مدل‌سازی و بررسی روند آلودگی سالیانه نیترات رودخانه تجن با QUAL2Kw و HEC-RAS

مهدی رادفر [1*] و فرشاد علی‌پور نصیرمحله [2]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد radfar@sku.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

دریافت: بازنگری: پذیرش:

چکیده

ارزیابی مداوم آلودگی آب موضوعی مهم و حیاتی در مدیریت بهینه پهنه‌های آبی است. در این تحقیق به بررسی روند آلودگی نیترات در طول حدود ۵۰ کیلومتری از رودخانه تجن، حد فاصل بین ایستگاه هیدرومتری ریگ‌چشمه در بالادست و ایستگاه کردخیل در پایین‌دست در طی سال ۱۳۹۷ پرداخته شد. برای تحقق این امر ابتدا شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان با استفاده از مدل HEC-RAS تعیین و وارد مدل QUAL2Kw شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، تغییرات زمانی- مکانی آلاینده نیترات در مسیر رودخانه بررسی گردید. نتایج نشان دهنده بیشتر بودن بار ورودی از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای و در فصل کشت به رودخانه بود که سبب بیشتر شدن بار نیترات از حداکثر مجاز می‌گردد. روند افزایش غلظت نیترات در طول مسیر ۵۰ کیلومتری در فصل غیرکشت حدود ۱۹ درصد است و حال آنکه به دلیل مصرف بی‌رویه کود در فصل کشت این رقم با افزایش حدود ۲/۸ برابری به حدود ۵۰ درصد می‌رسد. غلظت نیترات در فصل کشت، در بخش انتهایی و ادامه مسیر جریان به حدود ٤٧ میلی‌گرم بر لیتر رسیده که نزدیک به میزان مجاز mg/lit ۵۰ برای کاربری شرب و بسیار بیشتر از mg/lit ۳۰ برای کاربری کشاورزی بوده که برداشت آب برای کاربری‌های مربوطه را با محدودیت مواجه می‌نماید. از طرفی مناطق پایین‌دست رودخانه که محل تخم‌ریزی ماهیان بوده با روند افزایش نیترات منجر به تغذیه‌گرایی و کاهش جمعیت آبزیان خواهد شد. لذا تعیین چارچوبی برای کاهش و کنترل بار نیترات، با تمرکز بر منابع آلاینده غیرنقطه ای در سیاست‌های مدیریتی اکوسیستم آبی رودخانه تجن ضروری است.

کلید واژه‌ها: آلودگی نیتراتی، مدل‌سازی کیفیت آب، مدیریت کیفی آب، نیتریفیکاسیون.

مقدمه

آلودگی (Pollution) آب یکی از مهمترین چالش‌های جوامع بشری به شمار می‌رود که با توجه به محدودیت در منابع آب شیرین جهان روز به روز بر اهمیت موضوع افزوده شده است. گسترش شهرنشینی، توسعه صنایع و گسترش کشاورزی به‌ویژه کشت غیرارگانیک (Inorganic) از عوامل مهم ایجاد آلودگی در منابع آبی می‌باشد، که افزایش این عوامل سبب تغییر در کیفیت آب رودخانه‌ها شده است (Enrique et al., 2007). این تغییرات به گونه‌ای بوده که در دهه‌های اخیر به تهدیدی جدی برای انسان و اکوسیستم‌های طبیعی تبدیل و لذا بررسی تغییرات کیفیت آب به یکی از موضوعات مهم در مطالعات بدل شده است (Faryadi et al., 2012). به دلیل تأثیر مستقیم بر اکوسیستم موجود در پهنه آبی و نیز محیط اطراف آن بررسی کیفیت آب رودخانه‌ها موضوعی حساس و حیاتی است که در گروی آگاهی از روند تغییرات کیفیت آب همراه با شناسایی عوامل اصلی آلودگی آن قرار دارد (Tahmasebi et al., 2011).

در طول سال‌ها، مدل‌سازی به‌عنوان ابزاری مفید برای بهینه‌سازی کیفیت آب در نظر گرفته شده است که از آن برای بررسی مناسب بودن سیاست‌های کنترل آلودگی بهره می‌برند (Bui et al., 2019). این موضوع به نحوی پیش رفته که امروزه مدل‌های کیفیت آب به‌طور فزاینده‌ای برای کسب اطلاعاتی ارزشمند و کارا در جهت مدیریت بهینه کیفیت آب مورد استفاده قرار می‌گیرند (Fan et al., 2009).

مدل QUAL2Kw از ابزارهای مفید برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه است که به‌علت انعطاف پذیری، سهولت استفاده و دسترسی آزاد بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد(Ye et al., 2013). مدل QUAL2Kw مدلی یک بعدی است که متغیرهای کیفی آب را در حالت جریان پایدار و جریان غیریکنواخت مدل می‌کند (Hossieni et al., 2016). تا کنون مطالعه‌های بسیاری در زمینه کیفیت آب با استفاده از مدل QUAL2Kw انجام گرفته است. Torabi Maybodi (2011) در تحقیقی با استفاده از مدل QUAL2K روی کیفیت آب زیرحوضه قره‌سو رودخانه کرخه مشخص نمود که مدل به خوبی کاهش اکسیژن محلول در پایین دست، به علت ورود فاضلاب‌های خانگی و نیز آلودگی سطحی ناشی از فسفر و نیتروژن ورودی از اراضی کشاورزی و مراتع را شبیه سازی و تحلیل می‌نماید. Shokri et al. (2015) برای شبیه‌سازی آمونیوم و نیترات در رودخانه گرگر مدل QUAL2Kw را به‌کار برده و از مدل HEC-RAS برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی جریان بهره گرفتند. نتایج

آن‌ها نشان از توانایی خوب مدل QUAL2Kw برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه داشت. ایشان منابع و مراکز آلوده کننده رودخانه گرگر را فاضلاب‌های روستاهای مسیر، پساب‌ها و فاضلاب‌های مراکز پرورش ماهی و نیز زهکش‌های کشاورزی برشمردند.

Aryaee Nezhad et al. (2019) دقت مدل QUAL2Kw را برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه شاهرود مناسب توصیف نموده و بیان داشتند که مدل‌سازی هیدرولیکی دقیق از تغییرات پارامترهای هیدرولیکی رودخانه و جریان در طول رودخانه تأثیر زیادی در مدل‌سازی کیفی آب رودخانه دارد. Farkhani (2021) از مدل QUAL2K برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه هراز بهره برده و توانایی مدل را در این امر مطلوب دانست. ایشان با ذکر خاصیت کلی قلیائیت آب رودخانه هراز به افزایش مقادیر غلظت نیترات بعد از بند انحرافی آمل اشاره نموده اما عنوان داشت که مقدار افزایش قابل توجه نمی‌باشد.

Fan et al. (2009) مدل QUAL2K را با مدل HEC-RAS برای ارزیابی کیفی آب رودخانه جزر و مدی (Tidal river) کیلونگ در شمال تایوان ترکیب کردند. ایشان در این تحقیق از مدل HEC-RAS برای تخمین ثابت های هیدرولیکی و تغییرات سطح آب برای محاسبه ثابت هوادهی و تغییرات غلظت در نتیجه اثر جزر و مدی بهره بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که شبیه‌سازی‌های QUAL2K به کمک HEC-RAS با در نظر گرفتن اثر جزر و مد، سبب تطابق بالاتر شاخص‌های کیفی آب تولیدی با داده‌های پایش رودخانه می‌گردد. Rocha et al. (2015) رودخانه‌های سبالوس و سالسیپودس در آرژانتین را که تحت تأثیر ناحیه شهری سیراشیکا دچار مشکلات کیفی گردیده‌اند، با استفاده از مدل QUAL2Kw مورد بررسی قراردادند. در این تحقیق غلظت بالایی از سولفات‌ها، کلریدها، سدیم، نیترات، فسفر، کلیفرم و باکتری‌های مدفوعی شناسایی شد. ایشان عنوان داشتند که استفاده از نرم‌افزار QUAL2Kw امکان تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی پارامترهای فیزیکوشیمیایی و نیز مدل‌سازی و تعیین میزان تأثیر انسان بر کیفیت آب را فراهم می‌آورد که این موضوع پتانسیل مدل‌سازی ژئوشیمیایی برای مدیریت یکپارچه منابع آب را برجسته می‌کند.

Setiawan et al., (2017) شرایط کیفی منابع آلوده کننده و ظرفیت بار قابل حمل رودخانه بادونگ در اندونزی را که به محلی برای تخلیه فاضلاب تمامی فعالیت‌های حاشیه رودخانه شده است، مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق در سه بخش و چهار سناریو برای تعیین میزان بار مجاز آلاینده در طول رودخانه انجام و سطوح کاهش آلاینده محاسبه و تخصیص‌های لازم برای رعایت استانداردهای کیفی آب مورد تایید، ثبت شد.

