



Performance Evaluation of the QUAL2Kw Model for Water Quality Simulation in Mountain Rivers with Step-Pool Morphology

Mahdi Nesari¹, Mohammad Reza Majdzadeh Tabatabai^{*2}, Seyed Hossein Ghoreishi Najafabadi²

¹ PhD Candidate of Civil, Water and Environmental Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Civil, Water and Environmental Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Mountain rivers with step-pool morphology represent complex hydraulic systems in terms of water quality dynamics; however, the performance of conventional water quality models such as QUAL2Kw, which are designed based on the assumption of uniform flow, has rarely been evaluated in such environments. This study assessed the performance of the QUAL2Kw model in simulating water quality in these rivers. A 66-m reach with step-pool structure was selected on the Dohezar River in Mazandaran Province, Iran. Water quality sampling for temperature, dissolved oxygen, nitrate, and inorganic phosphorus was conducted at four monitoring stations (upstream, step crest, step toe, and downstream) over an eight-month period under both low-flow and high-flow conditions. The model was calibrated using the first four months of data and verified with the remaining four months. Results showed under low-flow conditions, the QUAL2Kw model performed satisfactorily for all parameters, with NSE exceeding 0.84. However, nitrate and inorganic phosphorus simulations exhibited lower errors compared to temperature and dissolved oxygen, attributed to increased residence time and reduced turbulence, which allowed sufficient time for kinetic reactions. Under high-flow conditions, the model overestimated all four quality parameters, particularly at the step-pool structure. This error is attributed to reduced residence time and the dominance of physical processes over kinetic reactions. Based on the findings, the model can serve as an efficient tool for water quality simulation in mountain rivers during low-flow periods, and its results are valuable for the environmental management of these ecosystems.

Keywords: QUAL2Kw model, Water quality simulation, Step-pool morphology, Mountain river, Nutrient modeling

* Corresponding Author: Mohammad Reza Majdzadeh Tabatabai
Email: m_majdzadeh@sbu.ac.ir
Phone: 09128048837

Doi:10.48306/juem.2026.588676.1164



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۵

ارزیابی کارایی مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌های کوهستانی با مورفولوژی پله-گوداب

مهدی نساری^۱، محمدرضا مجدزاده طباطبائی^{۲*}، سید حسین قریشی نجف‌آبادی^۲

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

رودخانه‌های کوهستانی با مورفولوژی پله-گوداب از پیچیده‌ترین سیستم‌های هیدرولیکی از نظر کیفیت آب محسوب می‌شوند، اما کارایی مدل‌های مرسوم کیفی مانند QUAL2Kw که بر اساس فرض جریان یکنواخت طراحی شده‌اند، در این بسترها به‌ندرت مورد ارزیابی قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی کیفیت آب چنین رودخانه‌هایی انجام شده است. بدین منظور، بازه ۶۶ متری با ساختار پله-گوداب در رودخانه دوهزار استان مازندران انتخاب و نمونه‌برداری از چهار پارامتر کیفی دما، اکسیژن محلول، نیتрат و فسفر غیرآلی در چهار ایستگاه (بالادست، بالای پله، پای پله و پایین‌دست) طی هشت ماه در شرایط کم‌آبی و پرآبی صورت گرفت. مدل، با استفاده از داده‌های چهار ماه نخست واسنجی و با داده‌های چهار ماه دوم صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد در شرایط کم‌آبی، مدل QUAL2Kw با ضرایب نش-ساتکلیف برای تمامی پارامترها بیش از ۰/۸۴ عملکرد قابل قبولی دارد. با این حال، شبیه‌سازی نیترات و فسفر غیرآلی نسبت به دما و اکسیژن محلول با خطای کمتری همراه بود که ناشی از افزایش زمان ماند و کاهش تلاطم است که به واکنش‌های سینتیکی فرصت کافی برای تأثیرگذاری می‌دهد. در شرایط پرآبی، مدل QUAL2Kw در تمامی پارامترهای کیفی، به‌ویژه در محل پله-گوداب، دچار بیش‌برآوردی گردید. این خطا ناشی از کاهش زمان ماند و غلبه فرآیندهای فیزیکی (تلاطم و اختلاط) بر واکنش‌های سینتیکی است. بر اساس یافته‌ها، مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌های کوهستانی در دوره‌های کم‌آبی مورد استفاده قرار گیرد و نتایج آن برای مدیریت زیست‌محیطی این اکوسیستم‌ها سودمند می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدل QUAL2Kw، شبیه‌سازی کیفیت آب، مورفولوژی پله-گوداب، رودخانه کوهستانی، شبیه‌سازی مواد مغذی

۱- مقدمه

افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی، توسعه صنایع و کشاورزی فشرده، فشار فزاینده‌ای بر منابع آب سطحی وارد کرده و کیفیت رودخانه‌ها را در معرض خطر قرار داده است [۱ و ۲]. در این میان، رودخانه‌های کوهستانی به عنوان سرچشمه‌های اصلی تأمین آب شیرین، نقش حیاتی در پایداری اکوسیستم‌های پایین دست و تأمین منابع آب دارند. با این حال، به دلیل مورفولوژی پیچیده و شرایط هیدرولیکی خاص، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر آلودگی‌ها دارند [۳]. لذا، مدیریت کیفی آن‌ها، نیازمند به استفاده از ابزارهای دقیق و کارآمد می‌باشد [۴]. از این رو، به منظور پیش‌بینی تغییرات کیفی، شناسایی منابع آلاینده و تدوین راهکارهای مدیریتی در چنین رودخانه‌هایی، مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب، ابزارهایی کم‌هزینه و کارآمد محسوب می‌شوند [۵].

از میان مدل‌های موجود، مدل‌های سری QUAL2K و QUAL2Kw به دلیل ساختار یک‌بعدی، رابط کاربری آسان در محیط EXCEL، دسترسی رایگان و قابلیت واسنجی خودکار با الگوریتم ژنتیک، مورد استقبال گسترده‌ای قرار گرفته‌اند [۶ و ۷]. به طور خاص، مدل QUAL2Kw نسخه توسعه‌یافته QUAL2K است که دارای قابلیت‌های جدیدی مانند شبیه‌سازی دو فرم BOD (سریع و کند)، جلبک‌های کفزی، شار رسوب، مواد مغذی و نیز واسنجی خودکار با الگوریتم ژنتیک می‌باشد [۸ و ۹]. مدل QUAL2Kw، رودخانه را به مجموعه‌ای از بازه‌ها با مشخصات هیدرولیکی یکسان تقسیم کرده و با حل معادله انتقال-انتشار یک‌بعدی در حالت جریان پایدار، تغییرات متغیرهای کیفی را شبیه‌سازی می‌کند [۹ و ۱۰].

در راستای بررسی و مدل‌سازی کاربردی با استفاده از مدل QUAL2Kw، تحقیقات متعددی صورت پذیرفته است. به عنوان مثال، در پژوهشی بر روی رودخانه خرم‌آباد، از مدل یک‌بعدی QUAL2Kw در طول یک بازه ۳۵ کیلومتری استفاده شد. پارامترهای کیفی شامل اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن‌خواهی زیست‌شیمیایی کربنی (CBODf)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، نیتрат (NO_3)، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) در دو ماه تیر و شهریور به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با پیوستن رودخانه فرعی به رودخانه اصلی و تخلیه پساب منابع آلاینده صنعتی، شهری و کشاورزی، پارامترهای کیفی COD، NO_3 و CBODf روند صعودی پیدا می‌کنند. شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای pH کمترین مقدار و به ترتیب ۸/۸۳ و ۹/۲۲ و برای EC به ترتیب ۱۱/۰۵ و ۱۳/۸۶ درصد محاسبه شد. شبیه‌سازی DO نیز در طول رودخانه دارای نوساناتی ارزیابی شد، اما شاخص‌های آماری در هر دو مرحله در حد قابل‌قبولی به‌دست آمدند. در نهایت، نتایج این پژوهش بیانگر دقت مناسب مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی در رودخانه خرم‌آباد بوده است [۱۱].

از سوی دیگر، امامی‌قرا و همکاران در سال ۱۴۰۲ و در مطالعه‌ای بر روی رودخانه نکا، ضمن بررسی و شبیه‌سازی روند تغییرات کیفی در بازه ۸ کیلومتری با استفاده از مدل QUAL2Kw، به ارزیابی اثرات بندها، آبشارهای طبیعی و سازه‌های تثبیت بستر پرداختند. نتایج نشان داد که تمامی متغیرهای کیفی در محدوده استاندارد قرار داشته و رودخانه توان خودپالایی بالایی دارد. بررسی روند تغییرات اکسیژن محلول نشان داد که غلظت این متغیر نزدیک به حد اشباع بوده که علت آن شرایط مطلوب هیدرولیکی رودخانه برای نرخ هوادهی و وجود آبشارهای طبیعی و مصنوعی متعدد در رودخانه است. مقدار pH نیز هر چند در محدوده استاندارد قرار داشته است، اما در برخی مقاطع نزدیک به حد اشباع بوده که علت آن خروج گاز دی‌اکسیدکربن بر اثر آبشارهای موجود در مسیر جریان بوده و مدل این اثرات را به‌خوبی شبیه‌سازی نموده است. همچنین وجود بندهای انحرافی و ایجاد حالت قرار گرفتن آب در پشت این بندها سبب شده است تا زمان بیشتری برای تجزیه مواد آلی در اختیار باکتری‌ها قرار گیرد و این امر موجب افزایش میزان قلیائیت و افزایش pH در محدوده شده است. تحلیل نتایج و ارزیابی شاخص‌های خطا در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که مدل QUAL2Kw دقت مناسبی در شبیه‌سازی کیفیت آب نکارود دارد [۱۲].

در مطالعه دیگری بر روی رودخانه باغمتی در نپال، اثر سرریزها بر بهبود کیفیت آب بررسی شد. نتایج نشان داد که وجود سرریز در رودخانه باغمتی می‌تواند منجر به بهبود و افزایش میزان اکسیژن محلول در رودخانه شود. این مطالعه نشان داد که مدل QUAL2Kw قادر است اثرات کیفی آبشارهای طبیعی و سازه‌های تثبیت بستر را به‌خوبی شبیه‌سازی کند [۱۳].

از سوی دیگر در رودخانه‌های کوهستانی، مطالعات نشان داده‌اند که از مهم‌ترین ویژگی‌های این رودخانه‌ها با مورفولوژی پله-گوداب (Step-pool)، وجود آبشارهای طبیعی است که تأثیر قابل‌توجهی بر فرایندهای هوادهی و خودپالایی دارند به طوری که وجود آبشارهای طبیعی در مسیر جریان، باعث افزایش قابل‌توجه نرخ هوادهی و در نتیجه افزایش غلظت اکسیژن محلول می‌شود. علاوه بر

آن، سرعت جریان رودخانه تأثیر به سزایی در خودپالایی دارد. همچنین محل آلودگی منبع نقطه‌ای در چنین شرایطی، تأثیر محدودتری به‌جا می‌گذارد و از سوی دیگر، دبی جریان رودخانه تأثیر محسوسی بر خودپالایی آب در رودخانه‌های کوهستانی دارد [۱۴]. این موضوع در فصول پر بارش که دبی جریان افزایش می‌یابد، باعث افزایش ظرفیت خودپالایی رودخانه می‌گردد. چنین موضوع در مطالعه ونائی و همکاران در سال ۱۴۰۱ نیز تأیید شده است، به‌طوری‌که غلظت BOD و COD در فصل پر بارش به‌مراتب کمتر از فصول خشک بوده است [۱۵].

