

# تعیین آلودگی کل مجاز رودخانه و تخصیص بار آلودگی براساس تغییرات فصلی، الگوی برای استانداردسازی و پایش چندپارامتره و محلی کیفیت آب

منوچهر حیدرپور<sup>۱</sup>، شروین جمشیدی<sup>۲\*</sup>

heidar@cc.iut.ac.ir

۱. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۳

## چکیده

یک چالش برای تعیین حداکثر مجاز انتشار آلودگی رودخانه وجود نوسانات کمی و کیفی فصلی ناشی از فعالیت‌های زراعی است. این پژوهش با استفاده از مدل Qual2k و شبیه‌سازی رودخانه تبحر نشان می‌دهد چگونه می‌توان حداکثر بار آلودگی و غلظت مجاز پارامترها، مؤلفه کلیدی پایش، میزان خودپالایی و تخصیص بهینه بار آلودگی را در شرایط نوسانات فصلی تعیین کرد. مطابق بررسی‌های به‌عمل‌آمده و به‌منظور حفظ شرایط زیستی سالانه آبیان، برآورد شد مجموعاً ۴۵۰۰ تن COD و ۲۵۰۰ تن نیتروژن کل ظرفیت نهایی بار آلودگی در دهانه رودخانه بوده و در این شرایط استاندارد غلظت مجاز پارامترهای COD، نیتروژن و فسفر کل در به ترتیب ۵، ۹ و ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر تعیین می‌شود. همچنین میزان خودپالایی رودخانه در کاهش بار نیتروژن، فسفر و COD در مسیر جریان به ترتیب ۶، ۹ و ۵۰ درصد برآورد شده که باعث می‌شود سهم آلودگی نقطه پایش از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای در مسیر رودخانه به نسبت مخزن بالادست برای انتشار ترکیبات نیتروژن و فسفر بیش از ۸۰ درصد و برای COD تنها ۲۰ درصد باشد. بنابراین برای بهسازی کیفی رودخانه توصیه می‌شود با مدیریت مزرعه و کاهش ۴۵ درصد بار آلودگی مواد مغذی از زهاب‌های کشاورزی، غلظت مجاز اکسیژن محلول برای حفظ آبیان رعایت شود.

## کلیدواژه

تخلیه مجاز، حداکثر بار آلودگی، خودپالایی رودخانه، کیفیت آب، مدل‌سازی.

## ۱. سرآغاز

محور، درصد ترکیبات تخلیه شده و حداکثر آلودگی مجاز پس‌اب منابع آلاینده (به‌ویژه نقطه‌ای) توسط سازمان قانون‌گذار (مانند سازمان حفاظت محیط‌زیست) و براساس استانداردهای مرجع جهانی به‌صورت پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شود و در صورت تجاوز ترکیبات آلاینده از مقدار مجاز، آن منبع آلاینده مشمول جریمه خواهد شد (Baldwin et al., 2011). این روش برای کنترل و ثبت جرائم زیست‌محیطی منابع آلاینده نقطه‌ای با جریان پیوسته، مانند شهرهای بزرگ و کارخانه‌های صنعتی، نسبتاً ساده

با گسترش فعالیت‌های انسان‌ساز در حاشیه رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، مدیریت و حفاظت کیفی منابع آب سطحی به چالشی زیست‌محیطی بدل شده است. بدین منظور رعایت ضوابط و استانداردهای مربوط به تخلیه بار آلودگی راهکاری قانونی برای کنترل این چالش به شمار می‌رود. این در حالی است که دو رویکرد کلی برای استانداردسازی، کنترل و پایش کیفی منابع آب سطحی در دنیا وجود دارد. در روش متعارف استانداردهای آلاینده

محیط مقدار دبی جریان را نیز به همراه غلظت آلودگی مدنظر قرار داد و بار آلودگی مجاز را برآورد کرد (Ferreira et al., 2011). با وجود این و به‌رغم مزایای این رویکرد نسبت به روش متعارف کنترل دستوری در خصوص پایش جامع منابع آلاینده به‌ویژه منابع غیرنقطه‌ای، سیاست‌گذاری همواره با عدم قطعیت ناشی از نوسانات دبی جریان رودخانه مواجه است. برای مثال نوسانات کمی و کیفی زهاب به‌صورت فصلی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی در دوره‌های کشت و غیرکشت باعث می‌شود جریان پایه در رودخانه و غلظت ترکیبات آلاینده همچون نیترژن و فسفر تغییر کرده و بار آلودگی در این دوره دچار تغییرات چشمگیری شود. برای نمونه در دو مطالعه جداگانه نشان داده شده است آثار این تغییرات و نوسانات کمی و کیفی جریان موجب می‌شود دریاچه و مخزن پایین‌دست رودخانه با مشکلات تغذیه‌گرایی و رشد جلبکی در دوره‌هایی از سال همراه شود (Garg et al., 2010; Xu et al., 2010). حال این پرسش مطرح می‌شود که حداکثر بار مجاز آلودگی در شرایط بروز نوسانات فصلی باید به‌صورت متوسط سالانه تدوین شده و یا براساس بدترین شرایط کیفی در سال تهیه شود. همچنین چگونه در شرایط وجود پارامترهای کیفی مختلف در آب، می‌توان حداکثر بار مجاز آن‌ها را بین منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای تعیین کرد.

رودخانه تجن در استان مازندران از نظر کیفی با مشکل کمبود اکسیژن محلول (DO) در پایین‌دست مواجه است که می‌تواند موجب مرگ و مهاجرت آبزیان شود (Saravi et al., 2015). این پدیده به‌ویژه در فصول گرم سال و در دوره کشت محصولات زراعی در مصب رودخانه گزارش شده است و پدیده‌ای ثابت به حساب نمی‌آید. در این راستا، برخی تمهیدات سازه‌ای برای هوادهی مصنوعی در محدوده شهر ساری در سال‌های اخیر در طرح‌های توسعه آن در نظر گرفته شده است (Sadeghi Azad, 2016) اما پژوهش‌های پیشین نشان داده است که روش‌های سازه‌ای

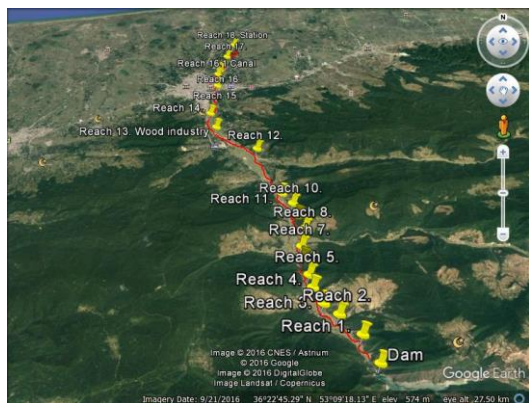
است و برای کنترل تخلیه آلودگی‌های تجمع‌پذیر و ریزآلاینده‌ها، مانند فلزات سنگین، استفاده می‌شود؛ اما دارای خلأهای اساسی است (Kostka, 2016). مهم‌ترین چالش این رویکرد، انطباق‌ناپذیر بودن استانداردها و حدود مجاز انتشار آلودگی با شرایط محلی و اجتماعی، نوسانات فصلی مصرف آب و انتشار آلودگی، و عدم لحاظ ظرفیت خودپالایی و میزان آسیب‌پذیری محیط است (Duncan, 2014; Malone, 2015). برای مثال، کنترل و پایش برخی شاخص‌های کیفیت آب مانند میزان اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD)، اکسیژن محلول آب (DO)، یا ترکیبات نیترژنی ممکن است به‌واسطه ظرفیت خودپالایی رودخانه متغیر باشد. کاستی دیگر این رویکرد نادیده انگاشتن اهمیت پایش آلودگی‌های منتشرشده از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای، مانند زمین‌های زراعی و مراتع دامی، است که علیرغم غلظت پایین ترکیبات آلاینده متعارف کیفی آب می‌تواند به‌صورت فصلی و با حجم زیاد در راستای رودخانه به محیط آبی تخلیه شده و به انتشار آلودگی فراوانی منجر شوند و آثار آن از جمله پدیده تغذیه‌گرایی تا مدت‌ها در محیط باقی مانده و موجب تهدید زندگی آبزیان و تخریب زیست‌بوم شود (Sun et al., 2012; Imani et al., 2017). بنابراین در سالیان اخیر رویکرد جدیدی برای پوشش این نقصان‌ها برای تنظیم استانداردها به‌صورت محیط‌محور مدنظر قرار گرفته است.

