

مدل WASP دقت بسیار خوبی در شبیه‌سازی رودخانه اترک واقع در محدوده حصارگرم‌خوان داشته و می‌توان آن را به‌عنوان یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی در رودخانه پیشنهاد کرد.

کلیدواژه: رودخانه اترک، حصارگرم‌خوان، انترکوکوس فکالیس، کلی‌فرم‌کل، اشیریشیاکلی.

ارزیابی کاربرد مدل WASP در بررسی تأثیر آلودگی انسانی بر کیفیت آب (مطالعه موردی: رودخانه اترک)

غلامحسین اکبری<sup>۱\*</sup>، صادق پرتانی<sup>۲</sup> و ایمان لطفی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۸/۱۷ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

DOI/ 10.22034/WMJI.2026.2077211.1133

#### مقدمه

آب مایه حیات و بسیار ارزشمند است، هم‌چنین نقش آن در رسیدن به توسعه پایدار (به‌واسطه موارد مصرف در صنعت، کشاورزی و خدمات) بسیار مهم می‌باشد، کمبود آب و عدم مدیریت صحیح منابع آب قابل‌دسترس، بحران آبی را ایجاد می‌کند که وقوع خشک‌سالی‌ها و برداشت بی‌رویه باعث تشدید آن می‌گردد و دارای ابعاد مختلف زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است [۲۰]. مسئله‌ی مهم در جوامع شهری و روستایی منابع آب است. منابع آب با بخش کشاورزی ارتباط تنگاتنگی دارد به‌طوری‌که بدون منابع آب اصولاً هیچ نوع فعالیت کشاورزی امکان‌پذیر نمی‌باشد و برای کشاورزی اولین و مهم‌ترین معیار منابع آب است [۲]. کشاورزی به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین فعالیت‌ها در جوامع محسوب می‌شود زیرا این بخش غذای جمعیت را تأمین می‌کند و کشاورزی عامل پایداری جمعیت در مناطق روستایی را سبب می‌شود منابع آب بر بخش کشاورزی اثر مستقیم دارد، کشاورزی هم باعث پایداری جمعیت در مناطق روستایی می‌شود [۶]. آلودگی آب از جمله بزرگ‌ترین مشکلات مردم جهان است که با توجه به کمبود آب شیرین به یک معضل مهم تبدیل شده است [۱۷]. تحقیقات در آمریکا نشان می‌دهد که نزدیک به نیمی از آب قابل شرب در این کشور با آلاینده‌های مختلف آلوده شده‌اند. عوامل انسانی و تغییرات اقلیمی و الگوی بارش از اصلی‌ترین دلایل آلودگی آب هستند [۲۶]. در این راستا، کشاورزی به‌عنوان عامل اصلی اختلافات محیط‌زیستی و اجتماعی است [۴]. زیست‌بوم‌های حساس به آب و خدمات آن‌ها اغلب به دلیل کمبود آب توسط انسان آسیب می‌بیند [۸]. باین‌وجود، آن‌ها به‌اندازه کافی در ارزیابی‌های پایداری یا ریسک گنجانده نشده‌اند و در توزیع منابع آب موجود نادیده گرفته می‌شوند [۵].

در حال حاضر، عامل اصلی مؤثر بر کیفیت آب‌های سطحی، فعالیت‌های انسانی است [۲۹]. از آنجایی‌که آلودگی منبع نقطه‌ای تا حدی کنترل شده است، آلودگی غیر نقطه‌ای به مشکل جدیدی