Ranjith (2019) در رودخانه تانگابهادرا هند تأثیر سه سناریو: افزایش جریان، اکسیژن رسانی موضعی و مدیریت بار آلودگی در مبدا را بر غلظت DO با مدل QUAL2Kw بررسی کردند. نتایج نشان داد که که اکسیژن رسانی موضعی در بالا بردن سطح اکسیژن محلول مؤثر است. همچنین ترکیبی از اصلاح فاضلاب، افزایش جریان و اکسیژن‌رسانی موضعی می‌تواند برای اطمینان از برآورده شدن الزامات حداقل غلظت DO استفاده شود. ظرفیت حمل بار رودخانه جینگ–می کریک در کشور تایوان با استفاده از ترکیب مدل‌های HEC-RAS و QUAL2K توسط Fan et al. (2021) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به‌دست‌آمده برای تعیین حداکثر بار روزانه (TMDL) به‌منظور مدیریت کیفیت آب، با در نظر گرفتن سه چشم انداز بلند مدت، میان مدت و کوتاه مدت و دو سناریو کاهش فردی و گروهی آلاینده استفاده شد. در این تحقیق ظرفیت حمل بار آلودگی کمی‌سازی شد و یک سیستم TMDL بر اساس معیارهای کیفیت آب مربوطه با استفاده از مدل‌سازی کیفیت آب ایجاد گردید. نتایج نشان داد که سناریو کاهش گروهی، عملکرد بهتری برای کنترل آلودگی از خود نشان می‌دهد و طی آن کاهش آلودگی در فاضلاب‌های با دبی بیشتر منجر به بهبود کیفیت آب رودخانه می‌شود.

نیترات از مهمترین آلاینده‌های ورودی به رودخانه‌ها به‌ویژه در مناطقی است که رودخانه از میان مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی می‌گذرد. غلظت‌های بالای نیترات می‌تواند موجب سرطان معده، بیماری متهموگلوبینمیا در نوزادان، عفونت در دستگاه تنفس و حتی سقط جنین در انسان و دام گردد (Ahmadpari and Hashemi Garmdareh, 2019). در این تحقیق از مدل‌های QUAL2Kw و HEC-RAS برای مدل‌سازی آلودگی ناشی از ورود نیترات به رودخانه تجن که از رودخانه‌های مهم استان مازندران بوده و بیشتر اراضی اطراف آن به زمین‌های کشاورزی تبدیل شده و از حاشیه شهر ساری (مرکز استان) نیز می‌گذرد، پرداخته شده است.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه تجن از مهمترین رودخانه‌های استان مازندران می‌باشد که از ارتفاعات رشته کوه البرز سرچشمه گرفته و در جهت جنوب غربی به شمال شرقی جریان و در نهایت به دریای مازندران (می‌ریزد شکل ۱). در طول مسیر این رودخانه بخش زیادی از اراضی محدوده کیفی، به زمین‌های کشاورزی تبدیل شده و زیر کشت برنج (در بالادست رودخانه)، باغات مرکبات و سیاه ریشه‌ها (در پایین‌دست رودخانه) قرار گرفته است. کشت غیرارگانیک و آبیاری به روش‌های سنتی عاملی است تا رودخانه تجن متأثر از آلاینده‌های غیرنقطه‌ای (Nonpoint source pollution) فراوان منتج از این اراضی باشد. از مهمترین آلاینده‌های خروجی از اراضی کشاورزی نیتروژن است که به‌صورت کودهای شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته و مشکلات و مخاطرات زیست‌محیطی فراوانی را باعث می‌گردد. علاوه بر اراضی کشاورزی، عبور رودخانه تجن از حاشیه شرقی شهر ساری و چندین روستا در مسیر این رودخانه باعث شده تا منابع آلاینده این مناطق نیز بر کیفیت آب رودخانه تأثیر سوء بگذارند.

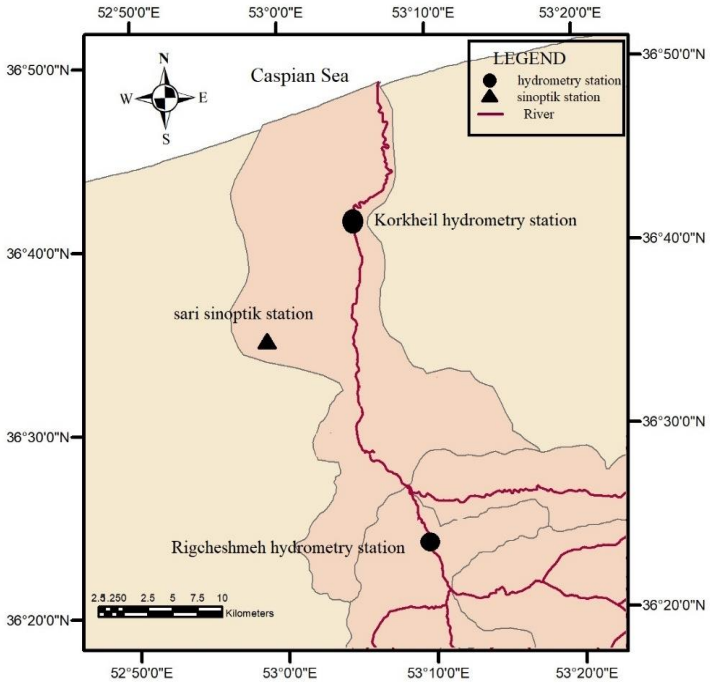

Fig. 1- Research area and location of hydrometry stations and sari sinoptic station

شکل ۱- محدوده مورد تحقیق و محل ایستگاههای هیدرومتری و ایستگاه سینوپتیک ساری.

مدل‌سازی

برای مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه تجن از مدل QUAL2Kw نسخه ۵/۱ استفاده شد. این نسخه دارای قابلیت کالیبراسیون خودکار با الگوریتم ژنتیک بوده که می‌تواند مناسب‌ترین ترکیب برای ضرایب و نرخ‌های سینتیک و بیولوژیک را به نحوی بیابد که معیارهای ارزیابی بهترین نتایج را ارائه دهند (Pellerire and Chapra, 2008). این مدل رودخانه را به بازه‌هایی تقسیم‌بندی می‌کند که در هر یک از آن‌ها شرایط هیدرولیکی مانند شیب طولی، عرض کف، شیب دیواره‌ها و... یکسان فرض شده و منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای در هر بخش از طول مسیر به رودخانه وارد یا از آن خارج گردند (Chapra et al., 2008).

مدل‌سازی دما

در مدل QUAL2Kw موازنه دما از طریق انتقال از بازه‌های مجاور، ناخالصی‌ها، جریان‌های خروجی و ورودی، هوا و رسوبات انجام می‌گیرد (Nikakhtar et al., 2020). تحقیقات نشان داده‌است که افزایش دما باعث افزایش غلظت پارامتر نیترات در آب می‌گردد (Gholipour and Alamatian, 2015). از این رو معادله‌های موازنه دما از بخش‌های مهم مدل QUAL2Kw در بررسی این پارامتر می‌باشد. براساس شکل (۲) برای یک بازه در مدل، موازنه دما با معادله (۱) ارائه می‌گردد:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}T_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i}T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i}(T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i}(T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i}\left(\frac{m^3}{10^6 cm^3}\right) + \frac{J_{h,i}}{\rho_w C_{pw} H_i}\left(\frac{m}{100\ cm}\right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i}\left(\frac{m}{100\ cm}\right) \quad (۱)$$

که در آن: T_i: دما در بازه i (°C)، t: زمان برحسب روز، E'_i: ضریب پراکندگی توده در بازه‌های i و i+1 ($\frac{m^3}{day}$)، $W_{h,i}$: دمای خالص انتقالی از منابع آلاینده و غیرآلاینده به بازه i ($\frac{cal}{day}$)، ρ_w: چگالی آب ($\frac{g}{cm^3}$)، C_{pw}: دمای ویژه آب ($\frac{g}{cm^3}$)، $J_{h,i}$: شار حرارتی آب- هوا ($\frac{cal}{cm^2}$)، $J_{s,i}$: شار حرارتی آب- رسوب ($\frac{cal}{cm^2}$) می‌باشد (Pellerire and Chapra. 2008).

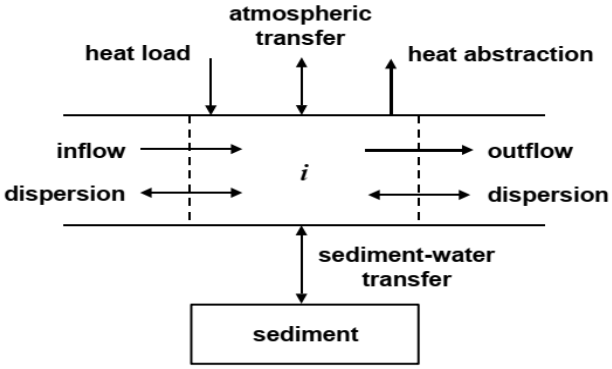

Fig. 2- Heat balance (Pellerire and Chapra, 2008)
شکل ۲- موازنه دما (Pellerire and Chapra, 2008)

