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 دریافت: ۹۶/۵/۹ **تاریخ پذیرش:۹۶/۶/۲۹**

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 قبل‌ازسد 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.

یافته ها: اطلاعات بدست آمده نشان داد که مدل در مورد پارامترهای DO، PH، COD و NO_3 تطابق خوبی با واقیعت داشته و قادر است به‌خوبی وضعیت پارامترهای کیفی آب را در هر دو شاخه از رودخانه ارداک شبیه‌سازی نماید.

بحث و نتیجه گیری: آب رودخانه در شاخه آبقد 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، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی محیط زیست-منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران *(مسوول مکاتبات).
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

J. Env. Sci. Tech., Vol 22, No.11, January, 2020

Simulating of Surface Water Quality Using QUAL2KW

(Ardak River, Khorasan Razavi Province)

Morteza Nikakhtar [1]

Seyedeh Hoda Rahmati[2*]

rahmati@srbiau.ac.ir

Ali reza Massah Bovani[3]

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 NO_3 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

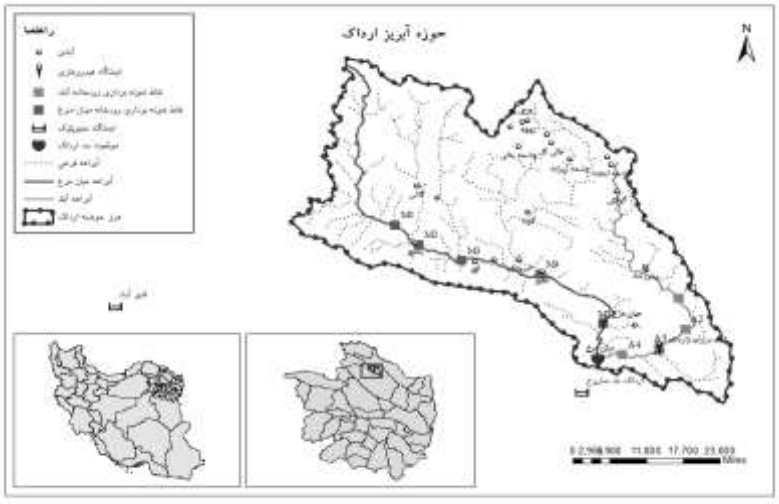
امروزه رودخانه‌ها به عنوان مهم‌ترین منبع تامین و انتقال آب مصرفی در بخش‌های صنعت، کشاورزی و شهری از اهمیت خاصی برخوردار هستند. رودخانه‌ها نه‌تنها تأمین کننده مصارف مختلف هستند، بلکه به عنوان مجاری طبیعی در انتقال پساب‌ها و فاضلاب‌های تولید شده عمل می‌نمایند. اما گسترش فزاینده فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی 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 نقطه‌نظر آلودگی‌ها مطرح باشند (۱). تأمین آب‌آشامیدنی، ارتقاء فعالیت-ها و کاربری‌های تفریحی و ایجاد یک اکوسیستم مناسب برای ماهیان و حیات‌وحش، مستلزم حفظ کیفیت آب رودخانه می-باشد. 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 زیست‌محیطی 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 زیست‌محیطی طراحی شده و توانایی اداره شرایط دشوار را نیز داشته باشند (۲). یکی از این ابزارها شبیه‌سازی و استفاده از مدل‌های کامپیوتری می باشد. اطلاعات بدست آمده بوسیله مدل‌سازی 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 نقاط‌مختلف‌رودخانه 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 مورداستفاده قرار گرفته‌اند (۲). مدل کیفی QUAL2K یک مدل دینامیکی و یک‌بعدی است که قادر است پارامترهای مختلف کیفیت آب یک‌رودخانه 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 شبیه‌سازی 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). ازآنجایی 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 بیش‌تری را به سوی خود جلب نموده است به‌طوری‌که، در مطالعاتی که بر روی رودخانه گرگر خوزستان انجام شد، کفیت آب این رودخانه به وسیله مدل یاد شده شبیه‌سازی 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 صحت‌سنجی 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

