محیط‌شناسی، دورهٔ ۴۳، شمارهٔ ٤، زمستان ۱۳۹۶، صفحهٔ ۷۴۲-۷۲۷

بررسی خودپالایی بازهٔ کوهستانی رودخانهٔ عباس‌آباد همدان

علی ونائی[۱]، صفر معروفی[۲]*، آرش آذری[۳]

۱. کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی علوم آب، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، a.vanaei84@gmail.com

۲. استاد، گروه مهندسی علوم آب، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان

۳. استادیار، گروه مهندسی علوم آب، دانشگاه رازی، arashazari.ir@gmail.com

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

چکیده

در این مطالعه ظرفیت خودپالایی رودخانهٔ عباس‌آباد همدان با استفاده از مدل QUAL2KW، مبتنی بر شبیه‌سازی پارامترهای DO، BOD، COD، NH_4، NO_3 و PO_4، با در نظر گرفتن استانداردهای کیفی آب در دو بازهٔ طولی ۱/۸۶ و ۴/۳۳ کیلومتر ارزیابی شد. نتایج نشان‌دهندهٔ افزایش DO و NO_3 به‌ترتیب به میزان ۵ و ۱۵ درصد در کل رودخانه است. ارتقاء کیفیت آب رودخانه از نظر شاخص‌های BOD و COD به‌میزان ۴۵ درصد، و کاهش PO_4 و NH_4 به‌ترتیب به‌میزان ۱۶ و ۷۵ درصد است. همچنین نتایج بیانگر آن است که حداکثر ظرفیت پذیرش مقادیر BOD، COD، NH_4، NO_3 و PO_4 برای بازهٔ اول به‌ترتیب ۱۰۱/۹۲، ۱۷۱/۹۵، ۲۶/۳۰، ۱۸۱/۷۸ و ۳/۸۰ کیلوگرم در روز و در بازهٔ دوم به‌ترتیب ۹۸۷/۸۷، ۱۷۳۱/۷۹، ۶۸/۳۶، ۲۶/۲۱ و ۳۳/۴۹ کیلوگرم در روز است. براساس این نتایج مقدار PO_4 رودخانه همواره بیش از استاندارد تعیین شده برای مصارف شرب بوده و می‌بایست به‌میزان ۳۶ درصد کاهش یابد. توان خودپالایی رودخانه در بازهٔ نخست به دلیل هوادهی مناسب رودخانه نسبت به بازهٔ دوم بیشتر است. بیشترین ظرفیت خودپالایی در کل رودخانه مربوط به شاخص BOD و کمترین میزان نیز مربوط به شاخص‌های COD و NO_3، به ترتیب در بازه‌های اول و دوم مشاهده شد.

کلیدواژه

خودپالایی، رودخانه عباس‌آباد، کیفیت آب، مدل QUAL2KW

۱. سرآغاز

آب‌های سطحی به‌ویژه رودخانه‌ها از مهمترین منابع تأمین آب، برای مصارف شرب و کشاورزی هستند. امروزه رودخانه‌ها، به سبب تخلیهٔ فاضلاب‌های شهری و صنعتی و زه‌آب‌های کشاورزی در معرض آلودگی قرار دارند. در اثر افزایش انواع آلودگی‌ها و استفاده از رودخانه‌ها به‌عنوان محل تخلیه آن‌ها، بدون در نظر گرفتن آثار زیست‌محیطی و رعایت‌نکردن استانداردهای تخلیه، توان خودپالایی رودخانه‌ها کاهش یافته و کیفیت آب آن‌ها به‌شدت تحت تأثیر قرار گرفته است. بنابراین برای داشتن آبی با کیفیت مطلوب، ظرفیت پذیرش رودخانه‌ها باید در طول رودخانه مشخص شده و در حد قابل قبول باقی بماند (Campolo et al., 2002). در تدوین مقررات تخلیهٔ پساب به رودخانه‌ها، به عواملی از قبیل ماهیت فاضلاب تخلیه شده (نقطه‌ای یا غیرنقطه‌ای، تجزیه‌پذیری و شدت آلودگی)، ظرفیت خودپالایی رودخانه (ویژگی‌های هیدرولیکی، جمعیت گیاهی و جانوری، ماهیت بستر) و کل بارگذاری جرمی ورودی در نقاط مختلف باید توجه شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۸۴). قدرت طبیعی رودخانه در تصفیه و حذف مواد آلاینده از

* نویسنده مسئول: Email: marofisafar59@gmail.com

محیط‌زیست، موجب ترغیب استفاده از آن به‌منظور تصفیهٔ آلاینده‌ها حتی بیش از توانایی رودخانه شده است (عظیمی، ۱۳۸۷). فرآیند خودپالایی[1] تأثیر تلفیقی ترقیق[2] ته‌نشین[3]، جذب و تجزیهٔ‌زیستی[4] است که منجر به بهبود کیفیت آب رودخانه می‌شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۸۸). با توجه به اینکه هر رودخانه تا حدود معینی ظرفیت پذیرش آلاینده‌های ورودی را داراست، بنابراین امروزه بررسی کیفی و زیست‌محیطی این منابع مطرح است (میرزایی و همکاران، ۱۳۸۴). پارامترهای دخیل در اکوسیستم رودخانه، بازهٔ وسیعی را در بر می‌گیرد و از آنجا که نرخ حذف، کاهش و افزایش آلاینده‌ها و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها متفاوت است، و در برخی موارد نیز اشتراکاتی وجود دارد، لذا پرداختن به همهٔ ویژگی‌ها و پارامترهای کیفی آب میسر نیست. بنابراین به‌منظور بررسی ویژگی‌های کیفی رودخانه در نظر گرفتن پارامترهایی که بیشترین تأثیر را در فرآیند خودپالایی رودخانه، با توجه به محدودیت‌های زمانی و مکانی و شیوهٔ مدل‌سازی که بیان‌کنندهٔ ویژگی‌های دیگر پارامترهای کیفی آب باشند، ضرورت می‌یابد.

برای ارزیابی آثار تخلیهٔ پساب بر روی منبع پذیرنده، لازم است مطالعات خودپالایی انجام شود. بدین‌منظور، نیاز به ابزارهایی است تا بتوان در شرایط مختلف، کیفیت آب را پیش‌بینی کرد. مدل‌سازی کیفی رودخانه یکی از ابزارهای مهم و کم هزینه در بررسی مشکلات و بررسی راه‌حل‌ها، در بهبود وضعیت کیفی رودخانه است. در رویکرد مدل‌سازی، روابط حاکم بر پدیده‌ها به یکدیگر مرتبط می‌شوند تا بتوان رابطهٔ علت و معلولی بین بار آلاینده‌های ورودی به رودخانه و تغییرات کیفیت آب را تعیین کرد. در دهه‌های گذشته، استفاده از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی اکولوژیکی و واکنش‌های کیفی در آب‌های سطحی رواج بسیاری یافته است و روش‌های شبیه‌سازی خط‌مش‌های جامع و مناسب برای ارزیابی روش‌های کاهش بار آلودگی ارائه داده‌اند (Chapra & Pelletier, 2006; Kannel et al., 2007) تاکنون نرم‌افزارهای مختلفی برای این منظور طراحی و آزمایش شده است، از جمله می‌توان WASP6، CE-QUAL-W2، MIKE 11، QUAL2E و QUAL2KW را نام‌برد. به‌عنوان مدل D۱، QUAL2K یکی از بهترین ابزارها برای شبیه‌سازی کیفیت آب با توجه به انعطاف‌پذیری آن، سهولت استفاده و در دسترس بودن آن است (Hanfeng et al., 2013). همچنین از این مدل برای تعیین حداکثر بار کل روزانهٔ رودخانه‌ها و مجوزهای تخلیه در ایالات متحده و دیگر کشورها استفاده زیادی می‌شود.

خدام محمدی و بوستانی (۱۳۹۵) به ارزیابی توان خودپالایی و نقش اکسیژن محلول در کیفیت آب رودخانهٔ کر پرداختند. نتایج نشان داد وجود پل‌ها و تأسیسات آب‌بند مانند بند امیر، پل رحمت‌آباد و بند حسن‌آباد می‌تواند باعث افزایش تلاطم و افزایش هوادهی و قدرت خودپالایی رودخانه کر و در نتیجه افزایش اکسیژن محلول در آن شود. حسینی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی تحت‌عنوان بررسی کارایی مدل QUAL2KW در خودپالایی رودخانه (مطالعهٔ موردی رودخانه کارون در بازهٔ زرگان – کوت امیر)، بیان کردند که مدل QUAL2KW دارای کارایی خوبی برای بررسی خودپالایی رودخانه‌ها است و در مورد رودخانه کارون، این مدل توانایی شبیه‌سازی خوبی داشته است. همچین Vivin Sintia و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعهٔ خود با استفاده از نرم‌افزار QUAL2KW به شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب شامل دما، pH، DO، BOD، TSS، NO_3، NH_4 و PO_4 در رودخانهٔ کالی سورابایا (Kali Surabaya) پرداختند. آن‌ها محاسبات لازم برای تعیین حداکثر ظرفیت پذیرش فاضلاب که می‌تواند به رودخانه تخلیه شود را انجام دادند. نتایج نشان داد حداکثر ظرفیت پذیرش NH_4 بین ۱۰۰ کیلوگرم بر روز تا ۳۵۶۳ کیلوگرم بر روز و NO_3 در بازهٔ ۹۷۶ تا ۱۴۳۰۶ کیلوگرم بر روز است. به‌طور مشابه Zhang و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی با استفاده از مدل QUAL2K کیفیت آب حوضهٔ آبریز دریاچه تایهو (Taihu)