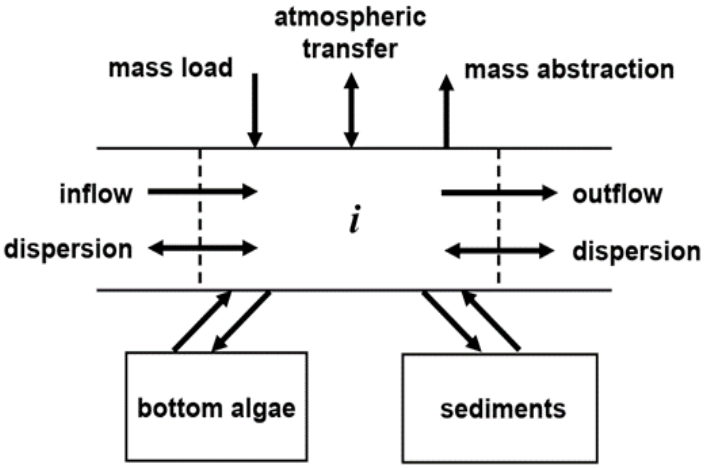

Fig. 3- Mass-balance in segment I (Pellerire and Chapra, 2008)
شکل ۳- موازنه جرم در بازه i ام (Pellerire and Chapra, 2008)

موازنه جرم

مدل QUAL2Kw معادله توازن جرمی برای غلظت جزء Ci در هر المان i نسبت به زمان را به‌صورت معادله (۲) ارائه می‌کند:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}C_i - \frac{Q_{out.i}}{V_i}C_i + \frac{E_{i-1}}{V_i}(C_{i-1} - C_i) + \frac{E_i}{V_i}(C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (۲)$$

که در آن: Q_i: میزان جریان در المان i ($\frac{m^3}{day}$)، V_i: حجم المان i (m^3)، W_i: بارهای خارجی وارد بر المان i ($\frac{mg}{day}$)، S_i: منابع و مصارف ناشی از انتقال جرم ($\frac{mg}{m^3/day}$)، E: ضریب پخش طولی بین المان i و i+1 ($\frac{L}{day}$)، C_i: غلظت در المان i ($\frac{mg}{l}$) و $Q_{out.i}$ میزان دبی خروجی از المان i (m^3/day) می‌باشد (Fan et al., 2021). میزان دبی جرمی ورودی به سیستم از معادله (۳) محاسبه می‌گردد:

$$W_i = \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps\,i,j} c_{psi,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i} c_{npsi,j} \quad (۳)$$

که در آن $Q_{ps\,i,j}$: دبی j امین منبع آلاینده نقطه‌ای در بازه i ام ($\frac{m^3}{day}$)، $Q_{nps,i}$: دبی j امین منبع آلاینده غیرنقطه‌ای در بازه i ام ($\frac{m^3}{day}$)، $c_{psi,j}$: غلظت آلاینده نقطه‌ای j ام در بازه i ام ($\frac{mg}{l}$) و $c_{npsi,j}$: غلظت آلاینده غیرنقطه‌ای j ام در بازه i ام ($\frac{mg}{l}$) می‌باشد (Pellerire and Chapra, 2008). مکانیزم این فرآیند به‌صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است.

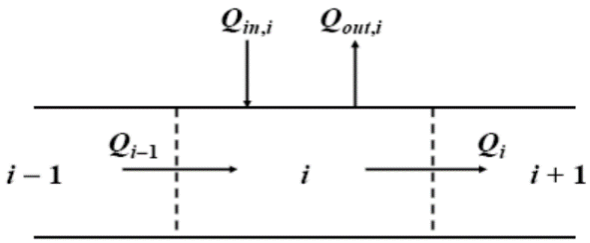

Fig. 4- Equality of surface flow for each element in QUAL2Kw (Chapra et al., 2008)
شکل ٤- موازنه جریان سطحی برای هر المان در مدل QUAL2Kw (Chapra et al., 2008)

موازنه جریان

طبق شکل (۴) جریان در رودخانه تحت شرایط پایدار در مدل به‌صورت معادله (۴) ارائه می‌گردد:

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i} \qquad (۴)$$

که در این معادله: Q_i: میزان جریان خروجی از المان i ($\frac{m^3}{day}$) ، Q_{i-1}: میزان جریان خروجی از المان i-1 ($\frac{m^3}{day}$) و $Q_{in,i}$: کل جریان ورودی از منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای به المان i ($\frac{m^3}{day}$) و $Q_{out,i}$: کل جریان خروجی به صورت نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای از المان i ($\frac{m^3}{day}$) می‌باشد (Chapra et al., 2008).

برای محاسبه کیفیت آب در مدلQUAL2Kw نیاز به تعیین خصوصیات هیدرولیکی حاکم بر جریان رودخانه است. این پارامترها با استفاده از معادله‌های (۵) و (۶) (Leopold and Maddock, 1953) قابل محاسبه هستند:

$$U = aQ^b \qquad (۵)$$

$$H = cQ^d \qquad (۶)$$

که در این معادله‌ها: Uو H به‌ترتیب سرعت(m/s) و عمق جریان(m)، Q دبی جریان ($\frac{m^3}{s}$) و a، b، c و d ضرایب ثابت می‌باشند. این ضرایب را به یکی از سه روش زیر می‌توان به‌دست آورد: ۱) مطالعه‌های انجام گرفته؛ ۲) محاسبه معادله‌های مانینگ و ۳) محاسبه با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS (Fan et al., 2021). در این پژوهش روش (۳) به شرح ذیل به کار گرفته شد.

تعیین خصوصیات هیدرولیک جریان

نرم‌افزار HEC-RAS توسط بخش تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژی گروه مهندسین ارتش آمریکا ارائه گردیده است. این نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان درحالت‌های ماندگار و غیرماندگار و نیز محاسبات هیدرولیکی جریان را برای سیستم کامل رودخانه‌های طبیعی و کانال‌های انسان‌ساز انجام می‌دهد (Brunner, 2008; USACE, 2016). در HEC-RAS فرایند اصلی محاسبات بر روش حل معادله انرژی استوار است که از یک مقطع به مقطع دیگر با استفاده از روش گام به گام و طبق معادله (۷) محاسبه می‌شود :

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \qquad (۷)$$

که در آن: Y: عمق جریان(m)، Z: ارتفاع آب در رودخانه(m)، V: سرعت متوسط جریان($\frac{m}{s}$)، α: ضریب وزنی سرعت، h_e: افت انرژی (m) و g: شتاب گرانشی($\frac{m}{s^2}$) در مقاطع یک و دو می‌باشند (Fan et al., 2009). افت انرژی (h_e) بین دو مقطع شامل افت اصطکاکی و افت ناشی از انبساط و انقباض می‌باشد که براساس معادله (۸) محاسبه می‌گردد:

$$h_e = L\bar{S}_f + C\left|\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right| \qquad (۸)$$

که در این معادله: L طول بازه (m)، $\bar{S}_f$ شیب اصطکاک بین دو مقطع، C ضریب انقباض و انبساط در مقاطع می‌باشند. لازمه تعیین ضریب انتقال کل و ضریب سرعت برای هر مقطع، تقسیم مقطع به قطعات کوچکتر است به نحوی که بتوان توزیع سرعت را یکنواخت فرض کرد. در اینصورت ضریب انتقال برای هر زیر مقطع از رابطه مانینگ به‌صورت معادله‌های (۹) و (۱۰) برآورد می‌شود:

$$Q = KS^{1/2} \qquad (۹)$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \qquad (۱۰)$$

که در این معادله‌ها: K: ضریب انتقال برای هر زیر مقطع، n: ضریب زبری مانینگ برای هر زیر مقطع، A: مساحت زیر مقطع و R: شعاع هیدرولیکی می‌باشد (USACE, 2016).

کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌های HEC-RAS و QUAL2Kw

واسنجی مدل به معنای تنظیم پارامترهای مدل در یک دوره آزمایشی- آموزشی به صورت دستی و یا خودکار است (Gupta et

پیش از انتشار - پذیرفته شده

al., 2014) تا خروجی‌های مدل تا حد ممکن با داده‌های اندازه‌گیری شده موجود تطابق پیدا کنند (Arsenault et al., 2018). به‌عبارت دیگر هدف از کالیبراسیون حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی و مشاهده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی از دو شاخص خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) یا ضریب تعیین (R^2) استفاده می‌شود که با معادله‌های (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌گردند. NRMSE حالت نرمال شده RMSE است و همانند دیگر معیارهای خطا، کوچکی آن نشانگر آن است که مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌باشد (Khodaparast Shirazi and Sadeghi, 2016). R^2 نیز ضریب تعیین است که مقدار آن بین صفر تا یک بوده و درجه اطمینان به پیش‌بینی مدل را مشخص می‌کند (Abbasi, 2017).

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{oi}-Y_{pi}\right)^2}}{\bar{Y}_o} \qquad (۱۱)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}[(Y_{oi}-\bar{Y}_o)(Y_{pi}-\bar{Y}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_{oi}-\bar{Y}_o)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_{pi}-\bar{Y}_p)^2}}\right]^2 \qquad (۱۲)$$

که در این معادله‌ها: Y_{oi}: مقادیر مشاهداتی iام، Y_{pi}: مقادیر مدل شده iام، $\bar{Y}_o$: میانگین مقادیر مشاهداتی، $\bar{Y}_p$: میانگین مقادیر مدل می‌باشند.

روش تحقیق

برای استفاده از مدل QUAL2Kw برای شبیه‌سازی رودخانه نیاز به داده‌های اولیه مورد نیاز مدل می‌باشد. این داده‌ها به‌طورکلی شامل: داده‌های هندسی رودخانه، داده‌های هیدرولیکی، داده‌های هواشناسی، داده‌های کیفیت آب رودخانه، ضرایب سینتیکی مورداستفاده در معادله‌های مدل و داده‌های کمی و کیفی منابع ورودی به رودخانه می‌باشند (Shokri et al., 2015).