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

روش بررسی

۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز ارداک چناران تقریبا 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 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 بهم‌پیوسته‌و پس از طی حدود ۳ کیلومتر وارد دشت می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- رودخانه ارداک و انشعابات فرعی آن

Figure1. Ardak River and its different tributaries

۲- ایستگاه‌های هیدرومتری و نمونه‌برداری

در این تحقیق برای مرحله واسنجی مدلQual2kw در شاخه-های 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 ۱۳۹۵در هر دو شاخه رودخانه، عملیات نمونه-برداری کیفی و برآورد دبی به وسیله دستگاه مولینه انجام شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده در شرایط استاندارد[1] 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.

1- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

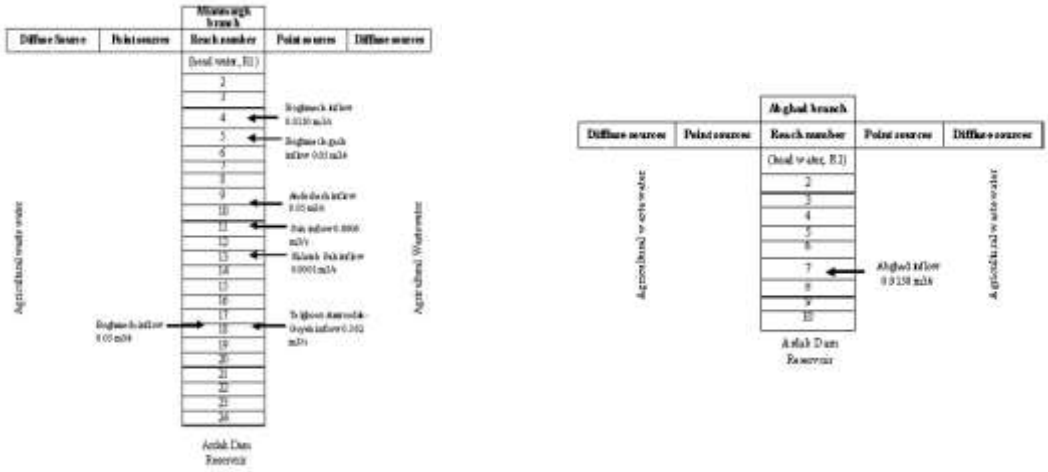
جدول ۱- مختصات جغرافیایی و مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی و نمونه‌برداری حوضه آبخیز ارداک

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

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

۳- منابع آلاینده:

با توجه به این‌که محدوده مورد مطالعه یک منطقه طبیعی و فاقد هر گونه منبع آلاینده صنعتی و معدنی بوده بنابراین عمدتا 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 می‌نمایند، پرورش و چرای دام در منطقه و آرامستان‌های‌موجود 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.



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

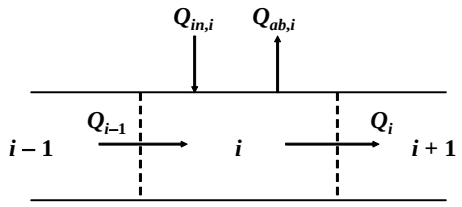
۴- معرفی مدل Qual2kw

یکی از روش‌های مدل‌سازی کیفیت آب، استفاده از تبادلات بین مواد و کمیت‌ها و روابط ریاضی موجود در بین آن‌ها، برای محاسبه میزان پارامترها می‌باشد (۳). در حال حاضر مدل‌های زیادی با قابلیت‌ها و توانایی‌های مختلف بر این اساس طراحی شده‌اند که یکی از آن‌ها مدل Qual2kw می‌باشد (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 ارایه گردیده است. یکی از آخرین ویرایش‌های این برنامه (که در این مطالعه از آن بهره گرفته شده است) نسخه ۵،۱ آن می‌باشد. این برنامه، انتقال و زوال آلاینده‌های معمول (یعنی غیرسمی) را شبیه‌سازی می‌کند.

