



Investigating the Quality Status of Haraz River Using Numerical Modeling

Sh. Farkhani*

Abstract

Rivers are amongst the most important sources of water supply all over the world. Increasing urban development, industrial activities and a significant increase in the volume of urban effluents have polluted rivers and in many places water quality of these vital resources have been seriously endangered. In this study, using the QUAL2K numerical model, the quality status of Haraz River has been investigated and the impact of effluents entering the river has been identified. According to the results of qualitative modeling of the river in 2016, at kilometer 48, where the Amol diversion dam is located, the BOD rate suddenly increases which is due to the reduction of flow velocity and discharge and the increase in the discharge of pollutants to the river related to workshops and factories. In spring and summer the concentration of dissolved oxygen is critical in the reaches from Amol diversion dam to the estuary of the river by the Caspian Sea. In terms of acidity, the water of Haraz River is alkaline. The EC parameter also decreases along the river due to the gradual deposition of soluble and suspended solids into the water. The concentration of nitrate in water also increases after the diversion dam, although it is not significant in total.

Keywords: Numerical Modeling, Water Quality, Haraz River, QUAL2K.

Received: February 24, 2021

Accepted: May 30, 2021

بررسی وضعیت کیفی رودخانه هراز با استفاده از مدل سازی عددی

شیرین فرخانی*

چکیده

رودخانه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب مصرفی، در سراسر جهان از اهمیت خاصی برخوردارند. توسعه روزافزون شهرنشینی، فعالیت‌های صنعتی و افزایش قابل توجه حجم پساب‌های شهری موجب آلودگی رودخانه‌ها گشته و کیفیت آب این منابع حیاتی را در بسیاری از نقاط مورد مخاطره جدی قرار داده است. در این مطالعه با استفاده از مدل عددی QUAL2K به بررسی وضعیت کیفی رودخانه هراز و شناسایی تأثیر پساب‌های ورودی به رودخانه پرداخته شده است. مطابق نتایج حاصل از مدل سازی کیفی رودخانه در سال ۱۳۹۵، در کیلومتر ۴۸ که سد انحرافی آمل واقع شده است، بواسطه کاهش سرعت جریان و دبی، ضمن افزایش تخلیه آلاینده‌های مربوط به کارگاه‌ها و کارخانجات به رودخانه، میزان BOD دچار افزایش ناگهانی می‌گردد. در فصول بهار و تابستان، حدفاصل سد انحرافی آمل تا مصب رودخانه مقدار غلظت اکسیژن محلول در حالت بحرانی واقع شده است. به لحاظ اسیدیته، آب رودخانه هراز دارای خاصیت قلیایی است. پارامتر هدایت الکتریکی نیز به دلیل ته‌نشینی تدریجی جامدات محلول و معلق در آب، در طول رودخانه روندی نزولی را طی می‌کند. غلظت نیترات موجود در آب نیز پس از سد انحرافی دچار جهش افزایشی می‌گردد، هر چند که در کل مقدار قابل توجهی ندارد.

کلمات کلیدی: مدل سازی عددی، کیفیت آب، رودخانه هراز، QUAL2K.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۲/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۹

1- Ph.D. Candidate of Environmental Engineering of Water Resources, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran. Email: s_farkhani@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.1.16.7](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.16.7)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست- منابع آب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

مدل‌سازی تغییرات نیتروژن و فسفر در طول رودخانه چالوس در سال ۱۳۸۷ با استفاده از نرم‌افزار QUAL2K پرداختند. Ardestani et al. (2015) کیفیت آب رودخانه سفیدرود را با استفاده از نمونه‌برداری‌های انجام شده در منطقه مورد بررسی قرار داده و سپس با استفاده از مدل QUAL2K به شبیه‌سازی کیفیت آب این رودخانه پرداختند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که پارامتر pH از پایاب سد تا انتهای حوضه مورد مطالعه افزایش یافته و پارامترهای DO و EC کاهش می‌یابد. Razaghian et al. (2015) با استفاده از مدل QUAL2K به بررسی وضعیت کیفی آب رودخانه قره‌سو پرداختند. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد در مناطقی از رودخانه میزان آلاینده‌های ورودی بالا می‌باشد. به عنوان مثال در اطراف کرمانشاه مقادیر نیتروژن و فسفر به میزان بحرانی می‌رسد. Chen et al. (2018) با استفاده از مدل QUAL2K به شبیه‌سازی اکسیژن محلول در رودخانه Boulder Creek واقع در ایالت کلرادو آمریکا پرداختند. هم‌چنین در این مطالعه آنالیزهای حساسیت‌سنجی برای شناسایی تأثیرگذارترین فرآیندها بر DO صورت گرفت که هوادهی رودخانه و نیتریفیکاسیون مهم‌ترین فرآیندهای مؤثر بر DO شناخته شده‌اند. فتوستنتز نیز بر این پارامتر تأثیرگذار بوده و فرآیند تنفس نیز با اثرات نسبتاً کوچک بر DO معرفی گردید. Iqbal et al. (2018) با استفاده از مدل عددی QUAL2KW به ارزیابی کیفیت چهار رودخانه در چهار زون اقلیمی مختلف (گرمسیری، معتدل، سرد و خشک) در آسیا پرداختند. بر اساس نتایج مدل‌سازی و بر مبنای شاخص WQI، رودخانه Yamuna در هند (اقلیم خشک) دارای کیفیتی ضعیف است در حالی که رودخانه‌های Bagmati در نپال (اقلیم گرم) و Galing در مالزی (اقلیم معتدل) دارای کیفیت متوسط می‌باشند و با حرکت به سمت پایین‌دست میزان اکسیژن محلول آن‌ها کاهش می‌یابد. در مقابل اکسیژن محلول رودخانه Nakdong واقع در کره جنوبی (اقلیم سرد)، به دلیل نرخ بالای هوادهی، با حرکت به پایین‌دست افزایش می‌یابد و دارای کیفیت مناسب می‌باشد. Nezaad et al. (2018) با استفاده از مدل QUAL2KW به مطالعه تغییرات فصلی خودپالایی رودخانه کارون و تغییرات غلظت اکسیژن محلول و نیترات و کلیفرم در رودخانه پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد غلظت نیترات در فصل زمستان به دلیل استفاده از کودهای نیتراته برای رشد گیاهان و ورود پساب این آلاینده به رودخانه بیشتر از سایر فصل‌ها است. Biglari et al. (2019) در پژوهشی ضمن شناسایی منابع آلاینده رودخانه زرينه‌رود، سناریوهای متعدد کنترل آلودگی‌های این رودخانه را برای دستیابی به استانداردهای کیفیت آب برای بقای آبزیان مورد مطالعه قرار دادند. به این منظور مدل کیفیت آب QUAL2KW برای داده‌های سال ۱۳۹۵ اجرا و صحت‌سنجی گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد آلودگی به مواد مغذی سبب شده تا در برخی از فصول سال و در برخی از بازه‌های

افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی همراه با توسعه فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، منجر به افزایش تعداد منابع آلاینده و میزان پساب‌های تخلیه شده از سوی آن‌ها به منابع آب سطحی از جمله رودخانه‌ها گشته است. تخلیه فاضلاب‌ها در بدنه‌های آبی عموماً منجر به افت کیفیت آب در محل تخلیه و پایین‌دست رودخانه می‌گردد. هم‌زمان با رشد روزافزون جمعیت و در نتیجه لزوم کنترل کیفیت منابع محدود آب، نیاز به استفاده از ابزارهای مدیریتی از جمله مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب به طور چشمگیری افزایش یافته است. مدل‌های ریاضی این فرصت را فراهم می‌آورند که با پیاده‌سازی ساختار شماتیکی از یک حوضه آبریز واقعی، فرآیندهای طبیعی و هیدرولوژیکی مرتبط با سیستم منابع آب و روابط حاکم بین عرضه و تقاضا شبیه‌سازی گردد تا از این طریق شیوه مدیریتی ارزیابی شده و روش‌ها و تکنولوژی‌های مناسب جهت کاهش و کنترل آلاینده‌های ورودی شناسایی و استفاده گردند. تاکنون مطالعات فراوانی در زمینه شبیه‌سازی وضعیت کیفی رودخانه‌های مختلف با استفاده از مدل‌های عددی، در سراسر جهان و ایران صورت گرفته است.

Drolc et al. (1996) با هدف سنجش تأثیر پساب ورودی به رودخانه Sava واقع در جنوب شرق اروپا، با استفاده از مدل QUAL2E به شبیه‌سازی کیفی این رودخانه پرداختند. به این منظور فاضلاب‌ها و مواد آلی قابل تجزیه که در این رودخانه تخلیه می‌گشتند، مورد بررسی قرار گرفت و مدل مذکور توسط اندازه‌گیری‌های میدانی و اسنجی گردید. Jafarzadeh Haghghi et al. (2005) با هدف بررسی وضعیت کیفی آب رودخانه کارون در شرایط موجود و در آینده تحت شرایط توسعه و مسائل ناشی از بهره‌برداری‌های روزافزون از آب این رودخانه، ضمن استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در گذشته و انجام نمونه‌برداری‌هایی از محل‌های مهم ورود پساب به رودخانه، با استفاده از مدل عددی QUAL2E به شبیه‌سازی کیفی رودخانه پرداختند. شبیه‌سازی رودخانه در وضعیت موجود و آتی بدون تصفیه، بیانگر کیفیت نامناسب رودخانه و غلظت بالای شاخص‌های BOD5، COD و نیتروژن کل بوده است. Kannel et al. (2007) به منظور شبیه‌سازی اکسیژن محلول رودخانه Bagmati واقع در کشور نپال بر اساس سناریوهای مختلف، از مدل QUAL2KW استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل QUAL2KW برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول رودخانه قابل قبول است. Paliwal et al. (2007) به منظور شبیه‌سازی وضعیت کیفی رودخانه Yamuna در هندوستان، از مدل QUAL2E بهره برده و بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی، محدوده آلوده رودخانه تعیین گردید. Mirbagheri et al. (2011) به

رودخانه هراز یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های شمال کشور ایران به حساب می‌آید. این رودخانه محل زیست گونه‌های حساس آبی نظیر ماهی قزل آلا، سفید و کپور می‌باشد. برداشت بی‌رویه از آب این بدنه آبی به منظور مصارف آبیاری زمین‌های کشاورزی و همچنین تجمع کارخانجات، کارگاه‌های پرورش ماهی و برداشت شن و ماسه در حومه این رودخانه، از موارد تأثیرگذار بر کیفیت آب این رودخانه به شمار می‌روند. (Farkhani (2018) با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و بر مبنای داده‌های مربوط به دو مطالعه در زمینه تعیین کیفیت آب رودخانه هراز در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۲ (Nasirahmadi et al., 2012; Mohseni-Bandpei and Yousefi, 2013) به شبیه‌سازی وضعیت کیفی این رودخانه با استفاده از مدل عددی QUAL2K پرداخت. نتایج مدل‌سازی نشان داد که وضعیت کیفی رودخانه در ۶ ماه اول سال به لحاظ اکسیژن محلول بحرانی بوده و آب رودخانه دارای خاصیت قلیایی است.