در این تحقیق کیفیت آب رودخانه تجن طبق شکل (۱) در بازه تقریبی ۵۰ کیلومتری از ایستگاه هیدرومتری ریگ‌چشمه در بالادست تا ایستگاه هیدرومتری کردخیل در پایین‌دست از نظر نیترات مورد ارزیابی قرار گرفت. در کیلومترهای ابتدایی مسیر، شاخه فرعی گرم‌رود به رودخانه تجن می‌پیوندد که به‌عنوان ورودی منبع آلاینده نقطه‌ای درنظرگرفته شد. دیگر منابع نقطه‌ای نیترات در طول مسیر شامل شهر ساری و روستای آکند می‌باشند. اراضی شالی‌کاری و باغات موجود در حاشیه رودخانه نیز منابع آلاینده غیرنقطه‌ای را تشکیل می‌دهند. داده‌های کمی و کیفی مسیر جریان از شرکت سهامی آب منطقه‌ای و اداره کل حفاظت محیط زیست مازندران گردآوری شدند. با بررسی‌های میدانی و بهره‌گیری از نقشه کاربری اراضی، میزان زمین‌های تحت هر کاربری در محدوده مورد مطالعه تعیین و با استفاده از ضرایب راهبردی برآورد بار آلاینده هر یک از کاربری‌ها (Jamshidi and Niksokhan, 2015)، میزان آلاینده‌های غیرنقطه‌ای در مسیر جریان برآورد گردید. خلاصه آماری داده های کمی و کیفی ایستگاه‌های هیدرومتری در جدول (۱) ارائه شده است. داده‌های هواشناسی مورد نیاز در مدل‌سازی کیفی نیز از ایستگاه سینوپتیک ساری اخذ گردید. مشخصات این ایستگاه و متوسط پارامترهای هواشناسی آن در جدول (۲) آورده شده است. نقشه‌های مقاطع هندسی رودخانه تجن (تهیه شده توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران و با مقیاس ۱:۲۰۰۰) به محیط Arc-GIS 10.8 منتقل و با توجه به شرایط عرضی، تغییرات شیب رودخانه و پوشش گیاهی منطقه به ۱۴ بازه طبق شکل (۵) تقسیم و با استفاده از HEC-GeoRAS به محیط HEC-RAS انتقال یافتند. مدل HEC-RAS تحت شرایط جریان ماندگار و به ازای اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری کالیبره و مقدار ضریب مانینگ بهینه مشخص و مدل در بازه زمانی ۱۳۹۵-۱۳۹۷ صحت‌سنجی گردید. سپس مدل نهایی در بازه‌های چهارده گانه اجرا و مقادیر عمق و سرعت جریان در هر یک از آنها استخراج و معادله‌های (۵) و (۶) بر آن‌ها برازش و ضرایب a، b، c و d تعیین و برای مدل‌سازی کیفی جریان آب در مدل QUAL2Kw مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱- متوسط آماره‌های کمی و کیفی در ایستگاههای آبسنجی مورد مطالعه

Table 1- Average quantitative and qualitative parameters of hydrometric stations

STATION	Mean Daily Discharge (m^3/s)	Mean Density of Nitrate (mg/lit)
Rigcheshmeh	9.2	5.1
Korkheil	3.8	5.5

جدول ۲- متوسط پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک ساری

Table 2- Average meteorological parameters of Sari synoptic station

STATION	Min Temperature (°C)	Max Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Wind Speed (m/s)	Relative Humidity (%)
Sari	8.8	21.2	792.1	0.55	60.6

از داده‌های کیفی گردآوری شده اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ (فصل کشت برنج، اصلی‌ترین محصول منطقه) برای واسنجی و آبان ماه ۱۳۹۷ (فصل غیرکشت) برای مرحله صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw استفاده و مدل کیفی نهایی گردید و به کمک مدل سناریوهای آلایندگی نیتراتی مسیر جریان در فصول کشت و غیرکشت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-RAS

مدل HEC-RAS تحت شرایط ماندگار واسنجی و میانگین ضریب زبری مانینگ مسیر جریان رودخانه برابر با ۰/۰۴ تعیین گردید. سپس مدل واسنجی‌شده با استفاد از رابطه دبی- تراز آب ایستگاه‌های هیدرومتری ریگ‌چشمه و کردخیل در بازه سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۵ صحت‌سنجی شد. نمودار دبی اندازه‌گیری و محاسبه شده توسط مدل برای ایستگاه‌های ریگ‌چشمه و کردخیل در شکل (۶) و نتایج آماری در جدول (۳) ارائه شده که نشان از تطابق خوب مدل می‌باشد. خروجی‌های مدل HEC-RAS در مدل کیفی به کار گرفته شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw

مدل کیفی بر اساس خروجی نهایی مدل HEC-RAS اجرا و نمودار مقادیر کیفی اندازه‌گیری و مدل‌سازی برای مرحله واسنجی (فصل‌کشت) در شکل (۷) و مرحله صحت‌سنجی (فصل غیرکشت) در شکل (۸) آورده شد. در این نمودارها، داده‌های اندازه‌گیری با نقاط مربع شکل و نتایج شبیه‌سازی بوسیله نمودار پیوسته نمایش داده شده که نشان از واسنجی و صحت‌سنجی مطلوب مدل دارند. نتایج آماره‌های دقت‌سنجی برای مقادیر خروجی مدل QUAL2Kw با داده‌های اندازه‌گیری مربوطه نیز در جدول (۴) ارائه شد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مقادیر NRMSE همبستگی خوب بین مقادیر و ضریب تعیین (R^2) نیز نشان از درجه دقت قابل قبول و توانایی مطلوب مدل کیفی دارد.

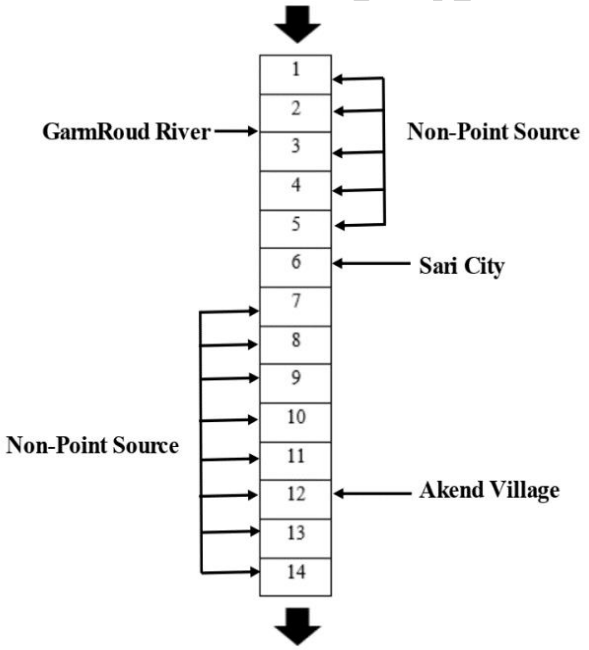

Fig. 5- Schematic view of sections and kinds of entrance pollution sources to Tajan river in research area

شکل ۵- نمای شماتیک مقاطع و انواع منابع آلاینده ورودی به رودخانه تجن در محدوده مورد تحقیق

