

## مدل سازی کیفی رودخانه کرخه در بالادست و پایین دست شهرستان شوش با بکارگیری

### نرم افزار Qual2k

علی عبدالخانی<sup>۱</sup>، علیرضا نیکبخت شهبازی<sup>۲\*</sup> و نرگس ظهراپی<sup>۳</sup>

(۱) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(۲) گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(۳) گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

\*نویسنده مسئول: ar\_nikbakht@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۳۱

### چکیده

رودخانه کرخه به عللی همچون احداث سد در بالادست، برداشت آب به منظور تأمین نیازهای آبی، فرار گرفتن صنایع مختلف در کنار این رود و تخلیه انواع فاضلابها به آن، امروزه شاهد شرایط نامطلوبی است. در این مطالعه بررسی کیفی رودخانه کرخه در بالادست و پایین دست شهرستان شوش انجام گرفت. بدین منظور با در نظر گرفتن پارامترهای کیفی آب و استانداردهای کیفی آب، با استفاده از مدل QUAL-2K توان خود پالایی این رودخانه ارزیابی شد. تعداد پنج ایستگاه ها نمونه برداری به فاصله تقریباً یکسان و متناسب با منابع ورودی بر روی رودخانه کرخه تعریف و عملیات نمونه برداری از آنها انجام شد. نه پارامتر BOD، COD، DO، PH، کدورت، نیترات، فسفات، کل کلیرمها، کلیرمهای مدفوعی به عنوان پارامترهای مورد نیاز جهت برآورد شاخص WQI انتخاب شد و اثرات تخلیه آلاینده های ورودی به رودخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان از کاهش چشمگیر کیفیت آب در طول مسیر داشت. البته حذف آلاینده ها به رودخانه به خوبی می تواند روند بهبود کیفیت آب در طول مسیر را بهبود بخشد. روند بهبود کیفیت آب رودخانه با توجه به خاصیت خود پالایی آن صعودی بوده و آب با نظام کیفی متوسط به نظام کیفی خوب بر اساس میزان شاخص WQI می رسد.

واژه های کلیدی: مدل سازی کیفی آب، رودخانه کرخه، شهرستان شوش و QUAL2K.

## مقدمه

رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع حیاتی آب شیرین جهت استفاده در امور کشاورزی، شرب و صنعت به شمار می‌روند. امروزه با توجه به تأثیر فعالیت‌های انسانی بر کیفیت آب و مسائلی که در ارتباط با آلودگی آب بوجود آمده است، لزوم توجه به کیفیت منابع آب اهمیت زیادی پیدا کرده است. در این راستا مدیریت پایدار منابع آب که محور اصلی آن تأمین آب مطمئن و با کیفیت مطلوب برای انواع مصارف باشد بسیار حیاتی است. در حال حاضر آلودگی‌های شیمیایی یکی از تهدیدات جدی اکوسیستم‌های آبی به شمار می‌رود این در حالی است که توسعه کشاورزی برای پاسخگویی به نیاز روز افزون غذا و در کنار آن زندگی مصرفی امروز باعث شده است که منابع آب بویژه آب‌های سطحی هر روز با مواد شیمیایی جدیدی آلوده شوند به طوری که سمیت بالقوه انواع آلاینده‌ها به دلیل برهم کنش بین آنها بسیار پیچیده است (آذری و همکاران، ۱۳۹۳؛ شهریاری و همکاران، ۱۳۹۰). آلودگی آب‌ها یکی از معضلات اصلی جوامع است. مطالعات بر روی مدل سازی کیفی آب‌های سطحی و رودخانه بصورت گسترده‌ای با اهداف مختلف صورت گرفته است که در ادامه به چندین مورد آن اشاره می‌شود (نصیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۱). سید سراجی و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی به بررسی اثرات تغییر دبی بر دما و اکسیژن محلول در رودخانه، با استفاده از داده‌های کمی و کیفی محاسبه شده، اثرات افزایش دبی بر تغییرات اکسیژن محلول در رودخانه قزل اوزون و شاخه فرعی شاهرود و در نزدیکی سد سفیدرود پرداختند. در این تحقیق از مدل ریاضی QUAL-2E برای شبیه‌سازی این پارامترها استفاده شد. از نتایج این شبیه‌سازی می‌توان به مناسب بودن وضعیت اکسیژن محلول و دما در طول رودخانه و مناسب بودن قدرت خود پالایی رودخانه در پالایش مواد آلاینده در مسیر اشاره کرد، ولی با نزدیک شدن به سد میزان تلاطم و شیب کاهش یافته و در نتیجه افزایش چشم‌گیری در مقدار اکسیژن محلول مشاهده نمی‌شود. Park and Lee (۲۰۰۲) در تحقیقی به مطالعه کیفیت آب رودخانه نکدانگ<sup>۱</sup> در کره پرداختند. هدف آن‌ها از انجام این تحقیق بررسی کارایی مدل‌های شبیه‌سازی کیفی رودخانه بود. در این تحقیق از مدل‌های QUAL-2K و QUAL-2E برای مدل‌سازی رودخانه نکدانگ استفاده شده و به منظور کاهش محدودیت‌های آن‌ها، این مدل‌ها توسعه داده شده‌اند. آن‌ها مدل‌های اصلاح شده را برای شبیه‌سازی چند پارامتر کیفی در نقاط مشابهی در رودخانه به کار گرفته و به مقایسه نتایج شبیه‌سازی پرداختند. پارامترهای کیفی مدنظر شامل اکسیژن محلول<sup>۲</sup> (DO)، BOD، نیترژن، فسفر و کلروفیل آلفا<sup>۳</sup> بودند. نتایج آن‌ها نشان دادند که شبیه‌سازی‌های انجام شده در مورد BOD و DO و کل نیترژن اختلافات قابل توجهی بین نتایج دو مدل وجود دارد و نتایج مدل QUAL-2K همخوانی بهتری با اندازه‌گیری‌های