در رویکرد دوم، استانداردهای کیفی آب متناسب با نوع مصرف در محیط پذیرنده و با توجه به توان‌زیستی رودخانه‌ها برآورد می‌شود. بدین منظور می‌بایست در گام نخست در محدوده مورد مطالعه حداکثر ظرفیت مجاز تخلیه آلودگی از تمامی منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای پس از گردآوری اطلاعات و شبیه‌سازی تخمین زده شود (Field & Field, 2017). در این رویکرد، از آنجایی که هدف شناسایی حداکثر بار آلودگی مجاز در نقاط حساس و کلیدی جریان همچون محل‌های تخم‌ریزی ماهیان در دهانه رودخانه است، می‌توان ضمن لحاظ آثار خودپالایی

## ۲. مواد و روش بررسی

### ۱.۲. محدوده مورد مطالعه

در این تحقیق، رودخانه تجن حد فاصل پایاب سد شهید رجایی تا مصب دریا در استان مازندران به طول تقریبی ۵۱ کیلومتر به عنوان محدوده مورد مطالعه برای بررسی حداکثر مجاز تخلیه بار آلودگی مدنظر قرار می‌گیرد. حوضه آبریز این رودخانه دائمی ۱۴۰ کیلومتر طول دارد و میزان متوسط دبی سالانه برای یک دوره آماری ۳۹ ساله منتهی به سال ۱۳۸۷ برابر ۱۴/۹ مترمکعب بر ثانیه و آورد سالانه آن ۴۶۰ میلیون مترمکعب تخمین زده شده است. این منطقه متشکل از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای متعددی است. منبع آلاینده غیرنقطه‌ای به طور مشخص فعالیت‌های شالی‌کاری و کشت برنج است که از حد فاصل سد شهید رجایی تا مصب رودخانه را شامل می‌شود و با وجود کشت غیرارگانیک سهم عمده‌ای در بین منابع آلاینده غیرنقطه‌ای دارد. از دیگر منابع آلاینده غیرنقطه‌ای می‌توان به باغ‌ها، روستاهای کم‌جمعیت، جنگل‌ها و مراتع اشاره کرد. منابع آلاینده نقطه‌ای مشرف به رودخانه در این بررسی شهر ساری و کارخانه‌های چوب و کاغذ، صنایع لبنی و آنتی‌بیوتیک‌سازی است (Sadeghi Azad, 2016).



شکل ۱. جانمایی بازه‌ها در نقشه ماهواره‌ای برای مدل‌سازی

### ۲.۲. متدولوژی انجام کار

در این پژوهش پس از اخذ اطلاعات کمی و کیفی محدوده مورد مطالعه از سازمان حفاظت محیط‌زیست استان و

هوادهی مصنوعی در احیای کیفی و افزایش ظرفیت خودپالایی رودخانه آثار ناچیزی دارند (Jamshidi et al., 2015). از طرفی توجه به این نکته ضروری است که اصولاً کاهش اکسیژن محلول و کیفیت آب پدیده‌ای است که از تخلیه آلودگی بیش از ظرفیت خودپالایی رودخانه نشأت می‌گیرد. مادامی که این معضل از سرمنشأ آن یعنی منابع آلاینده برطرف نشود نمی‌توان انتظار داشت احیای رودخانه به صورت پایدار صورت پذیرد. همچنین باید خاطر نشان کرد که آلودگی‌های مؤثر بر اکسیژن محلول رودخانه به شکل شاخص‌های کیفی مختلف مانند BOD و نیترژن هستند که از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای منتشر شوند. این موضوع بر پیچیدگی‌های مربوط به مدیریت تخلیه پساب در کنار نوسانات کمی و کیفی به صورت فصلی می‌افزاید. از این رو پاسخ به پرسش مطرح شده در این پژوهش یعنی شناسایی حداکثر بار مجاز تخلیه آلودگی به صورت چندپارامتره در شرایط بروز نوسانات کمی و کیفی فصلی می‌تواند زمینه‌ای برای ارائه گزینه‌های مدیریتی برای تخصیص بار آلودگی و بهبود شرایط در این محدوده فراهم آورد.

در این پژوهش با استفاده از اطلاعات کمی و کیفی رودخانه تجن به عنوان محدوده مورد مطالعه یک روش برای پاسخ به سؤالات فوق ارائه می‌شود. بدین صورت که نخست وضعیت کیفی رودخانه در فصول مختلف کشت و غیرکشت سنجیده شده و اثر این نوسانات بر میزان تخلیه بار آلودگی و پارامترهای کیفی تعیین می‌شود. نهایتاً براساس کلیدی‌ترین پارامتر کیفی و مؤلفه اثرگذار حداکثر بار آلودگی در نقطه اصلی پایش برآورد شده و بر این اساس سیاست‌گذاری برای تخصیص و کاهش بار آلودگی بین منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای و غلظت استاندارد پارامترها به صورت محلی برآورد می‌شود.

منحنی کمبود اکسیژن محلول در منابع آبی شده و به‌طور معمول شاخصی در مطالعات کیفی منابع آبی به‌شمار می‌رود. این شاخص نشان می‌دهد چگونه پارامترهای چندگانه کیفیت آب همچون BOD، ترکیبات نیتروژن و فسفر به‌عنوان شاخص‌های آلاینده به همراه دبی و سرعت جریان آب به‌عنوان مؤلفه‌های خودپالایی می‌تواند در ایجاد شرایط زیست‌آزبان اثرگذار باشد (Hounslow, 1995; Jamshidi & Niksookhan, 2016). از این مؤلفه در بسیاری از مطالعات و مدل‌سازی‌های کیفی شاخصی کمکی برای تصمیم‌گیری برای تخصیص بهینه بار آلودگی ذیل پارامتر BOD (Feizi Ashtiani et al., 2015) یا نیتروژن کل (Jamshidi et al., 2016a) استفاده شده است تا بر این اساس ضمن شناسایی ظرفیت خودپالایی رودخانه نگاه جامع‌تری به پارامترهای کیفی آب برای تدوین استانداردهای محیطی داشته باشد. در این مطالعه نیز از این پارامتر به‌عنوان یکی شاخص کلیدی در فرایند شبیه‌سازی استفاده شده است.

