

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره یازده، بهمن ماه ۹۸

شبیه‌سازی کیفیت آب سطحی با استفاده از مدل QUAL2KW

(رودخانه ارداک استان خراسان رضوی)

مرتضی نیک اختر^۱

سیده هدی رحمتی^{*۲}

rahmati@srbiau.ac.ir

علیرضا مساح بوانی^۳

تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۹

چکیده

زمینه و هدف: با توجه به این که رودخانه و سد ارداک از منابع تامین کننده آب شرب شهر مشهد می‌باشد، حفظ کیفیت آب این رودخانه قبل از سد اقدام بزرگی در جهت تامین آب این کلان شهر مذهبی خواهد بود. این تحقیق با معرفی مدلی برای شبیه سازی کیفی منابع آب رودخانه ارداک و با استفاده از ابزارهای مناسب و مرتبط، با مشخص کردن میزان پارامترهای مختلف کیفیت آب در طول رودخانه، وسیله مناسبی برای ارزیابی رفتار آب در برابر ورود آلاینده‌های مختلف و همچنین برای تصمیم گیری‌های آتی می باشد. روش بررسی: در این تحقیق از مدل دینامیکی Qual2kw استفاده گردید که برای واسنجی از اطلاعات موجود در شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی (آبان ماه ۹۳) استفاده و برای صحت‌سنجی، پس از نمونه‌برداری و آزمایش پارامترهای مختلف کیفیت آب (اردیبهشت ۹۵)، از اطلاعات بدست آمده استفاده گردید.

یافته‌ها: اطلاعات بدست آمده نشان داد که مدل در مورد پارامترهای DO، PH، COD و NO₃ تطابق خوبی با واقعیت داشته و قادر است به خوبی وضعیت پارامترهای کیفی آب را در هر دو شاخه از رودخانه ارداک شبیه‌سازی نماید.

بحث و نتیجه گیری: آب رودخانه در شاخه آبد به سبب استقرار جمعیت و منابع آلاینده کم‌تر از کیفیت بالاتری برخوردار بوده و کیفیت آب در هر دو شاخه رودخانه بیش‌تر تحت تاثیر آلاینده‌های کشاورزی، باغداری و دفع فاضلاب‌های روستایی می باشد.

واژه های کلیدی: رودخانه ارداک، کیفیت آب، شبیه‌سازی، Qual2kw.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی محیط زیست-منابع آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی محیط زیست-منابع آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران* (مسوول مکاتبات).
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Simulating of Surface Water Quality Using QUAL2KW (Ardak River, Khorasan Razavi Province)

Morteza Nikakhtar¹

Seyedeh Hoda Rahmati^{Y*}

rahmati@srbiau.ac.ir

Ali reza Massah Bovani^{Y*}

Admission Date: September 20, 2017

Date Received: July 31, 2017

Abstract

Background and Objective: Considering the importance of ARDAK River and dam in supplying drinking water of MASHHAD city as one of the biggest and most densely populated religious city of the world, preserving and maintaining water quality of this river is an essential task for providing water. This case study provides a model for water quality of ARDAK River by using appropriate and relevant tools which could calculate the values of water quality parameters along the entire length of main branches and it can be a beneficial approach for monitoring water responses to various contaminants and also for future decision making.

Method: In this research QUAL2KW dynamic model has calibrated with available previous data (July 2014) and verified by results of field sampling which has been conducted in April 2016 for different aspects of water quality.

Findings: Obtained results showed that this model made a good agreement with observed data such as DO, PH, COD and NO₃ and it was able to simulate water quality for both river branches.

Discussions and Conclusions: Abghad branch condition gets better due to less local population and contaminants, moreover agricultural, gardening and rural wastewater has affected both main branches of the river.

Keywords: Ardak River, modeling, Qual2kw, water quality

1- MSc Student, Department of Environmental Engineering- Water Resources. Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Environmental Engineering- Water Resources. Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. *(Corresponding Authours).

3- Associate Professor in Abooreyhan Compound of Tehran University, Department of Water Engineering, Tehran, Iran.

مقدمه

امروزه رودخانه‌ها به عنوان مهم‌ترین منبع تامین و انتقال آب مصرفی در بخش‌های صنعت، کشاورزی و شهری از اهمیت خاصی برخوردار هستند. رودخانه‌ها نه تنها تامین کننده مصارف مختلف هستند، بلکه به عنوان مجاری طبیعی در انتقال پساب‌ها و فاضلاب‌های تولید شده عمل می‌نمایند. اما گسترش فزاینده فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و افزایش حجم فاضلاب‌های شهری موجب آلودگی رودخانه‌ها گردیده، به نحوی که کیفیت این منابع حیاتی آب را مورد مخاطره جدی قرار داده است. تخلیه انواع آلاینده‌های کشاورزی، صنعتی و پساب‌های شهری به رودخانه‌ها باعث شده است که در حال حاضر رودخانه‌ها به عنوان یکی از کانون‌های بحرانی از نقطه نظر آلودگی‌ها مطرح باشند (۱). تامین آب آشامیدنی، ارتقاء فعالیت‌ها و کاربری‌های تفریحی و ایجاد یک اکوسیستم مناسب برای ماهیان و حیات وحش، مستلزم حفظ کیفیت آب رودخانه می‌باشد. به این دلیل، آگاهی از روند تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها همراه با شناسایی عوامل اصلی آلودگی آن از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. از طرف دیگر، هزینه‌های پایش و کنترل محیط زیست به طور مداوم در حال افزایش بوده و تاثیرات زیست محیطی ناشی از اشتباه در قضاوت و تفسیر نتایج بسیار شایع گردیده است. از این رو مدیریت کیفی زیست محیطی بایستی به ابزارهای موثر و قدرتمندی مجهز شود تا میزان خطا-های مذکور به حداقل برسد. ابزارهای مذکور باید بر اساس درک درستی از جنبه‌ها و خصوصیات زیست محیطی طراحی شده و توانایی اداره شرایط دشوار را نیز داشته باشند (۲). یکی از این ابزارها شبیه سازی و استفاده از مدل‌های کامپیوتری می باشد. اطلاعات بدست آمده بوسیله مدل سازی نه تنها باعث صرفه-جویی در هزینه‌های بعدی می‌شود بلکه دیدگاه بسیار خوبی در مدیریت حوضه آبریز و در تصمیم‌سازی‌های آینده برای چگونگی حفظ کیفیت و گسترش منابع و فعالیت‌های آتی منطقه را فراهم می‌آورد. آگاهی از روند کیفیت در نقاط مختلف رودخانه و نحوه استقرار منابع مختلف پخش و انتشار آلودگی و بررسی هم‌پوشانی‌ها تاثیر بسزایی در ارزیابی-