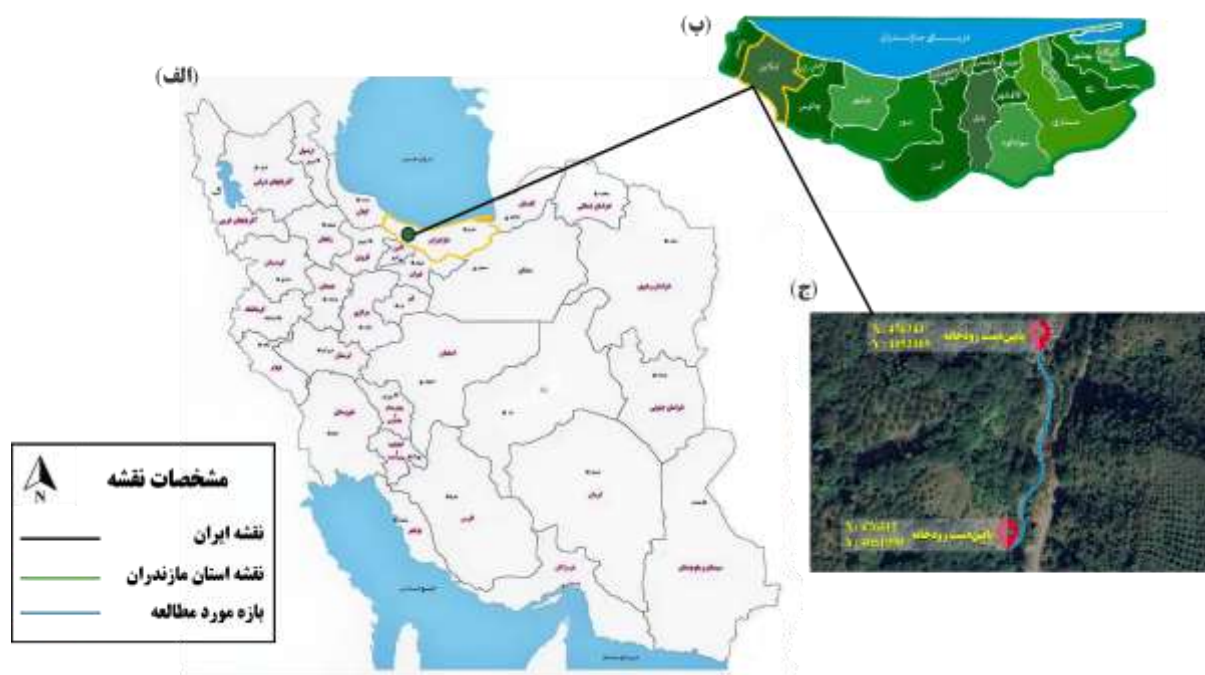
با وجود مطالعات متعدد در زمینه کاربرد مدل QUAL2Kw در رودخانه‌های مختلف، بخش عمده پژوهش‌های داخلی با استفاده از مدل QUAL2Kw بر روی رودخانه‌های بزرگ، کم‌شیب و با جریان نسبتاً یکنواخت متمرکز بوده است. از طرفی، با توجه به رویکرد میانگین‌گیری طولی^۱ مدل QUAL2Kw، تغییرات شدید پارامترهای هیدرولیکی مانند سرعت و عمق جریان در بازه‌های کوتاه پله-گوداب ساده‌سازی می‌شوند و ممکن است منجر به برآورد نادرست ضرایب هوادهی و در نتیجه شبیه‌سازی نادرست پارامترهای حساس به آشفته‌گی مانند اکسیژن محلول گردد. این مسئله در رودخانه‌های کوهستانی با زمان ماندگاری کوتاه اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند، زیرا واکنش‌های سینتیکی (جنبشی) زمان کافی برای تأثیرگذاری بر غلظت آلاینده‌ها را ندارند و فرآیندهای انتقال فیزیکی نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. لذا شکاف پژوهشی موجود در این زمینه، دارای اهمیت به خصوصی می‌باشد. در این راستا، نوآوری پژوهش حاضر در سه حیطه قابل‌تعریف است. ابتدا، کارایی مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی هم‌زمان چهار پارامتر کیفی اصلی (دما، اکسیژن محلول، نیتрат و فسفر غیرآلی) در یک رودخانه کوهستانی با ساختار پله-گوداب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین پژوهش حاضر، به‌طور خاص به بررسی تأثیر شرایط هیدرولوژیکی متفاوت (کم‌آبی و پرآبی) بر عملکرد مدل در این گونه رودخانه‌ها می‌پردازد و نهایتاً، با تحلیل پروفیل‌های طولی پارامترهای کیفی در چهار ایستگاه نمونه‌برداری (بالادست، روی پله، پای پله و پایین‌دست)، الگوی خطای مدل در مواجهه با تغییرات ناگهانی هیدرولیکی ناشی از ساختار پله-گوداب به‌صورت مکانی شناسایی و تبیین می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، رودخانه دوهزار در استان مازندران می‌باشد که به لحاظ موقعیت در نزدیکی شهرستان تنکابن واقع شده است. موقعیت جغرافیایی این رودخانه در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۸۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۸۲ دقیقه قرار دارد. رودخانه دوهزار از دو شاخه اصلی دریاسر رود و نوشارود نشأت می‌گیرد. این دو شاخه پس از تلاقی، رودخانه دوهزار را تشکیل می‌دهند. شکل (۱)، موقعیت قرارگیری بازه مورد مطالعه در استان و به صورت تصویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد.

^۱ Reach-averaged



شکل ۱- موقعیت بازه مورد مطالعه رودخانه دوهزار. (الف) نشان داده شده بر روی نقشه ایران، (ب) نشان داده شده بر روی نقشه استان مازندران و (ج) نشان داده شده بر روی تصویر ماهواره‌ای

یکی از ویژگی‌های بارز مورفولوژیکی رودخانه دوهزار، ساختار پله-گوداب در بستر آن است. این ساختار که در نتیجه شیب تند و تلاطم شدید جریان شکل گرفته است، باعث ایجاد تغییرات ناگهانی در عمق و سرعت جریان شده و الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. وجود چنین ساختاری، رودخانه دوهزار را به یک بستر طبیعی مناسب برای ارزیابی کارایی مدل‌های کیفیت آب در شرایط هیدرولیکی پیچیده تبدیل کرده است. شکل (۲)، نشان دهنده تصویری از مورفولوژی و ساختار بازه مورد مطالعه می‌باشد.



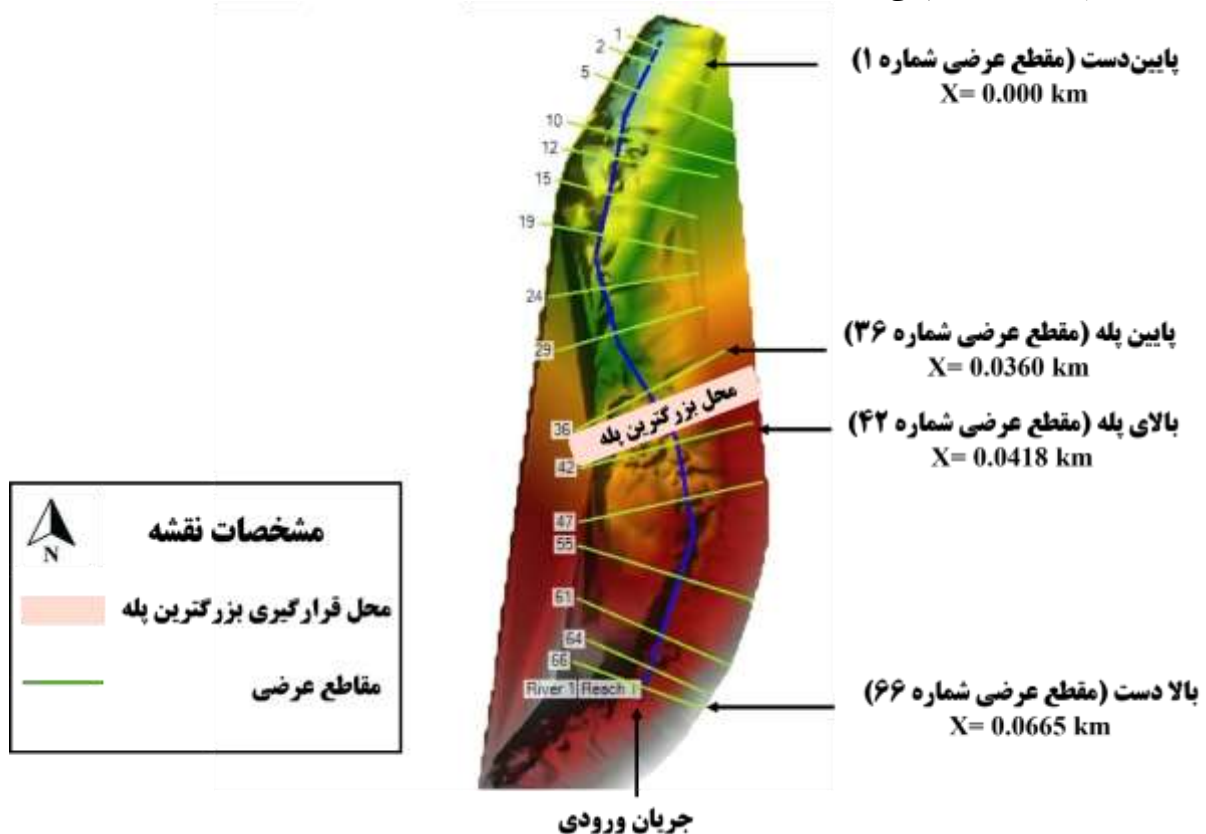
شکل ۲- تصویری از بازه مورد مطالعه در محدوده روستای هلوکله

۲-۲- جمع‌آوری و اندازه‌گیری‌های میدانی

به منظور شناسایی بازه مورد مطالعه و اجرای هر چه بهتر مدل QUAL2Kw و ارزیابی کارایی آن در شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه کوهستانی با مورفولوژی پله-گوداب، ابتدا به منظور برداشت مورفولوژی رودخانه، عملیات نقشه‌برداری با بهره‌گیری از دوربین توتال در آبان‌ماه ۱۴۰۱ اجرایی شد. در نهایت با توجه به مورفولوژی رودخانه و محدودیت در برخی نقاط جهت نمونه‌برداری، بازه‌ای به طول ۶۶ متر و هم‌راستا با نیاز پژوهش نقشه‌برداری شد. پس از نقشه‌برداری و پردازش نقاط برداشت شده، نقشه‌های DEM و TIN با استفاده از نرم‌افزار ArcMap آماده گردید. متعاقباً، پس از اتمام فرآیند نقشه‌برداری، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری میدانی در بازه مورد مطالعه از رودخانه دوهزار انجام شد.

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های میدانی به مدت ۸ ماه، از دی‌ماه ۱۴۰۱ تا مردادماه ۱۴۰۲ انجام شد. طراحی زمان‌بندی نمونه‌برداری به گونه‌ای صورت گرفت که هر دو رژیم هیدرولوژیکی کم‌آبی و پرآبی رودخانه را پوشش دهد. این رویکرد به دلیل آن حائز اهمیت است که تغییرات دبی جریان، تأثیری مستقیم بر پارامترهای هیدرولیکی و متعاقباً بر فرآیندهای کیفی دارد. از آنجا که کارایی مدل‌های کیفی مانند QUAL2Kw در شرایط هیدرولیکی متفاوت، به‌ویژه در رودخانه‌های کوهستانی با مورفولوژی پله-گوداب، می‌تواند تغییر چشمگیری داشته باشد، بنابراین، ارزیابی عملکرد مدل در هر دو رژیم هیدرولوژیکی، برای اطمینان از خروجی‌های مدل ضروری است. با این شرایط، تصویری کامل‌تر از توانایی مدل در مواجهه با نوسانات فصلی و سیلابی ارائه خواهد گردید.