به‌طور کلی شبیه‌سازی رودخانه با هدف تخمین تغییرات متغیرهای کیفی آب است به‌نحوی که نتایج به دست آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی مشابه باشد. بدین منظور برای انجام مطالعات در مرحله شبیه‌سازی از نرم‌افزار Qual2k نسخه ۵ استفاده شده است (Pelletier et al., 2006). برخلاف مطالعات پیشین (Mehrdadi et al., 2006) در این مطالعه و برای افزایش دقت مدل، رودخان مجموعاً به ۱۸ بازه تقسیم شده و محاسبات شبیه‌سازی در مسیر جریان از بالادست به پایین دست است. در طی مرحله شبیه‌سازی و پس از واسنجی مدل با نتایج آزمایشگاهی، ضرایب هوادهی براساس مشخصات هیدرولیکی جریان برآورد شده است (جدول ۱). بدین منظور از روش رانگ - کوتا با دوره‌های محاسباتی ۵ دقیقه استفاده شده که نسبت به روش اوپلر از دقت بالاتری برخوردار است (Jamshidi et al., 2016b).

برای اینکه نتایج مدل و داده‌های نمونه‌برداری شده به

بررسی میدانی، منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای شناسایی شده و با توجه به اطلاعات کمی و کیفی پساب‌ها، میزان جمعیت محدوده‌های شهری و روستایی، ضرایب راهبردی و مقدار متوسط سطح زمین‌های زراعی، باغ‌ها و مراتع میزان بار آلودگی هریک از منابع آلاینده تعیین شد و به همراه مشخصات هیدرودینامیکی رودخانه برای شبیه‌سازی استفاده شد. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، ضمن شناسایی توان خودپالایی رودخانه، محل و پارامتر کلیدی پایش و تصمیم‌گیری برای تعیین حدود استاندارد کیفی محلی در این رودخانه مشخص شد و میزان حساسیت مدل به پارامترهای کیفی ناشی از تخلیه آلودگی از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای و مخزن بالادست نیز بررسی شد. در نهایت با تعیین حداکثر بار مجاز آلودگی در نقطه پایش، میزان تخصیص بار آلودگی از منابع آلاینده و غلظت مجاز هر یک از پارامترهای اصلی کیفی آب در این منطقه برآورد شد. این روش برای تعیین حداکثر بار مجاز آلودگی و غلظت آب رودخانه در ورودی دریاها و دریاچه‌ها می‌تواند به‌طور مشابه در دیگر محدوده‌های جغرافیایی نیز استفاده می‌شود.

### ۳.۲. شبیه‌سازی و واسنجی مدل

رودخانه‌های منتهی به دریا و دریاچه‌ها از ارزش اکولوژیکی ویژه‌ای برای آبزیان برخوردار هستند و انتقال آلودگی از بالادست می‌تواند وفق معادلات حاکم بر کیفیت آب رودخانه و دریاچه به تجمع تدریجی آلودگی و بروز پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی همچون تغذیه‌گرایی یا کاهش اکسیژن محلول آب منجر شود (Brooks et al., 2016). به‌طور کلی کاهش اکسیژن محلول آب (DO) در منابع آب سطحی از فعالیت‌های بیولوژیکی باکتری‌ها و موجودات زنده موجود در آب در طی فرایند تجزیه مواد آلی کربنی (BOD) و نیتروژنی و تبدیل آن‌ها به ترکیبات معدنی مانند دی‌اکسیدکربن و نیترات حاصل می‌شود. این فرایند مطابق فرمول‌های استریتر-فلیس منتهی به ترسیم

مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برای پارامترهای مختلف تقسیم بر میانگین آماری آنهاست (RMSE نسبی) که در ضرایب وزنی مربوط به هرکدام از آنها ضرب شده است. نحوه محاسبه RMSE نسبی به صورت رابطه ۱ قابل محاسبه است (Chapra et al., 2008).

$$RMSE_R = \frac{\left(\frac{\sum(O_{i,j} - P_{i,j})^2}{n}\right)^{0.5}}{\bar{O}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $O$  و  $P$  به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل بوده که مجموع مربعات اختلاف آنها بر تعداد داده‌ها تقسیم شده و بر متوسط داده‌های مشاهده‌ای تقسیم می‌شود.

یکدیگر نزدیک باشند و به اصطلاح واقعی سازی شود لازم است مدل واسنجی شود. واسنجی، نخستین مرحله در آزمون و وفق دادن مدل با مجموعه‌ای از داده‌های میدانی است. مدل Qual2k مجهز به واسنجی خودکار است که از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌نماید. بدین منظور و برای مطالعات حاضر میزان جمعیت و تعداد نسل‌های در حال تکامل در الگوریتم هرکدام ۱۰۰ واحد در نظر گرفته شده است. به علاوه نرخ جفت‌یابی که از نوع ۲ است و به صورت قابل تطبیق با تابع فیتنس در نظر گرفته شده است، مقادیر اولیه آن ۰/۰۰۵ است. تابع فیتنس در واقع معکوس حاصل جمع تمامی مقادیر

جدول ۱. مشخصات بازه‌های رودخانه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

شماره بازه	نام بازه	طول بازه (کیلومتر)	فاصله تا مصب دریا (کیلومتر)	شیب بازه (%)	عرض متوسط (متر)	ضریب هوادهی متوسط (در واحد روز)
۱	خروجی سد	۱/۳	۵۱	۰/۴۷	۱۶	۹
۲		۲/۴	۴۸/۶	۱	۱۳	۱۳/۷
۳		۱/۵	۴۷	۱	۱۷	۱۷/۱
۴		۱/۷	۴۵/۳	۱	۱۴	۱۴/۷
۵		۱/۳	۴۴	۱/۳	۱۵	۱۸/۳
۶		۱/۷	۴۲/۳	۰/۷۸	۱۶	۱۲/۹
۷		۱/۵	۴۰/۹	۱/۴	۲۰	۲۲/۸
۸	زرم‌رود	۱/۲	۳۸/۷	۱/۲	۳۲	۲۶/۵
۹	ایستگاه بالادست	۱/۵	۳۷/۲	۰/۳	۲۸	۹/۴
۱۰		۱/۷	۳۵/۶	۱/۱	۲۵	۲۲/۲
۱۱		۱/۶	۳۳/۹	۰/۶۷	۳۰	۱۶/۵
۱۲	گرم رود	۷/۴	۲۶/۶	۰/۸۲	۳۸	۲۱/۵
۱۳	کارخانه چوب و کاغذ	۵/۷	۲۰/۹	۰/۷	۴۶	۲۰/۶
۱۴	راهبند	۲/۸	۱۸/۱	۰/۵۸	۵۷	۲۰
۱۵	ایستگاه میانی	۶	۱۲/۱	۰/۵۸	۸۰	۲۳/۷
۱۶	ساری	۴/۱	۸	۰/۵۸	۳۹	۱۵/۶
۱۷		۳/۷	۴/۳	۰/۲۷	۵۲	۱۰/۳
۱۸	مصب رودخانه (نقطه پایش)	۴/۳	۰	۰/۲۵	۳۶	۷/۹

جدول ۲. متوسط مشخصات کیفی ایستگاه‌های نمونه‌برداری (mg/L) در دو دوره کشت و غیرکشت

شمارهٔ بازه	نام بازه	دوره	اکسیژن محلول	COD	آمونیم	نیترات	نیترژن کل	فسفات	pH
۹	بالادست	کشت	۶/۳	۲۰	۱/۶	۲/۶	۴/۶	۰/۳۵	۸/۱
		غیرکشت	۶/۱	۱۸	۰/۴	۱	۱/۵	۰/۰۳	۸
۱۵	میانی	کشت	۷	۱۳	۲/۳	۵/۴	۸	۰/۸	۸/۳
		غیرکشت	۷/۵	۱۱	۰/۴	۱/۱	۱/۵	۰/۰۴	۸
۱۸	مصوب رودخانه	کشت	۵/۵	۱۱	۲/۴	۶/۸	۹/۵	۱	۸/۲
		غیرکشت	۷/۲	۸/۵	۰/۴	۱/۲	۱/۶	۰/۰۵	۸

است. یعنی خروجی مدل تا ۷۱ درصد از دقت برخوردار است.