#### چکیده

آلودگی آب‌های سطحی عموماً در اثر عوامل بیماری‌زا، مواد مغذی، پلاستیک‌ها، مواد شیمیایی مانند فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، تخلیه زباله‌های صنعتی به رودخانه‌ها ایجاد می‌شود هم‌چنین آب آشامیدنی با کیفیت خوب برای زندگی ضروری است. لذا در این پژوهش از مدل WASP برای کیفیت آب رودخانه اترک واقع در محدوده حصارگرم‌خوان بجنورد استفاده شده است. بدین منظور در ماه‌های فروردین تا خرداد و تیر تا آذر سال ۱۴۰۲ پارامترهای انترکوکوس فکالیس و کلی‌فرم‌کل و اشیریشیاکلی و دمای آب و نیتروژن نترات و نیتروژن کل شبیه‌سازی شدند. شبیه‌سازی پارامترهای فوق در سه مرحله، مرحله اول در ماه‌های تیر تا آذر و مرحله دوم در ماه‌های فروردین تا خرداد و مرحله سوم نیز نیتروژن کل در ماه‌های فروردین تا خرداد و تیر تا آذر به دلیل مقایسه ماه‌های مختلف سال انجام شد. به‌طوری‌که نتایج حاصل از آن تقریباً مشابه نتایج حاصل از مشاهدات اندازه‌گیری شده بود و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) هم این موضوع را تأیید کرد. برای مرحله اول و دوم نتایج مربوط به دقت مدل نشان‌دهنده‌ی خطای کم‌تر از ۰/۰۸ برای شبیه‌سازی پارامترها و هم‌چنین خطای کم‌تر از ۰/۰۴ برای اشیریشیاکلی و خطای کم‌تر از ۰/۰۲ برای نیتروژن نترات است که از دقت قابل قبولی به شمار می‌رود. برای مرحله سوم نیز نتایج مربوط به دقت مدل نشان‌دهنده‌ی خطای کم‌تر از ۰/۰۴ برای شبیه‌سازی نیتروژن کل است که از دقت قابل قبولی به شمار می‌رود. بر اساس نتایج فوق

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران، (\* نویسنده مسئول)  
Email: akbari@ub.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

۳- کارشناس ارشد گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

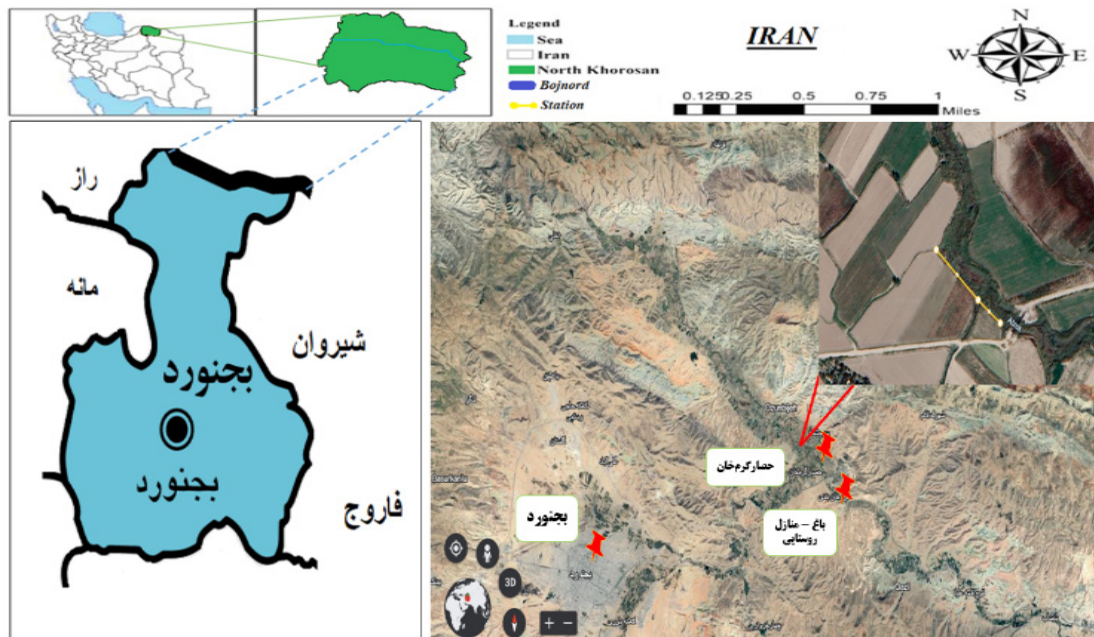
تبدیل می‌شود که نیاز به حل فوری دارد [۳]. به‌ویژه تغییر کاربری و پوشش زمین (LUCC) که عامل اصلی مؤثر بر آلودگی غیر نقطه‌ای است [۷]. هم‌چنین، تغییر شرایط اقلیمی در آینده ممکن است منجر به برخی عدم قطعیت‌ها در بهبود کیفیت محیط آب، پیشگیری از خطرات و اثربخشی کنترل شود [۳۰]. به‌طور خاص، تحت تغییر اقلیم، شدت و فراوانی رویدادهای شدید آب و هوایی مانند بارندگی‌های شدید، سیل و خشک‌سالی افزایش می‌یابد که احتمال بروز آلودگی را افزایش می‌دهد و هم‌چنین دشواری پیشگیری از خطرات آب و محیط‌زیست را افزایش می‌دهد [۹]. از این‌رو، تغییرات آب‌وهوا و تغییر کاربری و پوشش زمین نیروهای محرکه کلیدی برای تکامل کیفیت آب‌های سطحی هستند [۲۸]. آلاینده‌های آب از منابع نقطه‌ای یا منابع پراکنده می‌آیند. منبع نقطه‌ای یک لوله یا کانال است، مانند لوله‌هایی که برای تخلیه از تأسیسات صنعتی یا سامانه فاضلاب شهری استفاده می‌شود [۱۱]. منبع پراکنده (یا غیر نقطه‌ای) یک منطقه نامحدود بسیار وسیع است که از آن آلاینده‌های مختلفی وارد بدنه آبی