چین را بررسی کردند و حداکثر بار سالانهٔ مجاز برای آلاینده‌های COD، NH_3، نیتروژن کل، و فسفر کل را به‌ترتیب، ۵۲۱۶/۳۱، ۴۹۱/۷۱، ۹۴۸/۵۳ و ۱۰۴/۳۸ تن برآورد کردند. این محققان گزارش کردند که بار آلودگی برای تحقق اهداف کیفیت آب به‌ترتیب به ۱۳/۳۵، ۲۷/۲۶، ۴۷/۷۵ و ۳۷/۰۸ درصد کاهش نیاز دارد. حاتمی بهمن‌بیگلو و همکاران (۱۳۹۰) خودپالایی رودخانه سبزکوه را در بازه‌ای به‌طول ۱۸ کیلومتر با تعریف سناریوهای مختلف برای آن مطالعه کردند. تحقیقات این محققان نشان داد که رودخانهٔ سبزکوه برای پارامترهای نیتریت و آمونیوم دارای قدرت خودپالایندگی است ولی در مورد بار فسفری رودخانه پتانسیل مناسبی ندارد و منابع آلودگی غیرنقطه‌ای در طول مسیر رودخانهٔ سبزکوه نقش به‌سزایی در افزایش بار فسفری دارند. همچنین Masduqi و Syafi (۲۰۱۱) از این مدل برای محاسبهٔ بار آلودگی مجاز به رودخانه‌ها استفاده کردند. یافته‌های ایشان نشان داد که این مدل قبل از استفاده باید اعتبارسنجی شده و سپس می‌تواند برای محاسبه سناریوهای مختلف استفاده شود. در این راستا مطالعاتی با استفاده از مدل QUAL2KW توسط (Gikas, 2014; Sarda & Sadgir, 2015; Mehrasbi & Farahmand Kia, 2015; Gupta et al., 2013) انجام یافته است. ایشان بیان داشتند این مدل ابزاری مناسب برای مدیریت و تصمیم‌گیری در زمینهٔ کیفیت آب رودخانه است.

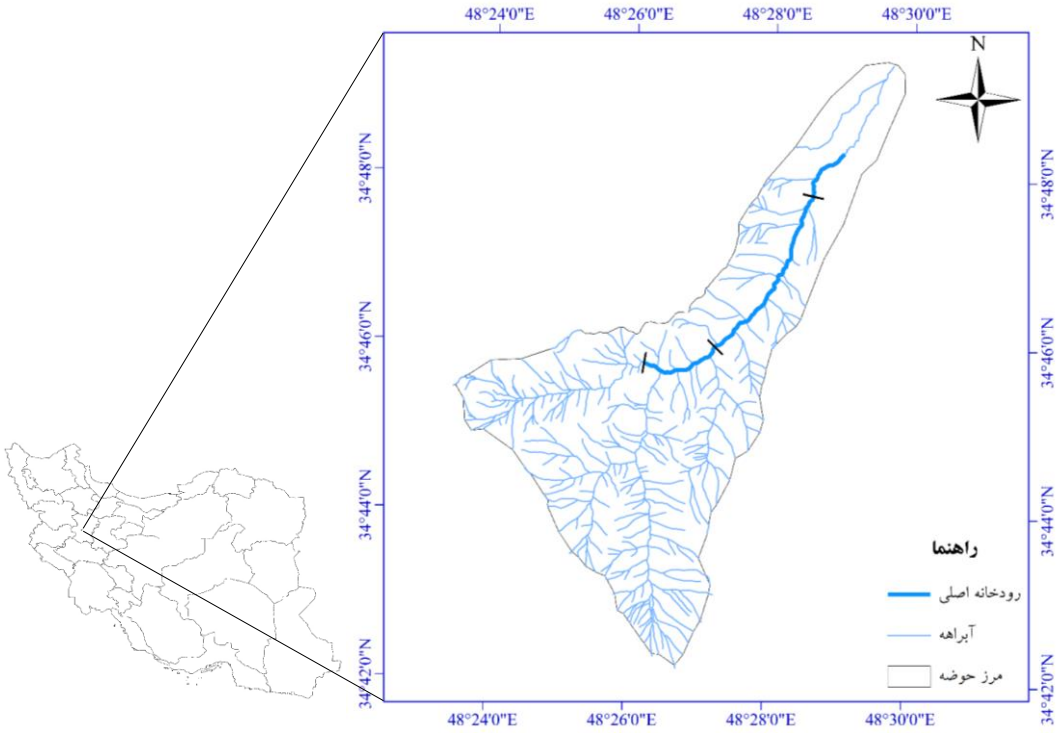
نتایج شبیه سازی، ابزار مدیریتی مفیدی است که می‌تواند به سیاست‌گذاران در تعیین استراتژی‌های واقع‌بینانه با در نظر گرفتن شرایط خاص هر حوضه و همچنین در پیش‌بینی اثر تخلیهٔ تصادفی یا بارهای آلایندهٔ اضافی یاری رساند (Oliveira, 2012). با توجه به بررسی منابع انجام شده و مطالعهٔ تحقیقات پیشین می‌توان دریافت که در سنوات اخیر محققان سعی کرده‌اند که از مدل‌هایی از قبیل مدل QUAL2KW به‌منظور ارزیابی المان‌های آلودگی رودخانه (از قبیل COD، آمونیوم، نیتروژن و فسفر) استفاده کنند. اغلب این مطالعات در حوضه‌های بزرگ مقیاس صورت گرفته است. بنابراین در این تحقیق سعی شده است که از این ابزار در یک حوضهٔ کوچک مقیاس کوهستانی نسبتاً پرشیب استفاده شود. در این راستا ویژگی‌های کیفی آب از قبیل اکسیژن محلول (DO)[۵]، اکسیژن‌خواهی زیستی (BOD)[۶] و شیمیایی (COD)[۷]، نیترات، آمونیوم و فسفات در رودخانهٔ عباس‌آباد همدان بررسی شده است.

هدف از تحقیق حاضر شبیه‌سازی تغییرات پارامترهای کیفی آب رودخانه عباس‌آباد با کمک مدل QUAL2KW و برآورد حجمی از آلودگی در دو بازه از این رودخانه است، بدون اینکه مشکلات زیست‌محیطی ایجاد کند و رودخانه توان خودپالایی آن را نیز داشته باشد. نتایج این بررسی می‌تواند در تدوین برنامهٔ کنترل بارگذاری مواد آلاینده (TMDL)[۸] برای رودخانه‌های مناطق کوهستانی نظیر عباس‌آباد مفید واقع شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. منطقهٔ مطالعاتی

همدان منطقه‌ای کوهستانی است و کوه الوند با ارتفاعی در حدود ۳ هزار و ۳۱۲ متر از مهمترین ارتفاعات آن به حساب می‌آید. رودخانهٔ عباس‌آباد به‌طول ۱۸ کیلومتر از دامنه‌های کوه فخرآباد به ارتفاع ۳۳۱۲ متر (ارتفاعات الوند) در ۱۲ کیلومتری جنوب‌غربی این شهر سرچشمه می‌گیرد و در جهت شمال جاری می‌شود. این رودخانه در مسیر خود (در حد فاصل مناطق گنج‌نامه و عباس‌آباد)، شاخه‌هایی را از اطراف دریافت می‌کند و پس از آبیاری باغ‌های روستای عباس‌آباد همدان، در اراضی گراچقا به رودخانهٔ خاکو (گیشین) می‌ریزد. رودخانهٔ عباس‌آباد به‌دلیل آنکه دارای حوضه آبریزی کوهستانی و با شیبی تند است، دارای جریانی سریع است. این رودخانه به‌دلیل داشتن حوضه‌ای برفی، دارای رژیمی دائمی است (وزارت نیرو، ۱۳۸۴).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدودهٔ مورد مطالعه

۲. ۲. روش تحقیق

در این تحقیق برای شبیه‌سازی پارامترهای DO، BOD، COD، نیترات، آمونیوم و فسفات و محاسبهٔ توان خودپالایی رودخانهٔ عباس‌آباد همدان از مدل QUAL2KW استفاده شده است. به‌منظور واسنجی مدل، اطلاعات لازم برای سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۱ در ماه‌های اردیبهشت، خرداد و مرداد از سازمان حفاظت محیط‌زیست همدان تهیه شد و به‌منظور آزمایش و صحت‌سنجی مدل، از داده‌های اندازه‌گیری شده در اردیبهشت، خرداد و مرداد سال ۱۳۹۴ استفاده شد. مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های نمونه‌برداری، مربوط به ماه‌های مورد بررسی در جدول ۱ بیان شده است. برای هر پارامتر، شبیه‌سازی در دو فصل بهار (اردیبهشت و خرداد) و تابستان (مرداد) صورت گرفت. داده‌های فصل بهار به‌عنوان الگویی از فصل پر آب، و داده‌های فصل تابستان به‌عنوان الگویی از فصل خشک در نظر گرفته شدند.