جدول ۳. مقدار خطای نسبی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در فصل کشت (واسنجی) و غیرکشت (صحت‌سنجی)

فصل	NO <sub>3</sub>	COD	DO
تابستان (کشت)	۰/۰۶۶	۰/۰۷۳	۰/۰۷۹
زمستان (غیرکشت)	۰/۱۰۱	۰/۰۸	۰/۰۶۱

#### ۴.۲. تعیین توان خودپالایی و حداکثر بار مجاز آلودگی

به‌منظور ارزیابی حداکثر بار مجاز تخلیهٔ آلودگی لازم است نخست پروفیل کیفیت آب شبیه‌سازی شده در رودخانه برای شاخص‌های اصلی ترسیم شده و بحرانی‌ترین نقطه بر این اساس شناسایی شود. در این نقطه با در اختیار داشتن دبی متوسط رودخانه و غلظت پارامترهای شبیه‌سازی شده در دو دوره کشت و غیرکشت می‌توان بار آلودگی بهینه سالانه و فصلی را برای حفظ زیست‌بوم تعیین کرد. همچنین با در اختیار داشتن مجموع بار آلودگی منتشر شده از منابع آلاینده و مقایسه آن با مجموع بار آلودگی موجود در انتهای مسیر رودخانه توان خودپالایی رودخانه قابل ارزیابی است. این ساختار به‌علاوه زمینه‌ای فراهم می‌سازد تا با ارزیابی و مقایسه تأثیر کاهش بار آلودگی در هر یک از منابع آلاینده (نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای) و بار آلودگی موجود در مخزن بالادست به تفکیک و با درصد مشابه، بر غلظت شاخص‌ها در نقطهٔ پایش نتیجه

با در اختیار داشتن مجموعه دادهٔ کیفی اندازه‌گیری شده در آب رودخانه، آن‌ها به دو زیرمجموعه برای استفاده در بخش واسنجی و صحت‌سنجی تقسیم می‌شوند به‌طوری‌که بخش اصلی برای واسنجی استفاده می‌شود (جدول ۲). پس از واسنجی مدل با اطلاعات اندازه‌گیری شده، می‌توان مدل را با استفاده از باقی ماندهٔ اطلاعات اندازه‌گیری شده، صحت‌سنجی کرد. یعنی بدون تغییر دادن پارامترهای واسنجی، مدل با شرایط جدید اجرا می‌شود. سپس با مقایسهٔ نتایج به دست آمده از مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده، می‌توان صحت عملکرد مدل را برای شرایط جدید بررسی و میزان اطمینان به مدل واسنجی شده را برآورد کرد (Chapra et al. 2008). برای واسنجی از اطلاعات کیفی رودخانه در فصول گرم (فصل کشت) و برای صحت‌سنجی از داده‌های سه ماه زمستان که بیانگر فصول غیرکشت است استفاده می‌شود.

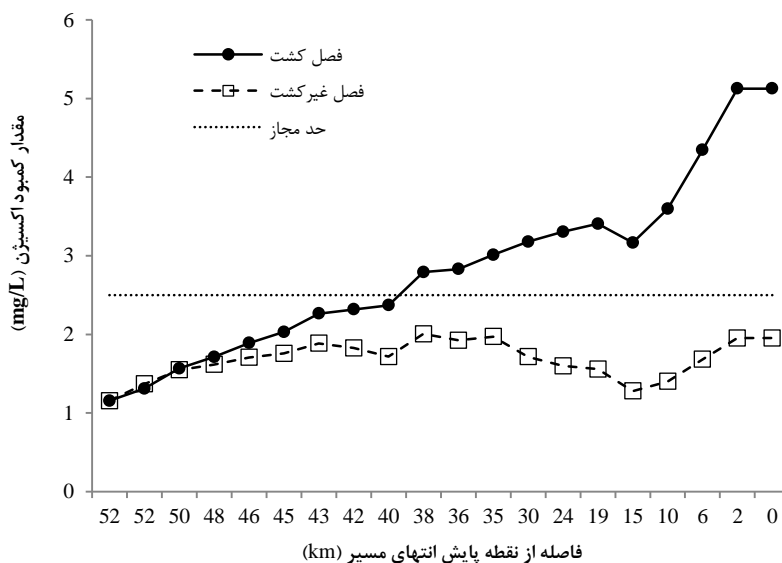
نتایج مدل واسنجی شده و صحت‌سنجی شده براساس پارامتر RMSE در جدول ۳ به ترتیب در دو فصل کشت و غیرکشت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار RMSE بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده با نرم‌افزار از همبستگی خوبی به‌ویژه برای پارامتر اکسیژن محلول برخوردار است. این مقادیر حداکثر به ۰/۰۸ (معادل ۸ درصد خطا) برای اکسیژن محلول می‌رسد. عدد فیتنس مستخرج از واسنجی مدل با الگوریتم ژنتیک معادل ۴/۶ است که این عدد نشان می‌دهد مجموع مقدار خطای وزندهی شده مدل برای کل پارامترها برابر ۲۱ درصد

به دلیل شرایط رسوب گذاری و هیدرودینامیکی برای تخم گذاری آبزبان اهمیت بسزایی دارد که می بایست برای کنترل کیفیت آن تدابیر ویژه ای اتخاذ کرد. شایان ذکر است میزان حد اشباع اکسیژن محلول در منطقه با توجه به هدایت الکتریکی و دمای متوسط آب بین ۸ تا ۹ میلی گرم بر لیتر برآورد شده است که با احتساب ۲/۵ میلی گرم بر لیتر حد مجاز کمبود اکسیژن، می توان مقدار ۶ میلی گرم بر لیتر را شرایط مطلوب و ۵ میلی گرم بر لیتر را شرایط بحرانی برای تعیین ظرفیت حداکثر تخلیه بار آلودگی به رودخانه براساس پارامتر اکسیژن محلول تعیین کرد. به عبارت دیگر غلظت این پارامتر در هیچ نقطه ای از رودخانه و در هیچ دوره زمانی مجاز نیست کمتر از ۵ میلی گرم بر لیتر باشد زیرا موجب بروز شرایط نامساعد برای آبزبان می شود. اما از طرف دیگر متوسط غلظت سالانه اکسیژن محلول در بحرانی ترین نقطه پایش باید بیشتر از ۶ میلی گرم بر لیتر باشد. با توجه به شکل ۲ نقطه بحرانی برای پایش اکسیژن محلول رودخانه همان نقطه انتهایی مسیر شبیه سازی شده است.