<sup>1</sup> Nakdong

<sup>2</sup> Dissolved Oxygen

<sup>3</sup> Chlorophyll-a

صحرايي دارد. Fang و همکاران (۲۰۰۹) در تحقيقي تحت عنوان مدل‌سازي با رويکردي ابتکاري به بررسي اثرات جزر و مد در شبیه‌سازي کيفي رودخانه پرداختند. در اين تحقيق برای شبیه‌سازي کيفي رودخانه از ترکیب دو مدل HEC-5 و QUAL-2K استفاده شده است. نتايج آن‌ها نشان داد که شبیه‌سازي جزر و مد رودخانه‌ها در قسمت‌های نزديک دریا، می‌تواند دقت حاصل از نتايج شبیه‌سازي شاخص‌های کيفي، خصوصاً در رودخانه‌های آلوده را افزایش دهد. Kannel (۲۰۰۹) در تحقيقي با استفاده از مدل QUAL-2K به شبیه‌سازي کيفي و مدیریت آب رودخانه باگماتي<sup>۴</sup> نپال<sup>۵</sup> پرداختند. نتايج آن‌ها نشان دادند که اکسیژن‌دهي منطقه‌ای بر بهبود غلظت اکسیژن محلول در آب موثر بوده و همچنین اختلاط فاضلاب تصفيه شده با جريان آب، افزایش جريان آب و اکسیژن‌دهي محلي موجب ارتقاء کيفيت آب رودخانه می‌شود. De Andre و همکاران (۲۰۱۲) در تحقيقي تخصیص بار آلودگي را شامل مواردی همچون منافع اقتصادی، منازعات سياسي و اجتماعي، حضور ذی‌نفعان مختلف و آگاهی از سامانه فیزیکی و طبیعت آب عنوان نمودند. برای حل مشکل تخصیص بار آلودگي در اين تحقيق، یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز با استفاده از الگوریتم نورد شبیه‌سازي شده<sup>۶</sup> (SA) و مدل QUAL-2E ارائه شد. اين مدل برای تعیین غلظت اکسیژن مورد نیاز برای فعاليت‌های بیوشیمیایی در حوضه سانتا ماریادا ویتوریا<sup>۷</sup> برزیل به کار رفت. نتايج آن‌ها نشان داد که مدل می‌تواند راه‌حل‌های مختلفی برای ترکیب انتظارات و اهداف متضاد ارائه کند. Wu و همکاران (۲۰۱۳) در تحقيقي به بررسي روش‌های مهندسي محیط‌زیست برای کنترل منابع غیرنقطه‌ای آلودگي ناشی از به کار بردن کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها پرداختند. در اين تحقيق به بررسي جنبه‌های مختلف آلودگي آب از جمله عواملی که در آلودگي آب نقش دارند، ارزیابی وضعیت رودخانه و روش‌های زیست‌محیطی رایج کنترل آلودگي مانند غربال گیاهی و احداث تالاب‌ها پرداخته شد و چند روش از روش‌های زیست‌محیطی رایج کنترل آلودگي، به عنوان راه‌کارهای مفید برای کشاورزي پایدار ارائه شدند. Zhang و همکاران (۲۰۱۲) کاهش کيفيت آب دریاچه تیاہو را عامل اصلی نگرانی‌های سال‌های اخیر در منطقه دانستند. آن‌ها منبع اصلی کاهش کيفيت آب دریاچه را وارد شدن جريان‌های آلوده از رودخانه‌ها معرفی کردند. لذا اعلام داشتند که بهبود وضعیت کيفي رودخانه‌های حوضه دریاچه موجب بهبود وضعیت رودخانه می‌شود. آن‌ها با استفاده از مدل QUAL2K و روش سعی و خطا، مقدار تخلیه آلودگي مجاز در رودخانه ویوجین<sup>۸</sup> که مهم‌ترین رودخانه حوضه است را به‌منظور افزایش کيفيت آب دریاچه تا مقادیر استاندارد، تعیین نمودند. آن‌ها

<sup>4</sup> Bagmati

<sup>5</sup> Nepal

<sup>6</sup> Simulated Annealing

<sup>7</sup> Santa Maria da Vitória

<sup>8</sup> Wujin

بیشینه مقدار تخلیه مجاز برای چهار شاخص آلودگی، نیاز اکسیژن شیمیایی<sup>۹</sup> (COD)، آمونیاک<sup>۱۰</sup>، نیتروژن کل<sup>۱۱</sup> و فسفر کل<sup>۱۲</sup> به ترتیب ۵۲۱۶/۳۱، ۴۹۱۱/۷۱، ۹۴۸/۵۳ و ۱۰۴/۳۸ تن تعیین کردند. این مقادیر نسبت به مقادیر تخلیه کنونی، 13/35، 27/26، 47/75 و 37/08 درصد کاهش را نشان می‌دهند. در این مطالعه بررسی کیفی رودخانه کرخه در بالادست و پایین دست شهرستان شوش انجام گرفت. بدین منظور با در نظر گرفتن پارامترهای کیفی آب و استانداردهای کیفی آب، با استفاده از مدل QUAL-2K توان خود پالایی این رودخانه ارزیابی شد. از این رو نه پارامتر PH، DO، COD، BOD، کدورت، نیترات، فسفات، کل کلیرمها، کلیرمهای مدفوعی به عنوان پارامترهای شاخص و مورد نیاز جهت برآورد شاخص WQI انتخاب شد. اثرات تخلیه آلاینده‌های ورودی به رودخانه مورد ارزیابی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

رودخانه کرخه در جنوب غربی کشور جاری است که پس از رودخانه کارون و دز سومین رودخانه پر آب کشور به حساب می‌آید و دارای طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر است. ایستگاه‌های نمونه‌برداری که شامل پنج عدد می‌باشند در یک بازه به طول تقریباً ۸۰ کیلومتر به فاصله تقریباً یکسان و متناسب با منابع ورودی بر روی رودخانه تعریف و عملیات نمونه برداری از آنها انجام می‌شود اولین ایستگاه، بالادست شهرستان شوش و آخرین ایستگاه بعد از فاضلاب شهری شهر الوان قرار دارد. ایستگاه‌های نمونه برداری برای پژوهش حاضر پس از تعیین تعداد بر روی رودخانه کرخه توزیع می‌شوند. تعداد پنج ایستگاه‌ها نمونه برداری به فاصله تقریباً یکسان و متناسب با منابع ورودی بر روی رودخانه تعریف و عملیات نمونه برداری از آنها انجام شد. اولین ایستگاه در بالادست شهرستان شوش و آخرین ایستگاه بعد از فاضلاب شهری شهر الوان قرار دارد (شکل ۱) و (جدول ۱) موقعیت ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در ابتدا مرحله اول اطلاعات موجود از سازمان آب و برق خوزستان تهیه شد و سپس انجام نمونه برداری به صورت فصلی و آنالیزهای آزمایشگاهی صورت گرفت. پارامترهایی همچون اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، کدورت، دما، EC، TDS، PH توسط دستگاه سنجش کیفیت آب (WTW-Multi 34i) که متعلق به شرکت آب و فاضلاب روستایی خوزستان است، اندازه‌گیری شد. از آنجاییکه در سطح ملی استاندارد معتبری در رابطه با مقایسه کیفیت آب خام برای مصارف شرب وجود ندارد، لذا در این مطالعات از استاندارد 75/440/EEC اتحادیه اروپا، استاندارد ۵۳۰-۳۰۲-۶۲ سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا و در نهایت معیارهای طبقه-

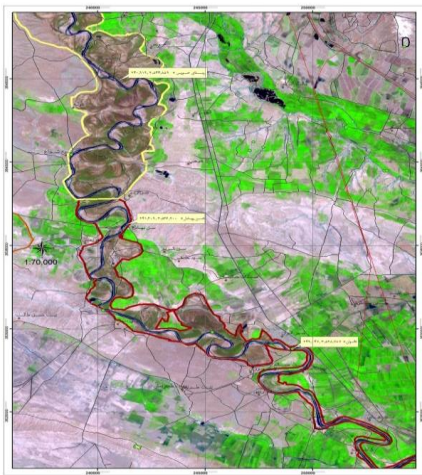
<sup>9</sup> Chemical Oxygen Demand

<sup>10</sup> Ammonia

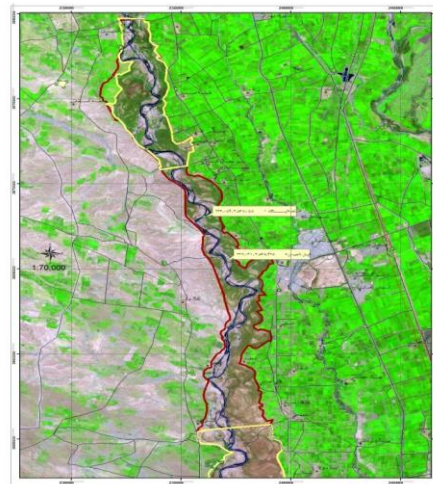
<sup>11</sup> Total Nitrogen

<sup>12</sup> Total Phosphor

بندی آب‌های سطحی ملی پاکستان استفاده شد.



موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های ۳ و ۴



موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های ۱ و ۲

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه برداری

جدول ۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه برداری

شماره ایستگاه نمونه	موقعیت ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	بالا دست شهرستان شوش	۲۳۶۰۵۴	۳۵۶۸۰۵۵
۲	پل شهید ناجیان	۲۳۷۰۳۱	۳۵۶۵۴۲۵
۳	میثم تمار یا خویس	۲۴۰۹۱۹	۳۵۴۴۸۵۹
۴	سن بهادل	۲۴۱۳۰۹	۳۵۳۶۲۰۰
۵	شهرستان الوان	۲۴۹۰۴۷	۳۵۲۸۷۸۷

از آنجا که تکنولوژی تصفیه در تصفیه‌خانه‌های ایران در مقایسه با کشورهای توسعه یافته استانداردهای پایین‌تری دارد و این عامل و عوامل دیگر در تهیه استاندارد کاربری آب دخیل هستند، لذا ملاک ما در این مطالعه معیارهای طبقه‌بندی آب‌های سطحی ملی پاکستان است که بر اساس سیستم طبقه‌بندی آب‌های سطحی کشورهای مختلف با تمرکز بر کشورهای در حال توسعه جنوب آسیا است. لازم به ذکر است که استاندارد ملی پاکستان معیارهای سختگیرانه‌تری نسبت به استانداردهای اروپایی و آمریکایی دارد که عمدتاً به دلیل تاسیسات ضعیف و محدودیت‌های تصفیه‌خانه‌های کشورهای در حال توسعه است.

### شاخص کیفیت آب (WQI)

این شاخص یک پیشنهاد برای توسعه سیستم مقایسه کیفیت آب در بخش‌های مختلف یک کشور بوده و دارای ۱۰۰ درجه کیفیت آب است. به طور عمده بر مبنای محاسبات ریاضی برای محاسبه ارزش واحدی جهت بیان این کیفیت از

نتایج چند گانه است نتایج شاخص سطحی از کیفیت آب را در یک حوضه آبی مانند: دریاچه، رودخانه و نهر ارائه می کند. WQI که در حدود سال های ۱۹۷۰ توسط بنیاد ملی بهداشت آمریکا توسعه یافته می تواند برای مانیتورینگ تغییرات کیفیت آب در منابع آبی به ویژه در زمان های مختلف به کار می رود و همچنین برای مقایسه کیفیت منابع آبی در یک ناحیه و حتی در سراسر جهان مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این شاخص همچنین برای تعیین و توضیح سلامتی منابع آب مورد استفاده قرار می گیرد. در (جدول ۲) فاکتور وزنی نهایی پارامترها و (جدول ۳) طبقه بندی شاخص کیفیت آب را برای NSF WQI ارائه می کند.

$$WQI = \sum_{i=1}^n (WI \times QI) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در (رابطه ۱)، WQI شاخص کیفیت آب که مقدار آن از صفر تا ۱۰۰ متغیر است، WI: وزن یا درجه اولویت عامل از صفر تا یک و QI: کیفیت پارامتر از صفر تا ۱۰۰ (منحنی های معیار) می باشد.

جدول ۲: فاکتور وزنی نهایی در NSF WQI

کل مواد جامد	کدورت	درجه حرارت	فسفات	نیترات	BOD5	PH	فکالکولیرم	اکسیژن محلول	پارامتر آلودگی
۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۱۷	فاکتور وزنی

جدول ۳: طبقه بندی شاخص کیفیت آب

رنگ	مقدار عدد شاخص	تعریف
قرمز	۰-۲۵	بسیار بد
نارنجی	۲۶-۵۰	بد
زرد	۵۱-۷۰	متوسط
سبز	۷۱-۹۰	خوب
آبی	۹۱-۱۰۰	عالی

## نرم افزار QUAL2K

مدل QUAL-2K از آخرین مدل های سری QUAL است و نسخه کامل شده مدل های پیشین این سری است. برنامه نویسی های لازم در این مدل در محیط نرم افزار اکسل و در قالب زبان ماکرو ویندوز انجام شده است. QUAL-2K به عنوان کامل ترین مدل شبیه سازی کیفی رودخانه است که در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرد و قادر است شاخص های بسیاری از قبیل DO، BOD، دما، اسیدیته، مواد معلق، فسفر، حالت های مختلف نیتروژن و جلبک را شبیه سازی کند. برای بررسی اثر تخلیه آلاینده ها به رودخانه، کل مسیر به سه قسمت تقسیم شد و در هر سناریو به فرض حذف آلاینده ها در هر بازه، مدل اجرا و نتایج با حالت واقعی مقایسه شد. تغییرات شاخص BOD و DO بیشترین تأثیر را روی

محیط زیست و بخصوص موجودات زنده در محیط‌های آبی دارد. در ابتدای بازه مورد نظر به علت شیب تندتر بستر رودخانه نسبت به انتهای مسیر در منطقه مورد نظر، سرعت جریان زیاد است و هرچه به پایین دست حرکت می‌کنیم با کم شدن شیب از سرعت جریان کاسته می‌شود. با توجه به دائمی بودن ورود آلاینده‌ها از طرف منابع آلاینده به رودخانه، لازم است هر شبیه‌سازی، تا زمانی که مقدار غلظت آلودگی در رودخانه به تعادل برسد، ادامه یابد. غلظت آلودگی در رودخانه زمانی به تعادل می‌رسد که آلاینده ورودی از اولین منبع ورودی، مدت زمان لازم برای طی کردن تمام مسیر رودخانه که تحت شبیه‌سازی است را داشته باشد. لذا مدت زمان لازم برای حرکت جریان آب از مکان اولین منبع آلاینده تا پایان مسیر شبیه‌سازی، کمینه زمان لازم برای انجام یک دوره‌ی شبیه‌سازی است. این زمان، با داشتن سرعت جریان و با استفاده از رابطه مانینگ توسط QUAL-2K، ۱/۷ روز به دست آمد. بنابراین برای اطمینان از به تعادل رسیدن غلظت‌های آلودگی در رودخانه، طول مدت زمان هر شبیه‌سازی، دو روز در نظر گرفته شد. با حرکت به سمت پایین‌دست رودخانه، به علت ورود آلاینده‌ها از میزان اکسیژن محلول در آب کاسته می‌شود. بعد از شبیه‌سازی پارامترهای مدل، شاخص WQI نیز در طول مسیر شبیه‌سازی شد. ابتدا کلیه داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار از شرکت آب و فاضلاب که در ایستگاه‌های مورد نظر نمونه برداری انجام می‌دهد اخذ شد و صحت داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعاتی که به مدل وارد می‌شوند شامل چند دسته است: دسته اول داده‌های مربوط به کیفیت و آبدهی رودخانه در ابتدای بازه می‌باشد و دسته دوم اطلاعات مربوط به ویژگی‌های هیدرولیکی مقاطع مختلف رودخانه است. اینکه هر مقطعی با ویژگی‌های هیدرولیکی ثابت از چه کیلومتری شروع و به چه کیلومتری ختم می‌شود، در چه طول و عرض جغرافیایی قرار می‌گیرد. رقوم ابتدایی و انتهایی آن به چه میزان است، مقطه عرضی آن به چه شکل است و ضرایب هیدرولیکی آن چقدر است. دسته سوم اطلاعات مربوط به شرایط آب و هوایی است که به مدل داده می‌شود. دسته چهارم ویژگی‌های منابع آلاینده است که به صورت نقطه ای یا گسترده به مدل داده می‌شود. دسته پنجم اطلاعات کیفی آب در مقاطع مختلف است که نمونه‌گیری‌ها در فصول مختلف سال انجام گرفته است و می‌توان با توجه به نتایج مدل و میزان ورودی آلاینده به مدل کیفیت آب را شبیه‌سازی نمود و با مقایسه با پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه‌ها واسنجی و صحت‌سنجی مدل را انجام داد. دسته ششم اطلاعات ضرایب جنبشی مورد استفاده در شبیه‌سازی می‌باشد. کلیه واکنش‌های شیمیایی، زیست‌شناسی و فیزیکی دارای نرخ واکنش اند مثلاً نرخ کاهش BOD، نرخ رشد موجودات ذره‌بینی، نرخ مرگ و میر، نرخ رشد جلبک‌ها و سرعت ته‌نشینی ذرات معلق نام برد. مدل ویژگی‌های آب را در نقطه شروع دریافت می‌کند. در طول مسیر فراسنج‌های مختلف هواشناسی، هیدرولیکی و آلودگی‌های وارده را بر آن تأثیر داده و بر اساس ضرایب جنبشی داده شده به مدل تغییرات کیفیت آب را نسبت به زمان