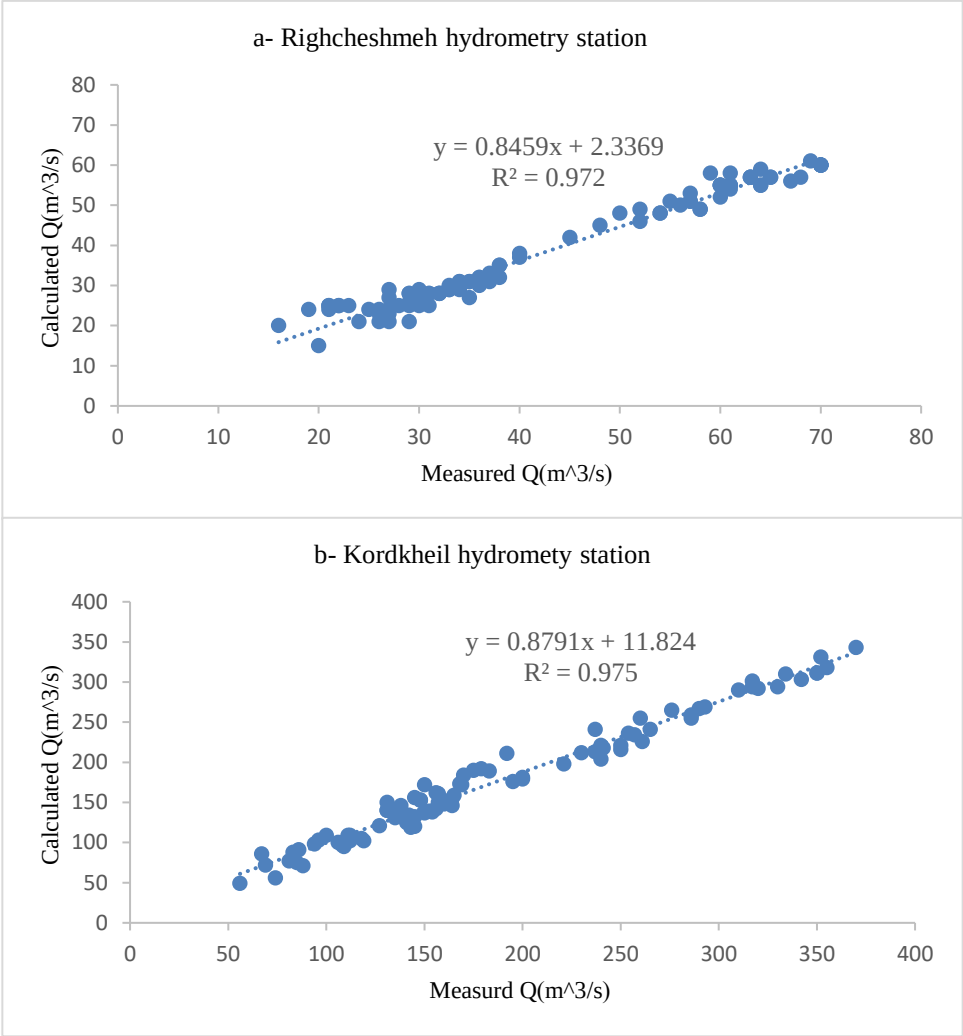

Fig. 6- Comparison of measured discharge versus calculated discharge in a- Righcheshmeh and b- Kordkheil hydrometry stations

شکل ٦- نمودار دبی اندازه‌گیری و محاسباتی در ایستگاه‌های هیدرومتری الف- ریگ‌چشمه و ب- کردخیل

جدول ۳- نتایج آماره‌های دقت‌سنجی از نتایج خروجی مدل HEC-RAS

Table 3- Accuracy indices of HEC-RAS model results

STATION	NRMSE	R^2
Rigcheshmeh hydrometry station	1.09	0.972
Korkheil hydrometry station	0.59	0.975

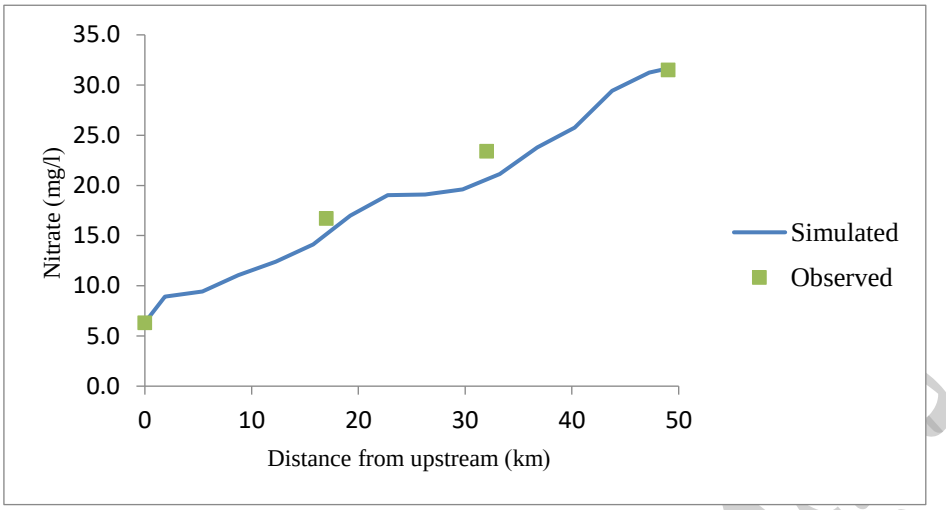

Fig. 7- Nitrate Calibrated model results and corresponding measured values in flow path during agricultural season

شکل ۷- نمودار مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌سازی‌شده در دوره واسنجی (فصل کشت)

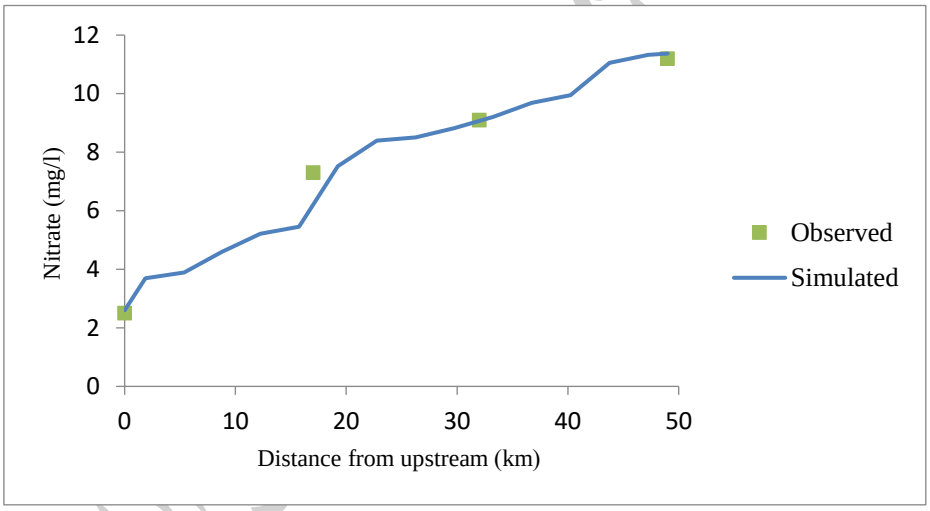

Fig. 8- Nitrate verified model results and corresponding measured values in flow path during non-agricultural season

شکل ۸- نمودار مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌سازی‌شده در دوره صحت‌سنجی (فصل غیرکشت)

جدول ٤- مقادیر شاخص‌های دقت‌سنجی مدل QUAL2Kw تحت شرائط واسنجی و صحت‌سنجی

Table 4. Accuracy indices of QUAL2Kw model during calibration and verification

STATION	NRMSE	R^2
Calibration (Agricultural season)	0.11	0.971
Verification (non-agricultural season)	0.053	0.970

بررسی غلظت نیترات در مسیر جریان رودخانه طی فصل کشت و غیرکشت

روند تغییرات غلظت نیترات در طول مسیر رودخانه در محدوده مورد تحقیق در دوره کشت و غیرکشت به‌ترتیب در شکل (۷) و شکل (۸) نشان داده شده است. در هر دوی این دوره‌ها روند افزایشی نیترات از بالادست (ایستگاه ریگ‌چشمه) به پایین‌دست (ایستگاه کردخیل) مشاهده می‌گردد، این مشاهدات با نتایج Shirdel و Zabardast Rostami (2020)، Valizadeh Pirkolomi et al. (2022) و Delbari et al. (2022) که روی کیفیت آب رودخانه تجن تحقیق کرده‌اند، مطابقت دارد. علت این تغییرات ناشی

از ورود نیترات از منابع مختلف در طول مسیر رودخانه و نیز کاهش حجم جریان می‌باشد (Shokri et al., 2015). تفاوت محسوس غلظت نیترات در بین این دو دوره زمانی بیانگر تأثیرپذیری بسیار زیاد رودخانه تجن از منابع غیرنقطه‌ای ناشی از کشت غیرارگانیک در اراضی کشاورزی منطقه می‌باشد که در مطالعه‌های Sadeghi Azad (2017) و Haydarpur و Jamshidi (2018) نیز اشاره شده‌است، همچنین Shayeghi et al. (2001) عنوان می‌دارند که در بین منابع آلاینده و تخریب کننده رودخانه تجن نقش زمین‌های کشاورزی بویژه شالیکاری‌های محدوده تراس رودخانه به‌عنوان منابع آلاینده غیرنقطه‌ای اهمیت فراوانی دارند. از طرف دیگر افزایش دما در فصل کشت (فصول گرم سال) که باعث افزایش حلالیت نیترات در آب می‌شود نیز عامل دیگری در افزایش غلظت نیترات در این دوره می‌باشد (Delbari et al., 2022).

به‌طور کلی محققین معتقدند عواملی منجمله وجود مناطق بکر، غلظت پایین اکثر پارامترهای کیفی و شیب زیاد در نقاط بالادست و مسائلی همچون افزایش جمعیت، توسعهٔ صنعت و کشاورزی و تخلیه فاضلاب‌های شهری در نقاط پایین‌دست ممکن است عامل افزایش آلاینده‌ها در نقاط پایین‌دست در مقایسه با نقاط بالادست رودخانه‌ها باشند (Sakizadeh 2015; Alizadeh et al., 2017; Delbari et al., 2022). مطالعه‌ها نشان داده‌است که نوع کاربری زمین تأثیر زیادی بر کیفیت آب داشته و ارتباط معنی‌داری بین پارامترهای کیفیت آب و نوع استفاده از اراضی وجود دارد (Miserendino et al., 2011). همچنین باید توجه داشت که ورود فاضلاب‌ها و رواناب‌های شهری، بارندگی و استفاده از کود در زمین‌های کشاورزی در فصول مختلف سال متفاوت است. لذا این موارد ممکن است منجر به تغییر غلظت اندازه‌گیری شده نیتروژن نیتراتی در دو فصل شوند (Wetzel, 2001).