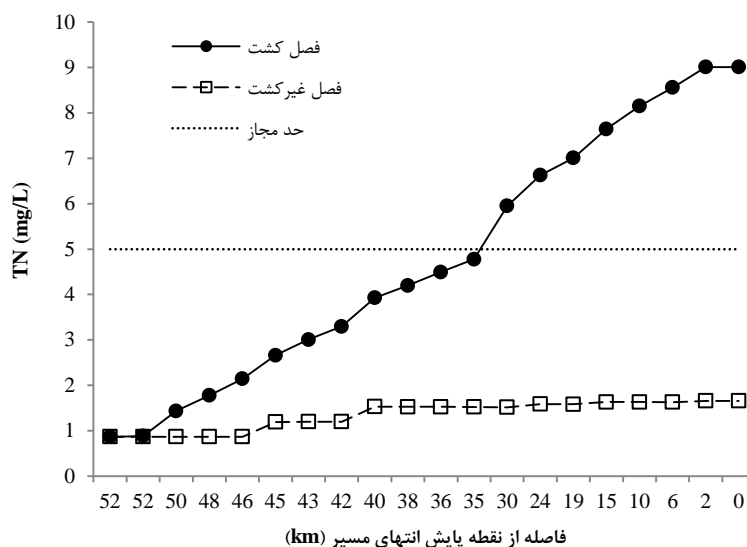
گرفت حساسیت کیفی رودخانه بیشتر تابع کدام یک از سه مؤلفه مذکور است. در نهایت با در اختیار داشتن مدل شبیه سازی شده و به روش سعی و خطا با کاهش بار آلودگی از ۱۰۰ درصد مقادیر داده شده تا آستانه زیست محیطی آن، می توان حداکثر مقدار تخصیص بار آلودگی را برآورد کرد. توضیحات تکمیلی در بخش نتایج آمده است.

### ۳. نتایج و بحث

براساس شبیه سازی انجام شده، پروفیل میزان کمبود اکسیژن محلول نسبت به حد اشباع در مسیر رودخانه مورد مطالعه در دو دوره کشت و غیرکشت به طور جداگانه ترسیم شود. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود تغییرات فصلی ورود آلاینده ها همچون زهاب منابع آلاینده غیرنقطه ای تأثیر بسزایی در کاهش کیفیت آب و افزایش میزان کمبود اکسیژن محلول در رودخانه دارد که در طی ماههایی که کشاورزی و شالی کاری جریان دارد به خفگی رودخانه و مرگ آبزبان به ویژه در ۱۵ کیلومتر انتهایی مسیر جریان منتهی به دریای خزر می انجامد. از طرفی، این منطقه



شکل ۲. پروفیل کمبود اکسیژن شبیه سازی شده به تفکیک دوره کشت و غیرکشت

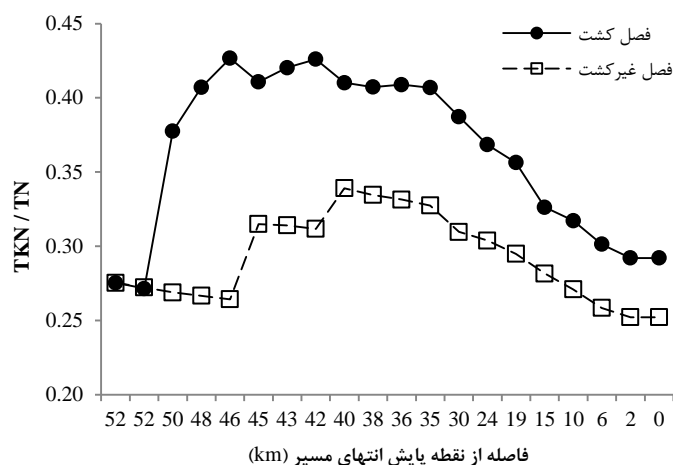


شکل ۳. پروفیل نیتروژن کل شبیه‌سازی شده به تفکیک دوره کشت و غیرکشت

فعالیت‌های صنعتی منطقه دانسته بود تفاوت دارد (Aazami et al., 2015). این اختلاف ناشی از تفاوت در انتخاب محدوده مورد مطالعه و مقایسه بالادست و پایین دست سد شهید رجایی در مطالعات مذکور است. در صورتی که پروفیل مقدار نیتروژن هواهی نشده (با شاخص TKN) نسبت به کل نیتروژن در مسیر رودخانه ترسیم شود مشاهده می‌شود که منابع آلاینده غیرنقطه‌ای در فصل کشت، به دلیل استفاده از کودهای ازته و آمونیاکی، به افزایش قابل ملاحظه این نسبت می‌انجامد (شکل ۴). بدیهی است این ترکیبات آلی در مسیر رودخانه از اکسیژن محلول آب برای نترات زایی (نیتریفیکاسیون) استفاده کرده و به همراه ترکیبات کربنی آلی (BOD) به کاهش اکسیژن محلول آب می‌انجامند. بنابراین تعیین حداکثر ظرفیت تخلیه بار آلودگی براساس پارامترهای مختلف می‌بایست به گونه‌ای صورت پذیرد که اثر تعاملی آن‌ها با یکدیگر نیز در تخصیص بار آلودگی مدنظر قرار گیرد. به عبارت دیگر تعیین حداکثر ظرفیت تخلیه بار آلودگی نیتروژن یا کربن در محیط صرفاً نباید به ترتیب براساس پارامتر TN یا BOD صورت پذیرد بلکه باید تمامی این پارامترها در کنار اکسیژن محلول نیز دیده شوند.

با بررسی غلظت ترکیبات نیتروژنی شبیه‌سازی شده در مسیر رودخانه شامل نیتروژن آلی، آمونیوم، نیتريت و نترات می‌توان همبستگی بالایی بین میزان تخلیه بار آلودگی نیتروژنی، به ویژه از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای با تغییرات فصلی، و میزان کاهش اکسیژن محلول در منطقه برقرار کرد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در فصول کشت مقدار غلظت نیتروژن کل (TN) آب رودخانه از بالادست (در حدود ۱ میلی‌گرم بر لیتر) تا ۹ برابر در پایین دست افزایش می‌یابد اما این پارامتر در فصول غیرکشت تغییرات ویژه‌ای از بالادست تا پایین دست ندارد. همین روند به طور مشابه برای فسفر نیز قابل ترسیم است. از این رو فعالیت‌های فصلی کشاورزی اصلی‌ترین عامل افزایش غلظت نیتروژن و فسفر در رودخانه تجن است. این نتیجه به نوعی مطالعات دیگر محققان در حوضه تجن را تأیید می‌کند که در آن با مدل‌سازی نشان داده شده است انتشار نیتروژن و فسفر در این حوضه اساساً از فعالیت‌های کشاورزی و دامی (منابع غیرنقطه‌ای) سرچشمه می‌گیرد (Rajaei et al., 2017). اما از طرفی این نتایج با دستاوردهای پژوهش دیگر که در آن براساس کیفیت و ظرفیت اکولوژیکی محیط مسئولیت اصلی آلودگی را





شکل ۴. پروفیل نسبت نیتروژن کج‌دال به نیتروژن کل شبیه‌سازی شده به تفکیک دوره کشت و غیر کشت