مدل QUAL2K رودخانه را به‌صورت یک‌بعدی، همراه با جریان دایمی غیریکنواخت شبیه‌سازی می‌کند و می‌تواند اثر بارگذاری را به دو صورت نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای درنظر بگیرد (۸،۳) . همچنین قادر است تغییرات را به‌صورت روزانه و با گام-های زمانی کم‌تر از یک ساعت شبیه‌سازی نماید (۳).

۴-۱- موازنه‌ی جریان و بازه‌بندی رودخانه:

برای تولید مدل که در واقع همان فرمول‌ها و روابط ریاضی کنترل کننده میزان پارامترها می‌باشند، اولین قدم ساده‌سازی سیستم ورودی‌ها و خروجی‌ها به منظور فرموله کردن ریاضی آن است. بدین منظور Qual2kw رودخانه را به صورت تعدادی بازه[1] در نظر می‌گیرد (۳). این‌تقسیم‌بندی می‌تواند در نقاطی که مشخصات هیدرولیکی جریان دچار تغییر می‌شود مانند نقاط ورود و یا خروج جریان صورت گیرد، لذا مدل‌رودخانه را به صورت یک‌سری بازه به‌هم‌پیوسته در نظر گرفته و شماره‌گزاری آن‌ها از بالادست به طرف پایین‌دست جریان انجام می‌شود (۸). سپس مدل از طریق حل معادلات انتشار و انتقال و با در نظر گرفتن منابع تولید و استهلاک[2] موجود در هر بازه، اقدام به شبیه‌سازی پارامترهای‌مختلف 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

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i} \quad (۱)$$

$$Q_{in,i} = \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps,i,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i,j} \quad (۲)$$

$$Q_{ab,i} = \sum_{j=1}^{pai} Q_{pa,i,j} + \sum_{j=1}^{npai} Q_{npa,i,j} \quad (۳)$$

Qin,i : کل جریان ورودی از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به عنصر i (m^3/d)

Qab, *i* : کل جریان خروجی از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به عنصر i (m^3/d)

Q*i*-1: میزان جریان خروجی از عنصر *i*-1 (m^3/d)

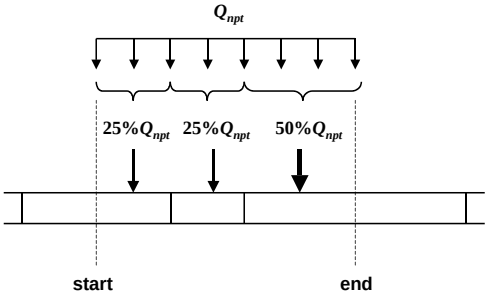
Q*i*: میزان جریان خروجی از عنصر *i*-1 (m^3/d)

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).

---

1 Reach

2 Source & Sink



شکل ۴- طریقه توزیع جریان‌های منابع غیرنقطه‌ای 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 به‌صورت رابطه ۴ است(۳)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial\left(AD_L \frac{\partial c}{\partial x}\right)}{A\partial x} - \frac{\partial\left(A\bar{U}C\right)}{A\partial x} + \frac{dc}{dt} + \frac{S}{V} \qquad (۴)$$

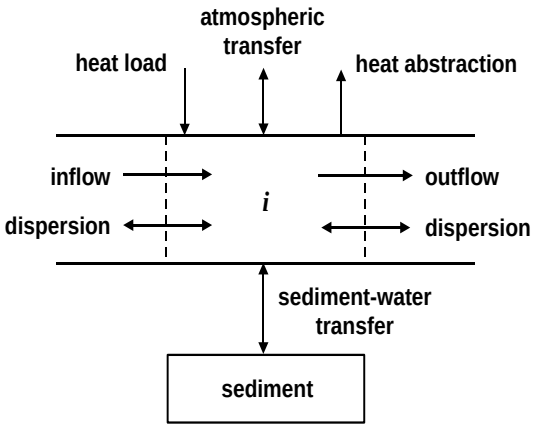
که در آن c غلظت ماده آلاینده (mg/l)، t زمان (sec)، A سطح مقطع المان عمود بر جریان (m2)، D_L ضریب پراکندگی (m2/s)، x طول رودخانه (m)، u سرعت متوسط جریان (m/s)، s جمله چشمه یا چاه خارجی (mg) و V حجم المان (m3) هستند. جملات سمت راست معادله به ترتیب عبارتند از: پراکندگی، جابجایی، چشمه/چاه درونی و چشمه/چاه 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 آن‌را با ترم سمت چپ یعنی $\frac{\partial c}{\partial t}$ اشتباه گرفت که بیان‌گر گرادیان غلظت است.