با توجه به ساختار پله-گوداب رودخانه و اهداف تعیین‌شده در این پژوهش، چهار ایستگاه نمونه‌برداری با رویکردی هدفمند انتخاب گردیدند. ایستگاه نخست در بالادست پله-گوداب (مقطع عرضی شماره ۶۶) جانمایی شد تا شرایط ورودی جریان به ساختار پله را ثبت نماید. ایستگاه دوم در محل روی پله (مقطع عرضی شماره ۴۲) قرار گرفت، جایی که جریان با شتاب گرفتن، کاهش عمق محسوسی را تجربه می‌کند. ایستگاه سوم در محل پای پله (مقطع عرضی شماره ۳۶)، در منطقه‌ای با آشفتگی شدید و افت انرژی قابل‌ملاحظه، تعیین شد. در نهایت، ایستگاه چهارم در فاصله‌ای مناسب پایین‌دست پله (مقطع عرضی شماره ۱) در نظر گرفته شد، به‌گونه‌ای که جریان تا حد زیادی به حالت تعادل بازگشته باشد. این رویکرد، امکان پایش پیوسته و دقیق تغییرات پارامترهای کیفی را در طول عبور جریان از ساختار پله-گوداب فراهم می‌آورد. موقعیت ایستگاه‌های مذکور در بازه مورد مطالعه در شکل (۳)، نمایش داده شده است.



شکل ۳- محل قرارگیری مقاطع عرضی و بزرگترین پله-گوداب موجود در طول بازه مطالعاتی

در هر یک از چهار ایستگاه تعیین شده در طول بازه مطالعاتی، نمونه برداری کیفی به صورت ماهانه انجام گرفت و پارامترهای کلیدی کیفی شامل دمای آب (T)، اکسیژن محلول (DO)، نیترات (NO₃) و فسفر غیرآلی (PO₄) برداشت شدند. همزمان با نمونه برداری کیفی، اندازه گیری پارامترهای هیدرولیکی به منظور تعیین دبی جریان و مشخصات هیدرولیکی بازه انجام شد. بدین منظور، ابتدا دو مقطع عرضی در ابتدا و انتهای بازه مورد مطالعه انتخاب شدند. در هر مقطع، با استفاده از متر، عرض جریان اندازه گیری و سپس مقطع به زیرمقطع های متعدد تقسیم شد. در هر زیرمقطع، عمق و سرعت جریان توسط میکرو مولینه اندازه گیری گردید. سپس با استفاده از معادله پیوستگی، دبی هر زیرمقطع از حاصل ضرب سرعت متوسط در سطح مقطع آن زیرمقطع محاسبه شد و در نهایت، دبی کل جریان از مجموع دبی های تمام زیرمقطع ها به دست آمد [۱۶]. شایان ذکر است که عملیات اندازه گیری هیدرولیکی و کیفی در هر ماه و در شرایط هیدرولوژیکی متفاوت (کم آبی و پرآبی) تکرار شد تا داده های کافی و قابل اطمینان برای واسنجی و صحت سنجی مدل QUAL2Kw فراهم گردد.

۳-۲- شبیه سازی کمی و کیفی در مدل QUAL2Kw

مدل QUAL2Kw یک مدل یک بعدی و جامع برای شبیه سازی کیفیت آب در رودخانه ها است که تحت شرایط جریان ماندگار یا شبه ماندگار عمل می کند. این مدل بر اساس معادله موازنه جرم برای هر یک از اجزای کیفیت آب در یک المان کنترلی بنا شده است و قادر به شبیه سازی همزمان ۱۶ پارامتر کیفی مختلف از جمله دما، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، نیترات، فسفر غیرآلی، آمونیاک (NH₄) و سایر پارامترهای مرتبط می باشد [۸]. ساختار فرآیندی (process-based) مدل را به ابزاری قدرتمند برای تحلیل واکنش های سینتیکی و بیوشیمیایی در رودخانه ها تبدیل کرده است. معادله حاکم بر مدل QUAL2Kw، معادله موازنه جرم برای هر جزء کیفی در یک المان کنترل است که به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} C_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} C_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (C_{i-1} - C_i) + \frac{E'_i}{V_i} (C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (1)$$

که در آن:

$\frac{dC_i}{dt}$ = نرخ تغییرات غلظت هر جزء در طول زمان (کیلوگرم بر مترمکعب در روز)

Q_i = خروجی از المان i به المان i+1 (مترمکعب در روز)

$Q_{out,i}$ = کل خروجی از المان ناشی از برداشت های نقطه ای و غیرنقطه ای (مترمکعب در روز)

V_i = حجم المان i ام (مترمکعب)

E'_i = ضریب پراکندگی توده ای بین المان i و i+1 (مترمکعب در روز)

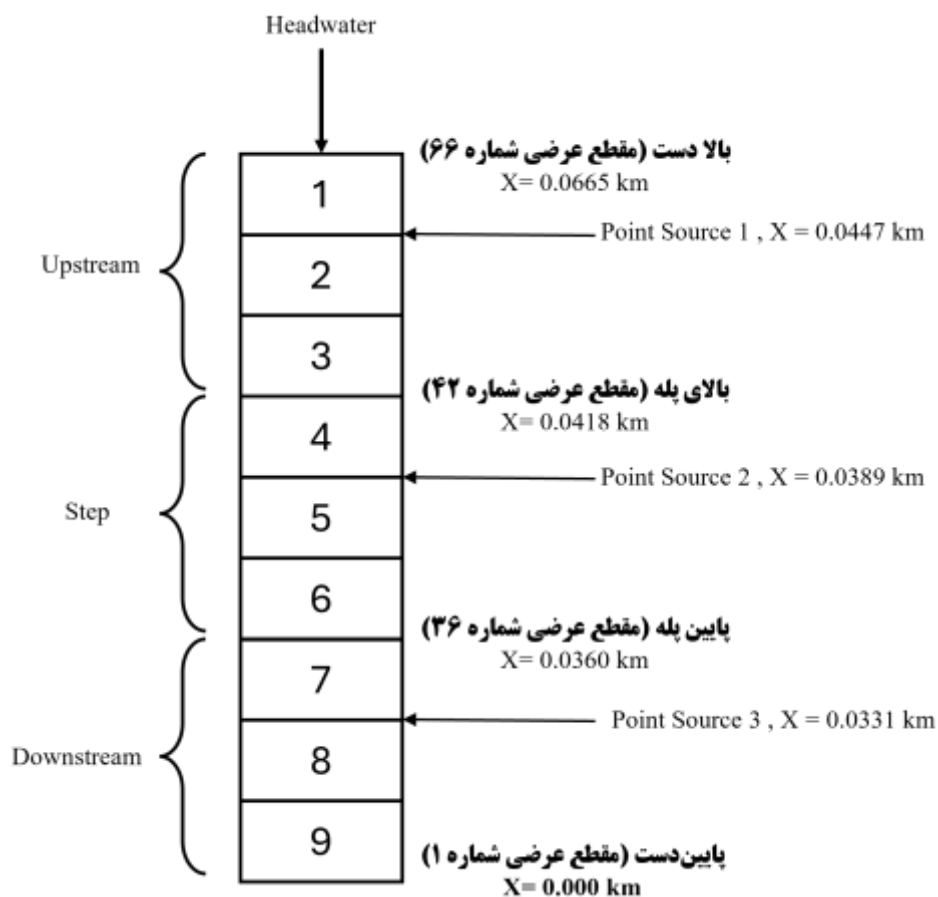
W_i = بار خارجی جزء مورد نظر نسبت به المان i (گرم در روز یا میلی گرم در روز)

S_i = منابع و مصارف جزء مورد نظر ناشی از واکنش ها و مکانیسم های انتقال جرم (گرم بر مترمکعب در روز یا میلی گرم بر مترمکعب در روز).

برای شبیه سازی کیفیت آب رودخانه دوهزار، داده های میدانی در چهار دسته شامل هندسی، هیدرولیکی، کیفی و هواشناسی تهیه و به عنوان ورودی مدل QUAL2Kw (نسخه ۵/۱) در نظر گرفته شدند. ویژگی های هندسی هر زیربازه شامل طول، شیب، عرض متوسط و عمق متوسط، بر اساس داده های توپوگرافی برداشت شده با توتال استیشن و اندازه گیری های هیدرومتری انجام شده در مقاطع عرضی تعیین گردید. پارامترهای هیدرولیکی شامل دبی، سرعت متوسط و عمق جریان نیز با استفاده از روش سرعت-سطح مقطع در ابتدا و انتهای هر زیربازه محاسبه شدند. همچنین، چهار پارامتر کیفی اصلی شامل دمای آب، اکسیژن محلول، نیترات و فسفر غیرآلی برای شبیه سازی به مدل معرفی شدند. انتخاب این پارامترها بر اساس اهداف پژوهش و اهمیت آن ها در فرآیندهای خودپالایی و کیفیت آب رودخانه های کوهستانی صورت گرفت. داده های هواشناسی نیز از طریق داده های در دسترس از ایستگاه سینوپتیک تنکابن برداشت شدند.

برای اجرای مدل QUAL2Kw در رودخانه دوهزار، بازه مورد مطالعه به سه زیربازه (Sub-reach) تقسیم شد. زیر بازه اول شامل بخش بالادست رودخانه تا قبل از بزرگترین واحد پله-گوداب (حداصل مقطع عرضی ۶۶ تا ۴۲) منظور گردید. زیر بازه دوم نیز شامل محل ساختار پله-گوداب (از مقطع عرضی ۴۲ تا ۳۶) و زیر بازه سوم از پایین دست پله تا انتهای بازه مورد مطالعه (حداصل مقطع عرضی ۳۶ تا ۱) تعیین و اجرا گردید. شایان ذکر است، به منظور افزایش دقت شبیه سازی در بازه با ساختار پله-گوداب، رودخانه به ۹ المان محاسباتی با طول های غیریکنواخت تقسیم شد. بدین ترتیب که در محدوده پله-گوداب (بین مقاطع عرضی ۳۶ تا ۴۲)، به دلیل تغییرات شدید پارامترهای هیدرولیکی، طول المان ها کوتاه تر و در بخش های بالادست و پایین دست، طول المان ها بزرگتر در نظر گرفته شد.

در این پژوهش، به منظور شبیه سازی دقیق تر کیفیت آب، تمامی جریان های ورودی جانبی به رودخانه (شامل شاخه های فرعی، زهکش ها و خروجی های احتمالی) به عنوان منابع نقطه ای^۱ در مدل QUAL2Kw تعریف شده اند. این رویکرد مطابق با ساختار مدل است که شاخه های فرعی را به صورت بارهای نقطه ای به آبراهه اصلی وارد می نماید. شکل (۴) نشان دهنده نحوه تقسیم بازه مطالعاتی و مقادیر بار نقطه ای ورودی به مدل می باشد.