جدول ۴. مقدار کل بار آلودگی تخلیه‌شده از منابع آلاینده مختلف به رودخانه به تفکیک دوره زمانی و پارامتر

سهم منابع آلاینده از کل آلودگی تخلیه‌شده (درصد)	مجموع کل بار آلودگی تخلیه‌شده به رودخانه	مقدار کل بار آلودگی تخلیه‌شده به رودخانه از منابع مختلف (تن)									پارامترهای پایش کیفی رودخانه
		مخزن بالادست رودخانه			منابع غیر نقطه‌ای			منابع نقطه‌ای			
		مجموع	فصل کشت	فصل غیر کشت	مجموع	فصل کشت	فصل غیر کشت	مجموع	فصل کشت	فصل غیر کشت	
۹۳/۴	۱۴۲۹/۲	۹۴/۲	۵۶/۵	۳۷/۷	۱۱۳۴	۹/۴	۱۱۲۴/۶	۲۰۱	۱۰۰/۵	۱۰۰/۵	TKN
۸۱/۶	۱۳۴۶/۲	۲۴۸	۱۴۸/۸	۹۹/۲	۸۵۱/۸	۷/۷	۸۴۴/۱	۲۴۶/۴	۱۲۳/۲	۱۲۳/۲	NO <sub>3</sub>
۸۷/۷	۲۷۷۵/۴	۳۴۲/۲	۲۰۵/۳	۱۳۶/۹	۱۹۸۵/۸	۱۷/۱	۱۹۶۸/۷	۴۴۷/۴	۲۲۳/۷	۲۲۳/۷	TN
۹۶/۴	۴۳۴/۴	۱۵/۸	۹/۵	۶/۳	۳۴۷/۸	۶/۶	۳۴۱/۲	۷۰/۸	۳۵/۴	۳۵/۴	TP
۲۰/۷	۹۹۳۹/۳	۷۸۸۴	۴۷۳۰/۴	۳۱۵۳/۶	۳۸۰/۳	۲۲/۹	۳۵۷/۴	۱۶۷۵	۸۳۷/۵	۸۳۷/۵	COD

آلاینده‌ها در فصول کشت به رودخانه تخلیه می‌شوند. این در حالی است که سهم منابع آلاینده نقطه‌ای در انتشار بار مواد مغذی سالانه تنها ۱۶ درصد است و مابقی آلودگی از بالادست و از مخزن به رودخانه وارد می‌شود که برای نیتروژن و فسفر به ترتیب کمتر از ۱۴ درصد و ۴ درصد است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت برای مدیریت کیفی رودخانه از نظر مواد مغذی و البته به دلیل تأثیر متقابل آن بر غلظت اکسیژن محلول می‌بایست در این منطقه تمرکز سیاست‌گذاری زیست‌محیطی بر کنترل انتشار آلودگی از منابع آلاینده غیر نقطه‌ای استوار باشد. همچنین این نکته نیز

به منظور تعیین ظرفیت تخلیه آلودگی به رودخانه تجن و براساس مدل شبیه‌سازی میزان کل بار آلودگی تخلیه‌شده مطابق جدول ۴ به تفکیک منابع آلاینده و دوره زمانی برآورد شده است. همان‌گونه که از ارقام محاسباتی استنباط می‌شود بخش اصلی آلودگی تخلیه‌شده سالانه حاوی نیتروژن و فسفر در آب رودخانه تجن از فعالیت‌های کشاورزی و منابع آلاینده غیر نقطه‌ای نشئت می‌گیرد به طوری که سهم این منابع در انتشار نیتروژن کل با ۱۹۸۵/۸ تن در سال بیش از ۷۰ درصد و برای فسفر با ۳۴۷/۸ تن در سال بیش از ۸۰ درصد است که بالغ بر ۹۸ درصد این

بارزی نسبت به دوره زمانی ندارد. در مقایسه جدول ۴ و ۵ مشخص است که از مجموع ۲۷۷۵/۴ تن در سال بار نیتروژنی تخلیه شده به رودخانه ۲۶۰۰ تن از نقطه انتهایی مسیر به دریا تخلیه می‌شود که نشان از ظرفیت پایین خودپالایی رودخانه برای نترات‌زدایی (کاهش نیتروژن) معادل تقریبی ۶ درصد دارد. به طور مشابه این مقدار برای فسفر کل نیز کمتر از ۹ درصد است. اما از طرفی، ظرفیت پالایش رودخانه در خصوص پارامترهای کربنی بالا بوده و نشان داده شده است این مقدار از مجموع ۹۹۳۹/۳ تن COD در سال تا ۵۰۴۵ تن COD در سال معادل تقریبی ۵۰ درصد در طول مسیر رودخانه کاهش یافته است. این خود مؤید این مطلب است که در رودخانه تجن، برای بهبود کیفیت آب و ارتقای زیست‌بوم آبریان، می‌بایست بر کنترل انتشار بار آلودگی مغذی از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای تمرکز کرد. حال به منظور تعیین سقف کل بار آلودگی تخلیه شده از نقطه انتهایی مسیر جریان به عنوان محل اصلی پایش رودخانه تجن (نقطه بحرانی) لازم است برای هر کدام از پارامترهای کیفی کلیدی پس از ارزیابی در مدل شبیه‌سازی و کنترل تأثیر کاهش بار آلودگی بر نقطه انتهایی و دیگر پارامترها (مانند اکسیژن محلول) محدوده مجاز آن اعلام شود.

خاطر نشان می‌شود که سهم مجموع منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای از انتشار بار COD در کل رودخانه تنها ۲۰ درصد بوده و بخش زیادی از این آلودگی از مخزن بالادست به رودخانه تخلیه می‌شود. از این رو اعمال محدودیت‌های کیفی برای منابع آلاینده نقطه‌ای در مسیر رودخانه نمی‌تواند تأثیر چندانی بر بهبود کیفیت آب در نقطه پایش و انتهای مسیر داشته باشد. هر چند حساسیت کمتر آلودگی رودخانه تجن به بار آلی کربنی ناشی از فاضلاب شهری به نسبت آلودگی بالادست نمی‌تواند دلیلی بر حذف نقش تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری مانند شهر ساری باشد؛ زیرا رعایت اصول بهداشتی در حذف آلودگی‌ها با منشأ کربنی و آلی جزو ضروریات بوده و مطالعات یکپارچه منابع آب و بهره‌برداری تصفیه‌خانه فاضلاب صرفاً برای بهبود و ارتقای روند بهره‌برداری از این تأسیسات است.