۴-۳- مدل‌سازی دما

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود موازنه دما از طریق انتقال دما از بازه‌های مجاور، ناخالصی‌ها، جریان‌های خروجی، هوا و رسوبات انجام می‌شود. برای یک بازه معادله موازنه دما به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود (۳):

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}T_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i}T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i}\left(T_{i-1} - T_i\right) + \frac{E'_i}{V_i}\left(T_{i+1} - T_i\right) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i}\left(\frac{m^3}{10^6\ cm^3}\right) + \frac{J_{h,i}}{\rho_w C_{pw} H_i}\left(\frac{m}{100\ cm}\right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i}\left(\frac{m}{100\ cm}\right) \qquad (۵)$$

که در آن T_i دما در بازه i بر حسب [°C]، t زمان بر حسب روز، E'_i ضریب پراکندگی توده بین بازه‌های i و $i+1$، بر حسب [m^3/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 [g/cm^3]، C_{pw} دمای‌ویژه‌آب بر حسب [cal/(g °C)]، $J_{h,i}$ شار حرارتی آب- هوا بر حسب [cal/(cm^2 d)] و $J_{s,i}$ شار حرارتی آب- رسوب بر حسب [cal/(cm^2 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 سینیتیکی که مورد استفاده در معادلات مدل بوده و داده‌های کمی و کیفی منابع ورودی به رودخانه می‌باشند (۸).

۴-۵- 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 بامقادیر مشاهداتی یعنی مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری مقایسه شد. هر چه اختلاف این دو کم‌تر باشد یعنی شبیه‌سازی به‌واقعیت 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 شماره۶) درصفحه‌ای 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 این‌ضریب،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 ۱۳۹۵مدل 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 شاخص مجذور میانگین مربع خط (RMSE[1]) استفاده گردید (رابطه شماره۷)، که اگر اختلاف مقدار این شاخص در مرحله صحت‌سنجی با مقدار آن در مرحله واسنجی به‌اندازه ۲۰ درصد باشد نتایج مرحله صحت‌سنجی را قبول کرده و مدل پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت مدل بیان‌گر واقعیت موجود در محل نمی‌باشد (۹).