در پژوهش حاضر ضمن شناسایی دقیق‌تر منابع آلاینده رودخانه هراز، با استفاده از اطلاعات هشت ایستگاه نمونه‌برداری در طول کانال اصلی رودخانه و داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به کیفیت خروجی ۱۲ منبع آلاینده ورودی به رودخانه، به شبیه‌سازی کیفیت آب آن با استفاده از مدل عددی QUAL2K پرداخته شده است. در این مطالعه پارامترهای دی، سرعت جریان، DO، BOD، pH، نیترات و هدایت الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه هراز با طول ۱۸۱ کیلومتر از جنوب غربی و جنوب قله دماوند در محله نهم لار سرچشمه گرفته و با طی مسیری طولانی به سوی شهر آمل و پس از عبور از شهر آمل به دریای خزر در منطقه‌ای به نام سرخورد متصل می‌گردد. این رودخانه دارای دو شاخه اصلی است که یکی از غرب به طرف شرق (رودخانه نور) و دیگری تقریباً از جنوب به طرف شمال (رودخانه لار و شاخه اصلی هراز) امتداد دارد. این دو شاخه در فاصله تقریبی ۴۶ کیلومتری جنوب شهر آمل به هم می‌پیوندند و شاخه اصلی هراز را ایجاد می‌کنند. حوضه آبریز این رودخانه معادل ۴۰۸۶ کیلومتر مربع است که در شهرستان‌های آمل، بابل، محمود آباد، فریدونکنار و نور واقع گردیده است (شکل ۱). این رودخانه یکی از مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های استان مازندران می‌باشد که سالانه یک میلیارد متر مکعب آبدی دارد (Karbasi and Kalantari, 2007).

رودخانه، شرایط کیفیت آب برای حیات گونه‌های شاخص ماهیان مساعد نباشد. (Bui et al. (2019) به منظور مدل‌سازی کیفی رودخانه Cau در ویتنام، از مدل QUAL2K بهره جستند. به دلیل نقص اطلاعات در دسترس در حوضه این رودخانه، از خروجی‌های مدل هیدرولوژیکی SWAT برای برخی از ورودی‌های مدل QUAL2K استفاده نمودند. پارامترهای DO، BOD، COD، TN و TP در این مطالعه شبیه‌سازی شدند و مدل برای دو دوره در سال ۲۰۱۴ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی تطابق خوبی با مشاهدات نشان دادند. (Abdveis et al. (2020) شاخص کیفیت آب رودخانه دز در یک دوره ۸ ساله را با توجه به رشد صنعتی و وقوع خشکسالی در این منطقه، با استفاده از مدل عددی QUAL2K مورد ارزیابی قرار دادند. پارامترهای EC، DO، CBOD، NO₃ و pH با استفاده از مدل‌سازی مورد مطالعه قرار گرفتند. بر اساس نتایج بدست آمده، کیفیت آب رودخانه خوب ارزیابی شده است. مدل QUAL2K به عنوان مدلی مناسب برای مطالعات کیفی و پیش‌بینی‌های آینده معرفی شده است. (Kamal et al. (2020) به شبیه‌سازی کیفی رودخانه Skudai در مالزی با استفاده از مدل عددی QUAL2K پرداختند. شبیه‌سازی‌ها تحت سه سناریوی تخلیه آلاینده به این رودخانه صورت گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده کیفیت آب رودخانه در اغلب ایستگاه‌ها، بر مبنای شاخص WQI، در گروه سه (نسبتاً آلوده و آلوده) قرار دارند. این ایستگاه‌ها توسط مناطق مسکونی، صنایع، کارگاه‌ها و رستوران‌ها احاطه شده‌اند که منجر به کیفیت پایین آب رودخانه گشته‌اند. (Lakshmi and Madhu (2020) به شبیه‌سازی اکسیژن محلول و نرخ هوادهی رودخانه Periyar، یکی از آلوده‌ترین رودخانه‌های جنوب هندوستان، با استفاده از مدل QUAL2K پرداختند. مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳ کالیبره گردید. نتایج نشان داد آب رودخانه به دلیل تخلیه پساب‌های صنعتی متعدد، دچار افت کیفیت بسیار بالایی شده است (در پایین‌دست رودخانه غلظت اکسیژن محلول به کمتر از چهار میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد). (Babamiri et al. (2021) با استفاده از مدل QUAL2KW به ارزیابی وضعیت کیفی رودخانه عباس‌آباد و ظرفیت خود پالایی آن پرداختند. شش پارامتر DO، BOD، COD، NH₄، NO₃، PO₄ و شبیه‌سازی شده و نتایج با مشاهدات میدانی مقایسه شدند. نتایج آنالیزهای حساسیت‌سنجی نرخ اکسیداسیون، نرخ نیتریفیکاسیون و نیتریفیکاسیون را به عنوان تأثیرگذارترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب شناسایی نمودند. هم‌چنین مشخص گردید که دی رودخانه دارای اثر بالایی بر قدرت خودپالایی رودخانه می‌باشد.

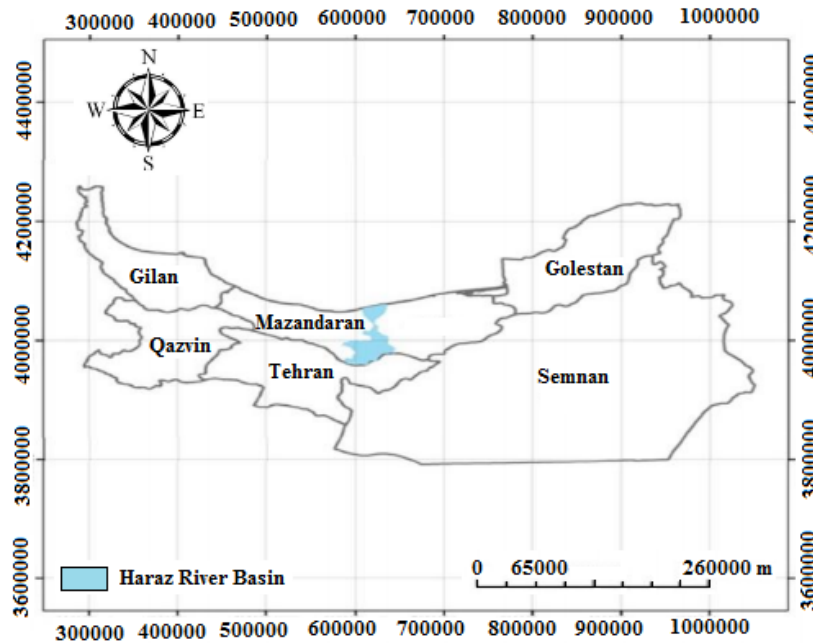


Fig. 1- Location of Haraz River catchment in Mazandaran province

شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز رودخانه هراز در استان مازندران

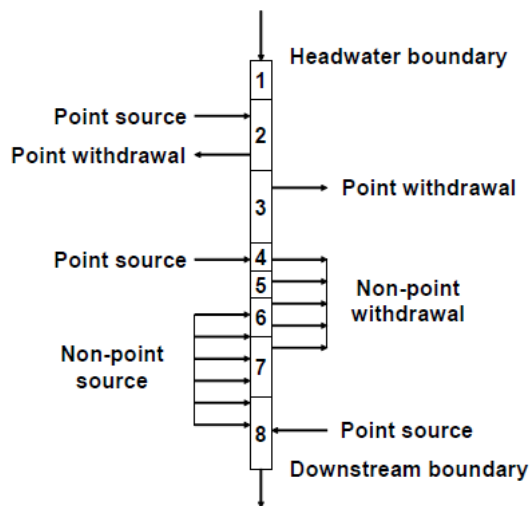


Fig. 2- QUAL2K segmentation scheme for a river (Chapra et al., 2003)

شکل ۲- نمای بازه‌بندی رودخانه توسط مدل QUAL2K (Chapra et al., 2003)

۲-۲-۱- موازنه جریان

برای هر بازه و المان، موازنه جریان رودخانه در حالت جریان پایدار مطابق رابطه ۱ صورت می‌گیرد:

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

که در آن Q_i میزان جریان خروجی از بازه i ، Q_{i-1} میزان جریان خروجی از بازه $i-1$ کل جریان ورودی از منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای به

۲-۲-۲- تشریح مدل QUAL2K

مدل QUAL-II توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا تهیه شده است و در واقع شکل تغییر یافته مدل QUAL-I است که پیش‌تر توسط سازمان توسعه آب تگزاس تهیه شده بود. مدل QUAL2K آخرین مدل از سری مدل‌های QUAL می‌باشد که امروزه به طور وسیعی جهت شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رابطه با قابلیت مدل در حال حاضر، مدل QUAL2K را می‌توان یکی از کامل‌ترین و جامع‌ترین مدل‌ها معرفی نمود. این مدل می‌تواند معادلات مربوط به رودخانه را در شرایط دائمی و غیردائمی حل کند. این برنامه قادر است پارامترهایی نظیر اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، دما، اسیدیته، مواد معلق، فسفر کل، فسفر آلی، نیتروژن کل، نیتروژن آمونیاکی، نیتروژن نیتراتی، نیتروژن نیتریتی، نیتروژن آلی و جلبک‌ها را در شبکه رودخانه شبیه‌سازی کند. مدل QUAL2K رودخانه را به بازه‌های مختلفی تقسیم می‌کند که هر یک از این بازه‌ها به ترتیب از بالادست به پایین دست شماره‌گذاری می‌شوند و منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای می‌توانند در هر قسمت رودخانه وارد شده و یا از آن خارج گردند (شکل ۲). هر یک از بازه‌های تعیین شده برای مدل به منظور رسیدن به نتیجه مطلوب‌تر و ظرافت بیشتر در ترسیم نمودارها به المان‌های مساوی تقسیم‌بندی شده و برای هر المان موازنه هیدرولوژیکی بر حسب دبی، موازنه حرارتی بر حسب دما و موازنه جرم بر حسب غلظت صورت می‌گیرد (Chapra et al., 2003).