به‌منظور تعیین دبی نرمال رودخانه (به‌عنوان اطلاعات ورودی مدل)، از دو الگوی منحنی تداوم جریان رودخانه و میانگین متحرک سه ساله آبدهی رودخانه استفاده شد و براساس دورهٔ آماری ۴۳ ساله (۱۳۵۰- ۱۳۹۲)، دبی نرمال برای ماه‌های مورد بررسی تعیین شد.

۲. ۳. جمع‌آوری و بررسی داده‌های موجود

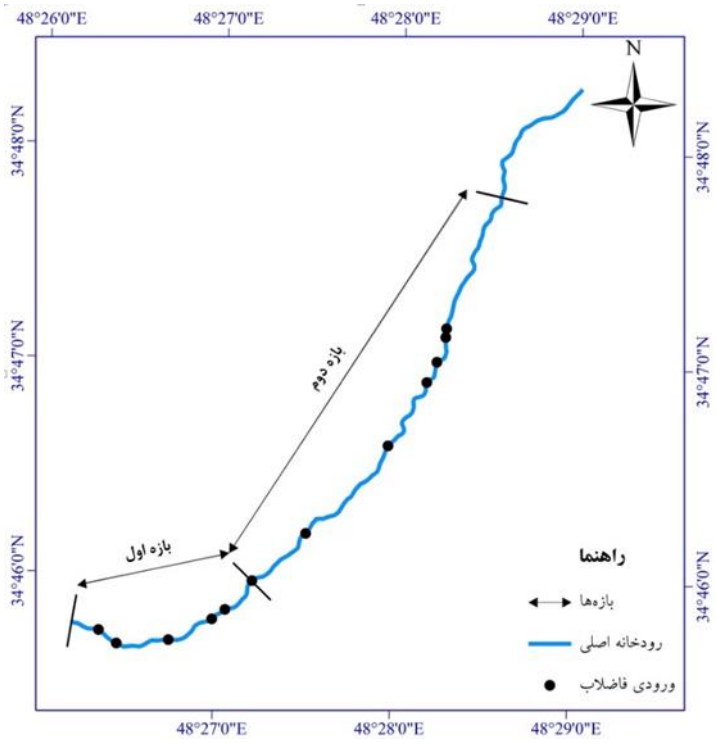
به‌منظور شناسایی موقعیت رودخانه عباس‌آباد همدان، حوضهٔ آبریز این رودخانه، زمین‌های کشاورزی، راه‌های دسترسی به رودخانه، مراکز اقامتی اطراف رودخانه و منابع آلایندهٔ نقطه‌ای آن‌ها بر روی نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ تعیین شد. برای شبیه‌سازی کیفی رودخانهٔ عباس‌آباد اطلاعاتی از قبیل دبی، شیب طولی رودخانه بین هر ایستگاه، ضریب مانینگ، عرض کف، شیب دیواره، فاصلهٔ بین هر یک از ایستگاه‌ها، دمای متوسط هوا، دمای نقطه شبنم، دمای آب، سرعت باد، تعداد روزهای ابری، درصدی از رودخانه که در اثر کوه‌ها و پوشش گیاهی زیر سایه قرار گرفته‌اند و وجود یا عدم جلبک در کف رودخانه، مورد نیاز مدل است.

جدول ۱. مشخصه‌های آماری داده‌های نمونه‌برداری شده

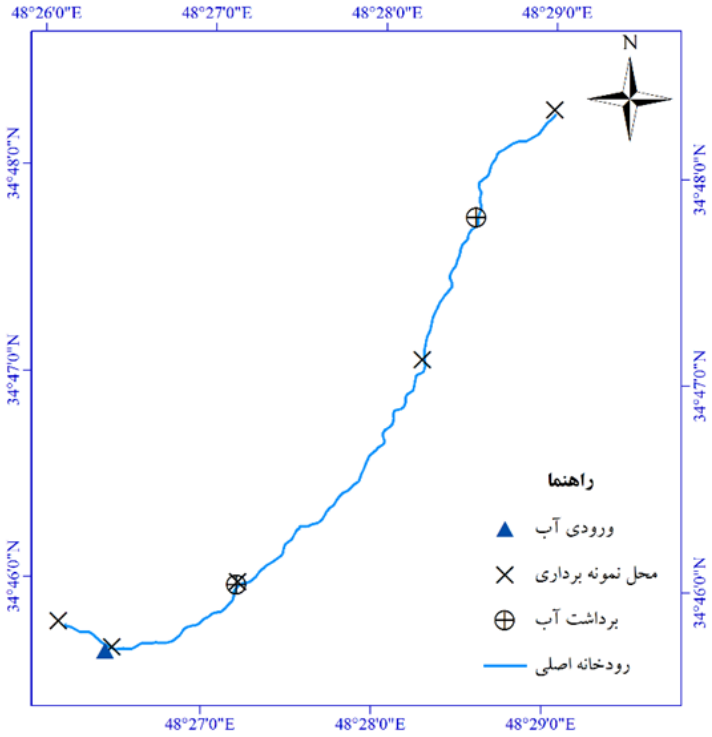
ایستگاه	PO_4			NO_3			NH_4			COD			BOD			DO		
	(µg/l)									(mg/l)								
	بیشینه	متوسط	کمینه	بیشینه	متوسط	کمینه	بیشینه	متوسط	کمینه	بیشینه	متوسط	کمینه	بیشینه	متوسط	کمینه	بیشینه	متوسط	کمینه
گنج‌نامه	۶۹۳/۷	۱۶۷	۱۹/۸	۹۰۰	۵۵۷/۳	۱۱۰	۹۵۰۸/۳	۵۸۹۶	۰	۱۲/۸	۶/۵۱	۱/۰۹	۷/۳۰	۲/۵۶	۰/۶۲	۸/۸۶	۷/۱۷	۶/۳۴
تاریک‌دره	۶۷۰/۸	۱۹۱	۳۲	۱۲۷۶/۴	۷۱۱	۱۷۰/۶	۱۳۶۵۷/۸	۷۳۸۰/۵	۴۳۶/۷	۲۷/۵۱	۱۳/۳۸	۵/۷۷	۱۴/۶۵	۵/۷۴	۱/۸۷	۸/۷۶	۶/۷۶	۵/۴۶
تقسیم‌آب ۱	۶۸۹	۲۰۰	۳۳	۱۲۹۸/۵	۷۱۶	۱۹۳/۵	۱۵۳۹۷/۱	۷۹۷۸	۶۱۱/۴	۲۳/۰۱	۹/۸۱	۳/۱۴	۱۲/۷۷	۴/۱۸	۰/۵۱	۸/۸۲	۶/۸۴	۶/۰۱
رستوران ساحلی	۶۸۳/۲	۲۰۳/۶	۴۲	۱۲۰۰	۷۱۸	۲۱۰	۱۳۹۹۶/۶	۷۷۸۳/۶	۸۷۳/۴	۴۰/۶۴	۱۷/۳۰	۴/۸۲	۲۰/۴۴	۷/۹۱	۲/۰۷	۸/۷۴	۶/۷۲	۵/۰۹
موزه	۸۹۳/۷	۳۲۶/۵	۴۶	۱۸۰۰	۸۸۳/۵	۲۵۰	۲۲۱۴۶/۲	۱۰۵۰۱/۵	۸۰۰	۴۸/۲۰	۲۲/۳۷	۴/۱۳	۱۸/۲۵	۹/۷۴	۰/۹۷	۸/۷۵	۶/۸۶	۵/۳۰

ضریب مانینگ با توجه به وضعیت بستر، جدارهٔ رودخانه و مسیر آن براساس بازدیدهای صحرایی منطقه و همچنین با مقایسهٔ عکس‌های مرجع بین ۰/۰۲۸ تا ۰/۰۳۵ انتخاب شد. بقیهٔ پارامترها براساس بازدیدهای محلی در زمان‌های مختلف، آمار ایستگاه هواشناسی فرودگاه همدان و نقشه‌برداری‌های صورت گرفته تعیین شدند.