های دقیق و اقدامات بهتر سازمان‌ها و ذی‌نفعان مربوط دارد. در سال‌های گذشته مدل‌های بسیار زیادی با اهداف متفاوت در مباحث مختلف کمی و کیفی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲). مدل کیفی QUAL2K یک مدل دینامیکی و یک بعدی است که قادر است پارامترهای مختلف کیفیت آب یک رودخانه را تحت شرایط جریان پیوسته و در حالت اختلاط کامل شبیه سازی نماید. این مدل که توسط Chapra و همکاران توسعه یافته است در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و در موارد مختلفی از قبیل شبیه سازی میزان و اثرگذاری شاخص-های مختلف کیفیت آب، کنترل و مدیریت ورود آلاینده‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای، مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر کیفیت آب و ... مورد استفاده قرار گرفته است (۳). از آنجایی که تا کنون جنبه‌های کیفی به اندازه کافی تحت پوشش تحقیقات و بررسی‌ها قرار نگرفته‌اند آگاهی از روند تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها همراه با شناسایی عوامل اصلی آلودگی آن از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد و می‌توان با استفاده از نتایج آن راهکارهای مناسبی برای حفظ کیفیت منابع آب سطحی ارایه نمود (۴). این موضوع در سال‌های گذشته توجه محققین داخلی بیش تری را به سوی خود جلب نموده است به طوری که، در مطالعاتی که بر روی رودخانه گرگر خوزستان انجام شد، کیفیت آب این رودخانه به وسیله مدل یاد شده شبیه سازی گردیده و با استفاده از نتایج بدست آمده مهم ترین آلاینده های موجود شناسایی شدند (۵). همچنین با استفاده از اطلاعات کیفیت آب رودخانه کارون مدل مذکور برای پارامترهای مختلف صحت سنجی گردید و از نتایج بدست آمده برای مدیریت کیفی رودخانه استفاده شد (۶). در تحقیق دیگری که بر روی رودخانه چالوس انجام شد با استفاده از ایجاد مدل کیفی آب سطحی، از نتایج آن برای ارزیابی میزان خودپالایی استفاده گردید (۲). در این تحقیق از مدل دینامیکی QUAL2kW در طول رودخانه ارداک که یکی از منابع تامین آب شرب شهر مشهد مقدس می‌باشد استفاده شده است و همچنین دفع پساب‌های روستایی، باغداری و کشاورزی موجود در منطقه مورد شناسایی

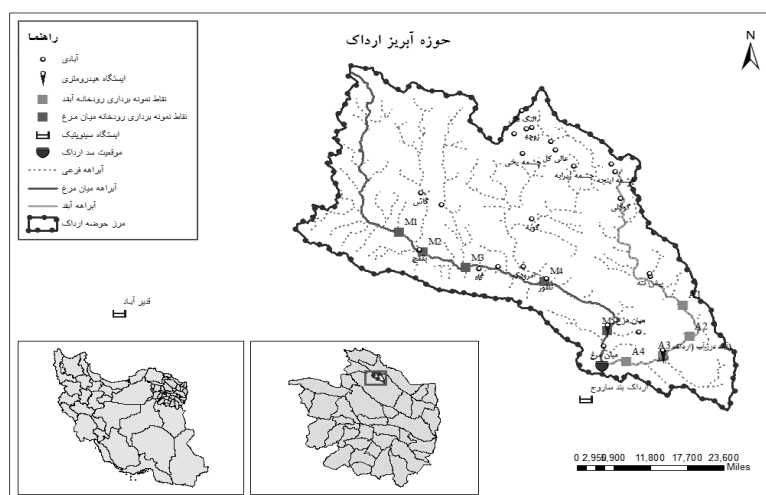
محدوده دو شهرستان مشهد و چناران در بخش مرکزی واقع شده است (شکل ۱). رودخانه ارداک یکی از سرشاخه‌های کشف رود است که از سمت چپ (شمال) به این رودخانه می‌پیوندد. کشف‌رود پس از عبور از دشت مشهد و رشته کوه‌های مزدوران به هریرود پیوسته و وارد دشت قره‌قوم می‌شود. رودخانه ارداک خود از دو شاخه به نام‌های میان‌مرغ (شاخه اصلی) به طول ۲۴ کیلومتر از سمت شمال غرب و آبقد به طول ۱۰ کیلومتر از سمت شمال شرق تشکیل یافته، این دو تقریباً در منتهی‌الیه جنوب شرقی حوضه بهم‌پیوسته و پس از طی حدود ۳ کیلومتر وارد دشت می‌شود (شکل ۱).

و ارزیابی قرارگرفته‌اند. با استفاده از مدل فوق پارامترهای مختلف کیفیت آب این رودخانه برای اولین بار شبیه‌سازی گردیده و مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند که می‌تواند پایه و اساسی برای اتخاذ بهترین تدابیر و رویکردهای آتی منطقه باشد.

روش بررسی

۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز ارداک چناران تقریباً در فاصله ۴۵ کیلومتری شمال غرب شهرستان مشهد و با مساحتی در حدود ۴۷۹/۲۴ کیلومتر مربع در حوضه آبخیز کشف‌رود و از نظر سیاسی در



شکل ۱- رودخانه ارداک و انشعابات فرعی آن

Figure 1. Ardak River and its different tributaries

نمونه‌های جمع‌آوری شده در شرایط استاندارد^۱ به آزمایشگاه آب منطقه‌ای خراسان رضوی جهت تجزیه انتقال داده شد. جدول ۱ مختصات جغرافیایی و میزان دبی اندازه‌گیری شده را در ایستگاه‌های نمونه‌برداری رودخانه‌های میان‌مرغ و آبقد را نشان می‌دهد.

۲- ایستگاه‌های هیدرومتری و نمونه‌برداری

در این تحقیق برای مرحله واسنجی مدل Qual2kw در شاخه‌های آبقد و میان‌مرغ، از اطلاعات ایستگاه‌های نمونه‌برداری و هیدرومتری که در جدول ۱ مشخص شده‌اند استفاده شد. با این توضیح که ایستگاه‌های ذکر شده با استفاده از روش ساندرس (۷) مکان‌یابی گردیده‌اند، برای مرحله صحت‌سنجی در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۵ در هر دو شاخه رودخانه، عملیات نمونه‌برداری کیفی و برآورد دبی به وسیله دستگاه مولینه انجام شد.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی و نمونه‌برداری حوضه آبخیز ارداک