نیز از جمله دیگر منابع آلاینده آب این رودخانه محسوب می‌شوند که می‌توان آن‌ها را در زمره آلاینده‌های طبیعی قلمداد نمود. در حوضه آبریز هراز مهم‌ترین و شاخص‌ترین منبع آلودگی طبیعی را می‌توان چشمه‌های گوگردی دانست. این چشمه‌ها که تعداد آن‌ها ۳ عدد می‌باشد، دبی قابل توجهی دارند و کیفیت آب رودخانه هراز را با مشکل جدی مواجه می‌سازند.

۲-۳-۲- منابع آلاینده انسانی

منابع آلودگی شهری و روستایی: در مجاورت رودخانه هراز تعداد زیادی روستا قرار دارد که فاضلاب و زباله‌های خانگی آن‌ها به طور مستقیم و غیرمستقیم به رودخانه تخلیه می‌شود. همچنین فاضلاب و زباله‌های رستوران‌های واقع در مسیر رودخانه مستقیماً وارد رودخانه می‌شوند که حاوی باقیمانده مواد غذایی، چربی، مواد زائد جامد دیر تجزیه و همچنین انواع میکروب‌ها، باکتری‌ها، کلیفرم‌های مدفوعی و ویروس‌ها و دیگر عوامل بیماری‌زای موجود در فاضلاب انسانی می‌باشند. سرانه مصرف آب در شهرها و روستاها حدود ۲۵۰-۲۰۰ لیتر نفر در روز می‌باشد که حدود ۸۰ درصد این مقدار تبدیل به فاضلاب شده، وارد زمین‌های کشاورزی، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی می‌گردند. مقدار BOD5 این فاضلاب ۳۰۰-۲۰۰ و COD آن ۶۰۰-۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد.

منابع آلاینده کشاورزی: افزایش زمین‌های زیر کشت موجب گردیده که مصرف آب در مناطق شهری و روستایی به شدت افزایش یابد و به علت فقر سفره‌های زیرزمینی و عدم استفاده از چاه عمیق در قسمت‌های وسیعی از منطقه مازندران، ناگزیر آب مورد نیاز اراضی کشاورزی دو طرف رودخانه‌ها، با احداث کانال و به وسیله موتور پمپ‌ها تأمین می‌شود و به همین لحاظ اکثر رودخانه‌های مازندران به لحاظ برداشت فوق‌العاده زیاد آب از اواسط بهار و سرتاسر تابستان خشک می‌شوند. زمین‌های کشاورزی و باغات میوه زیادی اطراف رودخانه هراز قرار دارد که پس از آبیاری پساب‌های کشاورزی همراه با باقیمانده کود و سم و یا کودهای شیمیایی و سموم اضافه بر مصرف واقعی وارد رودخانه هراز می‌شود.

منابع آلاینده صنعتی: بررسی موقعیت استقرار کارگاه‌های صنعتی بزرگ (پرسنل بیش از ۱۰ نفر) در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد اغلب واحدهای صنعتی در نزدیکی منابع آب‌های سطحی قرار گرفته‌اند. از جمله دلایل واقع شدن صنایع در این قسمت‌ها، دسترسی راحت‌تر به منابع آب بوده است. آلاینده‌های صنعتی به علت گستردگی مواد اولیه مصرفی و فرآیندهای تولید، مشخصات فیزیکی و شیمیایی

بازه $Q_{out,i}$ کل جریان خروجی از بازه i به صورت نقطه‌ای یا غیرنقطه‌ای است (شکل ۳) (Chapra et al., 2003).

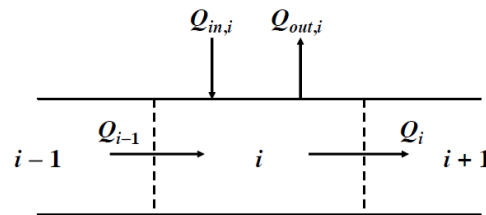


Fig. 3- Element flow balance (Chapra et al., 2003)
شکل ۳- تعادل جریان در المان (Chapra et al., 2003)

۲-۲-۲- موازنه جرم

موازنه جرم، پارامترها و مولفه‌های کیفی مدل در رابطه ۲ آورده شده است:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} C_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} C_i + \frac{E_{i-1}}{V_i} (C_{i-1} - C_i) + \frac{E_i}{V_i} (C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (2)$$

W_i بارگذاری خارجی پارامتر کیفی وارد بر المان i ، C_i غلظت پارامتر کیفی در المان i ، Q_i میزان جریان خروجی از المان i به المان $i+1$ ، Q_{i-1} میزان جریان خروجی از المان $i-1$ کل جریان خروجی از المان i به صورت نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای، V_i حجم المان i ، E_i ضریب پخش حجمی بین المان i و $i+1$ و S_i شیب کف در المان i می‌باشد (Chapra et al., 2003).

۳-۲-۳- منابع آلاینده رودخانه هراز

رودخانه هراز از دامنه‌های رو به شرق و شمال کوه دماوند و سایر ارتفاعات وابسته در سلسله جبال البرز سرچشمه گرفته و در انتهای مسیر به دریای خزر ختم می‌گردد. رودخانه در طی مسیر خود به سمت پایین‌دست، در معرض انواع آلاینده‌های طبیعی و انسانی قرار می‌گیرد که در ادامه به شرح این منابع آلاینده پرداخته شده است.

۱-۳-۲- منابع آلاینده طبیعی

بلایای طبیعی از قبیل سیل، زمین لرزه، آتشفشان و حریق از جمله منابع ایجاد آلودگی در محیط‌های طبیعی هستند که سبب از بین رفتن پوشش‌های گیاهی، شسته شدن و فرسایش خاک، ورود آلاینده‌ها به منابع آب سطحی و زیرزمینی، از بین رفتن اکوسیستم‌های طبیعی و در دیدگاه کلی بر هم خوردن چرخه حیات در کره زمین می‌گردند. واریزه‌های کوهی و مواد رسوبی و خاک‌های حاصل از فرسایش و زمین‌لغزه‌های به وقوع پیوسته در دامنه‌های مشرف به رودخانه هراز

۲-۴- مدل سازی

۲-۴-۱- داده‌های مورد استفاده

به منظور بررسی وضعیت کیفی رودخانه هراز توسط مدل QUAL2K، داده‌های مربوط به خروجی ۱۲ منبع آلاینده رودخانه هراز شامل پنج کارگاه پرورش ماهی و چهار کارگاه برداشت شن و ماسه تقریباً در میان دست و یک کشتارگاه مرغ و دو کارخانه لبنیاتی و نوشابه‌سازی در منطقه پایین‌دست رودخانه هراز مورد آنالیز قرار گرفت. موقعیت مراکز آلاینده مورد بررسی در محیط GIS در شکل ۴ نشان داده شده است. مشخصات کیفیت این منابع آلاینده در جداول ۱ تا ۳ مشخص گردیده است.

همچنین اطلاعات مربوط به هشت ایستگاه نمونه‌برداری در طول کانال اصلی رودخانه هراز مورد استفاده قرار گرفت. ایستگاه اول در بالادست رودخانه قرار داشته و بیشتر تحت تأثیر شرایط طبیعی قرار دارد و می‌توان گفت فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در این محدوده وجود ندارد.

متفاوتی دارند. معمولاً غلظت آلاینده‌های صنعتی ۵ تا ۲۰ برابر فاضلاب‌های شهری می‌باشد. در منطقه مطالعاتی واحدهای صنعتی مهم عمدتاً به صنایع غذایی و نساجی مربوط می‌شوند. کشتارگاه‌های دام و طیور و کارخانه‌های لبنیات‌سازی بیشترین تعداد صنایع بزرگ غذایی را شامل می‌شوند. کارگاه‌های پرورش ماهی نیز به دو طریق فیزیکی شیمیایی (افزایش کدورت آب در اثر انحراف آب رودخانه و نیز نفوذ باقیمانده مواد غذایی و داروهای دامی و غیره) و یا بیولوژیکی (ورود ماهیان غیر بومی) باعث آلودگی رودخانه هراز می‌شوند. همچنین در حال حاضر تعداد نسبتاً زیادی کارگاه‌های برداشت شن و ماسه در حاشیه رودخانه هراز احداث شده‌اند که معمولاً به صورت مداوم عملیات برداشت را انجام می‌دهند. آنچه مسلم است برداشت شن و ماسه و تخریب بستر رودخانه‌ها، باعث عریض و ناهموار شدن بستر، ایجاد انشعابات، تغییر مسیر و هرز رفتن آب‌ها می‌گردد که نتیجه آن برهم خوردن شرایط اکولوژیکی و ناتوانی در خودپالایی رودخانه‌ها است. با توجه به اثرات سوء انتشار آلودگی صنایع بر محیط زیست و به ویژه منابع آب، کارگاه‌های صنعتی منتخب جهت بررسی با توجه به موقعیت استقرار آن‌ها نسبت به رودخانه اصلی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