شکل ۴- نمایش شماتیک تقسیم بندی بازه رودخانه و محل منابع نقطه ای در طول بازه مورد مطالعه در رودخانه دوهزار، مطابق با نحوه پیاده سازی در مدل QUAL2Kw. (توجه: نمودار شماتیک مقیاس واقعی ندارد)

شرط مرزی بالادست بر اساس داده های میدانی برداشت شده در ورودی بازه تعریف شد؛ به گونه ای که دبی مشاهده شده و غلظت های مربوط به دما، اکسیژن محلول، نیترات و فسفر غیرآلی به عنوان ورودی های مدل در نظر گرفته شدند. برای مرز پایین دست، شرط مرزی خروجی انتخاب شد تا مدل بتواند غلظت های خروجی را بر اساس معادلات انتقال-انتشار محاسبه نماید. شایان ذکر است که داده های برداشت شده در نقاط میانی، شامل بالای پله و پای پله و همچنین در خروجی بازه، برای واسنجی و صحت سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

^۱ Point Sources

همچنین با توجه به اهمیت پله طبیعی در هوادهی موضعی، ضریب هوادهی (K_a) با استفاده از رابطه تجربی پرکاربرد اوکانر و دابینز (۱۹۵۸) تعیین گردید که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$K_a = \frac{3.93U^{0.5}}{H^{1.5}} \quad (2)$$

که در آن:

K_a = ضریب هوادهی (بر روز)

U = میانگین سرعت جریان (متر بر ثانیه)

H = عمق جریان (متر)

مقادیر مورد نیاز شامل سرعت و عمق مورد نیاز برای محاسبه ضریب هوادهی از رابطه فوق، پس از واسنجی و صحت‌سنجی و اطمینان از عملکرد صحیح مدل، از خروجی‌های مدل QUAL2Kw در المان مربوط به ساختار پله-گوداب استخراج شدند. لازم به ذکر است که این محاسبه در محل پای پله (به‌عنوان حساسترین نقطه از نظر تغییرات هیدرولیکی) انجام شده و هدف از آن، تحلیل تأثیر ساختار پله بر پتانسیل هوادهی و تبیین علت افزایش یا کاهش خطای مدل در شبیه‌سازی اکسیژن محلول در این ناحیه بوده است.

۲-۴- واسنجی و صحت‌سنجی

فرآیند واسنجی مدل QUAL2Kw با هدف حداقل‌سازی اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مشاهداتی انجام شد. به طوری که پس از تعریف داده‌های ورودی هر سناریو، بخش هیدرولیکی مدل با تغییرات ضریب زبری مانینگ تا حدی که اختلاف داده‌های صحرایی با نتایج شبیه‌سازی به حداقل برسد، کالیبره شد. پس از شبیه‌سازی و کالیبراسیون مدل و تعیین ضریب زبری مناسب برای بازه مورد مطالعه، نوبت به کالیبراسیون پارامترهای کیفی رسید. این فرآیند به‌صورت سلسله‌مراتبی و با ترتیب مشخصی برای پارامترهای کیفی اجرا گردید. بدین ترتیب، ابتدا پارامتر دما مورد واسنجی قرار گرفت، چراکه دما به‌عنوان یک متغیر فیزیکی بنیادین، تأثیری مستقیم بر واکنش‌ها و سایر پارامترها دارد. در گام بعدی، پارامتر اکسیژن محلول که از مهم‌ترین شاخص کیفیت آب در رودخانه‌های کوهستانی با جریان متلاطم محسوب می‌شود، واسنجی گردید. در نهایت، پارامترهای نیتрат و فسفر غیرآلی به‌ترتیب مورد واسنجی قرار گرفتند، زیرا این مواد مغذی تحت تأثیر فرآیندهای نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون و جذب زیستی قرار دارند که خود وابسته به دمای آب و غلظت اکسیژن محلول هستند.

پس از حصول اطمینان از عملکرد مطلوب مدل در مرحله واسنجی (با استفاده از داده‌های ۴ ماه اول، دی‌ماه تا فروردین‌ماه)، فرآیند صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های مستقل (داده‌های ۴ ماه دوم، اردیبهشت‌ماه تا مردادماه) انجام شد. در این مرحله، ضرایب به‌دست‌آمده از مرحله واسنجی بدون هیچ تغییری ثابت نگه‌داشته شدند و تنها شرایط مرزی و داده‌های ورودی بر اساس اندازه‌گیری‌های ماهانه تغییر یافتند. سپس خروجی‌های مدل (مقادیر شبیه‌سازی‌شده) با داده‌های مشاهداتی میدانی در ایستگاه‌های مختلف مقایسه شده و عملکرد مدل با استفاده از معیارهای آماری ارزیابی عملکرد مورد بررسی کمی قرار گرفت.

۲-۵- ارزیابی معیارهای عملکرد مدل

برای ارزیابی کمی دقت مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی، از معیارهایی نظیر خطای نسبی مطلق (ARE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین (R^2) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شد. روابط معیارهای ارزیابی فوق‌الذکر به شرح ذیل می‌باشد:

$$ARE = \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| * 100 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

$$MAPE (\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i - P_i}{P_i} \right| * 100 \quad (6)$$

که در آن:

N = تعداد کل مشاهدات یا نقاط داده

O_i = مقدار مشاهداتی برای نقطه داده i ام

P_i = مقدار شبیه‌سازی شده باری نقطه داده i ام

$\bar{O}$ = میانگین مقادیر مشاهداتی

$\bar{P}$ = میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی و کالیبراسیون

به منظور شبیه‌سازی، داده‌های ورودی به مدل QUAL2Kw شامل خلاصه‌ای از تمامی پارامترهای هیدرولیکی، کیفی، هندسی و هواشناسی که در جدول (۱) ارائه شده است، به مدل معرفی گردید. این داده‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، نقشه‌برداری توپوگرافی، داده‌های ایستگاه هواشناسی و خروجی فرآیند واسنجی، به‌عنوان ورودی‌های اصلی مدل در شبیه‌سازی و کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- داده‌های ورودی به مدل

منبع	مقدار/بازه	پارامتر	نوع داده
اندازه‌گیری میدانی (روش سرعت-سطح مقطع)	۰/۵۸ تا ۳/۰۱ (کم‌آبی تا پرآبی)	دبی جریان در بالادست پله (مترمکعب بر ثانیه)	
اندازه‌گیری میدانی و متناسب با روش اندازه‌گیری دبی	۰/۴۴ تا ۰/۸۰	عمق متوسط جریان در بالادست پله (متر)	
رابطه مانینگ و کالیبراسیون زیر بازه‌ها	۰/۱۹ تا ۰/۲۵	ضریب زبری مانینگ	
اندازه‌گیری میدانی	۱۷ تا ۲۶/۲	دمای آب (درجه سانتی‌گراد)	
آزمایشگاه	۷ تا ۱۱/۷	اکسیژن محلول (میلی گرم بر لیتر)	
آزمایشگاه	۲/۴۲ تا ۱/۲۲	نیتрат (میلی گرم بر لیتر)	
آزمایشگاه	۰/۰۵۶ تا ۰/۰۱۲	فسفر غیرآلی (میلی گرم بر لیتر)	
نقشه‌برداری توتال استیشن	۶۶	طول بازه (متر)	
تقسیم‌بندی بر اساس تغییرات بستر	۹ المان با طول‌های غیریکنواخت	تعداد المان‌های محاسباتی	

شیب متوسط بستر	۱۱ درصد	نقشه برداری توتال استیشن و پردازش نقاط
دمای هوا (درجه سانتی گراد)	۸/۵ تا ۳۲	ایستگاه سینوپتیک
رطوبت نسبی (درصد)	۴۵ تا ۸۵	ایستگاه سینوپتیک
سرعت باد (متر بر ثانیه)	۲ تا ۶/۵	ایستگاه سینوپتیک
پوشش ابری (درصد)	۲۰ تا ۹۰	تخمین میدانی

پس از اجرای مدل هیدرولیکی برای دبی‌های مختلف اندازه‌گیری شده در بازه مطالعاتی، نتایج شبیه‌سازی عمق جریان در قالب جدول (۲) ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص می‌باشد، دبی‌های جریان در بازه‌ای بین ۰/۵۸ تا ۳/۰۱ مترمکعب بر ثانیه قرار دارند که هر دو رژیم هیدرولوژیکی کم‌آبی و پرآبی رودخانه کوهستانی مورد مطالعه را پوشش می‌دهد. لازم به ذکر است، پس از تقسیم هر مقطع عرضی به زیرمقطع‌های متعدد، در هر زیرمقطع، عمق جریان اندازه‌گیری گردید. برای اطمینان از دقت، در هر زیرمقطع، عمق در چند نقطه اندازه‌گیری و سپس میانگین عمق برای آن زیرمقطع محاسبه شد. این عمق‌ها به همراه سرعت‌های اندازه‌گیری شده (توسط میکرومولینه)، برای محاسبه دبی هر زیرمقطع و در نهایت دبی کل جریان مورد استفاده قرار گرفتند. لذا عمق‌های گزارش شده در جدول (۲) که کالیبراسیون مدل بر اساس آن‌ها انجام شده است، مربوط به مقطع بالادست پله می‌باشند. این عمق‌ها در زمان نمونه‌برداری (متناسب با هر دبی) اندازه‌گیری شده و در جدول ثبت شده‌اند و به عنوان معیاری برای تعیین ضریب زیری مناسب در هر زیرمقطع در نظر گرفته شده‌اند. مدل QUAL2Kw بر اساس این عمق ورودی و هندسه تعریف شده برای هر المان، عمق جریان را در سایر نقاط بازه (از جمله پله و گوداب) به صورت محاسباتی برآورد می‌کند.

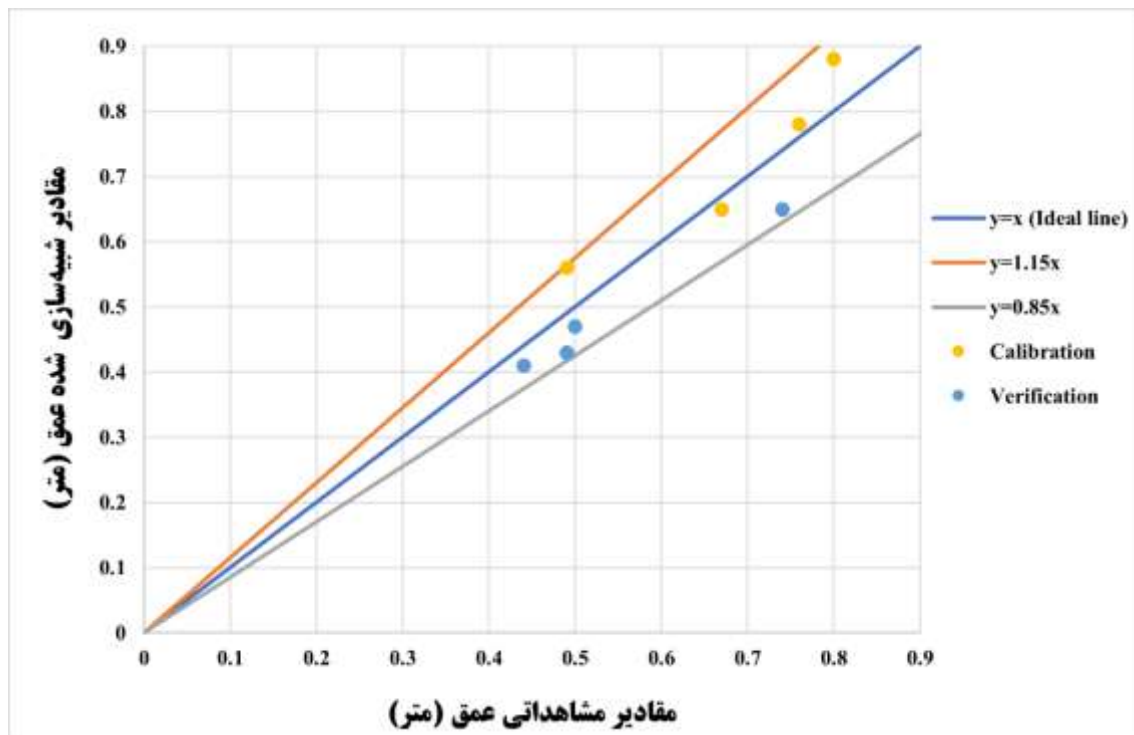
جدول ۲- مقایسه عمق‌های جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