جریان محاسبه می کند. با داده های ثابت ورودی به مدل می توان با تغییر ضرایب جنبشی کیفیت آب شبیه سازی شده را تغییر داد تا حداکثر همبستگی بین داده های صحرایی و نتایج مدل حاصل شود.

### نتایج و بحث

ابتدا مقادیر اندازه گیری شده در پنج ایستگاه مورد بررسی قرار گرفت و با استانداردهای مختلف مقایسه شد. بر اساس استاندارد 75/440/EEC اتحادیه اروپا برای رودخانه کرخه در تمامی ماه های سال این استاندارد رعایت شده است. بر اساس استاندارد 62-302-530 سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا نیز به جز کلیفرم، برای باقی پارامترها در تمامی ماه های سال این استاندارد رعایت شده است. بر اساس استاندارد طبقه بندی آب های سطحی ملی پاکستان، برای پارامتر اکسیژن محلول، نیترات و کلیفرم در تمامی فصول سال این استاندارد رعایت شده است اما استاندارد BOD در مواردی در ایستگاه های مختلف نقض شده است که به شرح جدول ۴ است. همان طور که در جدول مشاهده می شود برای فصل تابستان، در تمام ایستگاه ها استاندارد BOD نقض شده است. علت عمده این امر می تواند پایین آمدن آورد رودخانه در این فصل باشد. در تمام فصول هرچه به سمت پایین دست رودخانه حرکت می کنیم به علت ورود آلاینده های مختلف کشاورزی، شهری و صنعتی کیفیت رودخانه کاهش می یابد. به عنوان مثال در فصل بهار برای ایستگاه های یک، دو و سه استاندارد آب نقض نشده است اما برای ایستگاه های چهار و پنج این چنین نیست و رودخانه در محدوده استاندارد کیفی آب پاکستان نمی باشد.

جدول ۴: بررسی وضعیت کیفی پارامتر BOD با استفاده از استاندارد کاربری آب های سطحی پاکستان

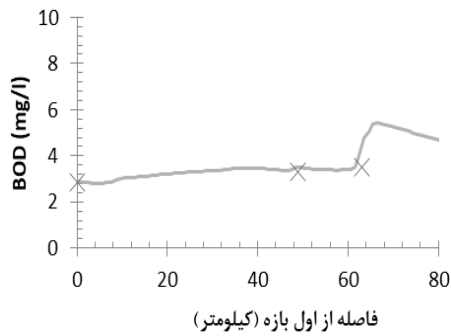
ایستگاه	استاندارد کاربردی		توضیحات	استاندارد کاربردی		توضیحات
	میلی گرم در لیتر	میلی گرم در لیتر		میلی گرم در لیتر	میلی گرم در لیتر	
	بهار			تابستان		
ایستگاه اول	۲/۸۹	۳		۳/۱۱	۳	نقض شده
ایستگاه دوم	۲/۹۰	۳		۳/۲۴	۳	نقض شده
ایستگاه سوم	۲/۷۰	۳		۳/۲۰	۳	نقض شده
ایستگاه چهارم	۳/۱۲	۳	نقض شده	۳/۱۹	۳	نقض شده
ایستگاه پنجم	۳/۸۵	۳	نقض شده	۳/۹۶	۳	نقض شده
	پاییز			زمستان		
ایستگاه اول	۱/۸۵	۳		۱/۴۰	۳	
ایستگاه دوم	۱/۴۵	۳		۱/۶۰	۳	
ایستگاه سوم	۲/۵۷	۳		۱/۵۰	۳	
ایستگاه چهارم	۲/۵۰	۳		۱/۸۹	۳	
ایستگاه پنجم	۳/۶۰	۳	نقض شده	۲/۸۰	۳	



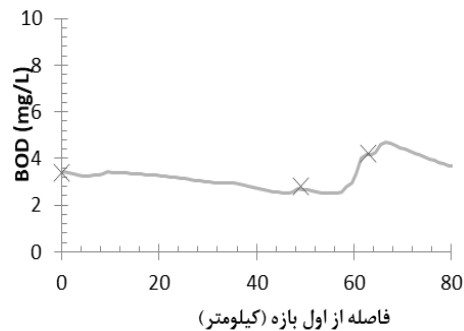
پارامترهای مدل که با فرض ثابت بودن آن‌ها مدل انجام شده است ارائه شده است. در (جدول ۵) ضرایب جنبشی مورد استفاده در مدل مشاهده می‌شوند. مقادیر این جدول با سعی و خطا بدست آمده است. در مرحله واسنجی مدل پارامترهای مدل با توجه به مقادیر نمونه برداری شده و اندازه گیری شده پارامترهای کیفی رودخانه کرخه بدست آمد. به منظور اطلاع از وضعیت غلظت شاخص BOD در رودخانه کرخه در بازه منطقه مورد مطالعه، شبیه‌سازی کیفی رودخانه برای این شاخص انجام صورت گرفت. با شبیه‌سازی شاخص BOD رودخانه در وضعیت کنونی، الگویی از کیفیت آب رودخانه در منطقه مورد نظر به دست می‌آید شبیه‌سازی شاخص BOD رودخانه در فصول مختلف در (شکل ۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر بدست آمده تقریباً منطبق بر مقادیر اندازه گیری شده در ایستگاه‌ها است. در تمام فصول رودخانه با روند افزایش BOD مواجه است، علت این امر می‌تواند ورود آلاینده‌ها در طول مسیر باشد.