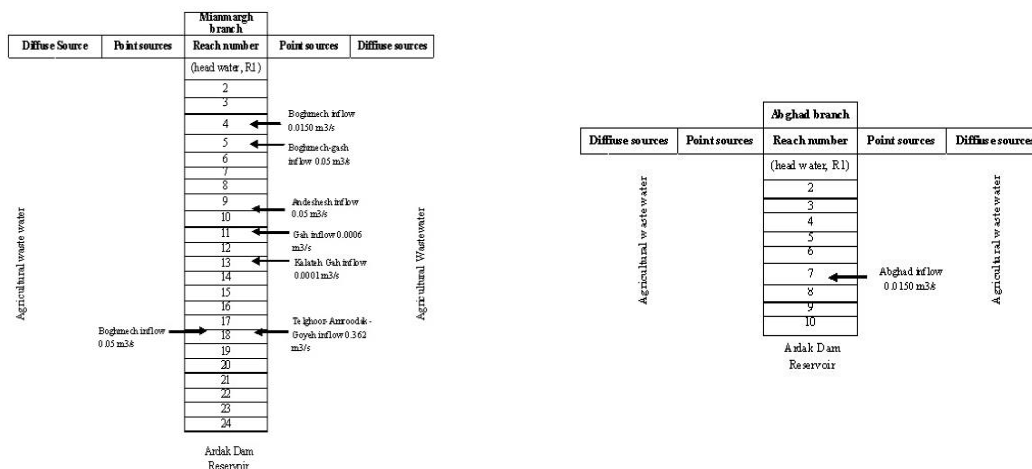
Table 1. Geographical coordinates and characteristics of hydrometric and sampling stations in Ardak watershed

مشخصات					نام
طول آبراهه (Km)	متوسط جریان (L/S)	UTM (Y)	UTM (X)	توضیحات	ایستگاه
۲۴	۱۰	۴۰۸۱۹۶۰	۶۹۸۷۳۰	بالادست	M1
۲۰	۴۵	۴۰۸۰۲۴۳	۷۰۰۵۱۹	پایین دست روستای بقمچ	M2
۱۶	۱۵۰	۴۰۷۸۹۵۵	۷۰۳۹۵۳	پایین دست سرشاخه انجشش	M3
۸	۵۰۰	۴۰۷۷۷۳۹	۷۱۰۲۴۸	پایین دست سرشاخه امرودک	M4
۰	۸۰۰	۴۰۷۳۴۴۷	۷۱۵۲۵۶	پایین دست (ورودی مخزن سد)	M5
۹	۸۵	۴۰۷۵۵۹۳	۷۲۱۲۶۵	بالادست	A1
۶	۹۵	۴۰۷۲۸۷۴	۷۲۱۹۰۹	بالادست روستای آبقد	A2
۳	۱۰۰	۴۰۷۱۳۷۲	۷۱۹۶۲۰	پایین دست روستای آبقد	A3
۰	۱۵۰	۴۰۷۰۸۰۰	۷۱۶۶۸۷	پایین دست (ورودی مخزن سد)	A4

۳- منابع آلاینده:

نمایند، پرورش و چرای دام در منطقه و آرامستان‌های موجود که از طریق نفوذ آب باران و امکان ورود زه‌آب ناشی از آن به رودخانه، می‌توانند سبب آلودگی رودخانه شوند. با توجه به موارد فوق پارامترهای DO، PH، NO3 و COD در آب رودخانه اهمیت زیادی داشته که نسبت به شبیه‌سازی آن‌ها اقدام گردید.

با توجه به این‌که محدوده مورد مطالعه یک منطقه طبیعی و فاقد هر گونه منبع آلاینده صنعتی و معدنی بوده بنابراین عمدتاً آلاینده‌های رودخانه از نوع فاضلاب‌های روستایی و زه‌آب کشاورزی می‌باشد. مواردی چون دفع نامناسب زباله در محدوده روستاهای حوضه، تخلیه فاضلاب روستاهای حاشیه رودخانه، زه‌آب باغات در مسیر رودخانه که از کود و سموم استفاده می-



شکل ۳- موقعیت منابع آلاینده نقطه‌ای و گسترده در بازه‌های مختلف شاخه های آبقد و میان مرغ

Figure 2. Location of point and nonpoint source of pollution in different reaches of abghad and mianmargh branches

آلاینده PM 10 مربوط به قسمت جنوب غربی تهران می باشد و کم ترین آن در مناطق شمالی شهر مشاهده می گردد. بیش-ترین میانگین غلظت انباشت آلاینده PM 2.5، مربوط به شهری و بخش های در محدوده بین میدان های انقلاب و آزادی می باشد و لازم است در برنامه ریزی برای کاهش آلودگی هوا، به این قسمت ها از شهر تهران توجه بیشتری بشود و کم ترین میزان غلظت هم مربوط به مناطقی در شمال و شرق می باشد.

۴- معرفی مدل Qual2kw

یکی از روش های مدل سازی کیفیت آب، استفاده از تبادلات بین مواد و کمیت ها و روابط ریاضی موجود در بین آن ها، برای محاسبه میزان پارامترها می باشد (۳). در حال حاضر مدل های زیادی با قابلیت ها و توانایی های مختلف بر این اساس طراحی شده اند که یکی از آن ها مدل Qual2kw می باشد (۳). مدل مذکور که ویرایش مدرنی از برنامه معروف کیفیت آب رودخانه-ها یعنی QUAL2E است، توسط چاپرا و همکاران اولین بار در سال ۲۰۰۶ ارائه گردیده است. یکی از آخرین ویرایش های این برنامه (که در این مطالعه از آن بهره گرفته شده است) نسخه ۵٫۱ آن می باشد. این برنامه، انتقال و زوال آلاینده های معمول (یعنی غیرسمی) را شبیه سازی می کند. مدل QUAL2K رودخانه را به صورت یک بعدی، همراه با جریان دایمی غیریکنواخت شبیه سازی می کند و می تواند اثر بارگذاری را به دو صورت نقطه ای و غیر نقطه ای در نظر بگیرد (۸،۳). همچنین قادر است تغییرات را به صورت روزانه و با گام-های زمانی کم تر از یک ساعت شبیه سازی نماید (۳).