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

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

۵- نتایج

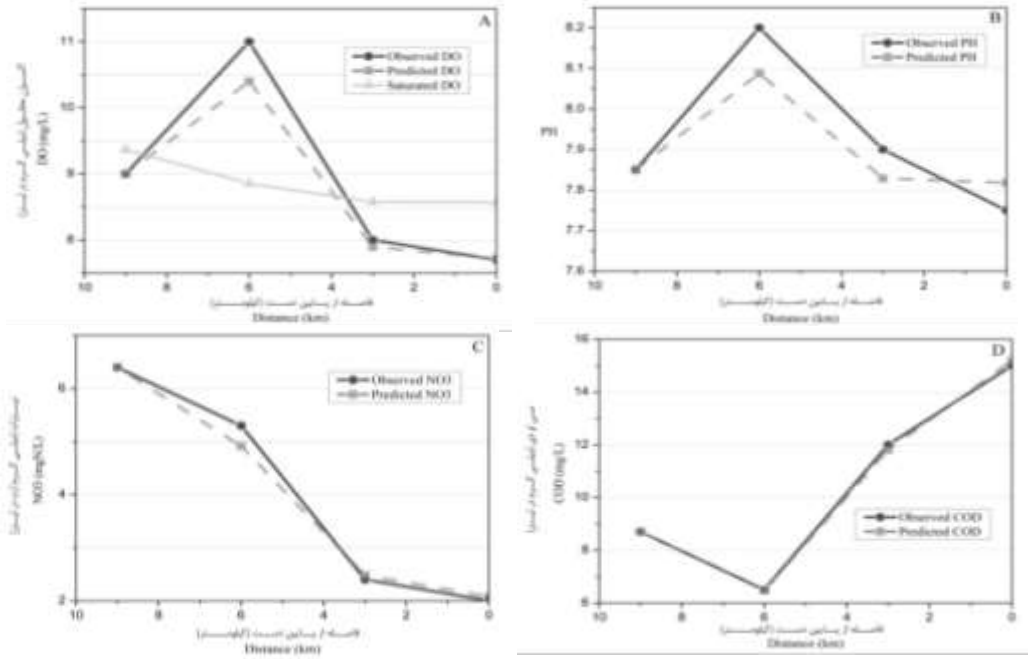
۵-۱- رودخانه یا شاخه‌ی آبقد

نتایج اجرای مدل برای پارامترهای مورد نظر این پژوهش در هر دو مرحله صحت‌سنجی و واسجی شاخه آبقد در شکل‌های 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 می‌دهد. 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 می‌دهند.

همان‌طور که در شکل‌های ۶A و ۷A مشاهده می‌شود، میزان اکسیژن محلول (DO) در بالادست رودخانه آبقد دارای غلظت بالایی است که علت آن می‌تواند عدم وجود منابع آلاینده از جمله فاضلاب‌های روستایی در این شاخه باشد. همچنین تجاوز غلظت اکسیژن محلول از غلظت‌اکسیژن اشباع در طول مسیر را می‌توان به گیاهان موجود در بستر رودخانه نسبت داد. شکل‌های ۶B و ۷B، به ترتیب روند تغییرات پارامتر PH در شاخه