براساس بازدیدهای میدانی و تعیین محل‌های دفع فاضلاب به رودخانه عباس‌آباد، بازه‌بندی انجام یافت که شامل بازهٔ نخست (مربوط به مصارف شرب) و بازهٔ دوم (مربوط به مصارف کشاورزی) است (شکل ۲). ضمناً محل‌های برداشت آب (تقسیم آب ۱، ۲ و شاخه فرعی تاریک‌دره) و موقعیت نقاط نمونه‌برداری کیفی (۵ ایستگاه)، از محل گنج‌نامه تا موقعیت موزهٔ تاریخ طبیعی (در پشت دانشکدهٔ کشاورزی)، که به‌طول ۷/۴۳ کیلومتر است، در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. از این ایستگاه‌ها در ماه‌های مورد نظر نمونه‌برداری آب صورت گرفته و آزمایش‌های کیفی مورد نیاز انجام شد. محل ایستگاه‌های مورد نظر به‌نحوی انتخاب شدند که نتایج به‌دست آمده از هر ایستگاه بتواند شاخص گویایی از وضعیت بالادست خود بوده و اثر ورود منابع آلاینده را در مقایسه با ایستگاه‌های پایین دست نشان دهد (نوشادی و حاتمی‌زاده، ۱۳۸۹). برای انجام فرآیند مدل‌سازی، مسیر رودخانه به ۱۶ قطعه تقسیم‌بندی شد (شکل ۴). با توجه به اینکه کیفیت آب رودخانه تحت تأثیر دبی و درجه حرارت است، تعیین ماه بحرانی از نظر کیفیت آب رودخانه، براساس میانگین متحرک ۳ ساله و آمار دبی ۴۳ ساله رودخانه صورت گرفت، و مردادماه به‌عنوان ماه خشک انتخاب شد. علاوه بر مرداد ماه، به‌منظور شناسایی پارامترهای کیفی آب، ماه‌های اردیبهشت و خرداد نیز به‌عنوان ماه تر انتخاب و شبیه‌سازی در این ماه‌ها نیز انجام شد.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منابع آلایندهٔ نقطه‌ای، بازهٔ نخست (شرب) و بازهٔ دوم (کشاورزی) در محدودهٔ مورد مطالعه



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی محل‌های برداشت آب، شاخهٔ فرعی و ایستگاه‌های نمونه‌برداری محدودهٔ مورد مطالعه

۲. ۴. فرآیند TMDL

ظرفیت خودپالایی رودخانه یا ظرفیت بارگذاری (LC)[۹] که به آن حداکثر بار کل روزانه (TMDL) نیز گفته می‌شود و براساس رابطهٔ ۱ توصیف می‌شود، بیشترین مقدار بارگذاری آلایندهٔ قابل تحمل توسط یک رودخانه است، به شرط آن‌که استانداردهای کیفیت آب رعایت شوند. سهم‌بندی بار مواد زائد (WLA)[۱۰] بخشی از حداکثر بار کل روزانه است که به منبع آلودگی نقطه‌ای فعلی یا آتی تخصیص داده می‌شود. سهم‌بندی بار (LA)[۱۱] درصدی از حداکثر بار کل روزانه است که به یک منبع آلودگی غیرنقطه‌ای فعلی یا آتی تخصیص داده می‌شود. مجموع سهم‌بندی بار مواد زائد برای منابع نقطه‌ای (WLA) و سهم‌بندی بار برای منابع غیرنقطه‌ای (LA) به اضافهٔ حاشیه‌ای ایمنی (MOS)[۱۲]، معادل TMDL است.

$$LC=TMDL=(WLA+LA+MOS) \quad (۱)$$

بدین ترتیب، حداکثر بار مواد زائد قابل تخلیه در رودخانه را می‌توان تعیین کرد، به‌طوری که استاندارد کیفیت آب مربوط به کاربری رودخانه نقض نشود. مطالعات ظرفیت بارگذاری و TMDL شامل فعالیت‌های مختلفی است که در چند سطح یا مرحله صورت می‌گیرد.

الف- استانداردهای کیفیت آب

در بررسی ظرفیت خودپالایی رودخانهٔ عباس‌آباد، با توجه به اینکه بخشی از آب رودخانه برای تأمین آب شرب شهر همدان (بازهٔ نخست) و بخشی نیز به‌عنوان حقابه‌های کشاورزی برای آبیاری باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی (بازهٔ دوم) استفاده می‌شود، استانداردهای مربوط به آب شرب و کشاورزی در دو بازهٔ مربوطه در نظر گرفته شد. بازهٔ نخست از محدودهٔ گنج‌نامه تا محل تقسیم آب یک، و بازهٔ دوم از محل تقسیم آب یک تا محل برداشت آب در پشت دانشکدهٔ کشاورزی (تقسیم آب دو) انتخاب شد (شکل ۴). در این رابطه از استانداردهای کیفیت آب‌های ایران (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۹۰) استفاده شد. در این

استاندارد کیفیت آب برای کاربری شرب به سه گروه تقسیم‌بندی شده است، که استاندارد گروه دوم (آبی که پس از تصفیهٔ فیزیکی معمول، تصفیهٔ شیمیایی و گندزدایی مانند پیش کلرزنی، انعقاد و لخته‌سازی، ته‌نشینی، فیلتراسیون و گندزدایی قابل شرب خواهد بود) استفاده شد. ضمناً به‌دلیل نبود برخی از پارامترهای مورد بررسی در این گروه، سعی شد از دیگر استانداردهای موجود در کشور و یا از استاندارد آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی (WHO) استفاده شود. همچنین در خصوص آب مورد استفاده در کشاورزی، از استاندارد FAO استفاده شد.

ب- حاشیهٔ ایمنی

ضریب ایمنی در واقع بازتاب تأثیر عواملی است که در تحلیل مدل‌سازی مدنظر قرار نگرفته و موجب تفاوت در غلظت پارامترهای محاسبه شده و اندازه‌گیری شده می‌شود. در این مطالعه برای تعیین ضریب ایمنی، پس از انجام مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل، نخست اختلاف تمامی داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را محاسبه کرده، و سپس با استفاده از نرم‌افزار SMADA، بهترین توزیع احتمالاتی برازش داده شد و احتمال ۵۰ درصد آن تعیین شد. نهایتاً برای هر پارامتر (برای افزایش سطح اطمینان)، مقدار محاسبه شده به‌وسیلهٔ روش احتمالاتی، بر میزان تعیین شده توسط استاندارد کیفیت‌های ایران افزوده شد.

۲. ۵. تعیین ظرفیت خودپالایی یا میزان بار ورودی

به‌منظور ارزیابی ظرفیت خودپالایی رودخانه در بازه‌های شرب (بازهٔ نخست) و کشاورزی (بازهٔ دوم)، بارگذاری یا کاهش بار به‌نحوی انجام گرفت که کیفیت موجود آب، میزان استاندارد کاربری در نظر گرفته شده را نقض نکند. حداکثر میزان بار ورودی (Li) از پارامترهای مورد بررسی (بر حسب kg/day)، در هر بازه از رابطهٔ ۲ محاسبه شد.

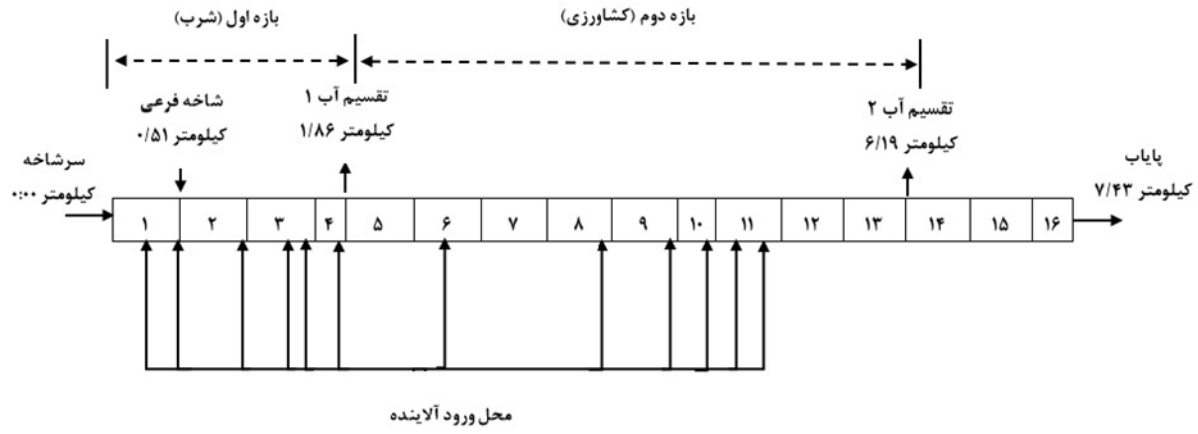
$$(Q_h \times C_h)+(Q_p \times C_p)+(Q_{np} \times C_{np}) = L_i \qquad (۲)$$

که در آن مقادیر Q و C به‌ترتیب دبی (مترمکعب بر ثانیه) و غلظت پارامترهای کیفی آب (میلی‌گرم در لیتر) است. اندیس‌های h، np و p نیز به‌ترتیب مربوط به سراب، منابع غیرنقطه‌ای و منابع نقطه‌ای هستند (عظیمی و همکاران، ۱۳۸۹).

برای تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه و حداکثر بار کل روزانه، از فرآیند TMDL استفاده شد و با توجه به نوع مصرف (کشاورزی و شرب)، استانداردهای مربوطه، با توجه به رعایت حاشیهٔ ایمنی، بار مازاد برای تمامی پارامترها (بجز فسفات در محدودهٔ برداشت شرب) به مقادیر استانداردها افزوده شده و توان خودپالایی رودخانه محاسبه شد. برای فسفات مقدار بار آلاینده ورودی تا سطح استاندارد مورد نظر کاهش داده شد.

۲. ۶. شبیه‌سازی هندسهٔ رودخانه در مدل QUAL2KW

QUAL2KW برای مدل‌سازی، مسیر رودخانه را به قطعه‌هایی تقسیم‌بندی می‌کند، این تقسیم‌بندی برای رودخانهٔ عباس‌آباد مطابق شکل ۴ انجام پذیرفت. این مدل می‌تواند معادلات مربوط به رودخانه را در شرایط دائمی و همچنین شبه دینامیکی تحلیل کند. این برنامه قادر است پارامترهایی نظیر اکسیژن محلول، نیاز اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، دما، اسیدیته، مواد معلق، فسفر کل، فسفر آلی، نیتروژن کل، نیتروژن آمونیاکی، نیتروژن نیتراتی، نیتروژن نیتریتی، نیتروژن آلی و جلبک‌ها را در شبکهٔ رودخانه شبیه‌سازی کند. این مدل می‌تواند پخش طولی مواد، اکسیژن مورد نیاز رسوبات ته‌نشینی مواد کربنی، نیتریفیکاسیون و دینیتریفیکاسیون را در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب به‌حساب آورد (Chapra & Canale., 2006).