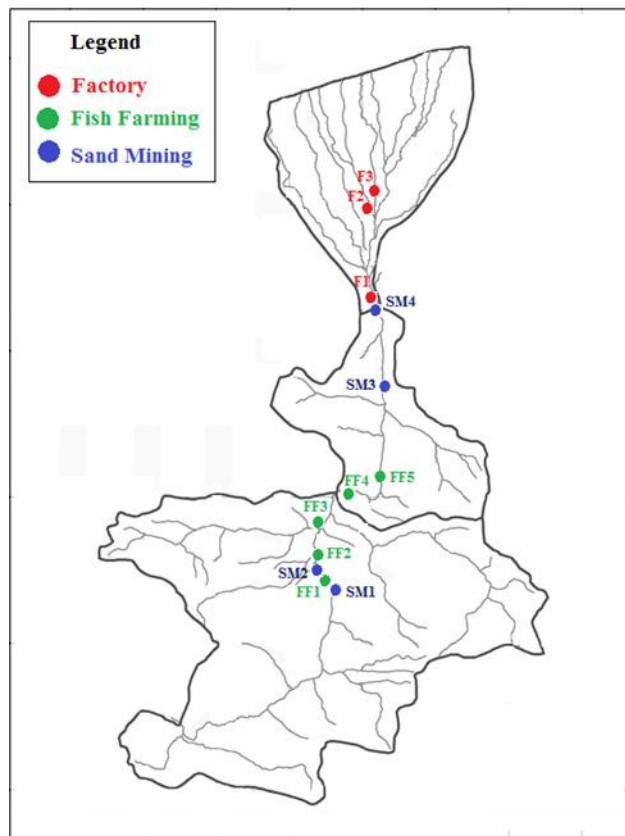


Fig. 4- Location of studied pollutant sources in Haraz River catchment

شکل ۴- موقعیت منابع آلاینده مورد بررسی در حوضه آبریز رودخانه هراز

Table 1- Quality of effluent of fish farms along the Haraz River
جدول ۱- کیفیت پساب خروجی کارگاه‌های پرورش ماهی در حاشیه رودخانه هراز

Stations	Location (Km)	Q (m ³ /s)	DO (mg/L)	pH	BOD (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	EC (μS/cm)
FF ₁	148	0.009	5.5	8	3.2	2.3	390
FF ₂	141	0.009	5.4	8.1	4.2	3.4	438
FF ₃	138	0.011	5.7	7.8	4.1	3.6	486
FF ₄	132	0.008	5.5	7.9	4.3	3.1	449
FF ₅	125	0.009	4.6	8.1	5.5	5.1	491

Table 2- Quality of effluent of sand harvesting workshops along the Haraz River
جدول ۲- کیفیت پساب خروجی کارگاه‌های برداشت ماسه در حاشیه رودخانه هراز

Stations	Location (Km)	Q(m ³ /s)	DO (mg/L)	pH	TDS (mg/L)	TSS (mg/L)	EC (μS/cm)
SM ₁	139	0.00025	2.2	7.8	543	464	783
SM ₂	128	0.00029	2.1	8.1	639	2362	884
SM ₃	95	0.00025	2.5	7.9	436	1975	641
SM ₄	50	0.00035	2.1	7.8	902	3180	1280

Table 3- Quality of effluent of dairy factory, poultry slaughterhouse and beverage factory
جدول ۳- کیفیت پساب خروجی کارخانه لبنیات، کشتارگاه مرغ و کارخانه نوشابه‌سازی

Stations	Location (Km)	Q(m ³ /s)	DO (mg/L)	pH	BOD (mg/L)	TDS (mg/L)	TSS (mg/L)	EC (μS/cm)
F ₁	50	0.0086	2.5	8.2	54	982	262	2140
F ₂	27	0.0055	2.4	8.6	47	800	86	1348
F ₃	27	0.0082	2.1	7.4	108	912	128	1055

Table 4- Geographical coordinates of sampling stations

جدول ۴- مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Station	Geographical coordinates	
	Longitude	latitude
1	52° 07' 33"	35° 51' 39"
2	52° 15' 5"	36° 05' 35"
3	52° 17' 8"	36° 08' 50"
4	52° 22' 14"	36° 14' 27"
5	52° 21' 1.4"	36° 24' 32"
6	52° 22' 16"	36° 29' 34"
7	52° 26' 9.6"	36° 37' 37"
8	52° 26' 45.7"	36° 40' 49"

۲-۵- مشخصات مدل‌سازی

برای اجرای مدل، رودخانه هراز به ۸۰ بازه با طول‌های بین ۲ الی ۳ کیلومتری تقسیم گردید. مقدار بازدمش برای ایستگاه‌های مختلف محاسبه گردید و به عنوان اطلاعات ورودی به نرم‌افزار وارد شد. محدوده مقدار پارامترهای مدل بر اساس اطلاعات موجود در راهنمای کاربرد نرم افزار تعیین گردید. پارامترهای دما، دبی، pH، DO، CBOD، نیترات، سرعت و عمق جریان به عنوان پارامترهای اندازه‌گیری شده جهت ورودی به مدل انتخاب گردیدند.

ایستگاه‌های دو، سه، چهار و پنج تحت تأثیر فعالیت‌های کشاورزی و کارگاه‌های پرورش ماهی و برداشت شن و ماسه قرار دارند. ایستگاه‌های شش و هفت در معرض اغلب فعالیت‌های آلوده‌کننده نظیر فعالیت‌های کشاورزی، روستایی و شهری و تا حدی هم صنعتی قرار دارند. مختصات جغرافیایی و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در کانال اصلی رودخانه به ترتیب در جدول ۴ و شکل ۵ مشخص گردیده است. در این ایستگاه‌ها در چهار فصل سال ۱۳۹۵ مقادیر اکسیژن محلول، pH، BOD، دمای آب، نیترات، کدورت و دبی جریان اندازه‌گیری شده‌اند که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روند تغییرات دبی در فصول مختلف در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۶ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد در فصل بهار تمامی ایستگاه‌ها دارای بالاترین دبی سالانه خود بوده و در تابستان کمترین میزان دبی را دارا می‌باشند. وضعیت شهرهای مجاور رودخانه و اراضی محدوده بر اساس نوع کاربری آن‌ها در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است بر اساس آخرین بررسی‌های صورت گرفته در سال ۱۳۹۹، کاربری اراضی و شهرهای مجاور رودخانه تغییری نداشته است و هم چنین واحدهای صنعتی مورد مطالعه بدون تغییر باقی مانده‌اند.

۲-۶- کالیبراسیون مدل

پس از اجرای مدل با استفاده از داده‌های موجود مربوط به بهار سال ۱۳۹۵، کالیبراسیون مدل برای این فصل صورت گرفت. در نسخه جدید QUAL2K، کالیبراسیون مدل به وسیله اتوکالیبراسیون و با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌گردد. این الگوریتم میزان انطباق نتایج مدل شده با نتایج اندازه‌گیری شده را می‌تواند به حداکثر خود برساند. اتوکالیبراسیون مدل برای جمعیت ۱۰۰ و اجرای ۸۰ چرخش الگوریتم ژنتیک اجرا شد. محدوده مجاز تغییر پارامترها در کالیبراسیون مدل کیفیت آب رودخانه (کمینه و بیشینه) برابر با مقادیر پیش‌فرض مدل در نظر گرفته شده است.

۲-۷- ارزیابی دقت مدل

به منظور ارزیابی دقت نتایج مدل‌سازی عددی و تعیین میزان خطای آن، از شاخص خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) استفاده شده است (رابطه ۳).

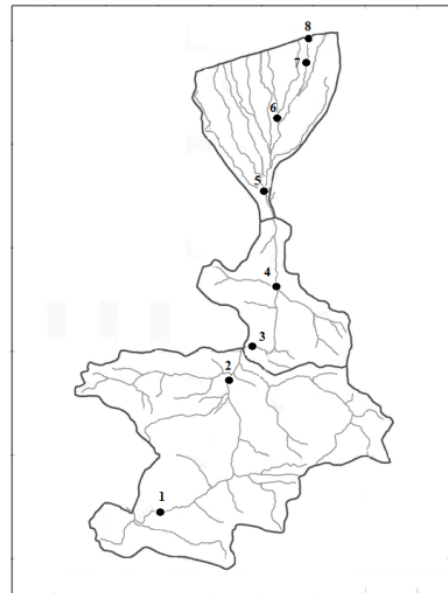


Fig. 5- Location of sampling stations
شکل ۵- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

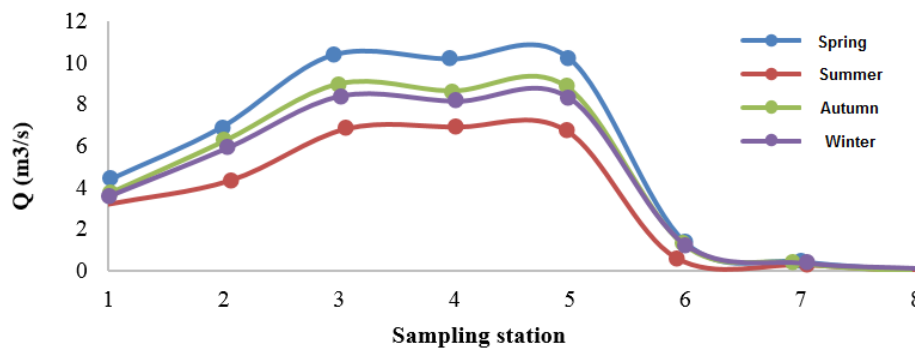


Fig. 6- Trend of flow rate changes in different seasons in sampling stations
شکل ۶- روند تغییرات دبی در فصول مختلف در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Table 5- Volume of produced wastewater in adjacent cities

جدول ۵- حجم فاضلاب تولیدی شهرستان‌های مجاور رودخانه هراز

City	Population	Volume of produced wastewater (MCM)
Babol	531930	1.07
Amol	401639	1.03
Fereydunkenar	38154	0.49
Nur	26947	0.35

