین الزامات زیست محیطی خود و کاهش هزینه‌های مربوط به آن استفاده نمایند. با این وجود، در اینجا به دلیل محدودیت در کاهش بار آلودگی توسط منابع آلاینده نقطه ای و عدم تعادل مناسب عرضه و تقاضای مجوز،

#### منابع

- جابری، ه.، ۱۳۹۳. توسعه مدل تخصیص بار دو هدفه در سامانه رودخانه ای با رویکرد تجارت مجوز تخلیه، اساتید راهنما: دکتر موسوی جهرمی و نیک سخن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
- جعفری، ع.، طاهریون، م.، یاور، ا.، باغوند، ا. ۱۳۸۸. تجارت آلودگی به روش مجوزهای تخلیه قابل مبادله در رودخانه و ارزیابی آن از نظر کارایی هزینه، فصلنامه محیط‌شناسی، سال سی و پنجم، ۵۱، صص ۱۰۱ - ۱۱۰.
- جمشیدی، ش.، محجوبی، ع.، اردستانی، م. ۱۳۹۴. امکان سنجی بازار مجوز انتشار آلودگی در رودخانه، مجله زمین شناسی ایران، دانشگاه شهید بهشتی، در دست چاپ.
- سارنگ، ا.، محجوبی، ع.، اردستانی، م.، نیک سخن، م. ح. ۱۳۹۳. راهنمای ارزیابی تجارت کیفیت آب، چاپ اول، انتشارات خانیران، تهران
- سازمان حفاظت محیط زیست (۱۳۸۹)، مطالعات پیشگیری، کنترل و کاهش آلودگی رودخانه سفیدرود، مطالعات تجزیه و تحلیل داده های آلودگی منابع آب، جلد سوم: مدل سازی کیفی رودخانه و بررسی وضعیت خود پالایی رودخانه سفیدرود.
- صابری، ا. ۱۳۹۳. تخصیص بار آلودگی با رویکرد حل اختلاف در تصمیم گیری چندمعیاره، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده محیط زیست، اساتید راهنما: دکتر نیک سخن و سارنگ، دانشگاه تهران