شکل ۴. نحوهٔ قطعه‌بندی مسیر رودخانه عباس‌آباد همدان

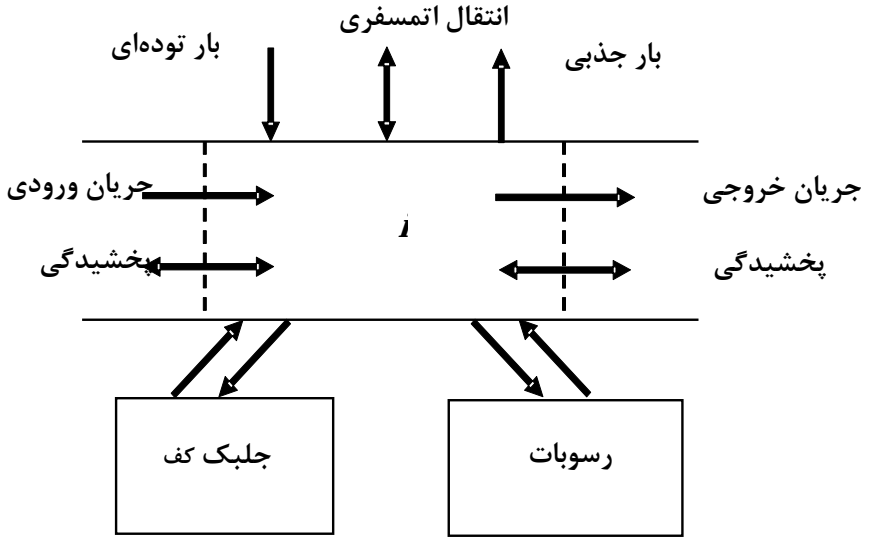
موازنهٔ جریان رودخانه

معادلهٔ اصلی که مدل مذکور به حل عددی آن می‌پردازد، معادلهٔ جابجایی/پخش یک بعدی است. با توجه به‌شکل ۵ رابطهٔ بیلان جرم برای بازهٔ iام از رودخانه، در مدل QUAL2KW به‌صورت رابطهٔ ۳ تعریف می‌شود.

(۳)

$$\frac{dc_i}{dt}=\frac{Q_{i-1}}{V_i}c_{i-1}-\frac{Q_i}{V_i}c_i-\frac{Q_{ab,i}}{V_i}c_i+\frac{E'_{i-1}}{V_i}\left(c_{i-1}-c_i\right)+\frac{E'_i}{V_i}\left(c_{i+1}-c_i\right)+\frac{W_i}{V_i}+S_i+\frac{E'_{hyp,i}}{V_i}\left(c_{2,i}-c_i\right)$$

C_i: غلظت پارامتر کیفی در المان i بر حسب g/m^3؛ V_i: حجم المان i بر حسب m^3/d؛ t: زمان بر حسب d؛ E_i': ضریب انتشار بین المان i و i+1؛ Q_i: دبی جریان المان i بر حسب m^3/d؛ W_i: بارگذاری خارجی پارامتر کیفی به المان i بر حسب g/d؛ S_i: تولید و مصرف پارامتر کیفی در اثر واکنش‌ها و مکانیسم‌های انتقال جرم در المان i بر حسب $g/m^3/d$؛ $c_{2,i}$ غلظت جزء کیفی در منطقه رسوب هایپرهئیک و $Q_{ab,i}$ دبی آلایندهٔ خروجی از بازهٔ iام برحسب m^3/d که مجموع آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای را شامل می‌شود.

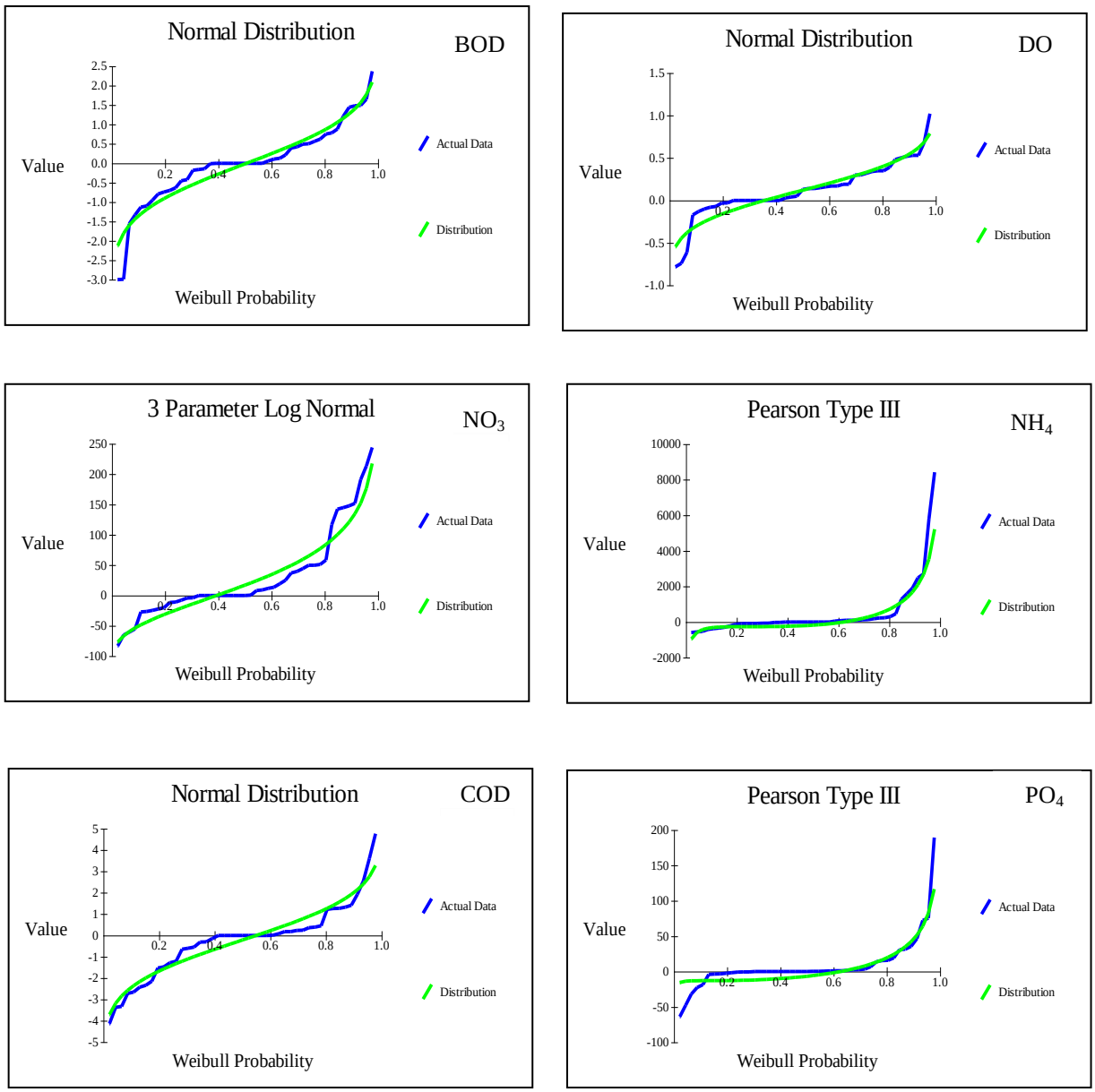


شکل ۵. ساختار توازن جرمی رودخانه (Pelletier et al., 2008)

۳. نتایج

پس از تعیین استانداردهای کاربری، برای حصول اطمینان از داشتن آبی با کیفیت مناسب، حاشیه ایمنی تعیین شد. برای تعیین حاشیهٔ ایمنی هر پارامتر، پس از برازش توزیع‌های آماری مختلف بر داده‌های مشاهداتی، مطابق با شکل ۶ بهترین توزیع آماری براساس آزمون کای اسکوئر انتخاب شد. براساس این شکل پارامترهای DO، BOD و COD از توزیع نرمال، NH_4 و PO_4 از توزیع پیرسون تیپ ۳ و NO_3 از توزیع لوگ نرمال سه پارامتری پیروی می‌کنند. به‌طور کلی توزیع نرمال بیشترین انطباق را با داده های موجود دارد.