در دوره کشت میزان نیترات در نقطه انتهایی مسیر (ایستگاه کردخیل) به بیش از ۳۱ میلی گرم در لیتر می‌رسد در حالی که در دوره غیرکشت به حدود ۱۱ میلی‌گرم بر لیتر رسیده‌است. روند افزایش غلظت نیترات در طول مسیر ۵۰ کیلومتری در فصل غیرکشت حدود ۱۹درصد است و حال آن‌که در فصل کشت این مقدار رقمی در حدود ۵۰ درصد است (افزایش حدود ۲۸۰ درصدی نسبت به فصل غیرکشت). با این روند افزایش در ۱۶ کیلومتر انتهایی مسیر جریان و تا مصب دریا افزایش غلظت به‌ترتیب در فصول کشت و غیرکشت به حدود ۴۷و ۱۷ میلی‌گرم بر لیتر خواهد رسید. از آنجایی که کشت برنج در فصل تابستان و ماه‌های کم بارش و کم آب سال انجام می‌گیرد و با توجه به آبیاری شبانه‌روزی این محصول، آب برگشتی به‌طور دائم با مواد معدنی و آلی قابل توجهی به رودخانه تخلیه می‌شود (Jafarzadeh Haghighifard et al., 2005). از این رو دو عامل رواناب‌ها و زه‌آب‌های مزارع شالیکاری نقش مهمی در ایجاد شرایط بحرانی و میزان بالای بار آلاینده ورودی به رودخانه دارند (Ahmadi Mamaghani et al., 2010).

آب رودخانه تجن در پایین‌دست منطقه مورد تحقیق از دو منظر بسیار پر اهمیت است: ۱) اصلی‌ترین منبع تامین آب اراضی کشاورزی در پایین‌دست می‌باشد، به نحوی که در مجموع ۴۶ هزار هکتار از اراضی کشاورزی دشت تجن تحت پوشش منابع آبی این رودخانه است (Ahmadi Mamaghani et al., 2010). مطابق استاندارد کیفیت آب‌های ایران تهیه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست، میزان غلظت مجاز نیترات در آب برای کاربری کشاورزی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر است (DOE Iran, 2016). همان‌طور که مشاهده می‌گردد غلظت نیترات در ایستگاه کردخیل به بیشتر از این میزان رسیده است، لذا نه تنها مناطق پایین‌دست جریان که حتی بخش‌هایی از منطقه مورد تحقیق نیز در مرز بحران و فاقد کیفیت مناسب به منظور مصارف شرب هستند. ۲) منطقه پایین‌دست و نزدیک مصب رودخانه محل تخم‌ریزی ماهیان است و باید توجه داشت که، رودخانه‌های جنوبی دریای مازندران از جمله رودخانه تجن، محلی مناسب برای تخم‌ریزی ماهیان خاویاری نیز می‌باشند (Laloei, 1997). از این رو و با توجه به اینکه وجود نیترات فراوان در آب نشان‌دهنده تشدید نیتریفیکاسیون و کاهش اکسیژن محلول در آب است، تداوم این چرخه می‌تواند باعث ازدیاد تلفات آبزیان و خصوصا نوزادان آن‌ها گردد. نیترات مجاز برای کاربری شرب توسط سازمان بهداشت جهانی برابر با ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر اعلام گردیده (WHO, 2016) که از این نظر محدوده مورد مطالعه را با میزان تقریبی ۴۷ میلی‌گرم بر لیتر نیترات در نزدیک مصب رودخانه در معرض خطر دانست.

همچنین میزان نیترات مجاز برای اکوسیستم‌های آبی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر عنوان می‌گردد (ANZECC, 2000). از این نظر در محدوده ایستگاه کردخیل مشکلی برای اکوسیستم‌های آبی وجود ندارد اما با توجه به فاصله ۱۶ کیلومتری این ایستگاه تا مصب رودخانه به دریا که غلظت درفصل کشت به حدود ۴۷ میلی گرم بر لیتر می‌رسد، بروز شرایط بحرانی در آینده نزدیک در ناحیه مصب رودخانه دور از انتظار نیست. لذا باید رودخانه تجن را در محدوده اخطار غلظت نیترات برای اکوسیستم‌های آبی قلمداد نموده و حفاظت گونه‌های آبی توسط ارگان‌های ذیربط مد نظر قرار گیرد. مالکیت‌های خرد، عدم انجام به زراعی اراضی کشاورزی و به‌ویژه شالیزارها، کشت غیر ارگانیک و استفاده از کودهای شیمیایی از جمله مسائلی است که در منطقه وجود دارد و باید برای بهبود شرایط کیفی آب رودخانه تجن مورد بازنگری و بررسی قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

۱- تلفیق خروجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS با مدل QUAL2Kw منجر به نتایج مطلوب در تحلیل کیفی رودخانه می‌گردد. این امر نشان می‌دهد که می‌توان در شرایط کمبود داده‌های هیدرولیکی از خروجی‌های مدل HEC-RAS در مدل QUAL2Kw استفاده کرد.

۲- بررسی شرایط کیفی رودخانه تجن نشان داد که در فصل کشت مقدار غلظت نیترات حدودا ۲/۸ برابر نسبت به فصل غیرکشت افزایش یافته که منشا آن منابع آلاینده غیرنقطه‌ای شامل اراضی کشاورزی حاشیه رودخانه می‌باشند که لازم است به منظور مدیریت شرایط کیفی بیشترین تمرکز مدیران بر روی این بخش قرار گیرد. برنامه‌های ترویجی در زمینه کشت‌های ارگانیک و کاهش استفاده از کودها و سموم شیمیایی و نیز تعیین شرایط الگوی کشت مناطق به نحوی که میزان آلاینده کمتری ایجاد گردد از پیشنهادات کاربردی در این زمینه است.

۳- غلظت نیترات رودخانه در فصل کشت و در مصب دریا به حد بحرانی برای آبزیان یعنی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر میل می‌کند، لذا تعیین چارچوبی برای کاهش بار نیترات ورودی به رودخانه با تمرکز بر منابع آلاینده غیرنقطه‌ای در سیاست‌های مدیریتی اکوسیستم آبی رودخانه تجن ضروری است.

پیشنهادات

کاهش حجم آب رودخانه در انتهای مسیر از عوامل بالا بودن غلظت نیترات می‌باشد، لذا بازنگری در محاسبات آزادسازی جریان از سد شهید رجایی و مصرف بهینه آب به‌ویژه در بخش کشاورزی و کاهش برداشت‌ها از جمله مواردی است که مدیران و تصمیم‌گیران حوضه باید مدنظر داشته باشند. همچنین بررسی سناریوهای مختلف تعیین میزان کاهش بار آلاینده از مبداء، به‌ویژه کاهش بار آلاینده‌های غیرنقطه‌ای در مسیر جریان با هدف کاهش میزان غلظت نیترات رودخانه تجن به کمتر از حداکثر بار مجاز قابل حمل، برای تحقیقات آینده توصیه می‌شود.

تقدیر و تشکر

از شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران و اداره کل حفاظت محیط زیست مازندران برای ارائه آمار و اطلاعات تقدیر و تشکر می‌گردد.

References

1- Abbasi, H., 2017. Designing the Model for Commercialization of University Research Using Structural Equation Modeling- Partial Least Squares Method (SEM-PLS). *Iranian Journal of Trade Studies, 21(82)*, pp.1-21. (In Persian).

2- Ahmadi Mamaghani, Y., Khorasani, N., and Rafiei, G. 2010. Investigation of pollution sources and water quality of Tajan River. *Journal of Natural Environment, 63(4)*, 317-327. (In Persian).

3- Ahmadpari, H. and Hashemi garmdareh, S., 2019. Application of Denitrification Wall in Nitrate Removal from Groundwater Aquifers. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering, 4(3)*, pp.13-25. (In Persian).

4- Alizadeh, M., Mirzaei, R., and Kia, S. H., 2017. Determining the Spatial Trend of Water Quality Indices across Kan and Karaj River Basins. *Journal of Environmental Health Engeenering, 4 (3)* :256-243. (In Persian).

5- 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.

6- Arsenault, R., Brissette, F., and Martel, J.L. 2018. The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of hydrology, 566*, pp.346-362.

7- Aryaee Nezhad, R., Sarai Tbrizi, M. and Babazadeh, H. 2019. Modeling Water Quality of Rivers Using QUAL2Kw Model (Case Study: Shahroud River). *Journal of Environmental Science and Technology, 21(7)* pp.1-13. (In Persian).

8- Brunner, G., 2008. *River analysis system hydraulic reference manual*. Do Defense, Davis.

9- Bui, H.H., Ha, N.H., Nguyen, T.N.D., Nguyen, A.T., Pham, T.T.H., Kandasamy, J., and Nguyen, T.V. 2019. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Ecohydrol. Hydrobiol, 19*. 210-223.

10- Chapra, S. C., Pelletier, G. J., and Tao, H. 2008. QUAL2K: a modeling framework for simulating river and stream water quality, version 2.11: documentation and user's manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.

11- Delbari, F., Rezaei Tavabe, K., Mirvaghefi, A., Lahijanzadeh, A., Bagherzadeh Karimi, M., & Salamroodi, E. 2022. Evaluation of water quality of Tajan River using IRWQIsc index. *Aquaculture Sciences, 10(2)*, 83-98. (In Persian).