جدول ۵: ضرایب جنبشی مورد استفاده در مدل Qual2k

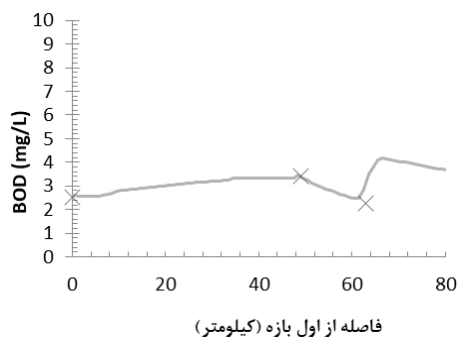
پارامتر	مقدار	واحد	حداقل	حداکثر
کربن	۴۰	gC	۳۰	۵۰
نیتروژن	۷/۲	gN	۳	۹
فسفر	۱	gP	۰/۴	۲
وزن خشک	۱۰۰	gD	۱۰۰	۱۰۰
کلروفیل	۱	gA	۰/۴	۲
مدل هوادهی	داخلی	-	-	-
اصلاح دما	۱/۰۲۴	-	-	-
اکسیداسیون کربن	۲/۶۹	gC/gO2	-	-
اکسیژن نیتریفیکاسیون	۴/۵۷	gN/gO2	-	-
CBOD اکسیژن	۰/۶	L/mgO2	۰	۱
Max growth rate	۲۰	gD/m2/d	۰	۱۰۰
Respiration rate	۰/۲	/d	۰	۰/۳
Photo respiration	۰/۵	-	۰	۰/۶
Inorganic carbon	۱/۹۵E-۵	Mole/L	۱/۹۵E-۶	۱/۹۵E-۴
ammonia	۵۰	ugN/L	۱	۱۰۰
Subsistence quota	۱۵	mgN/gD	۰/۰۷	۷۲
Max uptake for N	۱۲۰۰	mgN/gD/d	۳۵۰	۱۵۰۰
Internal N	۳	-	۱/۰۵	۵



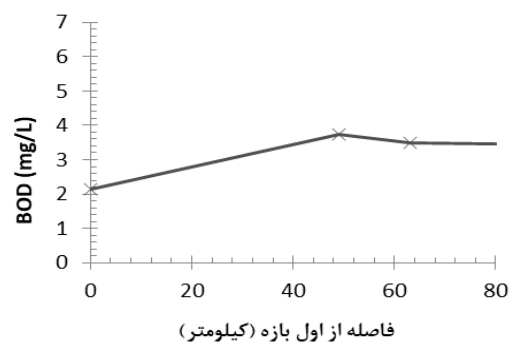
شبیه سازی BOD در فصل بهار



شبیه سازی BOD در فصل تابستان



شبیه سازی BOD در فصل پاییز



شبیه سازی BOD در فصل زمستان

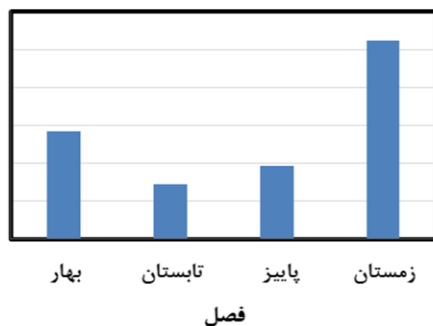
شکل ۲: شبیه سازی BOD در فصول مختلف سال (مدل واسنجی شده)

پس از واسنجی مدل مقادیر پارامترهای کیفی رودخانه با مدل شبیه سازی و شاخص WQI بدست آمد. (شکل ۳) نتایج میانگین فصلی شبیه سازی WQI در ایستگاه های مختلف را در فصل بهار نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود کمترین و بیشترین میزان شاخص WQI در طول مسیر به ترتیب مربوط به ایستگاه شماره پنج (الوان) و ایستگاه شماره یک (بالادست شوش) است. علت این امر کاهش کیفیت آب در طول مسیر به علت ورود آلاینده های مختلف به رودخانه است بطوری که کیفیت رودخانه با نظام کیفی خوب به نظام کیفی متوسط کاهش پیدا می کند. این کاهش کیفیت رودخانه برای تمام فصول اتفاق افتاده است. از ایستگاه دو (پل شهید ناجیان) تا ایستگاه سه (میثم تمار یا خویس) مقداری کیفیت آب بهبود پیدا می کند که علت این امر عدم وجود آلاینده موثر در طول مسیر و خود پالایی رودخانه است. به طور کلی نتایج محاسبات صورت گرفته بر اساس شاخص کیفیت آب نشان داد که در ایستگاه یک (بالادست شوش) بیشترین مقدار شاخص فصلی کیفیت آب مربوط به فصل زمستان به میزان ۷۵ که در نظام رتبه بندی کیفی آب در رده خوب و کمترین مقدار شاخص کیفیت آب در فصل تابستان به مقدار ۶۲ که در نظام کیفی آب در رده متوسط قرار دارد. در ایستگاه دو (پل شهید ناجیان) محاسبه پارامترهای شاخص کیفیت آب (WQI) برای این ایستگاه نشان داد که بالاترین شاخص فصلی کیفیت آب مربوط به فصل زمستان به میزان ۷۳ که در نظام کیفی آب در رده خوب قرار دارد و کمترین میزان شاخص

کیفیت آب در این ایستگاه مربوط به فصل تابستان به میزان ۵۹ که در نظام بندی کیفی آب در رده متوسط قرار دارد. در ایستگاه سه (خویس، میثم تمار) محاسبه پارامترهای کیفی آب بر اساس شاخص نشان داد که بالاترین میزان کیفیت آب در این ایستگاه مربوط به فصل زمستان به میزان ۷۵ که در رتبه بندی نظام کیفی آب در رده خوب قرار دارد و کمترین کیفیت آب در این ایستگاه مربوط به فصل تابستان به میزان ۵۷ که در نظام رتبه بندی در رده متوسط قرار دارد. در ایستگاه چهار (سن بهادل) محاسبه شاخص کیفی آب نشان داد که بالاترین شاخص کیفیت آب برای این ایستگاه مربوط به فصل زمستان به میزان ۶۸ می باشد که در نظام شاخص کیفی آب در رده متوسط قرار دارد و پایین ترین شاخص کیفیت آب مربوط به فصل تابستان به میزان ۵۴ که این مقدار نیز در رتبه بندی نظام کیفی در رده متوسط قرار دارد. در ایستگاه پنج (الوان) محاسبه شاخص کیفیت آب نشان داد که بالاترین میزان کیفیت آب در این ایستگاه مربوط به فصل زمستان با مقدار ۶۵ که در رتبه بندی نظام کیفی آب در رده متوسط قرار دارد و پایین ترین میزان شاخص مربوط به فصول تابستان و پاییز به میزان ۵۱ می باشد که در رتبه بندی نظام کیفی در رده متوسط قرار دارد. (شکل ۴) میانگین شاخص WQI در طول رودخانه برای فصول مختلف را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود مقدار این شاخص برای فصل تابستان به علت پایین آمدن حجم آورد رودخانه در پایین ترین سطح خود قرار دارد.