دوره	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	عمق مشاهداتی	عمق شبیه‌سازی	خطای نسبی مطلق	ریشه میانگین مربعات خطا (متر)	ضریب کارایی نش- ساتکلیف	ضریب تعیین	میانگین درصد خطای مطلق (درصد)
	۱/۵۸	۰/۶۷	۰/۶۶					
	۱/۱۳	۰/۴۹	۰/۵۷					
	۳/۰۱	۰/۸۰	۰/۵۹					
	۲/۳۱	۰/۷۶	۰/۷۹					
	۱/۵	۰/۷۴	۰/۶۶					
	۰/۶۲	۰/۴۹	۰/۴۳					
	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۴۷					
	۰/۵۸	۰/۴۴	۰/۴۲					

شاخص‌های خطای محاسبه شده در جدول (۲) نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل هیدرولیکی است. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله واسنجی برابر ۰/۰۶ متر و در مرحله صحت‌سنجی برابر ۰/۰۵ متر به دست آمد. این مقادیر پایین که به‌ویژه در صحت‌سنجی اندکی بهبود یافته است، بیانگر آن می‌باشد که مدل توانسته است عمق جریان را با خطایی کمتر از ۶ سانتی‌متر در شرایط مختلف شبیه‌سازی نماید. همچنین میانگین درصد خطای مطلق در مرحله واسنجی معادل ۸/۲۵ درصد و در مرحله صحت‌سنجی معادل ۸/۴۰ درصد محاسبه شد که نزدیکی این دو مقدار، مبین پایداری عملکرد مدل و عدم وابستگی بیش از حد به داده‌های واسنجی است. مقادیر خطای نسبی مطلق نیز با میانگین ۸/۲۵ در واسنجی و ۸/۴ در صحت‌سنجی، مؤید قابلیت اطمینان مدل در فرایند شبیه‌سازی مشاهدات میدانی است.

مقادیر ضریب تعیین در مرحله واسنجی ۰/۸۹ و در دوره صحت‌سنجی ۰/۹۸ نشان‌دهنده همبستگی مطلوب بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است. همچنین ضریب کارایی نش- ساتکلیف از مقدار ۰/۷۲ در مرحله واسنجی به ۰/۷۹ در مرحله

صحت‌سنجی ارتقا یافته است که بیانگر عملکرد مطلوب و قابل قبول در شبیه‌سازی تغییرات سطح آب در این رودخانه کوهستانی با بستر ناهموار است. همچنین در شکل (۵)، میزان انطباق میان عمق‌های جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نشان داده شده است.



شکل ۵- نتایج مدل در طول دوره واسنجی و صحت‌سنجی

همان‌گونه که در شکل (۵) مشهود است، پراکندگی نقاط داده در نمودار عمق‌های شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر مشاهداتی، حول خط ایده‌آل (خط آبی رنگ) متمرکز شده‌اند که با توجه به شرایط پیچیده هیدرولیکی حاکم بر رودخانه‌های پله-گوداب با شیب تند و جریان فوق‌بحرانی و زیربحرانی متناوب، عملکردی مناسب محسوب می‌شود.

۳-۲- نتایج شبیه‌سازی و واسنجی کیفیت آب

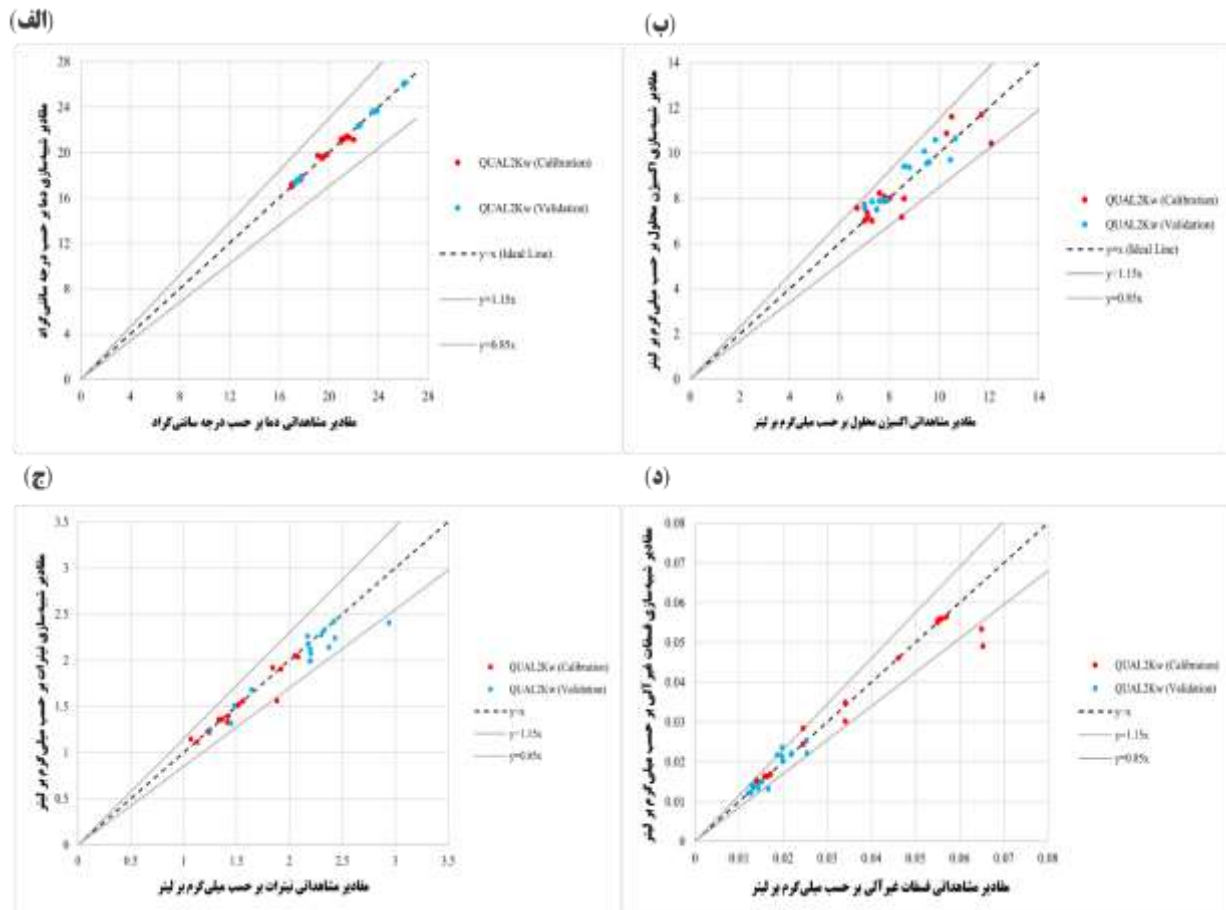
به منظور شبیه‌سازی کیفیت آب در مدل، تغییرات مکانی-زمانی پارامترهای کیفیت آب، شامل دمای آب، اکسیژن محلول، نیترات و فسفر غیرآلی که در چهار ایستگاه مورد پایش (بالادست، روی پله، پایین پله و پایین دست) جمع‌آوری و در جدول (۳) ارائه شده‌اند، به‌عنوان ورودی به مدل معرفی شدند.

جدول ۳- تغییرات مکانی-زمانی پارامترهای اندازه‌گیری شده کیفیت آب در ایستگاه‌های پایش مشخص شده

نوبت جمع‌آوری داده	ایستگاه پایش	دما (درجه سانتی‌گراد)	اکسیژن محلول (میلی گرم بر لیتر)	نیترات (میلی گرم بر لیتر)	فسفر غیرآلی (میلی گرم بر لیتر)
	بالادست	۲۱/۱	۷	۲/۰۵	۰/۰۲۴
	روی پله	۲۱	۷/۳	۲/۰۸	۰/۰۳۴
	پای پله	۲۱	۷/۱	۱/۸۴	۰/۰۲۴
	پایین دست	۲۱/۲	۷	۱/۹۲	۰/۰۳۴
	بالادست	۱۹/۸	۷/۱	۱/۵۶	۰/۰۴۶
	روی پله	۱۹/۱	۸/۵	۱/۵۲	۰/۰۶۵

۰/۰۶۵	۱/۸۸	۶/۷	۱۹/۵	پای پله
۰/۰۵۵	۱/۵۱	۸/۶	۱۹/۵	پایین دست
۰/۰۵۶	۱/۳۶	۸	۱۷	بالادست
۰/۰۵۵	۱/۴۱	۷/۹	۱۷	روی پله
۰/۰۵۷	۱/۴۲	۷/۸	۱۷/۷	پای پله
۰/۰۵۵	۱/۳۳	۷/۶	۱۷/۸	پایین دست
۰/۰۱۶	۱/۲۲	۱۱/۷	۲۱	بالادست
۰/۰۱۵	۱/۲۳	۱۰/۵	۲۲	روی پله
۰/۰۱۴	۱/۰۶	۱۰/۳	۲۱/۶	پای پله
۰/۰۱۷	۱/۱۲	۱۲/۱	۲۱/۴	پایین دست
۰/۰۱۵	۲/۱۷	۱۰/۶۵	۲۲/۴	بالادست
۰/۰۱۵	۲/۱۹	۹/۸۵	۲۲/۴	روی پله
۰/۰۱۲	۲/۲	۹/۴	۲۲/۵	پای پله
۰/۰۱۳	۲/۱۹	۱۰/۴۵	۲۲/۳۵	پایین دست
۰/۰۱۲	۲/۴۲	۹/۶	۱۷/۳	بالادست
۰/۰۱۲	۲/۹۴	۹/۵	۱۷/۳	روی پله
۰/۰۱۶	۲/۱۷	۸/۶	۱۷/۵	پای پله
۰/۰۱۴	۲/۴۳	۸/۸	۱۷/۸	پایین دست
۰/۰۲۱	۲/۳۳	۷/۹	۲۶	بالادست
۰/۰۱۸	۲/۳	۷/۶	۲۶	روی پله
۰/۰۲۵	۲/۳۷	۷/۳	۲۶	پای پله
۰/۰۲۱	۲/۲	۷/۸	۲۶/۲	پایین دست
۰/۰۲۵	۱/۲۵	۷/۵	۲۳/۶	بالادست
۰/۰۱۹	۱/۴۵	۷/۵	۲۳/۹	روی پله
۰/۰۱۹	۱/۴۸	۷	۲۳/۵	پای پله
۰/۰۱۹	۱/۶۴	۷	۲۳/۸	پایین دست

در خصوص نتایج پارامترهای کیفی نیز، مقادیر شبیه سازی شده حاصل از مدل QUAL₂Kw در برابر مشاهدات میدانی (مرقوم در جدول ۳) متناظر ترسیم شدند تا کارایی پیش بینی مدل QUAL₂Kw مورد ارزیابی قرار گیرد. مقادیر مذکور در شکل (۶) رسم شده اند.