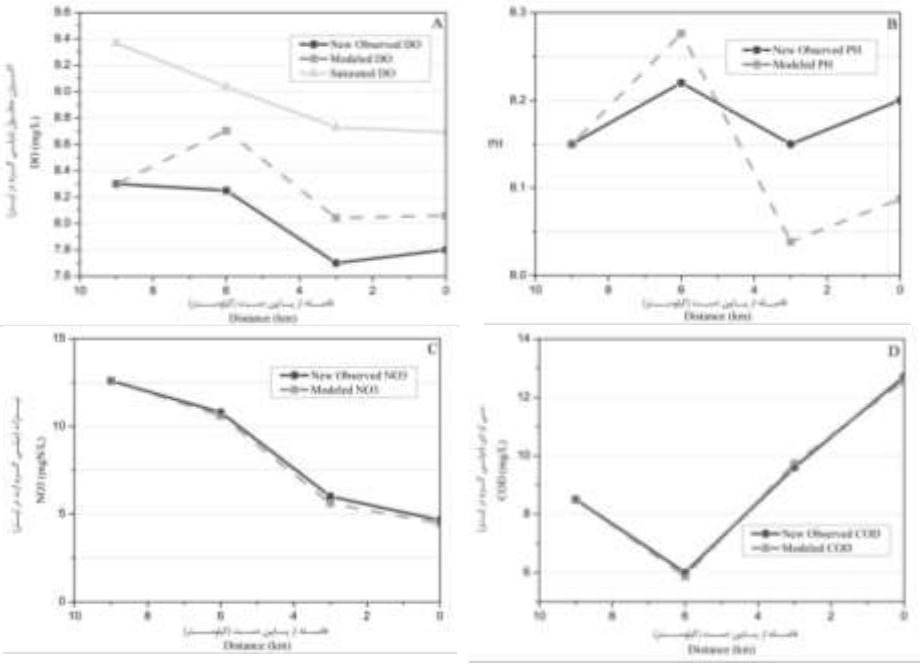
1- Root Mean Square Error

آبقد را در طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهند. همان‌طور که در نمودارهای نیترات (شکل‌های ۶C و ۷C) مشخص است میزان این کمیت در بالادست رودخانه زیادتر از سایر نقاط آن می‌باشد. علت در آن است که در حاشیه این مسیر از رودخانه جمعیت چندانی ساکن نبوده و عمده‌ترین منبع ایجاد نیترات، فعالیت‌های کشاورزی و باغداری است که اکثرا در مناطق بالادست این شاخه از رودخانه مستقر می‌باشند. در بررسی نمودارهای COD مشخص است که این پارامتر روندی صعودی، از بالادست به سمت‌پایین دست رودخانه دارد. بررسی و هم‌پوشانی منابع آلاینده این قسمت از رودخانه نشان می‌دهد که تنها روستای موجود در حاشیه این شاخه، تقریبا در میانه مسیر آن واقع گردیده و دفع مواد آلاینده از جمله مواد آلی سبب ایجاد این روند افزایشی گردیده است (شکل‌های ۶D و ۷D). تجزیه مواد آلی فرآیندی کاملا بی‌هوازی است (۱۰) و در نتیجه، در نقاطی که مقدار مواد آلی بالا است کاهش میزان DO مشاهده می‌گردد.



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

پارامتر	RMSE		درصد اختلاف
	واسنجی	صحت سنجی	
DO	۰/۳	۰/۳۱	۳/۳۳
PH	۰/۰۷۴	۰/۰۸۴	۱۳/۵
NO_3	۰/۲	۰/۲۳	۱۵
COD	۰/۱۳	۰/۱۲	۸/۳۳

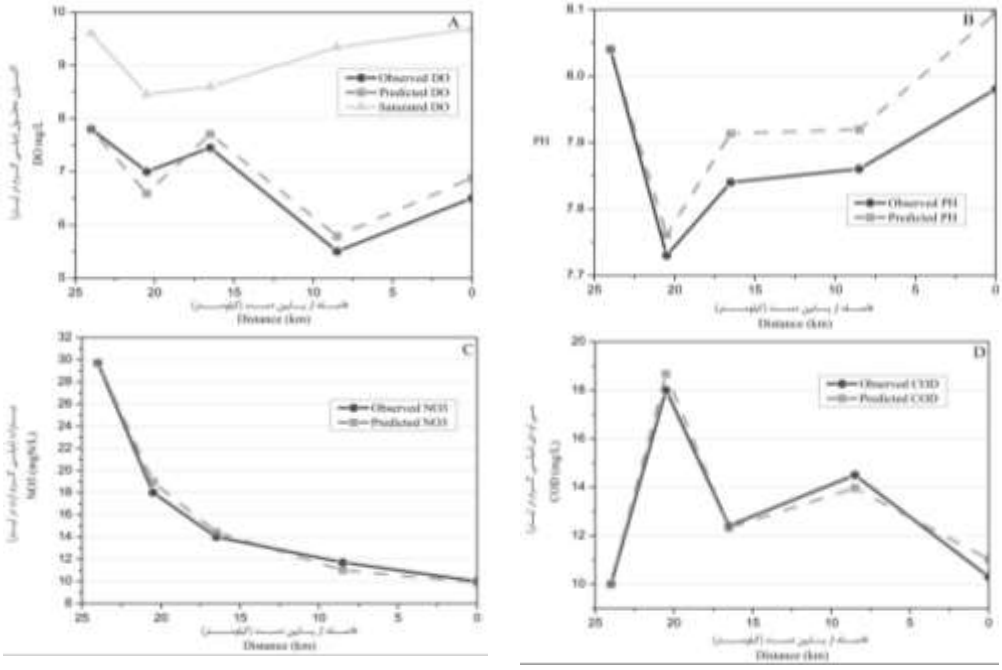
۵-۲- رودخانه یا شاخه‌ی میان‌مرغ:

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 (شکل های۸A و ۹A)، عمدتا 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 بی‌کربنات-های قلیایی موجود در خاک منطقه و بستر مسیر رودخانه می-باشد.