Table 6- Basin land pollutants by type of use

جدول ۶- آلاینده‌های اراضی حوضه بر حسب نوع کاربری

Land Use	BOD (mg/L)	TSS (mg/L)	Q (m³/s)
Forests and Groves	0.0201	0.816	0.512
Agriculture lands	0.0203	0.293	1.655
Dense Forests	0.2011	0.091	1.845
Meadows	0.004	0.126	0.756
Good Pastures	0.0201	0.815	0.025
Medium Pastures	0.0201	0.815	0.281

در این رابطه n تعداد کل داده‌ها، O_i^{obs} مقدار مشاهداتی متغیر کیفی در رودخانه و O_i^{sim} مقدار شبیه‌سازی شده متغیر کیفی است. هر چه مقادیر این شاخص کمتر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی بیشتر است. حدود قابل قبول این شاخص برای ارزیابی دقت مدل‌های کیفیت آب در مطالعات پیشین ارائه شده است (Kannel et al., 2007; Rafiee et al., 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_i^{sim})^2}{n}} \quad (3)$$

۲-۸- استاندارد سلامت کیفیت آب رودخانه برای آبریان

به منظور امکان ارزیابی سلامت کیفیت آب رودخانه برای حیات آبریان، محدوده استاندارد توصیه شده برای متغیرهای کیفیت آب در جدول ۷ نشان داده شده است.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- نتایج کالیبراسیون مدل

نتایج مقادیر بدست آمده برای پارامترهای کالیبره شده در جدول ۸ نشان داده شده است. شاخص خطای RMSE برای پارامترهای دبی جریان، سرعت جریان، دما، DO، BOD، pH و نیترات به ترتیب برابر با ۴/۵، ۳، ۱۵، ۱/۸، ۲ و ۱۹/۱ درصد بدست آمد که حاکی از نتایج قابل قبول برای کالیبراسیون می‌باشد.

در شکل ۷ تغییرات دبی و سرعت جریان رودخانه در مسافت‌های مختلف نشان داده شده است. با ورود رودهای فرعی به داخل رودخانه

در کیلومتر ۱۳۷ و ۱۲۱ و سایر رودهای فرعی کوچکتر، دبی رودخانه در حد فاصل ایستگاه اول تا ایستگاه دوم جهش قابل توجهی را دارا می‌باشد. همچنین در کیلومتر ۱۱۴ و ۱۰۶ دو رود فرعی نسبتاً پر آب حوضه آبریز رودخانه هراز وارد کانال اصلی رودخانه شده و مقدار دبی رودخانه را تقریباً به حداکثر مقدار خود می‌رساند. حد فاصل ایستگاه سوم تا پنجم، مقدار دبی نوسان چندانی را نشان نمی‌دهد. بعد از کیلومتر ۴۸، مقدار دبی کانال اصلی رودخانه افت زیادی می‌کند که دلیل آن کاهش سرعت آب به سبب وجود سد انحرافی آمل و در نتیجه کاهش انرژی جنبشی آب می‌باشد. همچنین کاهش بیش از ۴۰٪ از حجم آب رودخانه و انتقال آن به مسیرهای دیگر به منظور مصارف کشاورزی از جمله دلایل کاهش دبی در این محدوده به شمار می‌رود.

بر اساس نتایج بدست آمده مقدار سرعت جریان هر چه از بالادست به سمت پایین‌دست رودخانه حرکت می‌کنیم به دلیل کاهش شیب بستر کمتر شده و البته بعد از سد جهش زیادی به سمت پایین را نشان می‌دهد. چرا که سرعت توسط احداث سد تا حد زیادی مهار شده تا با آرام کردن رژیم جریان، مصارف آبیاری امکانپذیر گردد. هر چه به سمت مصب رودخانه پیش می‌رویم دبی به دلیل کاهش بسیار زیاد سرعت، کاهش می‌یابد و عملاً در مصب سرعت جریان به حدود ۰/۰۵ متر بر ثانیه می‌رسد.

شکل ۸ روند تغییرات غلظت اکسیژن محلول و BOD در آب رودخانه در فصل بهار را پس از کالیبراسیون نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌گردد، در بالادست رودخانه به دلیل پایین بودن مقدار آلاینده‌ها، تفاوت غلظت اکسیژن محلول با حد اشباع بسیار اندک می‌باشد.

Table 7- Standard range of water quality variables for aquatic life

جدول ۷- محدوده استاندارد متغیرهای کیفیت آب برای حیات آبریان

Variable	Standard range	Reference
DO (mg/l)	> 6	(USEPA, 1986; WERI, 2016)
BOD (mg/l)	< 6	(Bhatnagar et al., 2004; Bhatnagar & Devi, 2013)
EC ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	< 5000	(WERI, 2016; Bhatnagar & Devi, 2013)
pH	6-9	(EEC, 1978)
TEMP($^{\circ}\text{C}$)	< 30	(WERI, 2016)
NO3(mgN/l)	< 10.161	(ANZECC, 2000)

Table 8- Calibrated model parameters for Haraz River water quality modeling

جدول ۸- پارامترهای کالیبره شده در مدل‌سازی کیفی رودخانه هراز

Parameter	Value	Units	Symbol	Range
Fast CBOD Oxidation rate	0.05	1/d	K_{dc}	0.02-3.4
Organic N Settling velocity	0.02	m/d	V_{on}	0-2
Organic N Hydrolysis	0.04	1/d	K_{hn}	0.02-0.4
Ammonium Nitrification	1.35	1/d	K_{na}	0-10
Nitrate Denitrification	0.8	1/d	K_{dn}	0-2
Sed-denitrification transfer coefficient	0.28	m/d	V_{di}	0-1

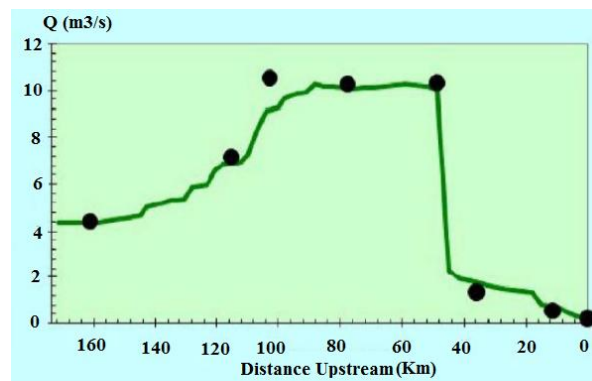
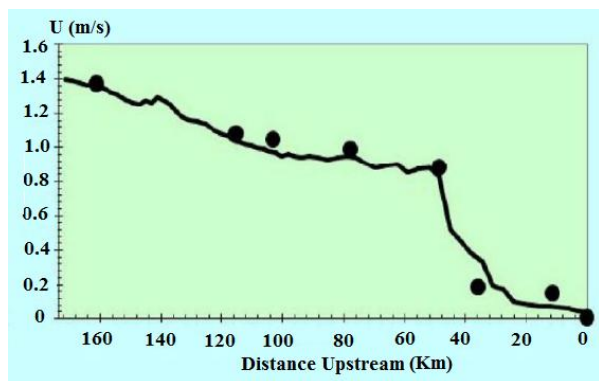


Fig. 7- Trend of changes in flow rate and velocity of Haraz River in spring

شکل ۷- روند تغییرات دبی و سرعت جریان رودخانه هراز در فصل بهار

رودخانه به مقدار قابل ملاحظه‌ای پس از این نقطه کاهش یابد. کاهش مقدار سرعت و دبی جریان بعد از کیلومتر ۴۸، افزایش فعالیت‌های انسان ساخت در حومه این رودخانه و بیشتر شدن میزان رواناب‌های کشاورزی، شهری و روستایی، افزایش بار آلودگی به میزان قابل توجهی را در این منطقه (بعد از سد انحرافی تا مصب رودخانه) سبب می‌گردد. چنانچه مشاهده می‌گردد غلظت اکسیژن محلول آب از کیلومتر ۴۸ جهش قابل توجهی به سمت پایین نشان می‌دهد که این جهش برای مدل BOD به سمت بالا بوده و حکایت از آلودگی بسیار بیشتری نسبت به قبل از سد انحرافی دارد. آنچه در نتایج مدل DO کاملاً مشهود می‌باشد، این است که نقاط بحرانی رودخانه هراز در فصل بهار به طور کلی در پایین دست و بعد از سد انحرافی آمل رخ می‌دهد. بیشترین مقدار افت اکسیژن محلول نسبت به مقدار اکسیژن اشباع (نقطه بحرانی) در انتهای رودخانه و همان مصب رودخانه تخمین زده می‌شود که مقدار اکسیژن محلول در این محل ۳/۷۹ میلی گرم در لیتر تخمین زده می‌شود و مقدار کمبود اکسیژن محلول آب برابر ۵/۷۱ میلی گرم در لیتر برآورد می‌گردد. چرا که بازدمش در اثر کاهش شدید سرعت به شدت پایین می‌آید و عملاً در مصب رودخانه به حداقل خود می‌رسد. اگرچه می‌توان گفت که حداقل سد انحرافی تا مصب رودخانه مقدار غلظت اکسیژن محلول در حالت بحرانی واقع شده است و عملاً می‌توان منطقه پایین دست رودخانه را جزو منطقه بحرانی در فصل بهار گزارش کرد. بر اساس استاندارد مقدار اکسیژن محلول در کل منطقه بعد از سد جهت زندگی اکثر آبزیان این منطقه اصلاً مناسب نمی‌باشد (جدول ۷).

در شکل ۹ نتایج حاصل از مدل سازی برای تغییرات pH و دمای آب در طول رودخانه هراز نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد مقدار نوسانات pH در محدوده ۸-۸/۵ می‌باشد که حکایت از یک رودخانه با خاصیت قلیایی دارد.