شکل ۶- نتایج مشاهداتی و محاسباتی مختص به پارامترهای الف) دما، ب) اکسیژن محلول، ج) نیترات و د) فسفر غیرآلی

بررسی بصری نتایج نشان‌دهنده سطح بالایی از انطباق میان داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است، به گونه‌ای که نقاط داده عموماً در اطراف خط ایده‌آل به‌طور متراکم قرار گرفته‌اند. در حالی که بخش عمده‌ای از نقاط داده در محدوده خطای $\pm 15\%$ درصد قرار دارند، چند مورد انحراف قابل توجه نیز مشاهده می‌شود. به طور مشخص، در مورد فسفر غیرآلی در برخی از پیش‌بینی‌های مدل QUAL2Kw در دوره واسنجی اندکی خارج از کران پایینی خطا قرار گرفته‌اند که بیانگر مواردی از کم‌برآوردی موضعی است. با وجود این نقاط پرت محدود، نتایج نشان می‌دهد که مدل توانسته است روند تغییرات پارامترهای کیفیت آب را در شرایط هیدرولیکی مورد مطالعه به‌طور قابل قبولی بازنمایی کند.

به‌منظور ارائه یک ارزیابی کمی دقیق از دقت شبیه‌سازی، شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی محاسبه و در جدول (۴) مرقوم شده‌اند. این شاخص‌ها معیار عینی برای سنجش میزان انطباق نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌شده فراهم می‌کنند و بدین ترتیب امکان ارزیابی جامع از قابلیت پیش‌بینی مدل را فراهم می‌سازند.

جدول ۴- مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب بر اساس توابع برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی

پارامتر	دوره	خطای نسبی مطلق	ریشه میانگین مربعات خط (10^{-2})	ضریب کارایی نش - ساتکلیف	ضریب تعیین	میانگین درصد خطای مطلق (درصد)
	واسنجی	۲/۱۸	۶۳	۰/۸۴	۰/۹۱	۲/۱۸
	صحت‌سنجی	۱/۲۰	۳۴	۰/۹۸	۰/۹۹	۱/۲۰

۳/۰۹	۰/۹۶	۰/۹۶	۳۳	۳/۰۹	واسنجی	اکسیژن محلول (میلی گرم بر لیتر)
۲/۳۴	۰/۹۶	۰/۹۵	۲۵	۲/۳۴	صحت‌سنجی	
۳/۵۸	۰/۹۴	۰/۹۳	۷	۳/۵۸	واسنجی	
۴/۱۸	۰/۹۴	۰/۹۱	۱	۴/۱۸	صحت‌سنجی	
۷/۱۱	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۲۶	۷/۱۱	واسنجی	
۳/۱۹	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۰۶	۳/۱۹	صحت‌سنجی	

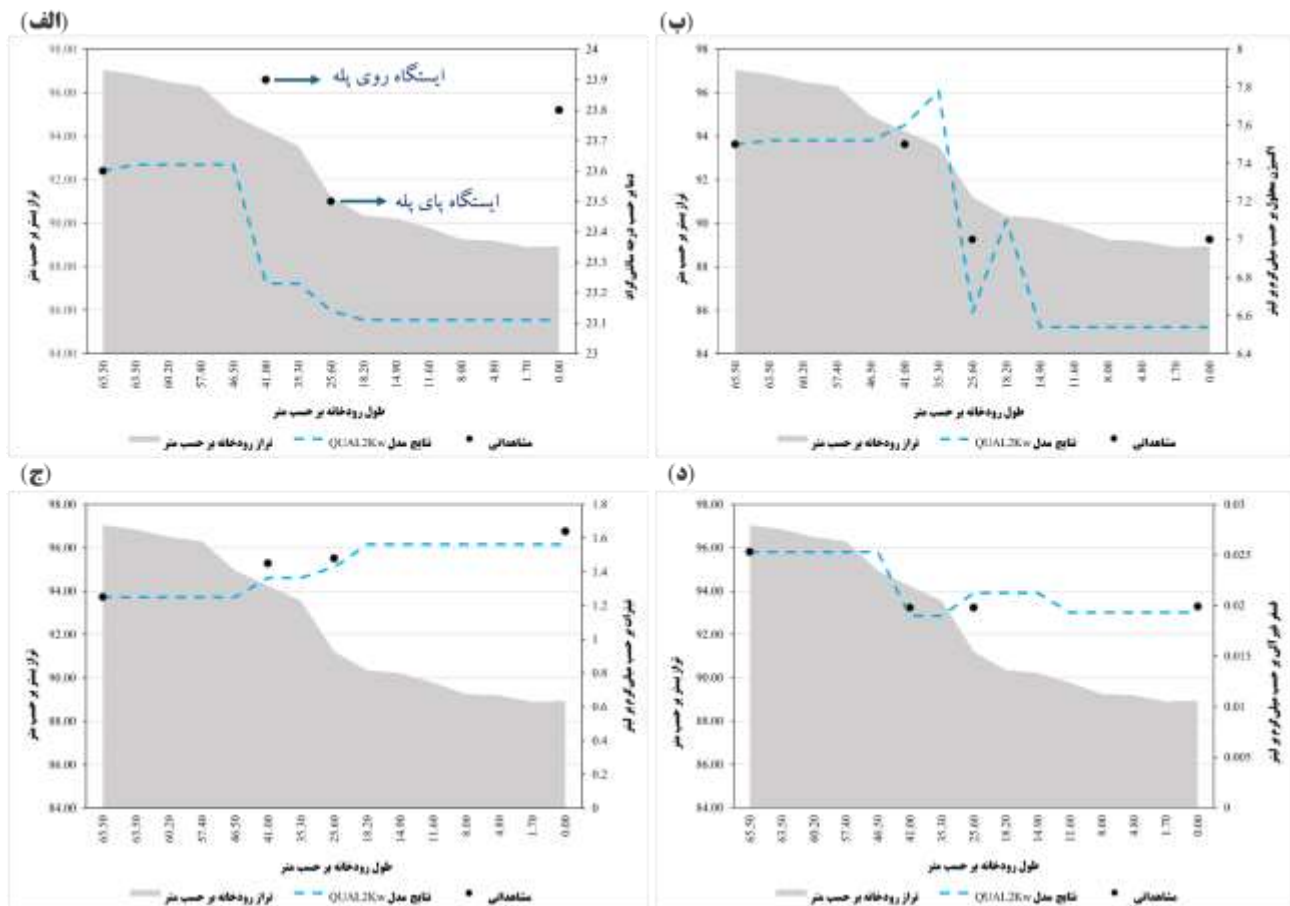
نتایج آماری حاصل از جدول (۴) نشان می‌دهد که مدل QUAL2Kw علی‌رغم محدودیت‌های ناشی از میانگین‌گیری طولی پارامترهای هیدرولیکی و استفاده از هندسه منشوری، توانسته است تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی اصلی (دما، اکسیژن محلول، نیترات و فسفر غیرآلی) را در رودخانه کوهستانی با مورفولوژی پله-گوداب با دقت قابل قبول نسبت به داده‌های میدانی شبیه‌سازی نماید. مقدار ضریب کارایی نش-ساتکلیف برای تمامی پارامترها در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بیشتر از ۰/۸۴ بوده که بر اساس معیارهای استاندارد در رده عملکرد مناسب قرار می‌گیرد.

با این حال، کم‌ترین دقت مدل مربوط به پارامتر دما در مرحله واسنجی با مقدار ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۶۳ درجه سانتی‌گراد و بیشترین دقت مربوط به فسفر غیرآلی در مرحله صحت‌سنجی با مقدار ریشه میانگین مربعات خطا معادل ۰/۰۰۰۶ میلی‌گرم بر لیتر بوده است. این اختلاف نشان می‌دهد که مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای با منشأ عمدتاً فیزیکی (مانند دما) نسبت به پارامترهای با منشأ شیمیایی-بیولوژیکی (مانند مواد مغذی) با دقت کمتری مواجه است. همچنین نوسانات جزئی میان مقادیر شاخص‌ها در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل از پایداری مناسب برخوردار بوده است.

در مجموع، یافته‌های این بخش تأیید می‌کند که مدل QUAL2Kw می‌تواند به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد و کارآمد برای شبیه‌سازی کیفیت آب در رودخانه‌های کوهستانی با مورفولوژی پله-گوداب مورد استفاده قرار گیرد، هرچند برای افزایش دقت شبیه‌سازی پارامترهای حساس به تلاطم مانند اکسیژن محلول، تغذیه مدل با خروجی‌های هیدرولیکی با تفکیک‌پذیری بالاتر مانند مدل HEC-RAS می‌تواند عملکرد آن را بهبود بخشد.

۳-۳- تحلیل پروفیل‌های طولی در شرایط کم‌آبی و پرآبی

به‌منظور ارائه ارزیابی عملکرد مدل در طول بازه مطالعاتی، پروفیل‌های طولی پارامترهای شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در شرایط مختلف هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفتند. این تحلیل با شرایط جریان کم آبی آغاز می‌شود و نتایج آن در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- پروفیل‌های طولی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی در شرایط کم آبی. (الف) دما، (ب) اکسیژن محلول، (ج) نیترات و (د) فسفر غیرآلی

با توجه به شکل‌های ۷ ج و ۷ د، مدل QUAL2Kw دقت مناسبی در شبیه‌سازی روندهای مکانی نیترات و فسفر غیرآلی نشان داد. مسیر تغییرات شبیه‌سازی شده توسط این مدل در طول بازه مورد مطالعه به طور مطلوبی با داده‌های مشاهداتی انطباق دارد. این موضوع نشان می‌دهد که فرایندهای انتقال-انتشار برای این دو پارامتر، علی‌رغم پیچیدگی مورفولوژی بستر، در چارچوب مدل QUAL2Kw به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی شده‌اند. این نتیجه، ناشی از افزایش زمان ماند جریان است که در حالت کم آبی افزایش یافته و واکنش‌های سینتیکی فرصت کافی برای تأثیرگذاری پیدا می‌کنند. از سوی دیگر، شدت تلاطم و تغییرات ناگهانی هیدرولیکی کاهش یافته و بنابراین ساختار میانگین‌گیری طولی مدل QUAL2Kw که برای شرایط جریان یکنواخت طراحی شده، در این حالت عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