نتایج مربوط به اعمال حاشیه ایمنی محاسباتی بر محدودهٔ استاندارد هر پارامتر، در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۶. نمودار توزیع‌های آماری مربوط به پارامترهای مورد بررسی

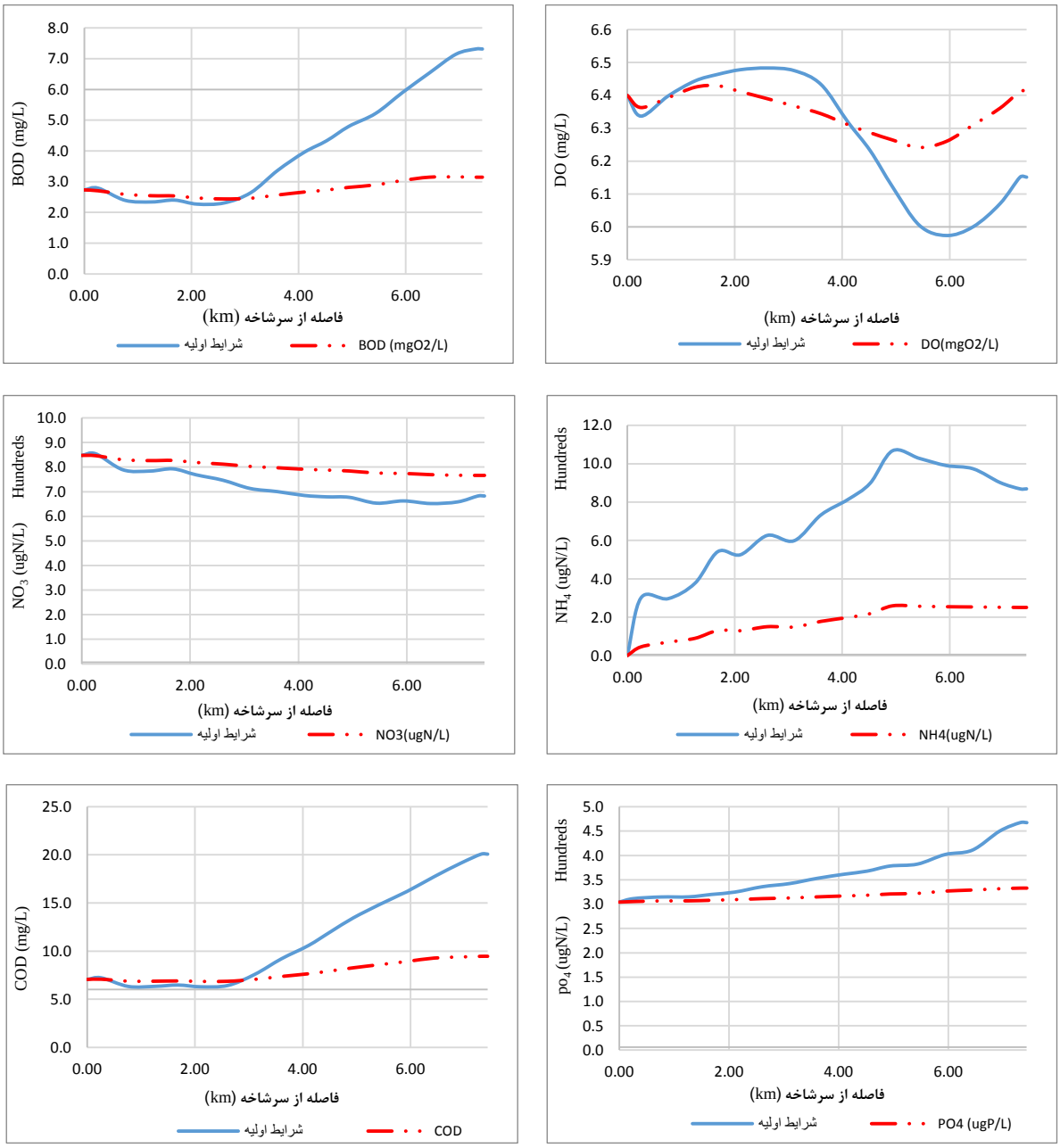
جدول ۲. استاندارد کاربری آب رودخانه

پارامتر	PO_4	NO_3	NH_4	COD	BOD	DO
	(µg/l)			(mg/l)		
توزیع برازش شده	پیرسون تیپ ۳	لوگ نرمال ۳	پیرسون تیپ ۳	نرمال	نرمال	نرمال
حاشیهٔ ایمنی	۶/۶۳	۱۶/۹۸	۱۷۵/۵۴	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۱۲
استاندارد آب آشامیدنی	۲۰۰	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰	۱۰	۵	۵
استاندارد آب کشاورزی	۲۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰	۵۰	۲
میزان در نظر گرفته شده برای مصارف شرب	۱۹۳/۳۷	۹۹۸۳/۰۲	۱۳۲۴/۴۶	۹/۷۸	۴/۹۸	۵/۱۲
میزان در نظر گرفته شده برای مصارف کشاورزی	۱۹۹۳/۳۷	۹۹۸۳/۰۲	۴۸۲۴/۴۶	۹۹/۷۸	۴۹/۹۸	۲/۱۲

ارزیابی نتایج کلی: همانگونه که قبلاً نیز بیان شد، براساس منحنی تداوم جریان آبدهی رودخانه و همچنین محاسبه میانگین متحرک سه ساله داده‌های آبدهی دورهٔ آماری ۴۳ ساله (۱۳۵۰-۱۳۹۲)، دبی نرمال برای ماه‌های مورد بررسی تعیین شد. سپس مقدار محاسبه شده به‌عنوان دبی ورودی به مدل معرفی و اجرا شد. شکل ۷ تغییرات روند کیفی و آلودگی رودخانه در طول بازهٔ مطالعاتی (در صورت وجود جریان دبی نرمال) در رودخانه را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، میزان اکسیژن محلول در طول یک کیلومتری ابتدای مسیر تغییر چشمگیری نداشته، ولی با ادامهٔ مسیر تا کیلومتراژ ۱۰۰+۴، نسبت به وضعیت نخستین، به‌میزان متوسط ۱/۵ درصد افت نسبی جزئی داشته و سپس تا انتهای مسیر، به‌میزان ۵ درصد ارتقاء می‌یابد. با توجه به نمودارهای مربوط به آمونیوم و نیترات، با افزایش دبی و اکسیژن محلول رودخانه، فرآیند نیتریفیکاسیون صورت گرفته و اکسیژن باعث تبدیل آمونیوم به نیترات شده است. این افزایش نیترات، تا کیلومتراژ ۵۰۰+۳، به‌طور متوسط ۱۵ درصد بوده است. ضمناً افزایش دبی که توأم با افزایش نسبی اکسیژن است، باعث ارتقاء کیفیت آب رودخانه شده و مقادیر BOD و COD به‌طور متوسط ۴۵ درصد کاهش می‌یابند. این امر همچنین باعث بهبود وضعیت فسفات در رودخانه شده است. نتایج این تحقیق با نتایج (شهریاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ Shraideh et al., 2013; Bagherian Marzouni et al., 2014; Sarda & Sadgir, 2015) هم‌خوانی دارد.

ظرفیت خودپالایی رودخانه: به‌منظور تعیین میزان خودپالایی، میزان بار ورودی تعیین شد. بدین منظور افزایش بار ورودی تا زمانی که استاندارد تعریف شده برای استفادهٔ مورد نظر نقض نشود، ادامه می‌یابد. در مواردی که بار ورودی بیش از مقدار تعیین شده (براساس استاندارد مورد نظر باشد)، مقدار آن براساس استاندارد کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه در بازه‌های مربوطه در حالت جریان دبی نرمال رودخانه در جدول ۳ ارائه شده است.

براساس نتایج ارائه شده در این جدول، برای مصارف شرب، چنانچه مقادیر BOD، COD، NH_4 و NO_3 به‌ترتیب تا میزان ۱، ۰/۳، ۹/۳ و ۱۰ برابر افزایش یابند، هنوز از نظر استانداردهای شرب قابل قبول هستند. باید توجه کرد که این امر با توجه به موقعیت و محل برداشت آب از رودخانه برای مصارف شرب (بازهٔ نخست) است. چنانچه در آینده محل برداشت آب شرب تغییر یابد، این ارزیابی معتبر نخواهد بود. لازم به ذکر است که مقدار فسفات رودخانه همواره بیش از استاندارد تعیین شده برای مصارف شرب بوده است و می‌بایست به‌میزان ۰/۶۴ مقدار نخستین کاهش یابد. همچنین برای مصارف کشاورزی، چنانچه مقادیر BOD، COD، NH_4، NO_3 و PO_4 به‌ترتیب تا میزان ۳۵، ۲۸، ۲۵، ۴۶ و ۴۰ برابر افزایش یابند، هنوز از نظر استانداردهای کشاورزی قابل قبول خواهند بود.



شکل ۷. نمودارهای بررسی اثر دبی نرمال در وضعیت کیفی رودخانه

همانگونه که قبلاً نیز بیان شد این امر با توجه به موقعیت و محل برداشت آب از رودخانه برای مصارف کشاورزی (بازهٔ دوم) معتبر است. نتایج این پژوهش با نتایج (Zhang et al., 2012; Raga Irsanda et al., 2014; Salvai & Bezdan, 2008) همراستاست.

میزان افزایش نسبی پارامترهای مورد نظر، نسبت به استانداردهای مربوطه در جدول ۴ نشان داده شده است. مطابق با این جدول، میزان BOD نسبت به عناصر دیگر افزایش بیشتری داشته، اگرچه تفاوت چشمگیری را نمی توان بین عناصر مربوطه مشاهده کرد. همچنین کمترین میزان خودپالایی در بازهٔ نخست، مربوط به COD و در بازهٔ دوم مربوط به NO_3 تعیین شد.