با حرکت به سمت پایین دست رودخانه، با توجه به افزایش غلظت آلاینده‌های منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای ورودی به رودخانه و همچنین افزایش دما و کاهش ارتفاع از سطح آب‌های آزاد، اختلاف قابل توجهی میان خط مدل و مقدار اکسیژن محلول اشباع مشاهده می‌گردد. حدوداً تا پیش از کیلومتر ۱۴۰ که ایستگاه اول نیز در این محدوده واقع شده است، تغییرات DO نشان می‌دهد که کیفیت آب در حد بسیار مطلوبی می‌باشد و از کیلومتر ۱۴۰ الی ۱۰۵ افت محسوسی در غلظت اکسیژن محلول آب پدیدار می‌شود که از دلایل این امر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: وجود کارگاه‌های پرورش ماهی در کیلومترهای ۱۴۱، ۱۳۸، ۱۳۲، ۱۲۵ و کارگاه‌های برداشت شن و ماسه در کیلومترهای ۱۳۹ و ۱۲۸ و مقدار ورودی قابل توجه منابع غیرنقطه‌ای شامل رواناب‌های زمین‌ها و باغات کشاورزی و فاضلاب‌های روستایی. حد فاصل کیلومتر ۱۰۵ تا ۴۸ روند تغییرات اکسیژن محلول نوسان قابل توجهی نداشته و غلظت DO به طور متوسط بین ۵-۵ میلی گرم بر لیتر می‌باشد. اگرچه در این محدوده میزان بار آلودگی رودخانه نسبت به قبل از کیلومتر ۱۰۵ افزایش می‌یابد و فعالیت‌های انسان ساخت، تراکم تعداد رستوران‌های حاشیه رودخانه و در نتیجه افزایش فاضلاب‌های تولیدی و نفوذ آن به داخل رودخانه و همچنین افزایش رواناب‌های سطحی حاصل از روستاها و زمین‌های کشاورزی نسبت به قبل از کیلومتر ۱۰۵ افزایش بیشتری می‌یابد، اما به دلیل نوسانات کمتر دما، سرعت و عمق آب و در نتیجه کاهش نوسانات بازدمش در این محدوده، مقدار اکسیژن محلول آب فراز و نشیب کمتری را در پی دارد.

همچنان که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، مقدار غلظت BOD از بالای دست رودخانه تا کیلومتر ۵۰ نوسانات شدیدی نداشته است. این روند صعودی پیوسته می‌تواند توجهی بر پیوستگی در روند نزولی تغییرات اکسیژن محلول در حد فاصل کیلومتر ۱۷۳ الی ۵۰ قلمداد گردد. در کیلومتر ۴۸، سد انحرافی آمل قرار دارد که سبب می‌گردد مقدار دبی

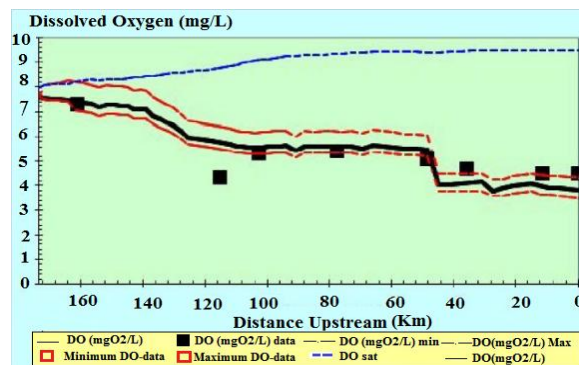
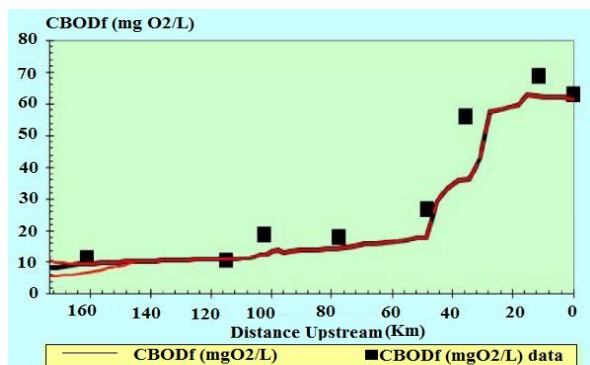


Fig. 8- Trend of changes in DO and BOD of Haraz River in spring

شکل ۸- روند تغییرات DO و BOD در رودخانه هراز در فصل بهار

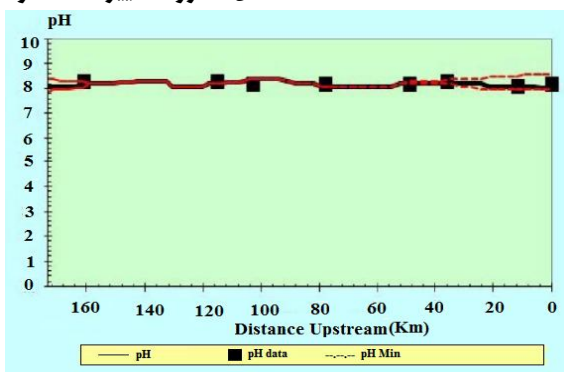
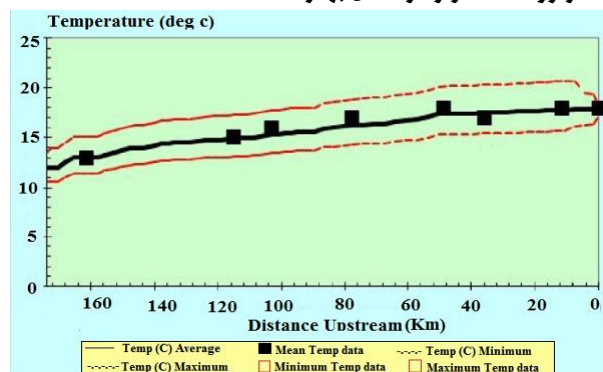


Fig. 9- Trend of pH and water temperature changes in Haraz River in spring

شکل ۹- روند تغییرات pH و دمای آب رودخانه هراز در فصل بهار

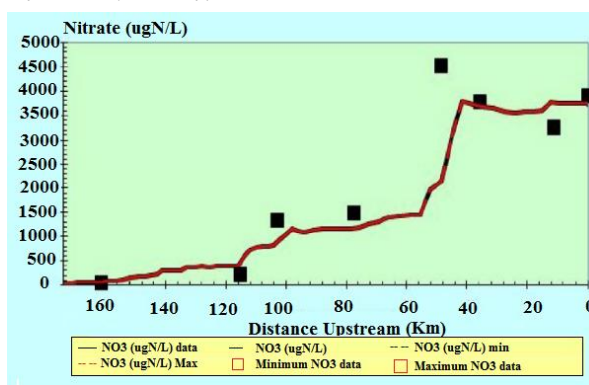
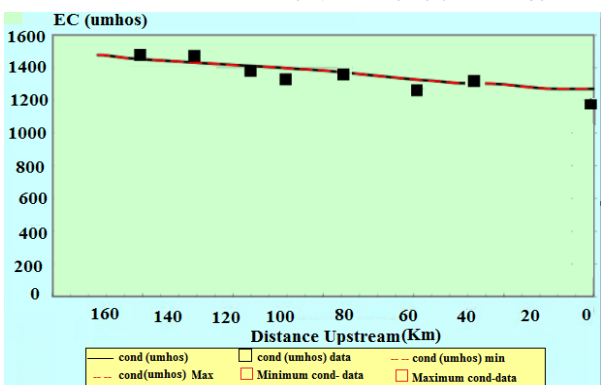


Fig. 10- Trend of nitrate concentration and electrical conductivity changes in Haraz River in spring

شکل ۱۰- روند تغییرات غلظت نیترات و هدایت الکتریکی آب رودخانه هراز در فصل بهار

قابل توجهی نمی‌باشد (بر اساس آستانه تعیین شده در استاندارد 10 mgN/l). البته مقدار غلظت نیترات نیز همانند BOD از کیلومتر ۴۸ به بعد (به سمت پایین دست رودخانه) جهش قابل توجهی دارد اما در کل حداکثر آن نیز مقدار قابل توجهی در آب رودخانه هراز نمی‌باشد. بر اساس نتایج مدل سازی پارامتر هدایت الکتریکی نیز با حرکت به سمت پایین دست رودخانه، روندی نزولی را طی می‌کند. کاهش این مشخصه را می‌توان به ته نشینی تدریجی جامدات محلول و معلق در آب نسبت داد.

به لحاظ اسیدیته، کیفیت رودخانه در محدوده استاندارد برای حیات آبیان قرار دارد (جدول ۷). بر اساس نتایج بدست آمده، با فاصله گرفتن از بالای دست رودخانه و کاهش ارتفاع، به دلیل افزایش دمای هوا، دمای آب رودخانه نیز روندی صعودی را طی می‌کند.

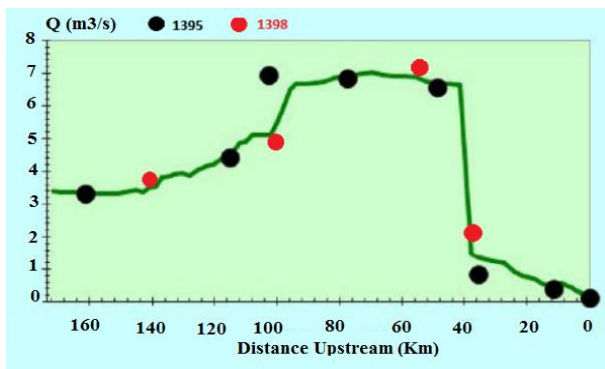
در شکل ۱۰ روند تغییرات غلظت نیترات و هدایت الکتریکی در فواصل مختلف رودخانه قابل مشاهده است. بر اساس نتایج بدست آمده، حداکثر غلظت نیترات حتی در پایین دست رودخانه نیز مقدار

۲-۳- صحت‌سنجی مدل

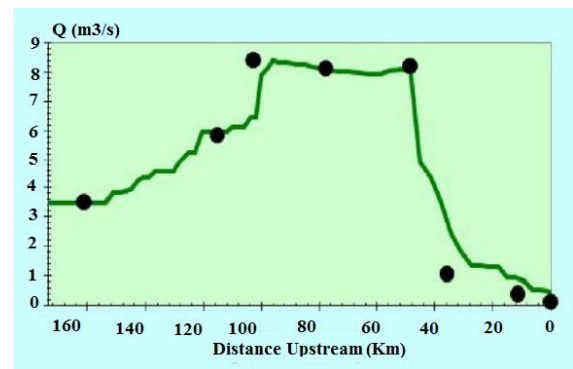
به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل، تمامی پارامترهای کالیبره شده ثابت نگه داشته شده و مدل برای داده‌های فصول زمستان و تابستان اجرا گردید. نتایج صحت‌سنجی مدل برای این فصول در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است به منظور سنجش قابلیت اطمینان نتایج برای ارزیابی کیفیت رودخانه در سالیان اخیر، داده‌های اندازه‌گیری چهار نقطه در کیلومترهای ۴۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ رودخانه در تابستان ۱۳۹۸ نیز در اشکال نشان داده شده‌اند. چنانچه مشاهده می‌گردد مدل به خوبی روند تغییرات را نشان داده و نتایج حاکی از عدم تغییرات چشمگیر کیفیت آب رودخانه در حد فاصل سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۸ می‌باشد.