۴-۱- موازنه ی جریان و بازه بندی رودخانه:

برای تولید مدل که در واقع همان فرمول ها و روابط ریاضی کنترل کننده میزان پارامترها می باشند، اولین قدم ساده سازی سیستم ورودی ها و خروجی ها به منظور فرموله کردن ریاضی آن است. بدین منظور Qual2kw رودخانه را به صورت

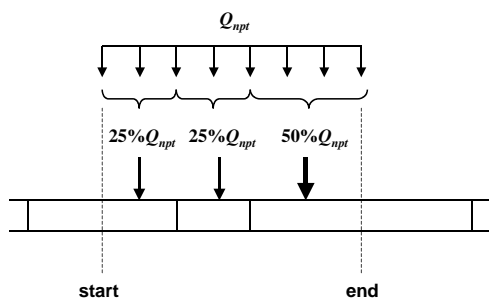
اگر واحد مکانی را برابر مناطق شهری در نظر بگیریم، با توجه به نتایج بدست آمده می توان گفت در سال ۹۳، بیش ترین و کم ترین میانگین سالانه غلظت آلاینده PM 2.5 برای یک منطقه، به ترتیب متعلق به منطقه ۲۰ و ۵ می باشد و کم ترین و بیش ترین غلظت نقطه ای هم به ترتیب در قسمت هایی از منطقه ۱۳ و ۲ ثبت شده است. با توجه به نتایج بدست آمده می توان گفت در سال ۹۴ هم، بیش ترین و کم ترین میانگین سالانه غلظت آلاینده PM 2.5 برای یک منطقه، به ترتیب متعلق به منطقه ۲۰ و ۱ می باشد و کم ترین و بیش ترین غلظت نقطه ای هم به ترتیب در قسمت هایی از منطقه ۱ و ۲ ثبت شده است.

بحث و نتیجه گیری

باتوجه به بررسی دقت روش های مختلف درون یابی در این مطالعه، می توان گفت روش IDW به عنوان بهترین روش درون یابی برای تهیه نقشه میزان غلظت آلاینده های PM 2.5 و PM 10 در شهر تهران می باشد. در حالی که روش گریجینگ بدترین نتایج را از نظر دقت ارائه داد، یکی از علت های اصلی این مساله می تواند به تعداد و موقعیت مکانی این ایستگاه ها مربوط باشد که به شکل کافی و همگن در قسمت-های مختلف شهر پخش نشده اند و بخش های بزرگی از شهر مثل مناطق ۲۱ و ۲۲ کمبود ایستگاه اندازه گیری مشهود می-باشد.

با توجه نتایج نقشه های میانگین ماهانه PM 10، بیش ترین غلظت این آلاینده متعلق به ماه های گرم تیر و مرداد می باشد و کم ترین آن در شهر تهران با توجه به تعطیلات و شرایط جوی در ماه فروردین مشاهده می گردد، ولی بیش ترین غلظت PM 2.5 به دلیل دمای پایین و پدیده وارونگی هوا متعلق به ماه های سرد آذر و دی می باشد و کم ترین آن هم متعلق به ماه فروردین، با توجه به بررسی های انجام شده در طی سال-های ۹۳ و ۹۴ می باشد. با توجه نتایج نقشه های میانگین سالانه هم می توان گفت، از نظر مکانی در سال های ۹۳ و ۹۴ رفتار تقریباً مشابه ای راجع به غلظت آلاینده های PM 10 و PM 2.5 مشاهده می شود. بیش ترین میانگین غلظت انباشت

مدل Qual2k ورودی‌ها و یا خروجی‌های غیر نقطه‌ای را به صورت خطی شبیه‌سازی می‌کند. شروع و پایان این منابع را به صورت شکل ۴ در نظر گرفته و با توجه به بار ورودی به هر عنصر، به آن وزن می‌دهد. بنابراین باید طول منابع ورودی یا خروجی غیر نقطه‌ای معلوم باشد (۳).



شکل ۴- طریقه توزیع جریان‌های منابع غیر نقطه‌ای در یک بازه

Figure 4. Distribution manner of nonpoint sources stream in a reach

۴-۲- معادلات تعادل جرم

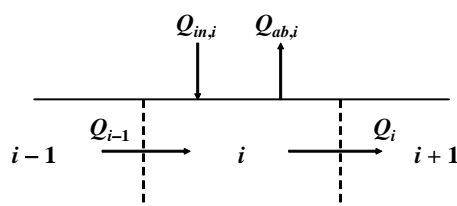
معادله اصلی که مدل مذکور، به حل آن می‌پردازد، معادله جابجایی/ پخش یک‌بعدی است که شامل جملات جابجایی، پخش، چشمه/چاه داخلی و چشمه/چاه خارجی است. این معادله برای هر ماده آلاینده C به صورت رابطه ۴ است (۳)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial (AD_L \frac{\partial c}{\partial x})}{A \partial x} - \frac{\partial (A \bar{U} C)}{A \partial x} + \frac{d_c}{dt} + \frac{S}{V} \quad (4)$$

که در آن c غلظت ماده آلاینده (mg/l)، t زمان (sec)، A سطح مقطع المان عمود بر جریان (m²)، DL ضریب پراکندگی (m²/s)، x طول رودخانه (m)، u سرعت متوسط جریان (m/s)، s جمله چشمه یا چاه خارجی (mg) و V حجم المان (m³) هستند. جملات سمت راست معادله به ترتیب عبارتند از: پراکندگی، جابجایی، چشمه/چاه درونی و چشمه/چاه بیرونی. عبارت dc/dt بیان‌گر تغییرات غلظت ماده آلاینده تحت فرآیندهای محیط‌زیستی است و برای هر ماده‌ای، بر حسب فرآیندهای تولید یا مصرف آن متفاوت است و نباید آن را با ترم سمت چپ یعنی $\frac{\partial c}{\partial t}$ اشتباه گرفت که بیان‌گر گرادیان غلظت

است.

تعدادی بازه^۱ در نظر می‌گیرد (۳). این تقسیم‌بندی می‌تواند در نقاطی که مشخصات هیدرولیکی جریان دچار تغییر می‌شود مانند نقاط ورود و یا خروج جریان صورت گیرد، لذا مدل رودخانه را به صورت یک‌سری بازه به هم پیوسته در نظر گرفته و شماره‌گذاری آن‌ها از بالادست به طرف پایین دست جریان انجام می‌شود (۸). سپس مدل از طریق حل معادلات انتشار و انتقال و با در نظر گرفتن منابع تولید و استهلاك^۲ موجود در هر بازه، اقدام به شبیه‌سازی پارامترهای مختلف کیفیت آب در طول رودخانه می‌نماید. همچنین مدل می‌تواند هر بازه‌ای را به تعداد دلخواهی عنصر با حجم کنترل (واحد محاسباتی بنیادی مدل) تقسیم‌بندی کند، که موازنه جریان در طول هر بازه از طریق واحدهای محاسباتی و با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ انجام می‌شود (۳).