جدول ۳. تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه (kg/day)

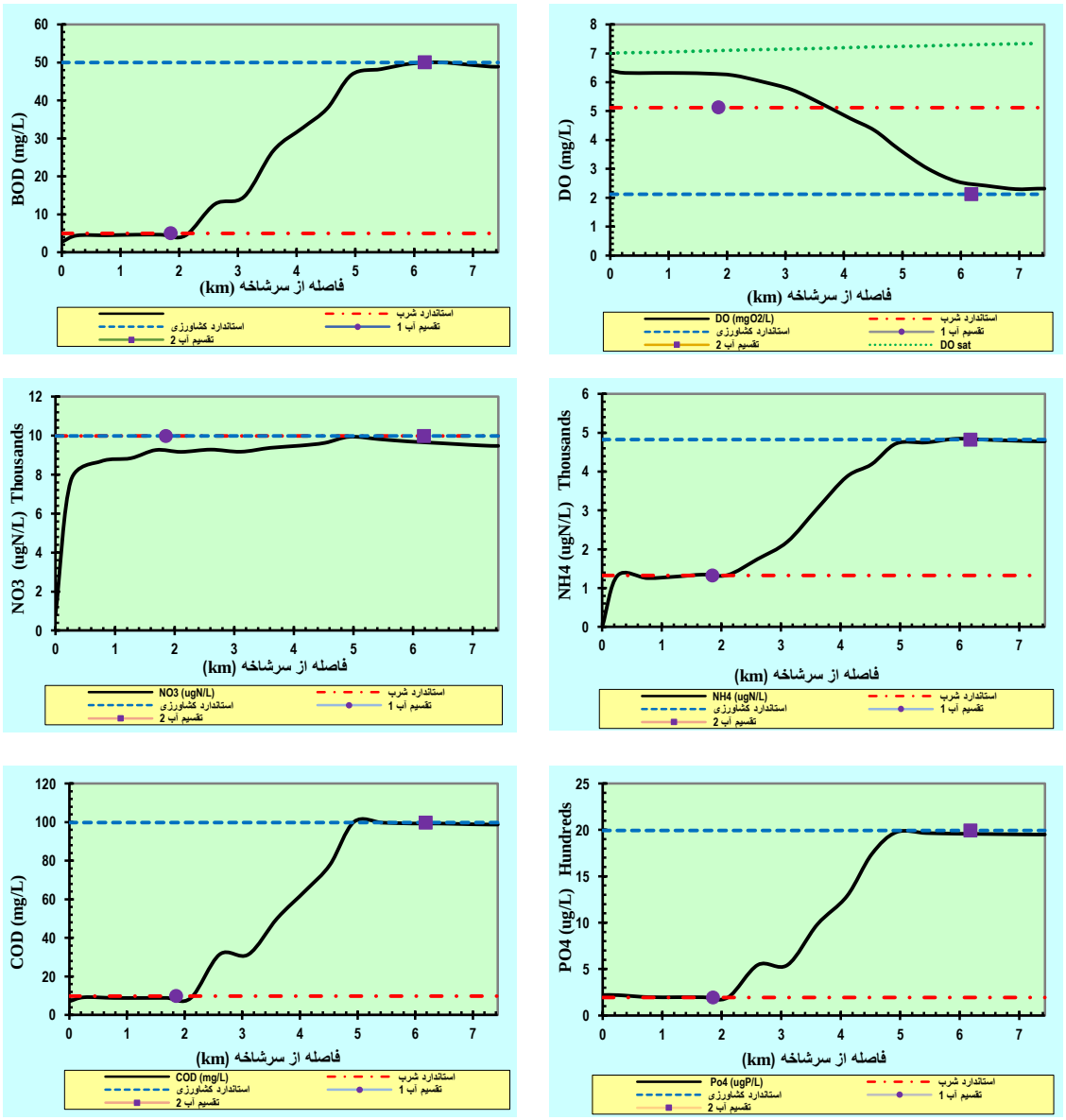
*بازهٔ نخست	PO_4	NO_3	NH_4	COD	BOD
بارگذاری فعلی	۳/۸۰	۱۶/۲۶	۲/۵۵	۱۳۴/۳۶	۵۲/۸۶
ظرفیت مازاد	۰/۰۰	۱۶۵/۵۳	۲۳/۷۵	۳۷/۵۸	۴۹/۰۵
ظرفیت خودپالایی	۳/۸۰	۱۸۱/۷۸	۲۶/۳۰	۱۷۱/۹۵	۱۰۱/۹۲
بازهٔ دوم	PO_4	NO_3	NH_4	COD	BOD
بارگذاری فعلی	۰/۸۱	۰/۵۵	۲/۵۵	۵۸/۸۹	۲۷/۰۸
ظرفیت مازاد	۳۲/۶۷	۲۵/۶۶	۶۵/۸۲	۱۶۷۲/۹۰	۹۶۰/۷۹
ظرفیت خودپالایی	۳۳/۴۹	۲۶/۲۱	۶۸/۳۶	۱۷۳۱/۷۹	۹۸۷/۸۷
کل رودخانه	PO_4	NO_3	NH_4	COD	BOD
بارگذاری فعلی	۴/۶۲	۱۶/۸۱	۵/۱۰	۱۹۳/۲۵	۷۹/۹۴
ظرفیت مازاد	۳۲/۶۷	۱۹۱/۱۹	۸۹/۵۶	۱۷۱۰/۴۸	۱۰۰۹/۸۵
ظرفیت خودپالایی	۳۷/۲۹	۲۰۸	۹۴/۶۶	۱۹۰۳/۷۳	۱۰۸۹/۷۹

* بازهٔ نخست محل برداشت آب برای شرب ** بازهٔ دوم محل برداشت آب برای مصارف کشاورزی

جدول ۴. مقایسهٔ افزایش پارامترهای کیفی (kg/day/mg/l)، نسبت به استانداردهای مربوطه

بازه	PO_4	NO_3	NH_4	COD	BOD
اول (استاندارد شرب)	۱۹/۰۱	۱۸/۱۸	۱۷/۵۳	۱۷/۱۹	۲۰/۳۸
دوم (استاندارد کشاورزی)	۱۶/۷۴	۲/۶۲	۱۳/۶۷	۱۷/۳۲	۱۹/۷۶

مطابق با شکل ۸، نمودارهای آستانهٔ مجاز پارامترهای مورد بررسی در دو بازهٔ شرب و کشاورزی در طول رودخانه، ترسیم شده‌اند. براساس این نمودارها و با توجه به افزایش میزان غلظت آلاینده‌ها در محل ورود به رودخانه، به‌منظور محاسبهٔ توان خودپالایی آن، به‌دلیل کوهستانی بودن منطقه و شیب مناسب رودخانه، هوادهی به خوبی انجام یافته است، به‌طوری‌که نمودار اکسیژن محلول در بازهٔ شرب، با وجود افزایش غلظت آلاینده‌ها کاهش محسوسی نداشته، ولی در ادامهٔ مسیر با کاهش شیب رودخانه و برداشت آب در محل تقسیم آب یک، برای مصارف شرب، میزان اکسیژن محلول روند کاهشی پیدا کرده و کمترین سطح اکسیژن محلول در انتهای رودخانه است. همچنین برای پارامتر BOD و NH_4 بیشترین بار وارده براساس استاندارد کشاورزی در محل تقسیم آب دو، به‌میزان ۴۹/۹۸ میلی‌گرم در لیتر و ۴۸۲۴/۴۶ میکروگرم بر لیتر محاسبه شد. برای پارامتر COD، نیترات و فسفات بیشترین مقدار در کیلومتر ۴+۹۴۰، به‌ترتیب به‌میزان ۹۹/۷۸ میلی‌گرم بر لیتر و ۹۹۸۳/۰۲ و ۱۹۹۳/۳۷ میکرو گرم بر لیتر بود.