در شکل ۱۱ نوسانات دبی رودخانه در مسافت‌های مختلف نشان داده شده است. روند تغییرات دبی بسیار شبیه به تغییرات دبی در فصل بهار می‌باشد، اگر چه مقدار رنج آن از فصل بهار کمتر می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج، دبی در فصل تابستان مقداری کمتر از زمستان دارد.

تغییرات اکسیژن محلول در طول رودخانه هراز در فصل زمستان نشانگر کیفیت مناسب آب در این فصل می‌باشد (شکل ۱۲). مشاهده می‌گردد در بالادست رودخانه مقدار اکسیژن محلول بسیار نزدیک به مقدار اکسیژن اشباع بوده که این امر نشان‌دهنده کمترین مصرف اکسیژن در رودخانه و به بیانی دیگر کمترین میزان آلودگی در کل سال می‌باشد. به دلیل کیفیت مناسب آب رودهای فرعی منتهی به رودخانه در فصل زمستان در حد فاصل کیلومتر ۱۴۰ الی ۵۰ و همچنین کاهش رواناب‌های سطحی ورودی به رودخانه، مقدار افت اکسیژن محلول اندک بوده و به طور کلی غلظت اکسیژن محلول در این حد فاصل از ۷/۵ میلی‌گرم در لیتر کمتر نمی‌گردد. در کیلومتر ۴۸، بعد از سد انحرافی مقدار اکسیژن محلول به دلیل افزایش مقدار BOD در اثر افزایش آلاینده‌های شهری و روستایی و البته سه منبع آلاینده نقطه‌ای واقع در کیلومتر ۵۰ کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. نقطه بحرانی مدل در این فصل در کیلومتر ۲۷ به دلیل وجود دو منبع آلاینده نقطه‌ای (کشتارگاه مرغ و کارخانه نوشابه‌سازی) در کنار هم در کیلومتر ۲۸/۳ رخ می‌دهد.

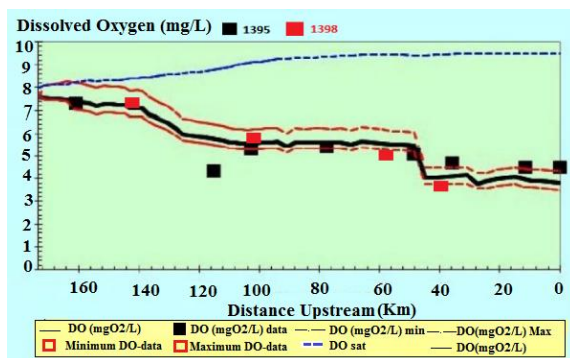


(ب)

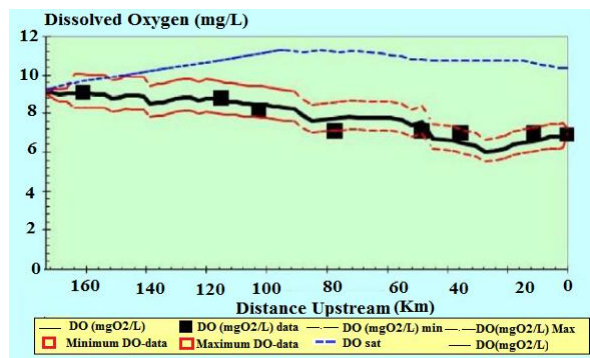


(الف)

Fig. 11- Trend of flow rate changes in Haraz River in a) winter b) summer
شکل ۱۱- روند تغییرات دبی رودخانه هراز در الف) فصل زمستان ب) فصل تابستان



(ب)



(الف)

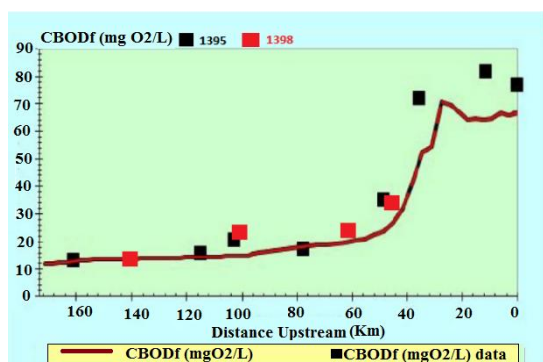
Fig. 12- Trend of DO changes in Haraz River in a) winter b) summer
شکل ۱۲- روند تغییرات DO رودخانه هراز در الف) فصل زمستان ب) فصل تابستان

ورود آلودگی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای بیشتر نسبت قبل از سد، BOD افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. البته مقدار غلظت نسبت به فصل بهار و تابستان به مقدار محسوسی پایین‌تر می‌باشد. در فصل تابستان روند تغییرات غلظت BOD بعد از سد انحرافی آمل همانند دو فصل دیگر جهش قابل توجهی را نشان می‌دهد و بیشترین مقدار غلظت در همان حدود ۲۷ کیلومتر برآورد می‌گردد.

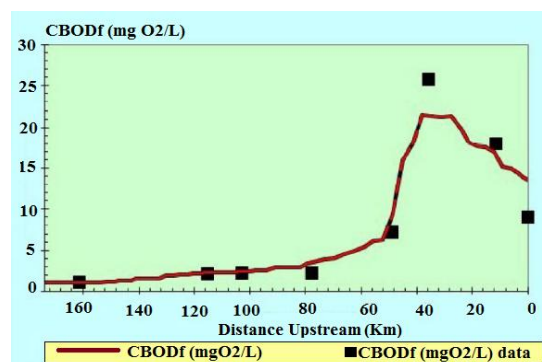
در شکل ۱۴ تغییرات pH در مسافت‌های در طول رودخانه نشان داده شده است. واضح است که مقادیر اندازه‌گیری شده به مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بسیار نزدیک بوده که ناشی از تصدیق مدل برای داده‌های مربوط به فصول زمستان و تابستان می‌باشد. در شکل ۱۵ غلظت نیترات در طول رودخانه نشان داده شده است. در این نمودار نیز همانند فصل بهار، مقدار غلظت بعد از سد انحرافی جهش قابل توجهی دارد اگر چه مقدار ماکزیمم غلظت برای رودخانه خطرناک نبوده و مقداری نسبتاً طبیعی در آبهای سطحی می‌باشد.

مقدار اکسیژن محلول در این نقطه برابر ۶/۰۱ میلی‌گرم در لیتر بوده و کمبود اکسیژن حدود ۴/۷۷ میلی‌گرم در لیتر برآورد می‌گردد. در فصل تابستان نقطه بحرانی رودخانه همانند دو فصل قبلی در ۲۷ کیلومتر، به دلیل وجود دو منبع آلاینده (کشتارگاه مرغ و کارخانه نوشابه‌سازی) و ورود فاضلاب آن‌ها به رودخانه رقم می‌خورد. مقدار اکسیژن محلول در این نقطه حدود ۲/۶۶ میلی‌گرم در لیتر بوده و مقدار کمبود اکسیژن نسبت به اکسیژن اشباع حدود ۵/۵۲ می‌باشد.

در شکل ۱۳، روند تغییرات BOD در مسافت‌های مختلف در فصول زمستان و تابستان مشخص شده است. در فصل زمستان مقدار غلظت BOD در بالادست رودخانه بسیار پایین بوده و این تقابل در دیاگرام اکسیژن محلول نیز مشهود بوده که نشان‌دهنده مقدار بسیار پایین آلاینده در بالادست رودخانه می‌باشد. حد فاصل ابتدای رودخانه تا ۴۸ کیلومتر (محل سد انحرافی) غلظت BOD افزایش چشمگیری نداشته و پس از سد به دلیل شرایط هیدرولیکی متفاوت و همچنین

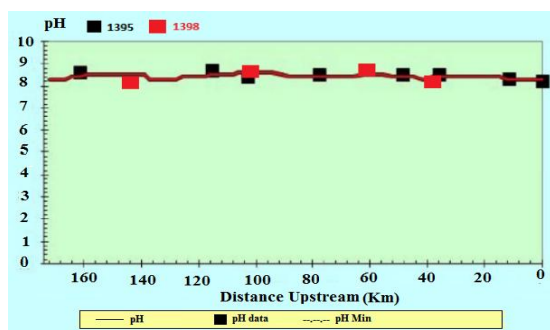


(ب)

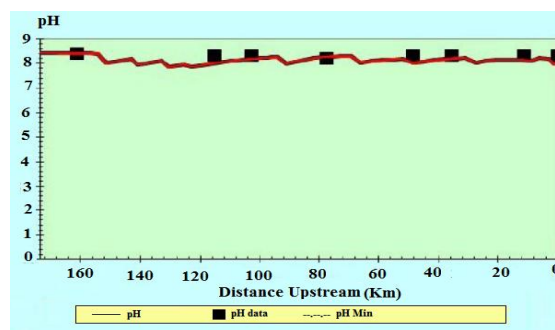


(الف)

Fig. 13- Trend of BOD changes in Haraz River in a) winter b) summer
شکل ۱۳- روند تغییرات BOD در رودخانه هراز در الف) فصل زمستان ب) فصل تابستان