شکل ۳- موازنه جریان در هر عنصر

Figure 3. Reach flow balance

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i} \quad (1)$$

$$Q_{in,i} = \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps,i,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i,j} \quad (2)$$

$$Q_{ab,i} = \sum_{j=1}^{pai} Q_{pa,i,j} + \sum_{j=1}^{npai} Q_{npa,i,j} \quad (3)$$

کل جریان ورودی از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به عنصر i (m³/d) : Q_{in,i}

کل جریان خروجی از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به عنصر i (m³/d) : Q_{ab,i}

میزان جریان خروجی از عنصر i-1 (m³/d) : Q_{i-1}

میزان جریان خروجی از عنصر i-1 (m³/d) : Q_i

1-Reach

2- Source & Sink

۳-۴- مدل سازی دما

هوا و رسوبات انجام می‌شود. برای یک بازه معادله موازنه دما به

صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود (۳):

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) \quad (5)$$

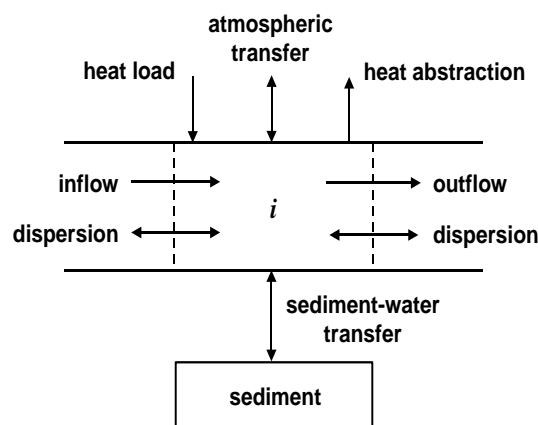
$$+ \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \left(\frac{m^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right) + \frac{J_{h,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 \text{ cm}} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 \text{ cm}} \right)$$

۵-۴- واسنجی و صحت‌سنجی مدل

پس از وارد کردن تمامی اطلاعات جمع‌آوری شده در مرحله واسنجی، مدل برای آبان ماه ۱۳۹۳ اجرا شد. سپس مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی یعنی مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری مقایسه شد. هر چه اختلاف این دو کم‌تر باشد یعنی شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر بوده و قابل پذیرش است. تغییر ضرایب و پارامترهای مدل در بازه‌های مجاز به نحوی که اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و اطلاعات شبیه‌سازی شده حداقل شود را واسنجی یا کالیبراسیون می‌گویند (۳). در نرم‌افزار QUAL2K کالیبراسیون به دو صورت دستی و خودکار انجام می‌شود (۸،۳). در روش خودکار که بر پایه الگوریتم ژنتیک است با تعریف تابعی به نام fitness (رابطه شماره ۶) در صفحه‌ای از نرم‌افزار که با همین عنوان طراحی شده، انجام می‌گردد (۴،۳). مقدار این تابع میزان انطباق دو دسته داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را مشخص می‌نماید. نرم‌افزار از طریق مقدار این تابع و سایر گزینه‌های مربوط به الگوریتم ژنتیک اقدام به اصلاح ضرایب می‌نماید (۴،۳). قبل از عمل کالیبراسیون ابتدا می‌بایستی دبی جریان واسنجی شود، که این کار از طریق ضریب مانینگ انجام می‌شود، به نحوی که با تغییر این ضریب، داده‌های مشاهداتی مربوط به نمودار Travel time با اطلاعات شبیه‌سازی شده این پارامتر بیش‌ترین تطابق را خواهند یافت (۸،۳). پس از واسنجی مدل به روش خودکار، با استفاده از داده‌های اردیبهشت ۱۳۹۵ مدل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت بدین‌صورت که ضرایب بدست آمده در مرحله قبلی را ثابت در نظر گرفته و مدل را با داده‌های مشاهداتی جدید اجرا و میزان تطابق داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بررسی می‌شود (۹). برای ارزیابی خطا از

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود موازنه دما از طریق انتقال دما از بازه‌های مجاور، ناخالصی‌ها، جریان‌های خروجی،

که در آن T_i دما در بازه i بر حسب $[\text{°C}]$ ، t زمان بر حسب روز، E'_i ضریب پراکندگی توده بین بازه‌های i و $i + 1$ ، بر حسب $[\text{m}^3/\text{d}]$ $W_{h,i}$ دمای خالص انتقالی از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به بازه i بر حسب کالری بر روز، ρ_w چگالی آب بر حسب $[\text{g}/\text{cm}^3]$ C_{pw} دمای ویژه آب بر حسب $[\text{cal}/(\text{g } \text{°C})]$ $J_{h,i}$ شار حرارتی آب- هوا بر حسب $[\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{ d})]$ $J_{s,i}$ شار حرارتی آب- رسوب بر حسب $[\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{ d})]$ می‌باشد.



شکل ۵- موازنه دما

Figure 5. Heat balance.

۴-۴- ورودی‌های مدل

از آنجایی که شرایط هیدرولیکی رودخانه ارداک در شاخه‌های میان‌مرغ و ارداک در همه‌جای آن یکسان می‌باشد با تقسیم شاخه میان‌مرغ به ۲۴ بازه یک‌کیلومتری و نیز شاخه آب‌قد به ۱۰ بازه یک‌کیلومتری کار ادامه یافت (شکل ۲). اطلاعات مورد نیاز این مدل عبارتند از: داده‌های هندسی رودخانه، داده‌های هیدرولیکی، داده‌های هواشناسی، داده‌های کیفی آب رودخانه، ضرایب سینتیکی که مورد استفاده در معادلات مدل بوده و داده‌های کمی و کیفی منابع ورودی به رودخانه می‌باشند (۸).

زیادتر از سایر نقاط آن می باشد. علت در آن است که در حاشیه این مسیر از رودخانه جمعیت چندانی ساکن نبوده و عمده ترین منبع ایجاد نیترات، فعالیت های کشاورزی و باغداری است که اکثرا در مناطق بالادست این شاخه از رودخانه مستقر می باشند. در بررسی نمودارهای COD مشخص است که این پارامتر روندی صعودی، از بالادست به سمت پایین دست رودخانه دارد. بررسی و هم پوشانی منابع آلاینده این قسمت از رودخانه نشان می دهد که تنها روستای موجود در حاشیه این شاخه، تقریباً در میانه مسیر آن واقع گردیده و دفع مواد آلاینده از جمله مواد آلی سبب ایجاد این روند افزایشی گردیده است (شکل های ۶D و ۷D). تجزیه مواد آلی فرآیندی کاملاً بی هوازی است (۱۰) و در نتیجه، در نقاطی که مقدار مواد آلی بالا است کاهش میزان DO مشاهده می گردد.