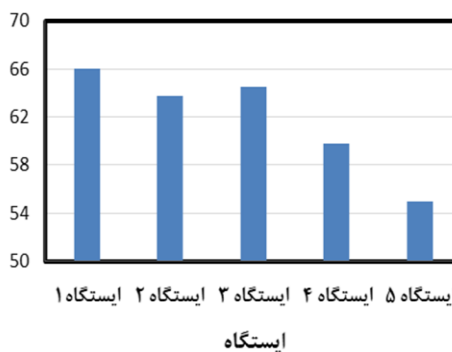
#### مقایسه نتایج شاخص (WQI) با مطالعات مشابه

متوسط کیفیت آب (WQI) رودخانه کرخه در طول سال و در بازه مورد مطالعه بین مقادیر ۵۱ و ۷۵ متغیر است. در (جدول ۶) مقدار شاخص WQI در رودخانه های اورگان، تجن و دز آورده شده است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با مطالعات مشابه انجام شده بر روی این رودخانه ها نشان داد که رودخانه کرخه نسبت به رودخانه دز وضعیت مطلوب تری دارد اما نسبت به رودخانه های اورگان و تجن وضعیت کیفی آن پایین تر است.



شکل ۴: میانگین شاخص WQI در فصول مختلف

سال در هر ۵ ایستگاه



شکل ۳: میانگین شاخص WQI در ایستگاه های

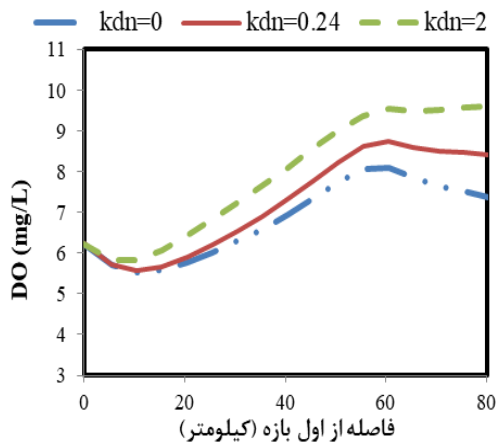
مختلف در فصل بهار

جدول ۶: مقایسه WQI با مطالعات مشابه

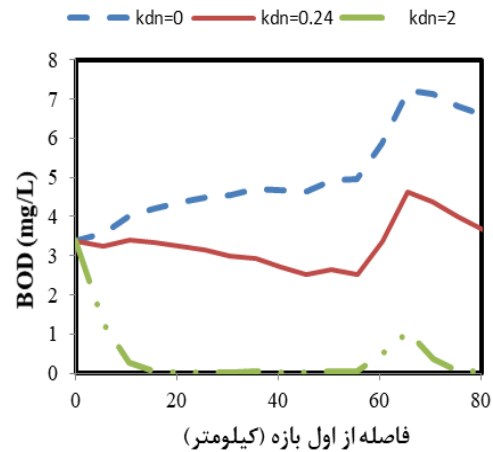
مکان	مقادیر شاخص کیفیت آب (WQI)	رودخانه
آمریکا	۷۸/۹-۸۸/۹	اورگان
ایران	۸۰-۹۵	تجن
ایران	۴۷-۷۰	دز

### تحلیل حساسیت مدل

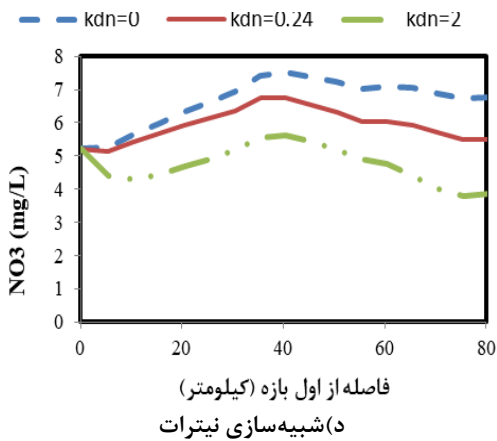
گاهی ممکن است تغییر در مقدار یک نرخ نتایج معکوسی در پارامترهای مختلف داشته باشد، یعنی باعث افزایش در مقدار یک پارامتر و کاهش پارامتر دیگری شود (مطالعات ظرفیت خودپالایی رودخانه‌ها، نشریه ۴۸۱). پس از شبیه‌سازی تحلیل حساسیت مدل در رابطه با نرخ‌های دینیتریفیکاسیون نیترات ( $k_{dn}$ )، اکسیداسیون BOD ( $k_{dc}$ ) و نرخ پایه تنفس جلبکی ( $k_{rlb}$ ) پرداخته شد. هر نرخ بازه مشخص دارد به طوری که کاربر ملزم است تا نرخ‌هایی که در نهایت انتخاب می‌کند در بازه مورد نظر قرار داشته باشد. برای تحلیل حساسیت مدل ابتدا مدل با نرخ مینیمم اجرا شد و نتایج آن با نرخ ماکزیمم مقایسه شد. نتایج نشان داد با افزایش نرخ دینیتریفیکاسیون نیترات مقدار اکسیژن محلول افزایش می‌یابد در حالیکه مقدار BOD با این افزایش در نرخ، کاهش می‌یابد. مقدار نیترات نیز با افزایش نرخ دینیتریفیکاسیون نیترات کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که حساسیت BOD (تغییر نتایج شبیه‌سازی BOD با تغییر نرخ‌ها) نسبت به دیگر پارامترها بیشتر است. نتایج شبیه‌سازی هر سه پارامتر BOD، نیترات و اکسیژن محلول تغییرات محسوسی نسبت به تغییر نرخ دینیتریفیکاسیون نیترات نشان داده‌اند، به این معنی که با تغییر در نرخ دینیتریفیکاسیون نیترات، تغییرات زیاد و قابل مشاهده‌ای در نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته است. در مورد نرخ اکسیداسیون BOD، BOD نسبت به اکسیژن محلول حساس‌تر است زیرا نتایج شبیه‌سازی BOD تغییرات شدیدتری نسبت به تغییر این نرخ به نمایش گذاشته است. همچنین نیترات حساسیت ضعیفی نسبت به این نرخ دارد. برای نرخ پایه تنفس جلبکی نیز تنها اکسیژن محلول دارای تغییرات می‌باشد در صورتی که BOD و نیترات دارای تغییرات غیر محسوسی هستند. اینگونه تحلیل در نتایج شبیه‌سازی که مشهور به تحلیل حساسیت است به کاربر این امکان را می‌دهد که مناسب‌ترین نرخ را برای مجموع پارامترها تعیین کند. برای دستیابی به بهترین ترکیب نرخ، بهترین روش این است که تمامی نرخ‌هایی که دارای حساسیت بیشتر نسبت به یک پارامتر و حساسیت کمتر نسبت به دیگر پارامترها هستند تعیین شوند و در ابتدای امر مقادیر این نرخ‌ها تعیین شود.