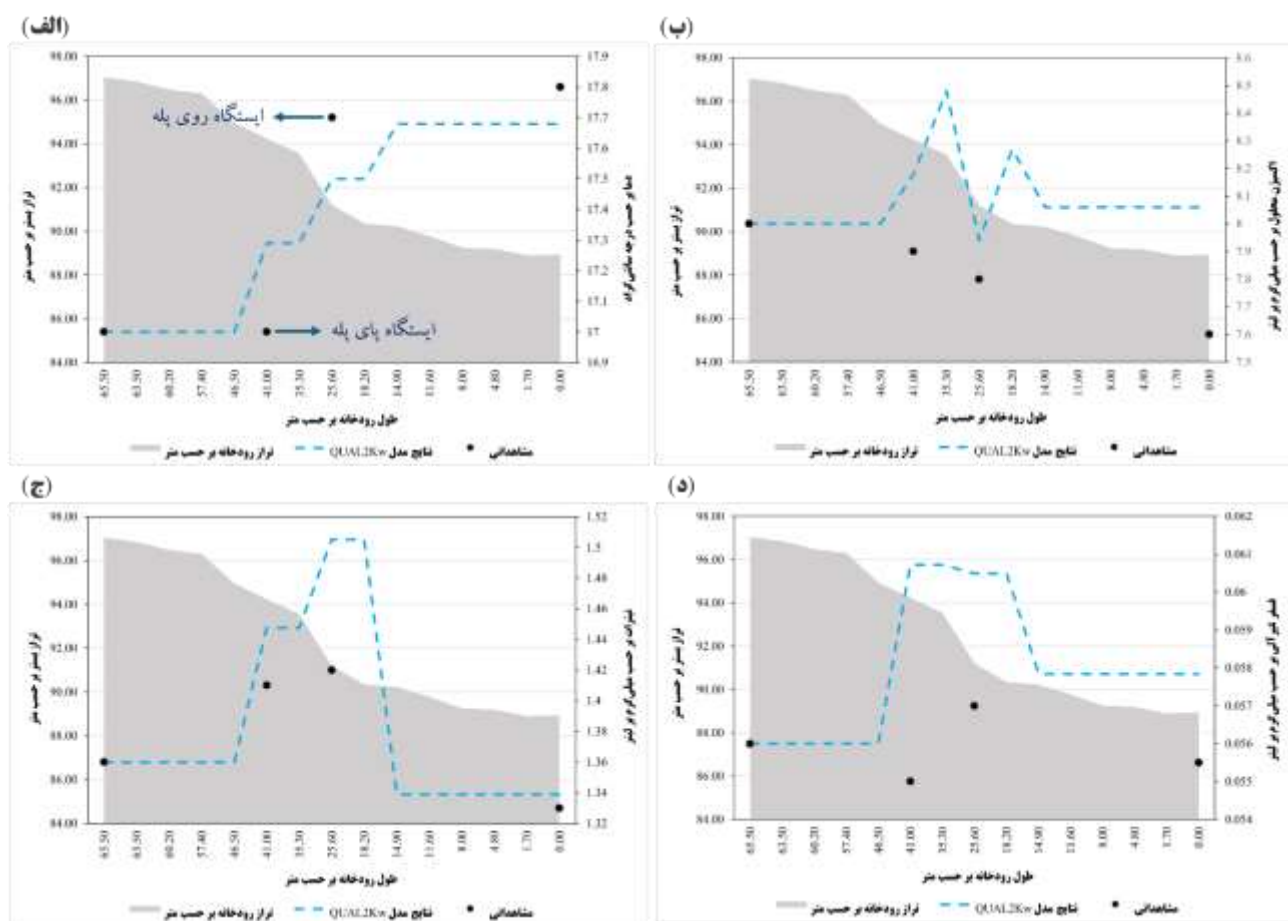
با این حال، در شبیه‌سازی اکسیژن محلول، به‌ویژه در مجاورت پله، محدودیت‌هایی در عملکرد مدل QUAL2Kw مشاهده می‌شود. اگرچه این مدل در بخش بالادست نتایجی مشابه با روند داده‌های مشاهده شده ارائه می‌دهد، اما بلافاصله در پایین دست پله، غلظت اکسیژن محلول را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. این کم‌برآوردی می‌تواند ناشی از ساده‌سازی مدل در شبیه‌سازی سرعت انتقال و فرایندهای هوادهی در شرایط شیب زیاد باشد. این شرایط متأثر از شبیه‌سازی دمای آب نیز می‌باشد که مدل در شبیه‌سازی مقادیر آن علی‌رغم شناسایی روند، مقادیر را کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد نموده است. همچنین در خصوص پارامتر دما نیز، باید توجه داشت که مدل QUAL2Kw از رویکرد میانگین‌گیری طولی برای پارامترهای هیدرولیکی استفاده می‌کند و هندسه منشوری^۱ را برای مقاطع رودخانه در نظر می‌گیرد. این بدان معناست که مدل، عمق، عرض و سطح مقطع جریان را در طول هر المان به‌صورت یکنواخت فرض می‌کند. در شرایط کم‌آبی، تغییرات عمق و سطح مقطع جریان در ساختار پله-گوداب شدید است به‌گونه‌ای که روی پله عمق کاهش یافته و در پای پله عمق افزایش می‌یابد. این تغییرات موضعی بر سطح تماس آب با هوا و در نتیجه

^۱ Prismatic geometry

بر تبادل حرارت بین آب و محیط تأثیر مستقیم می‌گذارند. رویکرد میانگین‌گیری طولی در QUAL2Kw این تغییرات ناگهانی را به‌خوبی منعکس نمی‌کند و در نتیجه، مدل در محاسبه تبادل حرارت در نواحی پله-گوداب دچار خطا می‌شود.

به طور کلی و با توجه به کوتاه بودن بازه مورد مطالعه، یعنی حدود ۶۶ متر، زمان ماند جریان کم است. در چنین شرایطی، فرایندهای نسبتاً کند بیوشیمیایی و سینتیکی که در مدل QUAL2Kw لحاظ می‌شوند، تأثیر چندانی بر تغییرات سریع کیفیت آب ندارند. در این مقیاس، تغییرات مکانی پارامترهایی مانند اکسیژن محلول و فسفر غیرآلی بیشتر تحت تأثیر فرایندهای فیزیکی هیدرودینامیکی، از جمله هوادهی در پای پله قرار می‌گیرند. بنابراین، اگرچه QUAL2Kw از نظر نمایش فرایندهای سینتیکی کیفیت آب ساختاری نسبتاً کامل دارد، اما به دلیل ساده‌سازی‌های هیدرولیکی، ممکن است در محیط‌های پله-گودابی با شیب زیاد، دقت کمتری در شبیه‌سازی تغییرات موضعی نشان دهد.

پس از ارزیابی شرایط کم‌آبی، به‌منظور بررسی پایداری و قابلیت اطمینان مدل، شرایط پرآبی نیز مورد تحلیل قرار گرفت. شکل (۸) تغییرات طولی پارامترهای کیفیت آب را برای شرایط پرآبی نشان می‌دهد.



شکل ۸- پروفیل‌های طولی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی در شرایط پر آبی. (الف) دما، (ب) اکسیژن محلول، (ج) نیترات و (د) فسفر غیرآلی

همان‌طور که در شکل ۸ الف قابل مشاهده است، پروفیل شبیه‌سازی‌شده دما توسط مدل QUAL2Kw تطابق قابل‌قبولی با داده‌های میدانی دارد. در شرایط پرآبی، غلظت نیترات و فسفر غیرآلی مقداری بیشتر از شرایط کم‌آبی برآورد شده است که این افزایش عمدتاً ناشی از افزایش غلظت در نتیجه افزایش دبی و آزادسازی مواد مغذی ته‌نشین شده می‌باشد. در خصوص اکسیژن محلول نیز شبیه‌سازی روند تغییرات چهار نوساناتی شده است. نوسانات مشاهده شده عمدتاً ناشی از میانگین‌گیری طولی پارامترهای هیدرولیکی است. این موضوع باعث می‌شود که تغییرات ناگهانی در ساختارهای پله-گوداب به خوبی شبیه‌سازی نشود و مدل در فرآیند هوادهی در بالا و پایین پله با نوساناتی مواجه شود. به طور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی در حالت پر آبی حاکی از آن است که عملکرد مدل در این شرایط با خطای بیشتری همراه بوده و دچار بیش‌برآوردی به‌خصوص در محل ساختار پله-گوداب، شده است. این الگوی خطا به

دلیل افزایش دبی، عمق و سرعت جریان، که منجر به کاهش زمان ماند و غلبه فرآیندهای فیزیکی (تلاطم، اختلاط و هوادهی) بر واکنش‌های سینتیکی می‌شود، رخ می‌دهد چرا که ساختار میانگین‌گیری طولی مدل QUAL2Kw که برای جریان یکنواخت طراحی شده است، نمی‌تواند این تغییرات ناگهانی را منعکس کند و با ساده‌سازی تلاطم، غلظت پارامترها را بیش از حد واقعی برآورد می‌نماید. در نهایت، به منظور بررسی تأثیر ساختار پله-گوداب بر فرآیند هوادهی و تحلیل علت خطاهای مشاهده‌شده در شبیه‌سازی اکسیژن محلول، ضریب هوادهی (K_a) در محل پله با استفاده از خروجی‌های مدل QUAL2Kw (سرعت و عمق جریان) و معادله تجربی اوکانر و دابینز (۱۹۵۸) محاسبه گردید. مقادیر محاسبه‌شده K_a در جدول (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که این محاسبه صرفاً در محل پای پله (به‌عنوان حساسترین نقطه از نظر تغییرات هیدرولیکی) انجام شده است. همچنین شایان ذکر است، به دلیل ساختار میانگین‌گیری طولی مدل QUAL2Kw که رودخانه را به مجموعه‌ای از بازه‌ها با مشخصات هیدرولیکی یکسان تقسیم می‌کند و برای هر بازه، یک مقدار میانگین برای عمق، سرعت و دبی در نظر می‌گیرد، بنابراین، ضریب هوادهی که تابعی از سرعت و عمق است، بر اساس همین مقادیر میانگین، برای کل طول بازه یکسان در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- مقادیر محاسباتی ضریب هوادهی مختص هر سناریو در محل پای پله با استفاده از معادله تجربی اوکانر و دابینز

سناریو	مقادیر ضریب هوادهی (روز ^{-۱})
۱	۱۰/۳۵
۲	۱۱/۴۹
۳	۲/۸۲
۴	۸/۸۹
۵	۱۰/۴۰
۶	۱۳/۱۳
۷	۱۲/۶۹
۸	۱۳/۲۹

مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۵)، مقادیر محاسبه‌شده K_a در محدوده ۲/۸۲ تا ۱۳/۲۹ (روز^{-۱}) قرار دارند. این دامنه نسبتاً گسترده، نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه شرایط هیدرولیکی متفاوت بر پتانسیل هوادهی در ساختار پله-گوداب است. کمترین مقدار و بیشترین مقدار بیانگر تغییرات شدید پارامترهای هیدرولیکی (سرعت و عمق) در سناریوهای مختلف است که خود ناشی از تغییرات دبی جریان در شرایط کم‌آبی و پرآبی می‌باشد.

بر اساس رابطه اوکانر و دابینز، ضریب هوادهی با سرعت جریان رابطه مستقیم و با عمق جریان رابطه معکوس دارد. بنابراین، سناریوهایی که در آن‌ها سرعت بیشتر و عمق کمتر است (معمولاً شرایط کم‌آبی)، مقادیر K_a بالاتری دارند. به‌عنوان مثال، سناریوهای ۶، ۷ و ۸ با مقادیر ۱۳/۱۳، ۱۲/۶۹ و ۱۳/۲۹ (روز^{-۱}) بالاترین نرخ هوادهی را نشان می‌دهند که حاکی از شرایط کم‌آبی با عمق کم و سرعت نسبتاً بالا در این سناریوها می‌باشد. در مقابل، سناریوهای ۳ و ۴ با مقادیر ۲/۸۲ و ۸/۸۹ (روز^{-۱}) پایین‌ترین نرخ هوادهی را دارند که مربوط به شرایط پرآبی با عمق بیشتر و سرعت کمتر می‌باشند. این الگو با اصول هیدرولیکی همخوانی دارد چرا که در شرایط کم‌آبی، کاهش عمق جریان باعث افزایش نسبی سرعت و در نتیجه افزایش ضریب هوادهی می‌شود.