شاخص مجذور میانگین مربع خط ($RMSE^1$) استفاده گردید (رابطه شماره ۷)، که اگر اختلاف مقدار این شاخص در مرحله صحت سنجی با مقدار آن در مرحله واسنجی به اندازه ۲۰ درصد باشد نتایج مرحله صحت سنجی را قبول کرده و مدل پذیرفته می شود و در غیر این صورت مدل بیان گر واقعیت موجود در محل نمی باشد (۹).

$$f(x) = \left[\sum_{i=1}^q w_i \right] \left[\sum_{i=1}^q \frac{\frac{\sum_{j=1}^m o_{ij}}{m}}{\left[\frac{\sum_{j=1}^m (p_{ij} - o_{ij})^2}{m} \right]^{1/2}} \right] \quad (۶)$$

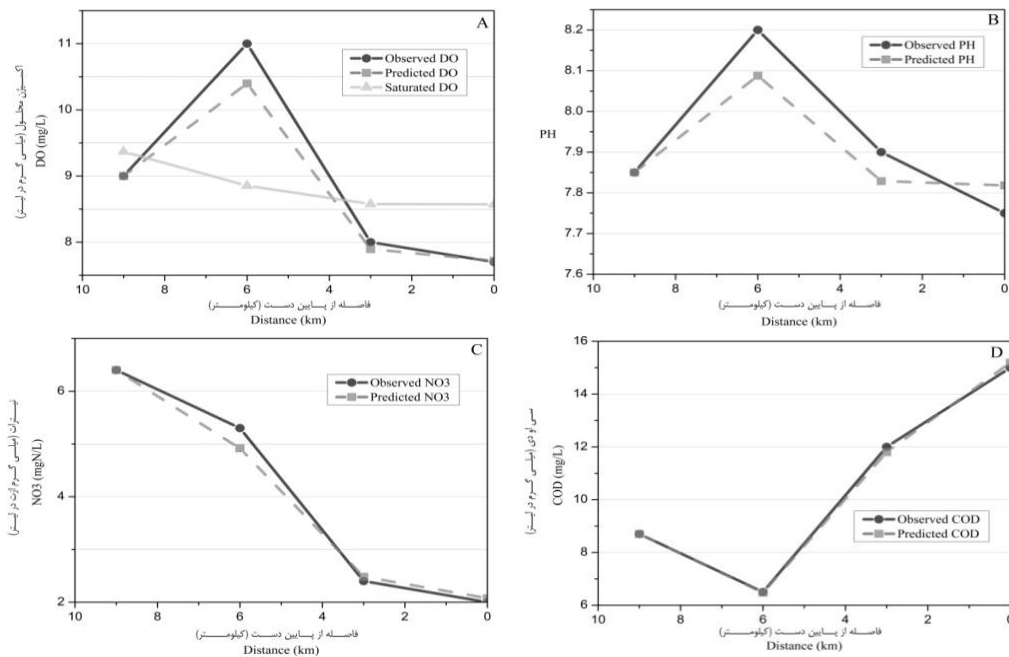
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{mo del,i})^2}{n}} \quad (۷)$$

۵- نتایج

۵-۱- رودخانه یا شاخه ی آبقد

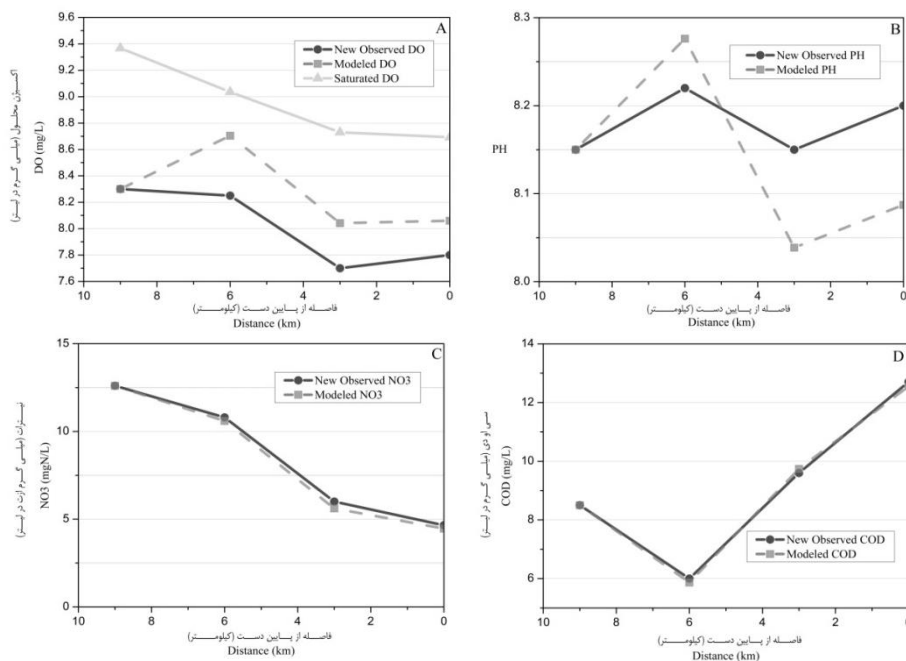
نتایج اجرای مدل برای پارامترهای مورد نظر این پژوهش در هر دو مرحله صحت سنجی و واسنجی شاخه آبقد در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شد. لازم به ذکر است که محور افقی نمودارها، فاصله نسبت به انتهای مسیر یا همان ورودی سد ارداک را نشان می دهد. شکل های فوق تغییرات پارامترهای مختلف کیفیت آب را در شاخه آبقد، از بالادست (کیلومتر ۱۰) تا پیوستن آن به دریاچه سد ارداک (کیلومتر صفر) را نشان می دهند.

همان طور که در شکل های ۶A و ۷A مشاهده می شود، میزان اکسیژن محلول (DO) در بالادست رودخانه آبقد دارای غلظت بالایی است که علت آن می تواند عدم وجود منابع آلاینده از جمله فاضلاب های روستایی در این شاخه باشد. همچنین تجاوز غلظت اکسیژن محلول از غلظت اکسیژن اشباع در طول مسیر را می توان به گیاهان موجود در بستر رودخانه نسبت داد. شکل های ۶B و ۷B، به ترتیب روند تغییرات پارامتر PH در شاخه آبقد را در طی دوره های واسنجی و صحت سنجی نشان می دهند. همان طور که در نمودارهای نیترات (شکل های ۶C و ۷C) مشخص است میزان این کمیت در بالادست رودخانه



شکل ۶- تغییرات پارامترهای مختلف کیفی در شاخه آبقد در مرحله واسنجی

Figure 6. Changes of different Qualitative parameters in Abghad Branch during calibration period



شکل ۷- تغییرات پارامترهای مختلف کیفی در شاخه آبقد در مرحله صحت‌سنجی

Figure 7. Changes of different Qualitative parameters in Abghad Branch during verification period

جدول ۲- میزان RMSE پارامترهای مختلف در دوره‌های مختلف واسنجی، صحت‌سنجی و ارزیابی مدل در شاخه آبقد

Table 2. RMSE value of different parameters during calibration and verification periods and model evaluation in Abghad branch