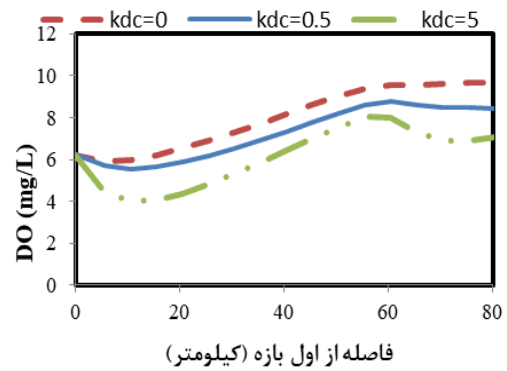
ب) بررسی تغییرات در شبیه‌سازی اکسیژن محلول با تغییر در مقدار نرخ دینیتریفیکاسیون نیترات



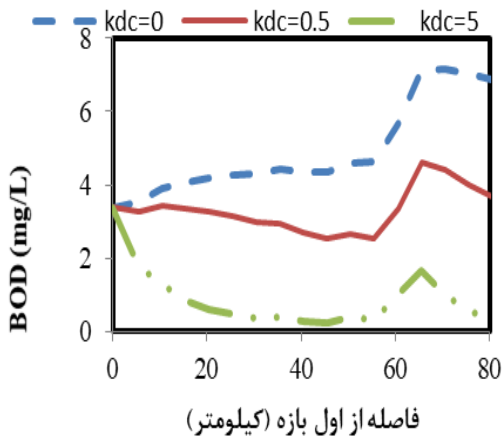
الف) شبیه‌سازی BOD محلول با تغییر در مقدار نرخ دینیتریفیکاسیون نیترات



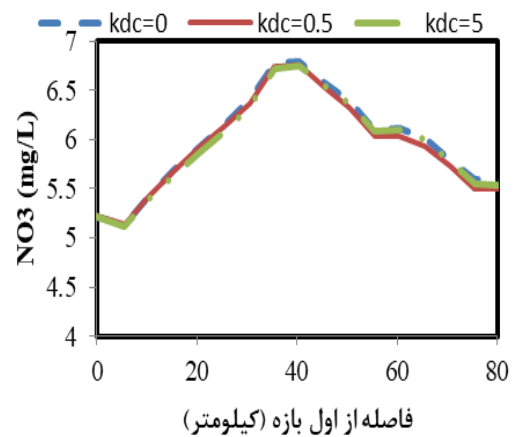
د) شبیه‌سازی نیترات



ج) شبیه‌سازی اکسیژن محلول با تغییر در مقدار نرخ BOD اکسیداسیون

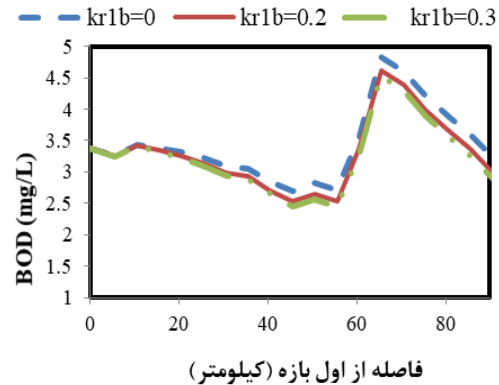
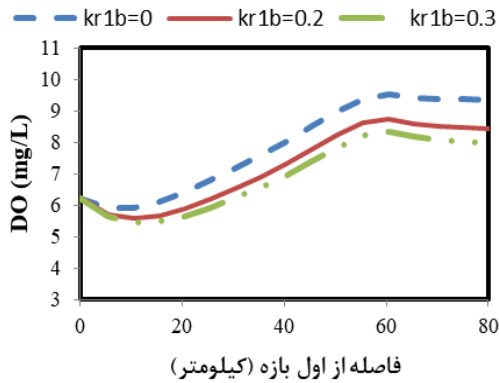


و) شبیه‌سازی BOD با تغییر در مقدار نرخ اکسیداسیون BOD

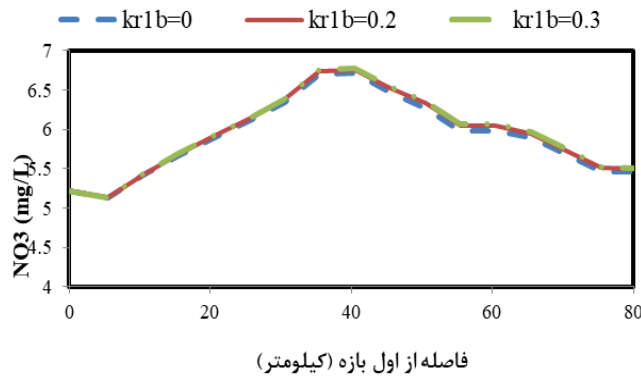


ه) شبیه‌سازی نیترات با تغییر در مقدار نرخ اکسیداسیون BOD

شکل ۵: بررسی تغییرات در پارامترها با تغییر در مقدار نرخ دینیتریفیکاسیون نیترات و نرخ پایه تنفسی جلبکی



ز) شبیه سازی BOD با تغییر در مقدار نرخ پایه تنفس جلبکی (ح) شبیه سازی اکسیژن محلول با تغییر در مقدار نرخ پایه تنفس جلبکی



ط) شبیه سازی نیترات با تغییر در مقدار نرخ پایه تنفس جلبکی

ادامه شکل ۵: بررسی تغییرات در پارامترها با تغییر در مقدار نرخ دینیترونیفیکاسیون نیترات و نرخ پایه تنفسی جلبکی

### بررسی اثر تخلیه پساب های صنعتی، فاضلاب های شهری و خانگی بر کیفیت آب

بار آلاینده که وارد رودخانه می شود به دو دلیل غلظت آن در طول رودخانه تغییر می کند: اول به دلیل اختلاط با حجم زیاد آب رودخانه و ترکیب با دبی بزرگتر (معادلات پخش-انتقال) و دوم به دلیل اندرکنش آلاینده ها با یکدیگر و محیط پذیرنده (معادلات کنش و واکنش اجزاء اصلی). برای بررسی اثر تخلیه پساب و فاضلاب بر روی کیفیت آب رودخانه کرخه تغییرات پارامتر WQI مد نظر قرار گرفته است. بر این اساس تغییرات کیفی رودخانه قبل و بعد از ورود بار آلودگی بررسی شد. استاندارد کاربری آب بصورت خطوط مستقیم منقطع نمایش داده شده است. خطوط منحنی منقطع وضعیت کیفی رودخانه قبل از حذف بارهای آلاینده را نمایش می دهد و خطوط منحنی غیر منقطع نتایج شبیه سازی بعد از حذف کلیه بارها را نمایش می دهد. همانطور که ملاحظه می شود برای بازه اول غلظت زمینه تاثیر قابل توجهی بر روی کیفیت آب رودخانه داشته است. در این بازه رودخانه نسبت به فاضلاب های ورودی بسیار حساس می باشد، با توجه به تمرکز آلاینده ها در این نقاط این منطقه به عنوان منطقه بحرانی در بازه اول در نظر گرفته می شود. در این منطقه تخلیه آلاینده های متعدد به وضعیت کیفی رودخانه شوک وارد کرده و لزوم تمرکز زدایی از این منطقه امری اجتناب ناپذیر است. در این

منطقه در صورتی که بار آلودگی به رودخانه حذف شود رودخانه رفته رفته به کیفیت خوب می‌رسد. بازه ایستگاه سوم تا ایستگاه چهارم نیز دارای حساسیت نسبتاً بالایی است و می‌تواند مطالعات تمرکز زدایی در این بازه مورد بررسی قرار بگیرد. با حذف آلاینده‌ها در این بازه روند بهبود وضعیت رودخانه با شیب ملایم‌تری نسبت به حالت قبل ادامه می‌یابد. بازه ایستگاه چهارم تا ایستگاه پنجم حساسیت کمتری نسبت به دو بازه قبل دارد اما به منظور بهبود وضعیت رودخانه بایستی بیشتر مورد توجه قرار بگیرد. این بازه انتهایی چون که تحت تاثیر بالادست خود است و کیفیت ابتدای آن پایین است، حائز اهمیت است. هرچه به سمت پایین دست رودخانه حرکت می‌کنیم کیفیت رودخانه از کلاس استاندارد طبقه‌بندی فاصله بیش‌تری می‌گیرد. در صورت حذف بار آلودگی در کل مسیر، میزان کیفیت آب رودخانه بهبود چشمگیری پیدا می‌کند. مطابق شکل مشاهده می‌شود روند بهبود کیفیت رودخانه با توجه به خاصیت خود پالایی خود صعودی بوده و آب با نظام کیفی متوسط به نظام کیفی خوب می‌رسد.

### نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش شبیه‌سازی وضعیت کیفی رودخانه کرخه در بالادست و پایین دست شهرستان شوش با استفاده از مدل QUAL2K بود. در این مطالعه بررسی کیفی رودخانه کرخه در بالادست و پایین دست شهرستان شوش انجام گرفت. بدین منظور با در نظر گرفتن پارامترهای کیفی آب و استانداردهای کیفی آب، با استفاده از مدل QUAL-2K توان خود پالایی این رودخانه ارزیابی شد. از این رو نه پارامتر BOD, COD, DO, PH, کدورت، نیترات، فسفات، کل کلیرم ها، کلیرم های مدفوعی به عنوان پارامترهای شاخص و مورد نیاز جهت برآورد شاخص WQI انتخاب شد و اثرات تخلیه آلاینده‌های ورودی به رودخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از شبیه‌سازی و اجرای مدل آنالیز حساسیت برای پارامترهایی از مدل انجام شد که بیشترین تأثیر را بر روی خروجی‌های مدل داشته‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب در طول مسیر رودخانه ارائه شد. نتایج در این بخش حاکی از آن بود که در فصل تابستان به علت کم شدن آورد رودخانه، کیفیت آن کاهش چشم‌گیری می‌یابد. روند کاهش کیفیت آب رودخانه در طول مسیر نیز به علت ورود زه‌آب‌های کشاورزی، پساب‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری کاملاً مشهود است. نتایج حاصل نشان از تمرکززدایی تخلیه فاضلاب‌ها در تمام بازه‌ها دارد. بررسی وضعیت فعلی کیفیت رودخانه بر اساس استاندارد طبقه‌بندی آب پاکستان نشان می‌دهد که جز BOD بقیه پارامترها در وضعیت استاندارد قرار دارند. استاندارد BOD در برخی از فصول نقض شده است که علت آن وجود بار آلاینده‌های آلی در مسیر رودخانه است. نتایج شبیه‌سازی سرعت نشان داد که در بازه ابتدایی رودخانه به علت شیب بستر، سرعت جریان بیش‌تر است و هرچه به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنیم از سرعت آن کاسته می‌شود. شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب نشان داد که به علت ورود آلاینده‌ها به رودخانه، سطح کیفیت رودخانه روند کاهشی داشته و

این امر در فصل تابستان به علت کم شدن آورد رودخانه تشدید می یابد. براساس شاخص کیفی WQI نیز وضعیت کیفی رودخانه بررسی و نتایج به دست آمده همانند قبل نشان از پایین آمدن سطح کیفی رودخانه دارد. این شاخص برای کل مسیر شبیه سازی شد و حاکی از آن بود که در فصل تابستان کیفیت آب تا رده متوسط نزول پیدا کند. نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که حساسیت BOD (تغییر نتایج شبیه سازی BOD با تغییر نرخها) نسبت به دیگر پارامترها بیشتر است. با افزایش نرخ دینیتریفیکاسیون نیترات مقدار اکسیژن محلول افزایش می یابد در حالی که مقدار BOD با این افزایش در نرخ، کاهش می یابد. در مورد نرخ اکسیداسیون BOD، BOD نسبت به اکسیژن محلول حساس تر است زیرا نتایج شبیه سازی BOD تغییرات شدیدتری نسبت به تغییر این نرخ به نمایش گذاشته است. همچنین نیترات حساسیت ضعیفی نسبت به این نرخ دارد. برای نرخ پایه تنفس جلبکی نیز تنها اکسیژن محلول دارای تغییرات می باشد در صورتی که BOD و نیترات دارای تغییرات غیر محسوسی هستند. نتایج نشان داد که با حذف آلاینده ها می توان وضعیت رودخانه را تا حد چشمگیری بهبود بخشید. پیشنهاد می شود در ادامه تحقیق حاضر با استفاده از دیگر مدل های شبیه سازی کیفیت آب همانند مدل Mike 11 و یا HEC-RAS این کار انجام شود و نتایج آن با تحقیق حاضر مقایسه شود. همچنین تاثیر احداث تصفیه خانه بر کیفیت رودخانه مورد آنالیز قرار گیرد.

### منابع

- آذری، آ.، آخوندعلی، ع.م.، رادمنش، ف. و حقیقی، ع. (۱۳۹۳). مدیریت کیفیت و آلودگی رودخانه در شرایط بهره برداری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی (بازه سد دز تا بند قیر). هفتمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران.
- شهریاری، ف.، جوادی فر، ن. و آخوندعلی، ع.م. (۱۳۹۰). بررسی تاثیر تغییرات میزان جریان بر کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از مدل Qual2kw، پنجمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.
- سید سراجی، م.ح.، حاتمی نیا، ح.، دهقانی پور، ا.ح. و ملکی پور، ب. (۱۳۸۹). اثرات تغییر دبی بر دما و اکسیژن محلول در رودخانه ها. همایش ملی آب با رویکرد آب پاک. دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباس پور).
- نصیراحمدی، ک.، یوسفی، ذ. و الف، ترسلی. (۱۳۹۱). پهنه بندی کیفیت آب رود هراز بر اساس شاخص NSWQI. مجله علوم پزشکی دانشگاه مازندران. ۲۲(۹۲): ۶۴-۷۱.
- نشریه ۴۸۱ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. (۱۳۸۸). راهنمای مطالعات ظرفیت خودپالایی رودخانه ها. تهران، ایران.



- De Andre, L. N., Mauri. G. R., and Mendonça, A. S. F. (2012).** General multiobjective model and simulated annealing algorithm for waste-load allocation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(3), pp: 339-344.
- Park, S. S., and Lee, Y. S. (2002).** A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling*, 152(1), pp: 65-75.
- Kannel, P. R. S. (2007).** Application of automated QUAL2K for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modeling*. 202 (34) pp: 503-517.
- Wu, M., Tang, X., Li, Q., Yang, W., Jin, F., Tang, M., and Scholz, M. (2013).** Review of ecological engineering solutions for rural non-point source water pollution control in Hubei province, China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(5), pp: 1-18.
- Zhang, R., X. Qian, H. Li, X. Yuan, and R. Ye. (2012).** Selection of optimal river water quality improvement programs using QUAL2K: A case study of Taihu Lake Basin, China. *Sci. Total Environ.* 431: pp: 278-285.