شکل ۸. نمودارهای آستانهٔ مجاز پارامترهای مورد بررسی در طول رودخانه، براساس دبی نرمال

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

هدف از این پژوهش بررسی توان خودپالایی رودخانهٔ عباس‌آباد همدان با رعایت استانداردها و معیارهای کیفی و آلودگی از قبیل پارامترهای DO، BOD، COD، NH_4، NO_3 و PO_4 بوده است. در این خصوص مدل یک بعدی QUAL2KW با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در اردیبهشت، خرداد و مرداد ماه سال‌های ۱۳۹۰، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ استفاده شد. برای تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه و حداکثر بار کل روزانه از فرآیند TMDL استفاده شد. نتایج بیانگر آن است که به‌دلیل کوهستانی و پرشیب بودن منطقه، هوادهی به‌نحو مناسبی صورت می‌پذیرد، و چنانچه مقادیر BOD، COD، NH_4 و NO_3 به‌ترتیب تا میزان ۱، ۰/۳، ۹/۳ و ۱۰ برابر افزایش یابند، هنوز از نظر استانداردهای شرب قابل قبول خواهند بود. مقدار PO_4 رودخانه همواره بیش از استاندارد تعیین شده برای مصارف شرب بوده و لازم است به‌میزان ۰/۶۴ مقدار نخستین کاهش یابد. برای مصارف کشاورزی نیز چنانچه مقادیر BOD، COD، NH_4، NO_3 و PO_4 به‌ترتیب تا میزان ۳۵، ۲۸، ۲۵، ۴۶ و ۴۰ برابر افزایش یابند، هنوز از نظر استانداردهای کشاورزی قابل قبول است. براساس این

نتایج، توان خودپالایی رودخانه در بازهٔ نخست (شرب) نسبت به بازهٔ دوم (کشاورزی) بیشتر است. همچنین الگوی رفتاری پارامترهای DO، BOD و COD در رودخانه از توزیع نرمال، NH_4 و PO_4 از توزیع پیرسون تیپ ۳ و NO_3 از توزیع لوگ نرمال سه پارامتری تبعیت می‌کند. بر این اساس حاشیهٔ اطمینان پارامترهای DO، BOD و COD به‌ترتیب برابر با ۰/۱۲، ۰/۰۲ و ۰/۲۲ میلی‌گرم بر لیتر و حاشیهٔ اطمینان برای پارامترهای NH_4، NO_3 و PO_4 برابر با ۱۷۵/۵۴، ۱۶/۹۸ و ۶/۶۳ میکرو گرم بر لیتر بوده است. با توجه به کمبود اطلاعات و در نظر نگرفتن برخی عوامل تأثیرگذار در مدل، این امر می‌تواند در پیش‌بینی نحوهٔ تغییرپذیری شاخص‌های کیفی و آلودگی کمک کند. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان چنین بیان کرد که مدل QUAL2KW ظرفیت خوبی را در شبیه‌سازی المان‌های کیفی رودخانه‌های نیمه‌کوهستانی و نسبتاً پرشیب را دارا بوده و نتایج این تحقیق مؤید این ادعاست.

یادداشت

1. Self-purification
2. Rarefaction
3. Sedimentation
4. Re-composition
5. Dissolved Oxygen
6. Biochemical oxygen demand
7. Chemical oxygen demand
8. Total Maximum Daily Load: TMDL
9. Loading Capacity: LC
10. Waste Load Allocation: WLA
11. Load Allocation: LA
12. Margin of Safety: MOS

منابع

حاتمی بهمن بیگلو، س.، صدیقی، م. و صمدی بروجنی، ح. ۱۳۹۰. بررسی قدرت خودپالایی و سناریوهای مختلف آلودگی رودخانه سبزکوه با مدل QUAL2KW، دومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.

حسینی، پ.، ایلدرومی، ع.ر. و حسینی، ی. ۱۳۹۵. بررسی کارایی مدل QUAL2KW در خودپالایی رودخانه (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ کارون در بازهٔ زرگان – کوت امیر)، مجلهٔ علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۸(۲): ۱۰۳-۱۲۲.

خادم محمدی، م.م. و بوستانی، ف. ۱۳۹۵. ارزیابی توان خودپالایی و نقش اکسیژن محلول در کیفیت آب رودخانه کر (مطالعهٔ موردی: پایین دست سد درودزن تا دریاچه طشک-بختگان)، مجلهٔ مهندسی منابع آب، ۹(۳۰): ۸۷-۹۶.

سازمان حفاظت محیط‌زیست. ۱۳۹۰. استاندارد کیفیت آب‌های ایران، ۱۴صفحه.

شهریاری، ف.، جوادی‌فر، ن. و آخوندعلی، ع.م. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات میزان جریان بر کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از مدل QUAL2KW، پنجمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی محیط‌زیست، تهران.

عظیمی، م.م.، غواصیه، ا.، هاشمی، س.ح. و علیمحمدی، س. ۱۳۸۷. بررسی عدم‌قطعیت پارامترهای کیفی رودخانه، مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ جاجرود، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباس پور)، دانشکدهٔ آب.

عظیمی، م.م.، غواصیه، ا.، هاشمی، س.ح. و برکتین، س. ۱۳۸۹. ارزیابی قدرت خودپالایی رودخانه به کمک نتایج حاصل از شبیه‌سازی کیفی (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ سفیدرود)، همایش ملی آب با رویکرد آب پاک. دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباس پور).

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. ۱۳۸۴. راهنمای مطالعات ظرفیت خودپالایی رودخانه‌ها، شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، نشریهٔ شمارهٔ ۲۹۲-الف.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. ۱۳۸۸. راهنمای مطالعات ظرفیت خودپالایی رودخانه‌ها، نشریهٔ ۴۸۱، ۱۶۱ صفحه.

میرزایی، م.، نظری، ع.ر. و یاری، ع. ۱۳۸۴. پهنه‌بندی کیفی رودخانهٔ جاجرود. مجلهٔ محیط‌شناسی، شمارهٔ ۳۷. صفحه ۱۷-۲۶.

نوشادی، م. و حاتمی‌زاده، م.ر. ۱۳۸۹. اندازه‌گیری و شبیه‌سازی کیفی رودخانهٔ کر با استفاده از مدل QUAL2K، نشریهٔ آبیاری و زهکشی ایران، ۳(۴):۳۳۸-۳۴۹.

وزارت نیرو. ۱۳۸۴. گزارش هیدرولوژی، مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب دشت همدان – بهار، شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان.

Bagherian Marzouni, M., Akhoundali, A. M., Moazed, H., Jaafarzadeh, N., Ahadian, J. and Hasoonizadeh, H. 2014. Evaluation of Karun river water quality scenarios using simulation model results, Int J Adv Biol Biom Res, 2(2): 339-358.

Campolo, M., Andreussi, P. And A. Soldati. 2002. Water quality control in the River Arno, Technical note. Water Research, 36: 2673–2680.

Chapra and Canale. 2006. Numerical Methods for Engineers, 5th Ed. New York, McGraw-Hill.

Chapra S., Pelletier G. and Tao H. 2006. A Modeling framework for simulating river and stream water quality, Version 2.04: Documentation and user's manual, Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, M. A.

Georgios D. Gikas. 2014. Water Quality of Drainage Canals and Assessment of Nutrient Loads Using QUAL2Kw, Environ. Process. 1: 369–385

Gupta R. C., Gupta A. K. and Shrivastava R. K. 2013. Water quality modeling of a stretch of river Kshipra (India), Nature Environment and Pollution Technology, 12(3): 511-516.

Hanfeng, Y. E., Shuhai, GUO., Fengmei, LI. and Gang, LI. 2013. Water Quality Evaluation in Tidal River Reaches of Liaohe River Estuary, China Using a Revised QUAL2K Model, Chin Geogra Sci, 23(3): 301–311.

Kannel, P. R., Lee S., Kanel, S. R., Lee, Y.S. and Ahn, K. H. 2007. Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati, Environmental monitoring and assessment, 125(1-3): 201-217.

Mehrasbi, M. R. and Farahmand Kia, Z. 2015. Water quality modeling and evaluation of nutrient control strategies using qual2k in the small sivers, J. Hum. Environ. Health Promot, 1(1): 1-11.

Oliveira, B., Bola, J., Quinteiro, P., Nadais, H. and L. Arroja. 2012. Application of Qual2Kw model as a tool for water quality management: Cértima River as a case study, Environ Monti Assess, 184: 6197–6210.

Raga Irsanda, P. G., Karnaningroem, N. and Bambang, D. 2014. Analisis Daya Tampung Beban Pencemaran Kali Pelayaran Kabupaten Sidoarjo Dengan Metode Qual2kw, JURNAL TEKNIK POMITS, 3(1): D-47-52. ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print).

Pelletier, G. and Chapra, S. 2008. QUAL2Kw theory and documentation A modeling framework for simulating river and stream water quality, (Environmental Assessment Program Olympia, Washington 98504-7710, .(2008)

Salvai, A. and Bezdan, A. 2008. Water Quality Model QUAL2K in TMDL Development. BALWOIS 2008 – Ohrid, Republic of Macedonia – 27, 31 May 2008

Sarda, P. and Sadgir, P. 2015. Water Quality Modeling and Management of Surface Water using Soft Tool, International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), 4(9): 2988-2992.

Shraideh, H., Shraideh, A., Samhan, S., and Hasan, J. 2013. Water quality modelity modeling of zimar stream with considerations of current and future solutions, Seventeenth International Water Technology Conference, IWTC17. Istanbul, 5-7 November 2013.

Syafi M. and A. Masduqi. 2011. Aplikasi model simulasi komputer qual2kw pada studi pemodelan kualitas air kali Surabaya. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Vivin, S. I., Wahyono, H., Masduqi, A. 2016. Identifikasi Daya Tampung Beban Pencemaran Air Kali Surabaya Segmen Jembatan Canggu- Tambangan Bambe dengan Pemodelan QUAL2Kw, JURNAL TEKNIK ITS, 5(2): 857-861. (2016) ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print).

Zhang, R., Gao, H., Zhu, W., Hu, w. and Ye, R. 2015. Calculation of permissible load capacity and establishment of total amount control in the Wujin River Catchment—a tributary of Taihu Lake, China, Environmental Science and Pollution Research, 22(15): 11493, doi: 10.1007/s11356-015-4311-3

Zhang, R., Qian, X., Yuan, X., Ye, R., Xia, B. and Wang, Y. 2012. Simulation of water environmental capacity and pollution load reduction using QUAL2K for water environmental management, Int. J. Environ. Res. Public Health. 9(12): 4504-4521.