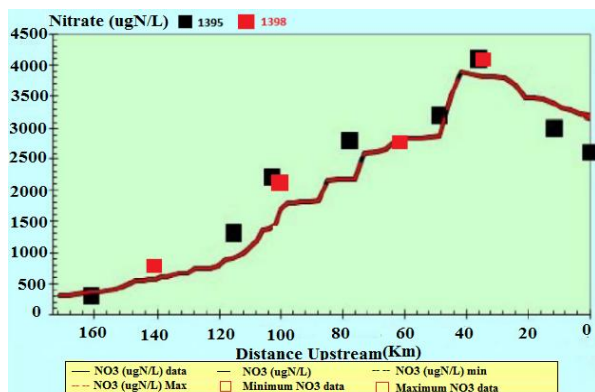


(ب)

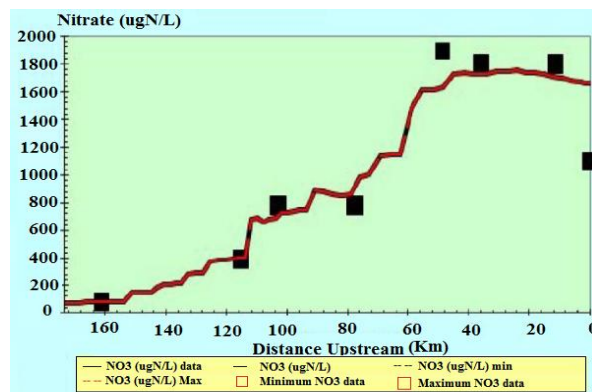


(الف)

Fig. 14- Trend of pH changes in Haraz River in a) winter b) summer
شکل ۱۴- روند تغییرات pH در رودخانه هراز در الف) فصل زمستان ب) فصل تابستان



(ب)



(الف)

Fig. 15- Trend of Nitrate concentration changes in Haraz River in a) winter b) summer

شکل ۱۵- روند تغییرات نیترات در رودخانه هراز در الف) فصل زمستان ب) فصل تابستان

داد، گرچه بیشترین غلظت نیترات حتی در پایین دست رودخانه نیز مقدار قابل توجهی نمی باشد. نتایج مدل سازی با نتایج مطالعه (Mohseni-Bandpei and Yousefi, 2013) در زمینه وضعیت کیفی رودخانه هراز دارای همخوانی مناسبی می باشد.

چنانچه مشاهده می گردد، به دلیل افزایش فعالیت های کشاورزی و صنعتی در تابستان و همچنین افزایش نرخ تبخیر، غلظت نیترات در تابستان بیشتر از زمستان می باشد.

۴- جمع بندی

۵- مراجع

Abdeveis S, Sedghi H, Hassonizadeh H, Babazadeh H (2020) Application of water quality index and water quality model QUAL2K for evaluation of pollutants in Dez River, Iran. Journal of Water Resources 47(5):892-903

ANZECC (2000) Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Australian and New Zealand environment and conservation council and agriculture and resource management council of Australia and New Zealand, Canberra:1-103

Ardestani M, Ghiasi B, Naghikhani A, Dalilsafai S (2015) Qualitative modeling of Sefid-rud River, (Manjil Dam to the estuary) using QUAL2K model. In: Proc. of International conference on sustainable development, strategies and challenges With a focus on Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism, 24-26 Feb, Tabriz, Iran (In Persian)

Babamiri O, Vanaei A, Guo X, Wu P, Richter A, Ng KT (2021) Numerical simulation of water quality and self-purification in a mountainous river using QUAL2KW. Journal of Environmental Informatics 37(1):26-35

Bhatnagar A, Devi P (2013) Water quality guidelines for the management of pond fish culture. International Journal of Environmental Sciences 3(6):1980-1990

Bhatnagar A, Jana S, Garg S, Patra B, Singh G, Barman U (2004) Water quality management in aquaculture.

هدف از این پژوهش شناسایی منابع آلاینده رودخانه هراز و بررسی وضعیت کیفی این رودخانه در فصول مختلف سال ۱۳۹۵ بوده است. به منظور ارزیابی وضعیت کیفی رودخانه، مدل سازی عددی با استفاده از مدل QUAL2K صورت گرفت. داده های هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی محدوده در سال ۱۳۹۵ که در هشت ایستگاه هیدرومتری و دو ایستگاه هواشناسی ثبت گردیده بودند، مورد آنالیز و استفاده قرار گرفت. همچنین ۱۲ منبع آلاینده نیز در مدل سازی مدنظر قرار گرفت. نتایج کالیبراسیون و صحت سنجی مدل، کارآمدی مدل QUAL2K را در شبیه سازی کیفی رودخانه هراز نشان داد. نتایج حاکی از قلیابیت آب رودخانه می باشد. مطابق نتایج حاصل از مدل سازی کیفی رودخانه در سال ۱۳۹۵، در کیلومتر ۴۸ که سد انحرافی آمل واقع شده است، بواسطه کاهش سرعت جریان و دبی، ضمن افزایش تخلیه آلاینده های مربوط به کارگاه ها و کارخانجات به رودخانه، میزان BOD دچار افزایش ناگهانی می گردد. خروجی های مدل، وضعیت مناسبی برای میزان اکسیژن محلول در فصل زمستان را نشان می دهند. در حالی که در پایین دست رودخانه (حد فاصل سد انحرافی آمل تا مصب رودخانه) در فصول بهار و تابستان وضعیت بحرانی می باشد. بدین معنا که در پایین دست رودخانه افزایش بار آلودگی وجود داشته و ضریب خودپالایی رودخانه دچار افت می گردد. نقطه بحرانی به لحاظ غلظت اکسیژن محلول، در کیلومتر ۲۷ رودخانه و به دلیل ورود پساب کارگاه ها و کارخانه های موجود در این ناحیه شکل می گیرد. نتایج همچنین جهش غلظت نیتروژن پس از سد انحرافی آمل را نشان

- modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. *Journal of Environmental monitoring and assessment* 125(1):201-217
- Karbasi AR, Kalantari F (2007) Investigating the pollution sources of Haraz River and providing management solutions to control it. *Journal of Environmental Science and Technology* 9(3):61-70 (In Persian)
- Lakshmi E, Madhu G (2020) Evaluation and modeling of dissolved oxygen and re-aeration rate in river Periyar, south India. *Indian Journal of Scientific Research* 10(2):1-15
- Mirbagheri A, Mahmoudi Sh, Khezri M (2011) Modeling of nitrogen and phosphorus changes along Chalous River in 2008 using QUAL2K software. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 40(3):49-60 (In Persian)
- Mohseni-Bandpei A, Yousefi Z (2013) Status of water quality parameters along Haraz River. *International Journal of Environmental Research* 7(4):1029-38
- Nasirahmadi K, Yousefi Z, Tarassoli A (2012) Zoning of water quality on Haraz river bases on national sanitation foundation water quality index. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences* 22(92):64-71
- Nezad, SM, Ebrahimi K, Kerachian R (2018) Investigation of seasonal self-purification variations of Karun River. *Journal of Amirkabir Civil Engineering* 49(4):621-634
- Paliwal R, Sharma P, Kansal A (2007) Water quality modelling of the river Yamuna (India) using QUAL2E-UNCAS. *Journal of Environmental Management* 83(2):131-44
- Rafiee M, Ali A, Mohammad A, Moazed H, Lyon S, Jaafarzadeh N, Zahraie B (2014) A case study of water quality modeling of the Gargar River, Iran. *Journal of Hydraulic Structures* 1(2):10-22
- Razaghian F, Sabzipour B, Sarang A (2015) Qualitative modeling of Qarasu River in Kermanshah with QUAL2KW model. In: Proc. of 10th International Congress on civil Engineering, 5-7 May, University of Tabriz, Iran (In Persian)
- USEPA (1986) Quality criteria for water. Gold book quality criteria, EPA 440/5-86-001. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington
- WERI (2016) Determination of the environmental project on wetlands and rivers of the Urmia lake basin. *Ecological Studies*, University of Tarbiat Modares (In Persian)
- Course Manual of summer school on development of sustainable aquaculture technology in fresh and saline waters, CCS Haryana Agricultural, Hisar (India):203-210
- Biglari MR, Sima S, Saadatpour M (2019) Modeling and management of the river water quality for aquatic habitat health using a source control approach (Case Study: Zarrineh-rud River). *Journal of Iran-Water Resources Research* 14(5):54-70 (In Persian)
- Bui HH, Ha NH, Nguyen TN, Nguyen AT, Pham TT, Kandasamy J, Nguyen TV (2019) Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Journal of Ecohydrology & Hydrobiology* 19(2):210-223
- Chapra SC, Pelletier GJ, Tao H (2003) QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality: Documentation and user's manual. Civil and Environmental Engineering Dept, Tufts University, Medford, 121p
- Chen QS, Xie XH, Du QY, Liu Y (2018) Parameters sensitivity analysis of DO in water quality model of QUAL2K. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 191(1):012030
- Droic A, Končan JZ (1996) Water quality modelling of the river Sava, Slovenia. *Journal of Water Research* 30(11):2587-2592
- EEC (1978) On the quality of fresh waters needing protection or improvement in order to support fish life. Official Journal
- Farkhani Sh (2018) Qualitative modeling of Haraz River using QUAL2K model. In: Proc. of Conference on Civil engineering, Architecture and Urbanism of the Islamic Countries, 16-17 May, Tabriz, Iran (In Persian)
- Iqbal MM, Shoaib M, Farid HU, Lee JL (2018) Assessment of water quality profile using numerical modeling approach in major climate classes of Asia. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(10):2258
- Jafarzadeh-Haghighi N, Tavasol M H, Barootkoob A (2005) Investigation of Karoon River water quality variations using Qual2E program. *Journal of Iran-Water Resources Research* 1(2):85-96 (In Persian)
- Kamal NA, Muhammad NS, Abdullah J (2020) Scenario-based pollution discharge simulations and mapping using integrated QUAL2K-GIS. *Journal of Environmental Pollution* 259:113909
- Kannel P, Lee S, Kanel S, Lee Y, Ahn K (2007) Application of QUAL2Kw for water quality