12- DOE Iran., 2016. *Water quality standards of Iran*. Department of Environment of Iran. (In Persian).

13- Enrique, S., Manuel, F., Colmenarejo, J.A., Angel, R.G., Garcı, L.T., and Borja, R., 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Journal of Ecological Indicators. 7(2),* pp315-328.

14- Fan, C., Chen, K.H., and Huang, Y.Z., 2021. Model-based carrying capacity investigation and its application to total maximum daily load (TMDL) establishment for river water quality management: A case study in Taiwan. *Journal of Cleaner Production, 291*, pp.125-251.

15- Fan, C., Ko, C. H., and Wang, W. S., 2009. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation. *Journal of environmental management. 90(5),* pp. 1824-1832.

16- Farkhani, S., 2021. *Investigating the Quality Status of Haraz River Using Numerical Modeling*. Vol 17. 1(56). pp. 262-276. (In Persian).

17- Faryadi S., Shahedi K., and Nabatpoor M., 2012. Investigation of Water Quality Parameters in Tadjan River Using Multivariate Statistical Techniques. *journal of watershed management research. Vol 3. No 6.* pp. 75-92(In Persian).

18- Gholipour, A., and alamatian, E. 2015. Assessing of channel roughness and temperature variations on Parkand Abad WWPT's wastewater quality using numerical modeling. *Journal of Water and Sustainable Development, 2(1),* 51-58. (In Persian)

19- Gupta, H.V., Perrin, C., Blöschl, G., Montanari, A., Kumar, R., Clark, M., and Andréassian, V., 2014. Large-sample hydrology: a need to balance depth with breadth. *Hydrology and Earth System Sciences, 18(2),* pp.463-477.

20- Haydarpur, M., and Jamshidi, Sh. 2018. Determining Total Allowable Pollution and Waste Load Allocation in Rivers Regarding Seasonal Variations, A Framework for Local Multi-Parameter Water Quality Standardization and Monitoring. *journal of environmental studies. 44(3).* pp. 519 - 531 (In Persian).

21- Hossieni, P., Ildoromi, A.R. and Hosseini, Y., 2016. The Study of Qual2kw Model Efficacy on River Self-purification (A Case Study of Karun River at Interval of Zargan to Kute Amir). *Journal of Environmental Science and Technology*, *18*(4), pp.103-122. (In Persian).

22- Jafarzadeh Haghighifard N, Tavasoli M.H., and Barootkoob, A., 2005. Investigation of Karoon River Water Quality Variations Using Qua12e Program. *Journal of iran-water resources research., 1(2).* pp. 85-96. (In Persian).

23- Jamshidi, S., and Niksokhan, M. H., 2015. Waste load allocation in Sefidrud using water quality trading. *Water and Irrigation Management, 5(2),* 243-259. (In Persian).

24- Khodaparast Shirazi, J., and Sadeghi, Z., 2016. Forecasting seafood production in Iran using the ARIMA and Artificial Neural Networks. *Agricultural Economics Research, 8(31),* pp. 145-166. (In Persian).

25- Laloei, F., 1997. Studying the manner of sturgeon fishes migration to Gorganrud and Tajan rivers. *Iranian Scientific Fisheries Journal, 5(4),* 17-30. (In Persian)

26- Leopold, L. B., and Maddock, T., 1953. *The hydraulic geometry channels and some physiographic implications, geological survey professionals*. Washington, DC.

27- Miserendino, M. L., Casaux, R., Archangelsky, M., Di Prinzio, C. Y., Brand, C., and Kutschker, A. M. 2011. Assessing land-use effects on water quality, in-stream habitat, riparian ecosystems and biodiversity in Patagonian northwest streams. *Science of the total environment, 409(3),* 612-624.

28- Nikakhtar, M., Rahmati, S., and Massah Bovani, A., 2020. Simulating of Surface Water Quality Using QUAL2KW (Ardak River, Khorasan Razavi Province). *Journal of Environmental Science and Technology, 21(11 (90)),* pp. 93-105. (In Persian).

29- Pellerire, G. J., and Chapra, S. C., 2008. Qual2kw-Theory and documentation (Version 5.1). A modeling framework for simulating river and stream quality. Washington Department of Ecology-Washington State, see information in: http://www. ecy. wa. gov/programs/eap/models. html.

30- Ranjith, S., 2019. Utilization of Water Quality Modeling and Dissolved Oxygen Control in River Tungabhadra, Karnataka (India). *Open Access Library Journal*, 6(05), pp.1.

31- Rocha, J., Roebeling, P., and Rial-Rivas, M.E., 2015. Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model. *Science of The Total Environment, 536*, pp.48-58.

32- Sadeghi Azad, A., 2017. Assessment of self-purification and identification the effect of constructed cotroling flow on Tajan river Using QUAL2K and CCHE-2D. MSc Thesis. *Isfahan University of Technology*. Iran. (In Persian).

33- Sakizadeh, M. 2015. Assessment the performance of classification methods in water quality studies, A case study in Karaj River. *Environmental monitoring and assessment, 187*, pp.1-12.

34- Setiawan, D., Dharma, I.G.B.S. and Suyasa, I.W.B., 2017. Pollution load capacity of Badung River at Dauh Puri village, Denpasar town using Qual2kw model. Ecotrophic: *Journal of Environmental Science/Ecotrophic: Jurnal Ilmu Lingkungan, 11(2),* pp.116-124.

35- Shayeghi, M., Shahtaheri, S. J., and Selsele, M. 2001. Phosphorous Insecticides Residues in Mazandaran River Waters, Iran (2000). *Iranian J. Publ. Health, 30(3-4),* pp.115-118.

36- Shirdel, I., and Zabardast Rostami, H. 2020. Assessing the effects of aquaculture farms on water quality of Haraz and Tajan rivers. *Journal of Animal Environment, 12(3),* 353-364. (In Persian)

37- Shokri, S., hoshmand, A., and Moazed, H. 2015 Ammonium and Nitrate Quality Simulation in GarGar rivers using QUAL2KW Model.. *Wetland Ecobiology. 7 (1)* :57-68. (In Persian)

38- Tahmasebi, S., Afkhami, M., and Takdastan, A., 2011. Study of Chemical, Physical and Microbial Quality of Gargar River, Sw, Iran, Using Nsf Water Quality Index. *jundishapur journal of health sciences. 3(4),* pp. 55- 64 (In Persian).

39- Torabi Maybodi, A., 2011. Simulation and uncertainties analysis of water quality of Karkheh River. MSc thesis. *Khajeh Nasirodin Tosi University.* (In Persian).

40- USACE, H., 2016. *River Analysis System Hydraulic Reference Manual.*

41- Valizadeh Pirkolomi, M., Khoshravesh, M., and Gholami Sefidkohi, M. 2022. Evaluation of Seasonal Changes of Tajan River Water Quality using Simulation Model of Qual2kw. *Extension and Development of Watershed Management, 10(36),* 48-59. (In Persian).

42- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. gulf professional publishing.

43- WHO, 2016. Nitrate and nitrite in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization (WHO/SDE/WSH/ 03.04/56).

44- Ye, H., Guo, S., Li, F. and Li, G., 2013. Water quality evaluation in tidal river reaches of Liaohe River estuary, China using a revised QUAL2K model. *Chinese geographical science, 23(3),* pp.301-311.

EXTENDED ABSTRACT

Modeling and investigation of annual Nitrate pollution trend of Tajan River with QUAL2Kw and HEC-RAS

M. Radfar [1*] and F. Alipour Nasirmahale[2]

1*- *Corresponding Author, Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. (radfar@sku.ac.ir)*

2- PhD Student of Water Resources Engineering, *Water Engineering Department, Faculty of Agriculture*, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Keywords: Nitrate pollution, Water Quality Modeling, Water Quality Management, Nitrification.

Introduction

Water pollution, is considered one of the most important challenges of human societies, has increased in importance day by day due to the limitation of fresh water resources in the world. The expansion of urbanization, the development of industries, and the expansion of agriculture, especially inorganic cultivation, are important factors that cause pollution in water sources, and the increase of these factors has caused changes in the quality of river water (Enrique et al., 2007). These changes have become a serious threat to humans and natural ecosystems in recent decades, and therefore the investigation of water quality changes has become one of the most important subjects in studies (Faryadi et al. 2012) and researches. Due to the direct impact on the existing ecosystem in the water area and its surrounding environment, the investigation of river water quality is a sensitive and vital issue that depends on the knowledge of the changes in water quality along with the identification of the main factors of its pollution (Tahmasebi et al. 2011). Over the years, modeling has been considered as a useful tool for optimizing water quality, which is used to check the appropriateness of pollution control policies (Bui et al., 2019) and this issue has progressed in such a way that today water quality models they are increasingly used to obtain valuable and effective information for optimal water quality management (Fan et al., 2009).

Study area

Tajan River is one of the most important rivers of Mazandaran province, which originates from the Alborz mountain and flows from the southwest to the northeast direction and finally reachs to the Caspian Sea (Figure 1).