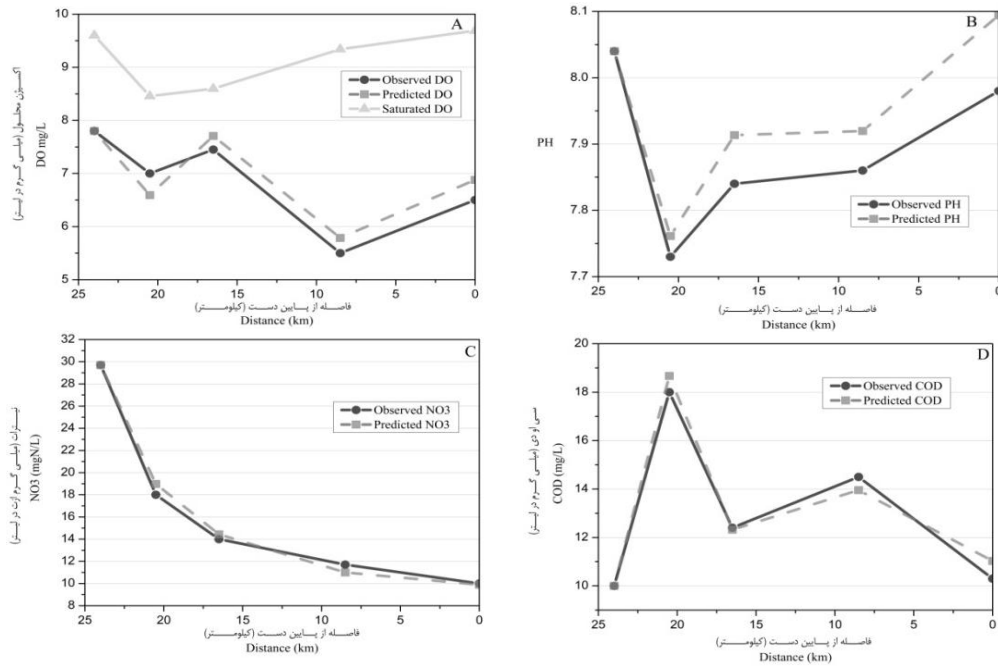
درصد اختلاف	RMSE		پارامتر
	صحت سنجی	واسنجی	
۳/۳۳	۰/۳۱	۰/۳	DO
۱۳/۵	۰/۰۸۴	۰/۰۷۴	PH
۱۵	۰/۲۳	۰/۲	NO ₃
۸/۳۳	۰/۱۲	۰/۱۳	COD

۲-۵- رودخانه یا شاخه‌ی میان‌مرغ:

شکل‌های ۸ و ۹ وضعیت تغییرات پارامترهای مختلف کیفیت آب در طول شاخه میان‌مرغ را از بالادست تا پیوستن این شاخه به دریاچه سد ارداک نشان می‌دهد. نقاط مینیمم در نمودار DO (شکل‌های ۸A و ۹A)، عمدتاً به علت وجود روستاهای مستقر در حاشیه رودخانه و تخلیه فاضلاب‌های آن‌ها است که باعث کاهش اکسیژن محلول در برخی از نقاط رودخانه شده است. با بررسی نمودارهای PH (شکل‌های ۸B و ۹B) در مسیر میان‌مرغ مشخص است که میزان آن علی‌رغم وجود نوسانات در طول مسیر، کمی از حد خنثی بالاتر و کمی قلیایی می‌باشد. علت این امر به خاطر انحلال کربنات‌ها و بی‌کربنات‌های قلیایی موجود در خاک منطقه و بستر مسیر رودخانه می‌باشد.

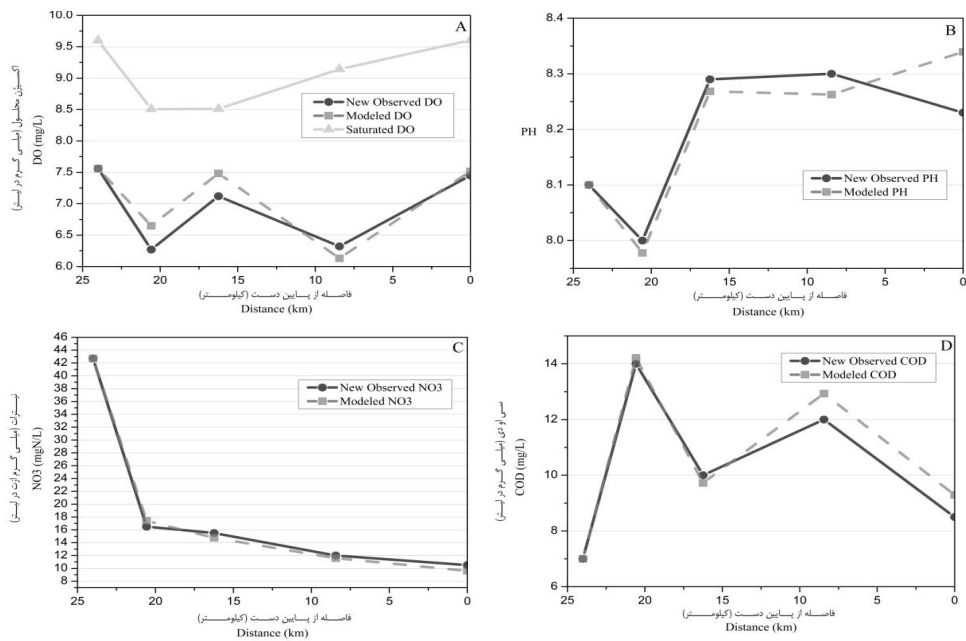
بررسی نمودارهای مربوط به نیترات (شکل‌های ۸C و ۹C) نشان دهنده کاهش میزان این پارامتر از بالادست به سمت پایین‌دست رودخانه است. بیش‌ترین میزان نیترات در قسمت بالایی رودخانه و در اثر آلودگی‌های ناشی از پساب‌های روستایی رخ داده است. تغییرات نیترات در سایر مناطق رودخانه دارای شیب ملایمی است که در اثر منابع آلاینده گسترده مانند کشاورزی و باغداری است که در طول رودخانه و در دوطرف آن مستقر هستند.

بررسی نمودارهای COD (شکل‌های ۸D و ۹D) نیز مکان دفع آلودگی‌ها را تایید نموده و نشان دهنده علت افت محتوای اکسیژن محلول آب در برخی از نقاط رودخانه می‌باشند.