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

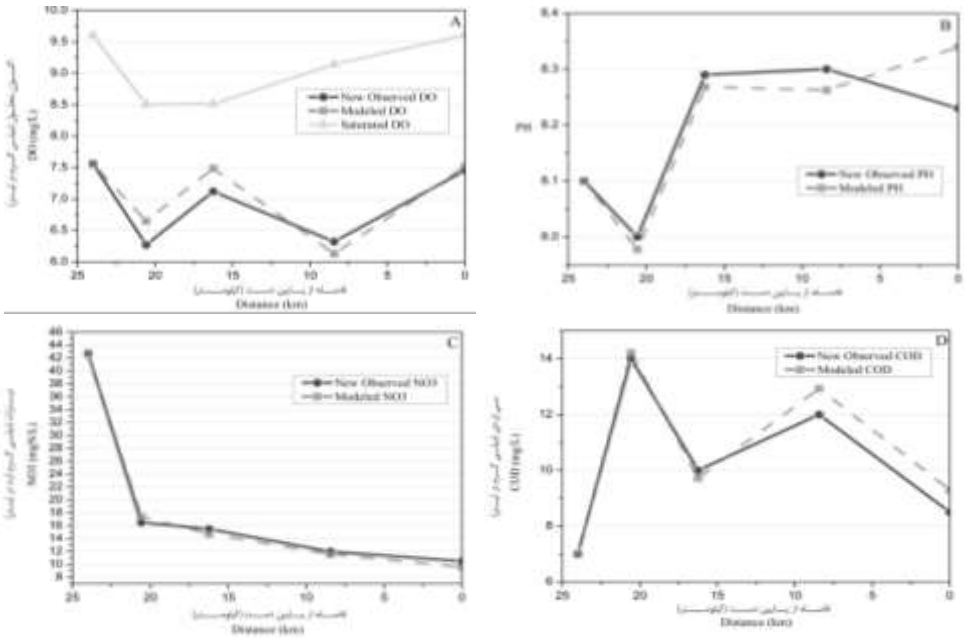
رخ داده است. تغییرات نیترات در سایرمناطق رودخانه دارای شیب ملایمی است که در اثر منابع آلاینده گسترده مانند کشاورزی و باغ‌داری است که در طول رودخانه و در دوطرف آن مستقر هستند.

بررسی نمودارهای COD (شکل‌های ۸Dو 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 میان‌مرغ در مرحله واسنجی

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



شکل ۹- تغییرات پارامترهای مختلف کیفی در شاخه میان‌مرغ در مرحله صحت‌سنجی

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.

پارامتر	RMSE		درصد اختلاف
	واسنجی	صحت سنجی	
DO	۰/۳	۰/۲۵	۲۰
PH	۰/۰۶	۰/۰۵	۲۰
NO_3	۰/۵۷	۰/۶۷	۱۷/۵
COD	۰/۵	۰/۵۶	۱۲

بحث و نتیجه‌گیری

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، NO_3 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 عدم‌وجود و استقرار جمعیت روستایی و منابع آلاینده کم‌تر در این شاخه از رودخانه باشد. هر چند مسایلی مانند عدم رعایت شیوه‌های‌بهداشتی دفع زباله و تصفیه فاضلاب های روستایی و کشاورزی در این قسمت نیز به چشم می‌خورد، وجود مقادیر بالای DO و غلظت‌های کم NO_3 و COD حاکی از عدم آلودگی منابع آب سطحی این منطقه می‌باشد. در شاخه میان‌مرغ مقادیر بیش‌تری از NO_3 و COD در بالادست رودخانه مشاهده می‌گردد که علل آن‌را می‌توان در وجود روستا های 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 آبگیری می‌نماید، لزوم توجه هر چه بیش‌تر به این رودخانه و شاخه‌های اصلی آن را بیش از پیش ضروری 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 شایان‌توجه احداث پل و یا انحراف راه به محل‌هایی خارج از رودخانه است که رفت و آمد کم‌تر در مسیر رودخانه و در نتیجه آلودگی کم تری 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

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