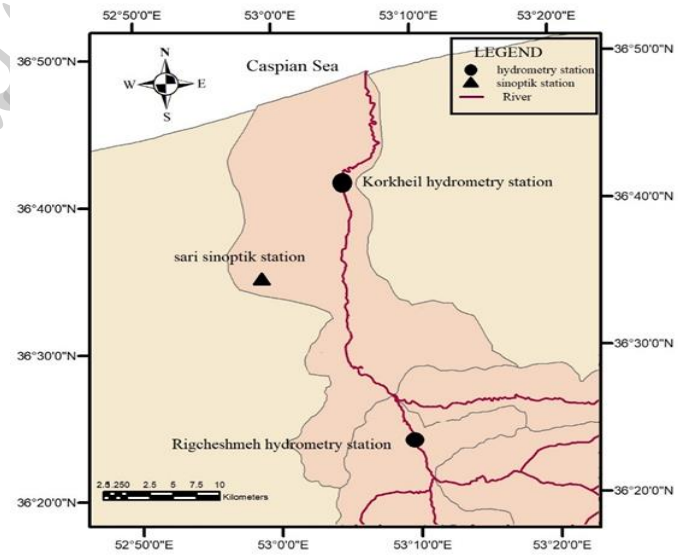

Fig. 1- Research area and location of the hydrometry stations and the sari synoptic station

Methodology

In this research the water quality of Tajan River was evaluated in term of nitrate along with about 50 km from the upstream (Rigcheshmeh hydrometry station) to the Kordkheyl hydrometry station in the down stream. Quantitative and qualitative data of the flow path were collected from the Regional coucil of Water management of Mazandaran and the General Department of Environmental Protection of Mazandaran. Required meteorological data for qualitative modeling were also obtained from Sari synoptic station. The statistical summary of quantitative and qualitative data of hydrometry stations is presented in table (1). The maps of the geometric sections of the Tajan River (prepared by the Mazandaran Regional Water Company and with a scale of 1:2000) were transferred to the Arc-GIS 10.8 software and according to the latitudinal conditions, the changes in the river slope and the vegetation cover of the area were divided into 14 intervals and were transferred to the HEC-RAS software using the HEC-GeoRAS.

The HEC-RAS model was calibrated under steady state condition and according to the information of hydrometry stations the optimal value of Manning's coefficient of flow path in Tajan river was determined and the model was validated in the period of 2017-2018. Then, the final model is extracted in the fourteen executed intervals in order to evaluate the hyrodynamic characteristics of the river including the depth and flow speed in each of 14 intervals. Then the Leopold and Maddock (1953) equations (equation 1 and 2) are fitted to the found out characteristics along with Tajan river and the equations coefficients are determined for the qualitative modeling of water flow in the QUAL2Kw model.

$$U = aQ^b \tag{1}$$

$$H = cQ^d \tag{2}$$

Table 1- Average quantitative and qualitative parameters of hydrometry stations

STATION	Mean Daily Discharge (m3/s)	Mean Density of Nitrate (mg/lit)
Rigcheshmeh	9.2	5.1
Korkheil	3.8	5.5

Findings

The graph of the qualitative values measured and simulated by the Kval model in the calibration phase (cultivation season), is shown in Figure (2) and the validation phase (non-cultivation season) in Figure (3). In these graphs, measured data with square points and simulated results are displayed by a continuous graph, which shows the desired calibration and validation of the model. The results of the statistical comparison of the output values of the QUAL2Kw model and the corresponding measured data are also presented in Table (2). As can be seen, the values of NRMSE and (R^2) show a good agreement between the observed data and the simulated model and also indicate an acceptable degree of accuracy and ability of the qualitative model.

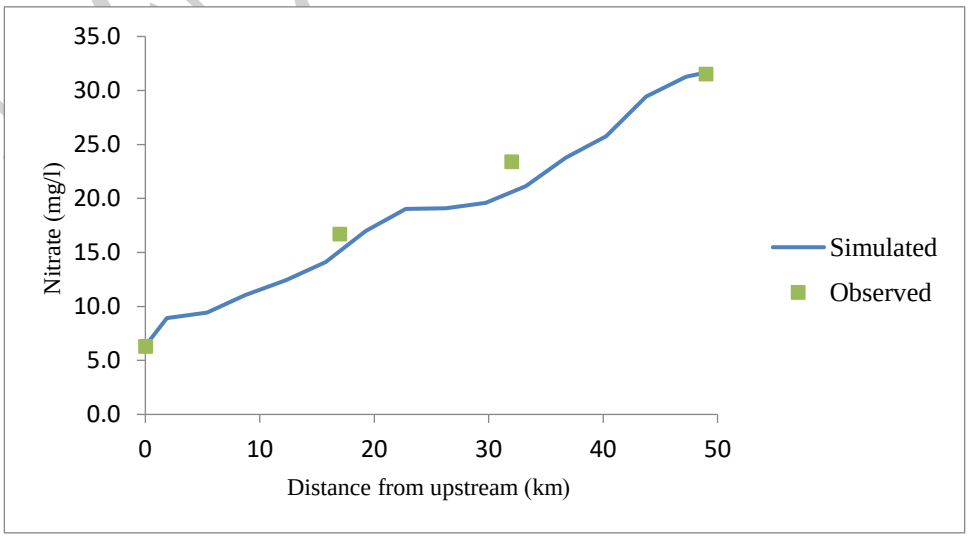

Fig. 2- Nitrate calibrated model results and corresponding measured values in flow path during cultivation season.

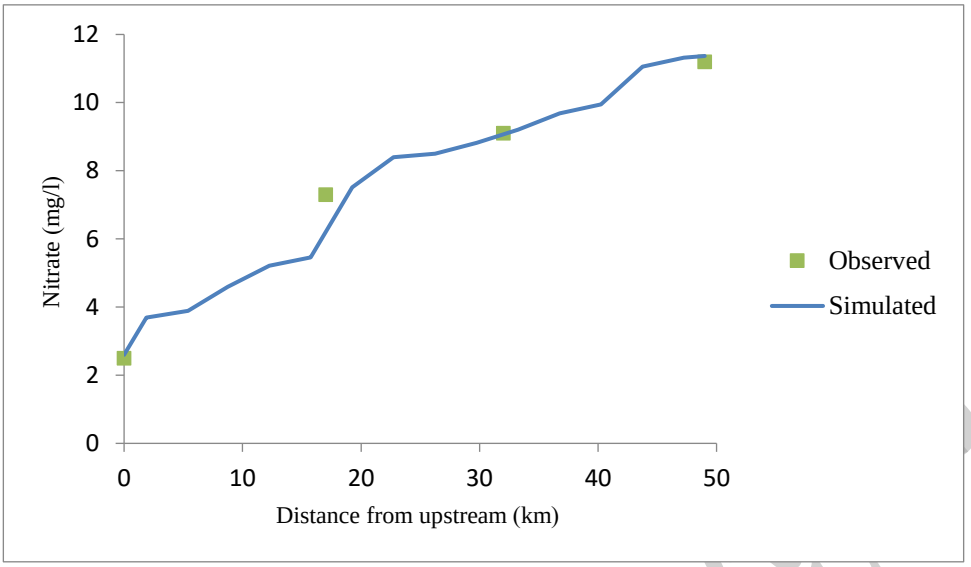

Fig. 3- Nitrate calibrated model results and corresponding measured values in flow path during non-cultivation season.

Table 2- Accuracy indices of QUAL2Kw model during calibration and verification

Factor	NRMSE	R^2
Calibration (Agricultural season)	0.11	0.971
Verification (Non-agricultural season)	0.053	0.970

Conclusion

1- Combining the output of the HEC-RAS hydraulic model with the QUAL2Kw model leads to favorable results in the qualitative analysis of the river.

2- Investigating the quality condition of Tajan River showed that in the cultivation season, the nitrate concentration has increased about 2.8 times more than non-cultivation season, which is caused by non-point polluting sources.

3- The concentration of nitrate in the river during the growing season in the mouth of the Caspian sea tends to 50 mg/liter, which is higher than the permissible level for drinking water and aquatic life's. Therefore determining a framework to reduce the nitrate load entering to Tajan river, focusing on non-point sources of pollution, are necessary in the water ecosystem management policies of Tajan River.

Acknowledgements

We are thankful from Regional Water Company and Environmental Protection Department of Mazandaran for providing essential data for this article.

References

1-Bui, H.H., Ha, N.H., Nguyen, T.N.D., Nguyen, A.T., Pham, T.T.H., Kandasamy, J., and Nguyen, T.V. 2019. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Ecohydrol. Hydrobiol, 19.* 210-223.

2-Enrique, S., Manuel, F., Colmenarejo, J.A., Angel, R.G., Garcı, L.T., and Borja, R., 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Journal of Ecological Indicators. 7(2),* pp315-328.

3-Fan, C., Ko, C. H., and Wang, W. S., 2009. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation. *Journal of environmental management*. 90(5), pp. 1824-1832.

4-Faryadi S., Shahedi K., and Nabatpoor M., 2012. Investigation of Water Quality Parameters in Tadjan River Using Multivariate Statistical Techniques. *journal of watershed management research. Vol 3. No 6*. pp. 75-92(In Persian).

5-Tahmasebi, S., Afkhami, M., and Takdastan, A., 2011. Study of Chemical, Physical and Microbial Quality of Gargar River, Sw, Iran, Using Nsf Water Quality Index. *jundishapur journal of health sciences.* pp. 55- 64 (In Persian).

پذیرفته شده- پیش از انتشار