شکل ۸- تغییرات پارامترهای مختلف کیفی در شاخه میان مرغ در مرحله واسنجی

Figure 8. Changes of different Qualitative parameters in Mianmargh Branch during calibration period



شکل ۹- تغییرات پارامترهای مختلف کیفی در شاخه میان مرغ در مرحله صحت سنجی

Figure 9. Changes of different Qualitative parameters in Mianmargh Branch during verification period

جدول ۳- میزان RMSE پارامترهای مختلف در دوره‌های مختلف واسنجی، صحت‌سنجی و ارزیابی مدل در شاخه میان‌مرغ

Table 3. RMSE value of different parameters during calibration and verification periods and model evaluation in Mianmargh branch.

درصد اختلاف	RMSE		پارامتر
	صحت سنجی	واسنجی	
۲۰	۰/۲۵	۰/۳	DO
۲۰	۰/۰۵	۰/۰۶	PH
۱۷/۵	۰/۶۷	۰/۵۷	NO ₃
۱۲	۰/۵۶	۰/۵	COD

بحث و نتیجه‌گیری

پیش‌روی می‌نماید. محدودیت سیستم‌های تصفیه آب در کاهش مقدار بسیاری از آلاینده‌ها، لزوم احداث سیستم‌های تصفیه فاضلاب و دفع بهداشتی زباله در روستاهای بالادست رودخانه را واضح و روشن می‌نماید. از دیگر مسایل شایان توجه احداث پل و یا انحراف راه به محل‌هایی خارج از رودخانه است که رفت و آمد کم‌تر در مسیر رودخانه و در نتیجه آلودگی کم‌تری را در بر خواهد داشت. احداث پارکینگ‌های مناسب برای گردش‌گران و جلوگیری از ورود و توقف اتومبیل‌ها که در بعضی از مناطق رودخانه به وفور دیده می‌شود نیز می‌تواند موثر واقع شود.

Reference

- Giraldo-B LC, Palacio CA, Molina R, Agudelo RA. Water quality modeling of the Medellin river in the Aburrá Valley. UNIVERSIDAD NACIONAL DE CLOMBIA, DYNA. 2015.
- Mirbagheri Sa, Mahmoodi S, Khezri Sm. Modeling of nitrate and phosphorus in chaloos river using QUAL2K. Jurnal of civil and environment. 2011. (In Persian)
- Pelletier G, Chapra S. QUAL2KW theory and documentation (version 5.1). Environmental Assessment Program Olympia. Washington Publication. 2008.

بررسی مقادیر RMSE در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، اختلاف بسیار جزعی (۲۰ درصد یا کم‌تر) را مابین مقادیر ذکر شده نشان داد (جدول‌های ۲ و ۳) و لذا مدل‌های تولید شده در مورد پارامترهای DO، COD، NO₃ و PH که به خوبی منعکس کننده وضعیت طبیعی موجود در محل می‌باشند را می‌پذیریم.

نتایج این تحقیق نشان داد که در شاخه آبقد، آب از کیفیت بالاتری نسبت به رودخانه میان‌مرغ برخوردار است. علت این امر می‌تواند در اثر عدم وجود و استقرار جمعیت روستایی و منابع آلاینده کم‌تر در این شاخه از رودخانه باشد. هر چند مسایلی مانند عدم رعایت شیوه‌های بهداشتی دفع زباله و تصفیه فاضلاب‌های روستایی و کشاورزی در این قسمت نیز به چشم می‌خورد، وجود مقادیر بالای DO و غلظت‌های کم NO₃ و COD حاکی از عدم آلودگی منابع آب سطحی این منطقه می‌باشد. در شاخه میان‌مرغ مقادیر بیش‌تری از NO₃ و COD در بالادست رودخانه مشاهده می‌گردد که علل آن را می‌توان در وجود روستا‌های پرجمعیت و گسترش مناطق کشاورزی و باغداری در این قسمت از رودخانه جستجو نمود. بنابراین اتخاذ روش‌های محدود کننده مقادیر فوق مانند جلوگیری از ورود فاضلاب‌های تصفیه نشده، محافظت از خاک‌های بدون پوشش و کاهش ورود مواد مغذی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، باغداری و دامداری باید مد نظر قرار گیرد. کاربری شرب آب سد ارداک که از دو شاخه مورد مطالعه آبقد و میان‌مرغ آبقیری می‌نماید، لزوم توجه هر چه بیش‌تر به این رودخانه و شاخه‌های اصلی آن را بیش از

11. Kalburgi PB, Shareefa RN, Deshannavar UB. Development and Evaluation of BOD-DO Model for River Ghataprabha near Mudhol (India), using QUAL2K. Modern Education and computer Science. 2015.
12. Masamba WRL, Mazvimavi D. Impact on water quality of landuses along Thamalakane-Boteti River, An outlet of the Okavango Delta. Physics and Chemistry of the Earth. 2008.
13. Fereidoon M, Khorasani G. Water quality simulation in qarresu river and the role of wastewater treatment plants in reducing the contaminants concentrations. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2013; 3(5).
14. Ribeiro CHA, Araujo M. Mathematical Modeling as a Management Tool for Water Quality Control of The Tropical Beberibe Estuary. Ne Brazil, Hydrobiologia. 2002.
15. Turner D, Pelietier G, Kasper B. Disolved Oxygen and PH Modeling of a Periphyton Dominated, Nutrient Enriched River. Jurnal of Environmental Engineering. August 2009.
16. Zhang R, Qian X, Yuan X, Ye R, Xia B, Wang Y. Simulation of water environmental capacity and pollution load reduction using QUAL2K for water environmental management. international journal of environmental research and public health. 2012.
17. Zipper C, Holtzman E, Golde I, Patrick D, Gildea F, Stewart JJ, et al. Virginia USA Water Quality, 1978 to 1995. Regional Interpretation. 2002.
4. Pelletier G, Chapra S, Tao H. QUAL2KW A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. Researchgate <http://www.researchgate.net/publication/222978409>. 2006.
5. Shokri s, Hooshmand A, Moazed H. Simulation of ammonium and nitrate in gargar river using QUAL2KW. scientific research journal of wetland's ecobiology. 2015. (In Persian)
6. Bagherian Marzouni M, Akhoundalib M, Moazed H, Jaafarzadeh N, Ahadian J, Hasoonizadeh H. Evaluation of karun river water quality scenarios using simulation model results. journal of Advanced Biological and Biomedical Research. 2014; 2(2): p. 339-358.
7. Sanders TG, Ward RC, Loftis JC, Steele TD, Adrian DD, Yevjevich V. Design of Networks for Monitoring Water Quality: Water Resources research; 1987.
8. Pelletier G, Chapra S. QUAL2KW user manual (version 5.1) A modeling framework for simulating river and stream water quality. Washington; 2008.
9. Prakash R, Kannel S, Lee Y, Lee S, Kanel SR, Pelletier GJ. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. Ecological modelling. 2007.
10. Nuzhat P, Singh S. Development of Enhanced DO model for Gomti River at Lucknow Stretch, India. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES. 2016.