در جدول ۵ مقدار کل بار آلودگی تخلیه شده از نقطه انتهایی رودخانه به تفکیک فصول کشت (بهار و تابستان) و غیرکشت (پاییز و زمستان) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بار آلودگی تخلیه شده با منشأ ترکیبات نیتروژنی و فسفر نوسانات بالایی بین فصول کشت و غیرکشت دارد اما بار آلودگی کربنی (COD) تغییرات

جدول ۵. مقدار کل بار آلودگی و غلظت مجاز در دهانه رودخانه و نقش سیاست تخصیص بار آلودگی به تفکیک پارامتر کیفی

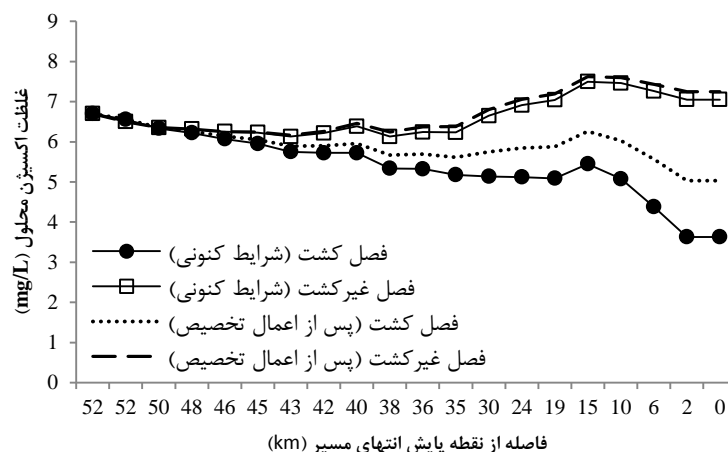
پارامترهای پایش کیفی رودخانه	مقدار کل بار آلودگی تخلیه شده به دریا در شرایط کنونی (تن)		کل بار آلودگی سالانه پس از تخصیص (تن)	کاهش بار آلودگی در نقطه انتهایی (%)	سقف کل بار آلودگی تعیین شده (تن)	حداکثر غلظت مجاز در نقطه انتهایی پایش (mg/L)
	فصل کشت	فصل غیرکشت				
TKN	۶۳۹	۱۱۱	۴۴۶	۴۰/۵	۵۰۰	۱
NO <sub>3</sub>	۱۵۴۹	۳۲۹	۱۲۸۱	۱۳/۸	۲۰۰۰	۴
TN	۲۱۸۸	۴۴۰	۱۷۲۷	۳۴/۳	۲۵۰۰	۵
TP	۳۸۱	۱۶	۲۱۲	۴۶/۵	۲۵۰	۰/۵
COD	۲۷۸۴	۲۲۶۱	۴۳۶۱	۱۳/۶	۴۵۰۰	۹

تقریبی ۳۴ درصد، ۴۶ درصد و ۱۴ درصد کاهش در مقایسه با شرایط کنونی در نقطه پایش برای این سه پارامتر در انتهای مسیر جریان است. این موضوع نشان می‌دهد که اولاً کاهش بار مواد مغذی بر تغییرات دیگر پارامترها نیز مؤثر بوده و ثانیاً دارای رابطه یک به یک با میزان بار آلودگی تخلیه شده در انتهای مسیر به دریا نیست.

از مجموع موارد ذکر شده در بالا می‌توان چنین برداشت کرد که برای بهبود کیفیت آب رودخانه تجم، حداقل مخرن سد تا مصب دریا با هدف بهبود شرایط لازم برای رشد و نمو آبزیان لازم است استانداردهای محلی متناسب با نوسانات فصلی کیفیت آب تهیه شده تا بر اساس ظرفیت موجود برای انتشار آلودگی سیاست‌گذاری و تخصیص لازم صورت پذیرد. بدین منظور، سقف مجاز بار آلودگی نیتروژن هواهی نشده (TKN)، نترات و نیتروژن کل به ترتیب برابر ۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ تن در سال تعیین شد که کمی بیش از مقادیر تخصیص بار آلودگی بهینه معادل ۴۴۶، ۱۲۸۱ و ۱۷۲۷ تن در سال است تا بهتر عملیاتی و اجرا شود. تحت این شرایط حداکثر غلظت متوسط سالانه برای استانداردسازی و پایش در نقطه انتهایی رودخانه به ترتیب ۱، ۴ و ۵ میلی‌گرم بر لیتر تعیین می‌شود که به‌ویژه برای ترکیبات نترات و نیتروژن کل نسبت به استانداردهای ملی بسیار پایین‌تر و سخت‌گیرانه‌تر است.

پس از تعیین پارامتر کلیدی تخصیص بار آلودگی براساس سهم آلودگی منتشر شده، حساسیت رودخانه و توان خودپالایی آن و پس از انجام سعی و خطا در مدل شبیه‌سازی شده مشخص شد که کاهش ۴۵ درصد بار آلودگی مواد مغذی منتشر شده از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای (تخصیص بار آلودگی)، که اصولاً در دوره کشت صورت می‌پذیرد، می‌تواند شرایط مناسب را برای بهبود کیفیت رودخانه در محدوده مورد مطالعه فراهم آورد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، اعمال سیاست کاهش ۴۵ درصد بار مواد مغذی در زهاب منابع آلاینده غیرنقطه‌ای به ارتقای غلظت اکسیژن محلول رودخانه در همان فصل کشت به بیش از ۵ میلی‌گرم بر لیتر منجر شده و متوسط غلظت این پارامتر نیز در کل مسیر رودخانه بیش از ۶ میلی‌گرم بر لیتر می‌شود. نقطه انتهایی مسیر به‌طور متوسط سالانه ۶/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر حاوی اکسیژن محلول خواهد بود که معادل افزایش ۱۵ درصد این پارامتر است. همچنین در این شرایط نقطه مینیمم پروفیل اکسیژن محلول متوسط سالیانه در کیلومتر ۳۸ قرار می‌گیرد.

در شرایط اعمال سیاست کاهش ۴۵ درصد بار آلی تخلیه شده از پساب منابع آلاینده غیرنقطه‌ای، مجموع آلودگی تخلیه شده از نقطه انتهایی رودخانه به دریا به ترتیب برای نیتروژن، فسفر و COD به ۱۷۲۷، ۲۱۲ و ۲۳۶۱ تن در سال کاهش می‌یابد که به ترتیب معادل



شکل ۵. پروفیل اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده به تفکیک دوره کشت و غیرکشت در شرایط تخصیص بار آلودگی

غیرکشت و میزان بار آلودگی موجود در نقطه پایش در این دو دوره، توان خودپالایی محیط و مقادیر حداکثر مجاز آلودگی در نقطه پایش برای استانداردهای و کنترل بهتر شرایط کیفی در شرایط نوسانات چندپارامتره مشخص شد. در این مرحله حفظ مقدار متوسط اکسیژن محلول رودخانه بیش از ۶ میلی‌گرم بر لیتر در طول سال و حفظ حداقل ۵ میلی‌گرم بر لیتر اکسیژن محلول در بدترین شرایط کیفی رودخانه (دوره کشت) به‌عنوان شروط کنترل انتشار آلودگی در نظر گرفته شد. بر این اساس، توان خودپالایی محیط در کاهش بار مغذی کمتر از ۱۰ درصد و بار آلی کربنی تا ۵۰ درصد برآورد شده و سقف کل بار آلودگی مجاز موجود سالانه در نقطه انتهایی مسیر جریان برای نیتروژن و COD به ترتیب برابر ۲۵۰۰ و ۴۵۰۰ تن در سال برآورد شد. در این شرایط استاندارد محیطی غلظت مجاز نیتروژن و COD به ترتیب ۵ و ۹ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شد. همچنین با در اختیار داشتن این مجموعه اطلاعات مشخص شد با کاهش و کنترل ۴۵ درصد آلودگی منتشر شده از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای می‌توان حدود پیشنهادی را رعایت کرد. در نهایت متدولوژی پیشنهادی شامل استفاده از مدل شبیه‌سازی برای تعیین پارامترها و منابع آلاینده کلیدی و تعیین حداکثر مجاز انتشار و تخصیص بار آلودگی برای استفاده در دیگر منابع آب سطحی به‌ویژه رودخانه‌های منتهی به دریا و دریاچه‌ها پیشنهاد می‌شود.