- Adewumi, J.R., Ilemobade, A.A. and van Zyl, J.E. 2010 Decision support for the planning of integrated wastewater reuse projects in South Africa, *Water Science and Technology: Water Supply*, 10(2), 251-267.
- Axelrad, G. and Feinerman, E. 2009 Regional planning of wastewater reuse for irrigation and river rehabilitation, *Journal of Agricultural Economics*, 60(1), 105-131.
- Boyd, B., and Greenwood, R. 2005. Water quality trading: Assessment methods and lessons, *Environmental Quality Management*, 14(14), 23-29.
- Caplan, A. J. and Sasaki, Y. 2014. Benchmarking an optimal pattern of pollution trading: The case of Cub River, Utah, *Economic Modelling*, 36, 502-510.
- Collentine, D. 2005. Including non-point sources in a water quality trading permit program, *Water science and technology*, 51(3-4), 47-53.
- Corrales, J., Melodie Naja, G., Bhat, M. G. and Miralles-Wilhelm, F. 2014. Modeling a phosphorous credit trading program in an agricultural watershed, *Journal of Environmental Management*, 143, 162-172.
- Doyle, M. W., Patterson, L. A., Chen, Y., Schneir, K. and Yates, A. J. 2014. Optimizing the scale of markets for water quality trading, *Water Resources Research*, 50(9), 7231-7244.
- Eheart, J. W. 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), 2004, 615-621.
- Feizi Ashtiani, E., Niksokhan, M.H. and Jamshidi, S. 2015. Equitable Fund Allocation, an Economical Approach for Sustainable Waste Load Allocation, *Environmental Monitoring and Assessment*, pp. 187:522, DOI 10.1007/s10661-015-4739-4
- Ghosh, G., Ribaud, M. and Shortle, J. 2011. Baseline requirements can hinder trades in water quality trading programs: Evidence from the Conestoga watershed, *Journal of environmental management*, 92, 2076-2084.
- Horan, R. D. and Shortle, J. 2011. Economic and ecological rules for water quality trading, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 47(1), 59-69.
- Jamshidi, S., Ardestani, M. and Niksokhan, M.H. 2015a. Seasonal Waste Load Allocation Policy within Integrated Discharge Permits and Reclaimed Water Market, *Water Policy*, in press, DOI:10.2166/wp.2015.30120.
- Jamshidi, S. and Niksokhan, M.H. 2015. Multiple Pollutant Discharge Permit Markets, A Challenge for Wastewater Treatment Plants, *Journal of Environmental Planning and Management*, in press. DOI 10.1080/09640568.2015.1077106
- Jamshidi, S., Niksokhan, M.H. and Ardestani, M. 2014. Surface Water Quality Management Using Integrated Discharge Permit and Reclaimed Water Market, *Water Science and Technology*, 70(5), 917-924.
- Jamshidi, S. Niksokhan, M.H. Ardestani, M. and Jaber, H. 2015b. Enhancement of Surface Water Quality Using Trading Discharge Permits and Artificial Aeration, *Environmental Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s12665-015-4663-5.
- 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.
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R. and Pelletier, G. J. 2007. Application of automated Qual2kw for water quality modelling and management in the Bagmati River, Nepal, *Ecological Modelling*, 202, 503-517.
- Kardos, J. S. and Obropta, C. C. 2011. Water quality model uncertainty analysis of a point-point source phosphorous trading program, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 47(6), 1317-1337.
- Mesbah, S. M., Kerachian, R. and Torabian, A. 2010. Trading pollutant discharge permits in rivers using fuzzy nonlinear cost functions, *Desalination*, 250(1), 313-317.
- Molinos-Senante, M. 2014. Water rate to manage residential water demand with seasonality: peak-load pricing and increasing block rates approach, *Water Policy* 16(5), 930-944.
- Newburn, D. A. and Woodward, R. T. 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.
- Niksokhan, M. H., Kerachian, R. and Amin, P. 2009a. A stochastic conflict resolution model for trading pollutant discharge permits in river systems, *Environmental Monitoring and assessment*, 154, 219-232.



- Niksokhan, M. H., Kerachian, R. and Karamouz, M. 2009b. A game theoretic approach for trading discharge permits in rivers, *Water Science and Technology*, 60(3), 793-804.
- Obropta, C. C., Niazi, M. and Kardos, J. S. 2008. Application of an environmental decision support system to a water quality trading program affected by surface water diversions, *Environmental Management*, 42, 946-956.
- 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 (JAWRA)*, 47(1), 39-51.
- Ranga Prabodanie, R. A., Raffensperger, J. F. and Milke, M. W. 2010. A pollution offset system for trading non-point source water pollution permits, *Environmental and Resource Economics*, 45, 499-515.
- Ribaudo, M. O. and Gottlieb, J. 2011. Point-Nonpoint Trading – Can it Work?, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 47(1), 5-14.
- Ribaudo, M. O. and Nickerson, C. J. 2009. Agriculture and Water Quality Trading: Exploring the Possibilities, *Journal of Soil and Water Conservation* 64(1), 1-7. doi: 10.2489/jswc.64.1.1
- Ribaudo, M. 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.
- Roberts, A. M. and Craig, R. K. 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.
- Sarang, A., Lence, B. J. and Shamsai, A. 2008. Multiple Interactive Pollutants in Water Quality Trading, *Environmental Management*, 42, 620-646.
- USEPA 2004. Water quality trading assessment handbook, 1-120.
- Wainger, L. A. and Shortle, J. S. 2013. Local Innovations in Water Protection: Experiments with Economic Incentives, *Choices* 28(3), 1-6.
- Wittmann, N. 2014. A note on distortional distributional effect in river basin discharge permits trade, *Water Resource Management*, 28(1), 279-285.