مقادیر محاسبه‌شده K_a در جدول (۵)، رویکرد مهمی درباره علت خطاهای مشاهده‌شده در شبیه‌سازی اکسیژن محلول توسط مدل QUAL2Kw ارائه می‌دهد. در شرایط کم‌آبی که نرخ هوادهی بالا است، مدل QUAL2Kw در پای پله دچار کم‌برآوردی اکسیژن محلول شده است. این موضوع نشان می‌دهد که رویکرد میانگین‌گیری طولی مدل، تغییرات ناگهانی سرعت و عمق را در ساختار پله-گوداب به‌خوبی منعکس نمی‌کند و در نتیجه، نرخ هوادهی واقعی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید. در مقابل، در شرایط پرآبی که نرخ هوادهی پایین‌تر است، مدل دچار بیش‌برآوردی اکسیژن محلول می‌شود که نشان‌دهنده ساده‌سازی مدل در شبیه‌سازی فرآیند هوادهی در شرایط تلاطم شدید و عمق بیشتر می‌باشد.

نتایج این پژوهش حاکی از دقت قابل قبول مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب در رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند به‌خصوص در شرایط کم‌آبی است. شایان توجه است که مدل QUAL2Kw در پژوهش‌های مختلفی به عنوان ابزاری برای

شبیه‌سازی کیفیت آب استفاده شده است. به عنوان مثال Kannel و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل QUAL2Kw در رودخانه بگمتی نپال، موفق به شبیه‌سازی قابل قبول پارامترهای کیفی از جمله اکسیژن محلول شدند و نشان دادند که مدل با وجود برخی مغایرت‌ها، داده‌های میدانی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. همچنین Oliveira و همکاران (۲۰۱۲) نیز مدل QUAL2Kw را در رودخانه سرتیما پرتغال به کار گرفتند و نتیجه گرفتند که مدل می‌تواند پاسخ رودخانه به بارهای مختلف نیتروژن و فسفر را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نماید که این یافته‌ها با نتایج پژوهش حاضر در خصوص عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی نیترات و فسفر غیرآلی در شرایط کم‌آبی هم‌خوانی دارد.

همچنین در مطالعات داخلی، شاهی‌نژاد همکاران (۱۴۰۰) نیز ارزیابی مدل QUAL2Kw را در شبیه‌سازی کیفی رودخانه خرم‌آباد انجام دادند و نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی بود.

با این حال، پژوهش حاضر دارای تفاوت‌هایی با مطالعات مذکور است. نخست آنکه، اکثر پژوهش‌های پیشین بر روی رودخانه‌های کم‌شیب و با جریان نسبتاً یکنواخت متمرکز بوده‌اند، در حالی که مطالعه حاضر به‌طور خاص بر روی رودخانه کوهستانی با مورفولوژی پله-گوداب که دارای تغییرات ناگهانی سرعت و عمق و تلاطم شدید است، متمرکز شده است. دوم آنکه، در پژوهش حاضر عملکرد مدل به‌طور هم‌زمان در دو شرایط هیدرولوژیکی کم‌آبی و پرآبی مورد ارزیابی قرار گرفته است، در حالی که در اغلب مطالعات پیشین، مدل‌سازی تنها بر اساس یک رژیم هیدرولوژیکی (معمولاً کم‌آبی) انجام شده است. سوم آنکه، در این پژوهش با تحلیل پروفیل‌های طولی پارامترهای کیفی در چهار ایستگاه نمونه‌برداری (بالادست، روی پله، پای پله و پایین‌دست)، الگوی خطای مدل در مواجهه با تغییرات ناگهانی هیدرولیکی ناشی از ساختار پله-گوداب به‌صورت مکانی شناسایی و تبیین شد که حاکی از آن بود که افزایش تلاطم (که در شرایط پر آبی محسوس‌تر است) در نواحی پله منجر به افزایش خطاهای شبیه‌سازی می‌شود، نکته‌ای که در تحقیقات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۴- نتیجه‌گیری

ارزیابی عملکرد مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه کوهستانی با مورفولوژی پله-گوداب نشان داد که این مدل، علی‌رغم ساختار یک‌بعدی و رویکرد میانگین‌گیری طولی، می‌تواند در شرایط کم‌آبی برای پارامترهای نیترات و فسفر غیرآلی عملکرد مطلوبی ارائه دهد. این نتیجه در شرایط کم‌آبی ناشی از افزایش زمان ماند جریان است که در حالت کم‌آبی افزایش یافته و واکنش‌های سینتیکی فرصت کافی برای تأثیرگذاری پیدا می‌کنند. از سوی دیگر، شدت تلاطم و تغییرات ناگهانی هیدرولیکی کاهش یافته و بنابراین ساختار میانگین‌گیری طولی مدل QUAL2Kw که برای شرایط جریان یکنواخت طراحی شده است، در این حالت عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. شایان ذکر است که عملکرد ضعیف‌تر مدل در شبیه‌سازی دما و اکسیژن محلول در شرایط کم‌آبی، تحت تأثیر فرآیندهای فیزیکی موضعی (تبادل حرارت سطحی و هوادهی در پای پله) هستند که به دلیل هندسه منشوری و رویکرد میانگین‌گیری طولی مدل QUAL2Kw، به خوبی شبیه‌سازی نمی‌شوند.

در شرایط پرآبی، عملکرد مدل با خطای بیشتری همراه بود و در هر چهار پارامتر کیفی، به‌خصوص در محل ساختار پله-گوداب، بیش‌برآوردی مشهود بود. این الگوی خطا به دلیل افزایش دبی، عمق و سرعت جریان، که منجر به کاهش زمان ماند و غلبه فرآیندهای فیزیکی (تلاطم و اختلاط) بر واکنش‌های سینتیکی می‌شود، رخ می‌دهد چرا که ساختار میانگین‌گیری طولی مدل QUAL2Kw که برای جریان یکنواخت طراحی شده است، نمی‌تواند این تغییرات ناگهانی را منعکس کند و با ساده‌سازی تلاطم، غلظت پارامترها را بیش از حد واقعی برآورد می‌نماید.

بر اساس یافته‌ها، مدل QUAL2Kw می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد و کم‌هزینه برای مطالعات اولیه و شناسایی روند کلی کیفیت آب در رودخانه‌های کوهستانی مخصوصاً در شرایط کم‌آبی مورد استفاده قرار گیرد، به‌ویژه در شرایطی که استفاده از مدل‌های سه‌بعدی به لحاظ زمانی و اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد. اما برای کاربرد در شرایط پرآبی و بازه‌های پیچیده هیدرولیکی با تلاطم شدید مانند ساختار پله-گوداب، استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی می‌تواند منجر به نتایج دقیق‌تر شود.

۵- اعلامیه‌ها

حمایت مالی:

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از سازمان‌های دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع:

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تضاد منافع در این پژوهش وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی:

این مقاله شامل هیچ‌گونه مطالعه‌ای بر روی انسان یا حیوان نیست که نیاز به اخذ مجوز اخلاقی داشته باشد.

رضایت آگاهانه:

مطالعه حاضر نیازمند اخذ رضایت آگاهانه نبوده است.

دسترسی به داده‌ها:

داده‌های این پژوهش بنا به درخواست منطقی از نویسنده مسئول قابل دسترسی است.

۶- منابع و مراجع

1. Ejigu, M. T. (2021). Overview of water quality modeling. Cogent Engineering, 8(1), Article 1891711. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1891711>
2. Sanchez Hernandez, E.P., Colmenarejo, M.F., Vicente, J., Rubio, A., et al., Use of the Water Quality Index and Dissolved Oxygen Deficit as Simple Indicators of Watershed Pollution. Ecological Indicators, 2007. 7(2): p. 315-328. DOI: 10.1016/j.ecolind.2006.02.005.
3. Viviroli, D., Archer, D.R., Buytaert, W., Fowler, H.J., Greenwood, G.B., Hamlet, A.F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M.I., López-Moreno, J.I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M., and Woods, R., Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. Hydrology and Earth System Sciences, 2011. 15(2): p. 471-504. DOI: 10.5194/hess-15-471-2011.
4. Schmeller, D.S., Loyau, A., Bao, K., Brack, W., Chatzinotas, A., De Vleeschouwer, F., Friesen, J., Gandois, L., Hansson, S.V., Haver, M., Le Roux, G., Shen, J., Teisserenc, R., and Vredenburg, V.T., People, pollution and pathogens – Global change impacts in mountain freshwater ecosystems. Science of The Total Environment, 2018. 622-623: p. 756-763. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.006.
5. Bui, H. H., Ha, N. H., Nguyen, T. N. D., Nguyen, A. T., Pham, T. T. H., Kandasamy, J., & Nguyen, T. V. (2019). Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. Ecohydrology & Hydrobiology, 19(2), 210-223, DOI: 10.1016/j.ecohyd.2019.03.005.
6. Pelletier, G. J., Chapra, S. C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. Environmental Modelling & Software, 21(3), 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.002>
7. Ye, H., Guo, S., Li, F., & 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), 301-311, DOI: 10.1007/s11769-013-0586-9.

8. Cho, J.H. and Ha, S.R., Parameter optimization of the QUAL2K model for a multiple-reach river using an influence coefficient algorithm. *Science of The Total Environment*, 2010. **408**(8): p. 1985-1991. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.01.025.
9. Chapra, S. C., Pelletier, G. J., & 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.
۱۰. طاهری سودجانی، ه.، براتی، خ. و شایان‌نژاد، م.، معرفی معادلات اساسی و راهنمای کاربردی مدل Qual2kw، مجله آب و توسعه پایدار، ۱۳۹۴، ۲ (۲): ص. ۳۵-۴۲. (DOI: <https://doi.org/10.22067/jwsd.v2i2.47011>)
۱۱. شاه‌نژاد، ب.، ایزدی، ز.، و جوادی، ب. ارزیابی مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی کیفی رودخانه خرم‌آباد، مجله هیدروژئومورفولوژی، ۱۴۰۰، ۲۶ (۸)، ص. ۱۶۵-۱۸۱. (DOI: [10.22034/hyd.2021.44490.1576](https://doi.org/10.22034/hyd.2021.44490.1576))
۱۲. امامی‌قرا، ف.، فضل‌اولی، ر.، و خوش‌روش، م. بررسی روند تغییرات کیفی رودخانه نکا با استفاده از مدل QUAL2Kw در پایین‌دست سد گلورد، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۴۰۲، ۱۴ (۱)، ص. ۲۶۶-۲۸۳. DOI: 10.22125/iwe.2023.369028.1686
13. Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R., & Khan, S. P. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*, 202(3-4), 503-517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.12.033>
14. Babamiri, O., Vanaei, A., Guo, X., Wu, P., et al., Numerical Simulation of Water Quality and Self-Purification in a Mountainous River Using QUAL2KW. *Journal of Environmental Informatics*, 2021. **37**(1): p. 26-35. DOI: 10.3808/jei.202000435.
۱۵. وانی، ع.، معروفی، ص. و آذری، آ.، شبیه‌سازی آلودگی در رودخانه‌های پر شیب کوهستانی با استفاده از مدل QUAL2Kw، علوم و مهندسی آبیاری، ۱۴۰۱، ۴۵ (۱)، ص. ۱۹-۳۴. (DOI: [10.22055/jise.2017.21674.1557](https://doi.org/10.22055/jise.2017.21674.1557))
16. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill
17. O'Connor, D. J., & Dobbins, W. E. (1958). Mechanism of reaeration in natural rivers. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 123(1), 641-666.