به‌طور مشابه برای پارامتر فسفر، حداکثر ظرفیت بار آلودگی در نقطه انتهایی مسیر برابر ۲۵۰ تن در سال و برای پارامتر COD مقدار ۴۵۰۰ تن در سال تعیین شد که مشابه روند فوق به تعیین حداکثر غلظت مجاز برابر ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر فسفر کل و ۹ میلی‌گرم بر لیتر COD می‌انجامد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش و در قالب مطالعه‌ای موردی در رودخانه تاجن، متدولوژی تعیین حداکثر بار مجاز آلودگی و در نتیجه غلظت مجاز سالانه پارامترهای اصلی کیفی آب رودخانه مانند اکسیژن محلول، نیتروژن، فسفر و COD به‌صورت محلی و محیط‌محور و با استفاده از مدل شبیه‌سازی رودخانه تعیین شد. در این چارچوب مشخص شد اولاً پارامتر اکسیژن محلول رودخانه به همراه نیتروژن و فسفر نسبت به نوسانات فصلی جریان رودخانه ناشی از تسهیم دوره‌ای آب برای مزارع کشاورزی و آلودگی‌های ناشی از آن حساسیت بالایی دارند و این موضوع تعیین حداکثر مجاز بار آلودگی را با دشواری همراه می‌سازد. ثانیاً فعالیت‌های دوره‌ای کشاورزی در محدوده مورد مطالعه، اصلی‌ترین عامل انتشار آلودگی و کاهش اکسیژن محلول در نقطه انتهایی مسیر شناخته شد به‌طوری‌که تمرکز سیاست‌گذاری در تعیین حداکثر بار آلودگی و تخصیص آن بر کنترل بار آلودگی از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای استوار شد. در این چارچوب، پس از تعیین میزان کل بار آلودگی تخلیه‌شده به تفکیک منابع آلاینده در دو دوره کشت و

#### منابع

- Aazami, J., Esmaili Sari, A., Abdoli, A., Sohrabi, H. and Van der Brink, P.J. 2015. Assessment of ecological quality of the Tajan River in Iran using a Multimetric Macroinvertebrate Index and species traits, *Environmental Management*, 56(1): 260-269.
- Baldwin, R., Cave, M. and Lodge, M. 2011. *Understanding Regulation: Theory, Strategy and Practice*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.
- 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*, 187(8): 522.
- Field, B. and Field, M. 2017, *Environmental economics: An introduction*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Brooks, B.W., Lazorchak, J.M., Howard, D.A., Johnson, M.V., Morton, S.L., Perkins, D.A.K., Reavie, E.D., Scott, G.I.,

- Smith, S.A. and Steevens, J.A. 2016. Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems?, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(1): 6-13.
- Chapra, S.C. 1997. Surface water quality modeling. The McGraw-Hill Company, Inc.
- Chapra, S.C. Pelletier, G.J. and Tao, H. 2008. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and User's Manual.
- Duncan, R. 2014. Regulating agricultural land use to manage water quality: The challenges for science and policy in enforcing limits on non-point source pollution in New Zealand, *Land Use Policy*, 41: 378-387.
- Ferreira, J.G., Andersen, J.H., Borja, A., Bricker, S.B., Camp, J., da Silva, M.C., Garces, E., Heiskanen, A., Humborg, C., Ignatiades, L., Lancelot, C., Menesguen, A., Tett, P., Hepffner, N. and Claussen, U. 2011. Overview of Eutrophication indicators to assess environmental status within the European marine strategy framework directive, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(2): 117-131.
- Garg, R.K., Rao, R.J., Uchchariya, D., Shukla, G. and Saksena, D.N. 2010. Seasonal variations in water quality and major threats to Ramsagar reservoir, India, *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(2).
- Hounslow A. 1995. Water quality data, Analysis and interpretation, CRC press.
- Imani, S., Niksokhan, M.H., Jamshidi, S. and Abbaspour, K.C. 2017. Discharge permit market and farm management nexus: an approach for Eutrophication control in small basins with low-income farmers, *Environmental monitoring and assessment*, 189: 346.
- Jamshidi, S., Ardestani, M. and Niksokhan, M.H. 2016a. A seasonal waste load allocation policy in an integrated discharge permit and reclaimed water market, *Water Policy*, 18(1): 235-250.
- Jamshidi, S., Niksokhan, M.H. and Ardestani, M. 2016b. Wastewater Reuse, an Opportunity to Expand Nitrogen Discharge Permit Markets, *Journal of Environmental Studies*, 42(1): 211-227.
- Jamshidi, S. and Niksokhan, M.H. 2016. Multiple pollutant discharge permit markets, a challenge for wastewater treatment plants, *Journal of Environmental Planning and Management*, 59(8): 1438-1455.
- Jamshidi, S., Niksokhan, M.H., Ardestani, M., Jaber, H. 2015. Enhancement of surface water quality using trading discharge permits and artificial aeration, *Environmental Earth Sciences*, 74(9): 6613-6623.
- Kostka, G. 2016. command without control: the case of china's environmental target system, *Regulation and Governance*, 10(1): Wiley, 58-74.
- Pelletier, G., Chapra, C. and Tao, H. 2006. QUAL2KW; A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling and Software*, 21: 419-4125.
- Rajaei, F., Esmaili, Sari A., Salman Mahini, A., Delavar, M. and Massah Bavani, A.R. 2017. modelling of effective components contribution of phosphate pollution transport from the agriculture, forest and rangeland land uses using SWAT (case study: Tajan Watershed), *Journal of Water and Irrigation Management*, 6(2): 237-250.
- Sadeghi, Azad, A. 2016. Assessment of self-purification in tajan river and impacts of using control structures on water quality enhancement Using Qual-2K and CCHE-2D Models, MSc Thesis, Isfahan University of Technology.
- Saravi, M.S., Ahmadi, M.R., Rahmani, H. and Kamrani, E. 2015. Water quality assessment based on hilsenhoff biological, Diversity Shannon- Wiener Indices and Environmental Parameters in Tajan River, *Fisheries Science and Technology*, 3(4): 43-55.
- Sun, B., Zhang, L., Yang, L., Zhang, F., Norse, D. and Zhu, Z. 2012, Agricultural non-point source pollution in china: causes and mitigation measures, *Ambio*, 41: 370-379.
- Malone, P.R. 2015. Identifying and managing impacts of point and non-point source pollution on surface water quality, MSc thesis, Worcester Polytechnic Institute.
- Mehrdadi, N., Ghobadi, M., Nasrabadi, T. and Hoveidi, H. 2006. Evaluation of the quality and self purification potential of Tajan River using Qual2e model, *Iranian Journal of Environmental Health, Science and Engineering*, 3(3): 199-204.
- Xu, J., Yin, K., Lee, J.H.W., Liu, H., Ho, A.Y.T., Yuan, X. and Harrison, P.J. 2010. Long-term and seasonal changes in nutrients, phytoplankton biomass, and dissolved oxygen in Deep Bay, Hong Kong, *Estuaries and Coasts*, 33(2): 319-416.