می‌شود (مانند رواناب از یک منطقه کشاورزی) [۲۵]. کنترل منابع نقطه‌ای آلودگی آب نسبت به منابع پراکنده آسان‌تر است، زیرا آب آلوده جمع‌آوری شده و به یک نقطه منتقل شده است تا بتوان آن را تصفیه کرد [۱۹]. کنترل آلودگی ناشی از منابع پراکنده دشوار است و علی‌رغم پیشرفت‌های زیاد در ساخت کارخانه‌های مدرن تصفیه فاضلاب، منابع پراکنده همچنان بخش بزرگی از مشکلات آلودگی آب را ایجاد می‌کنند [۲۷]. در ۵۰ سال گذشته، هم بارش سالانه و هم رواناب طبیعی در حوضه رودخانه لوانه در فرانسه روند کاهشی داشته است. باین‌حال، تقاضا برای منابع آب با توسعه اجتماعی و اقتصادی افزایش یافته است [۲۴]؛ بنابراین، وضعیت خشک‌سالی در حوضه رودخانه به‌طور فزاینده‌ای شدید شده است و هم‌چنین کیفیت آب و شرایط هیدرولوژیکی همچنان رو به وخامت است. بر اساس تجزیه و تحلیل آماری کیفیت آب در ۱۰ سال اخیر، رودخانه‌های آلوده (کلاس IV و پایین‌تر) ۴۳/۲ درصد از کل رودخانه‌های ارزیابی شده را تشکیل می‌دهند. در پژوهشی تجرو و همکاران [۱۸] با عنوان شبیه‌سازی دینامیکی کیفیت آب در رودخانه‌ها، کاربرد مدل WASP<sup>1</sup> در رودخانه نالون اسپانیا را مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که این مطالعه باهدف توسعه مدل‌های دینامیکی کیفیت آب برای بخش‌های بالایی رودخانه نالون در اسپانیا انجام شد. کارایی این شبیه‌سازی در برنامه‌ریزی بهداشت حوضه نالون می‌باشد. این مدل برای مطالعه نوسانات روزانه کیفیت آب و تأثیر سرریز فاضلاب ترکیبی بر سیستم آبی استفاده خواهند شد. مدل حالت پایدار با مطالعات میدانی خاص کالیبره شد. تمام داده‌های مطالعات میدانی و ثابت‌ها و پارامترهای سینتیکی برای مدل پویا استفاده شده‌اند. تغییرات روزانه اکسیژن محلول مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهای BOD، آمونیاک، نیتروژن آلی، نترات و نیتروژن کل شبیه‌سازی شده‌اند. مقادیر شبیه‌سازی شده مدل بسیار

1. Water Quality Analysis Simulation Program

نزدیک به مقادیر مشاهداتی به دست آمد که از برتری مدل WASP در ارزیابی کیفیت آب بوده و هم‌چنین مدلی قابل قبول برای ارزیابی کیفیت آب می‌باشد. در مطالعه دیگر اسوارنکر و همکاران [۱۶] مدل‌سازی کیفیت آب WASP برای کانال زهکشی آب‌های سطحی در هند را مورد بررسی قرار دادند. مشاهدات میدانی برای مشاهده پارامترهای کیفیت آب مورد بررسی، اکسیژن محلول (DO)، تقاضای اکسیژن بیولوژیکی (BOD) و تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD) در یکی از شهرهای هند و منطقه‌ی متروپلیتن مومبای انجام دادند. تجزیه و تحلیل داده نشان می‌دهد که مقادیر BOD و COD در کانال بیشتر از حداکثر مجاز است (۳۰ میلی‌گرم در لیتر برای BOD و ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر برای COD). هم‌چنین، DO کم‌تر از حد مجاز (حداقل سه میلی‌گرم در لیتر) دیده می‌شود. در نهایت مدل‌سازی WASP برای محدوده مورد بررسی به تخمین‌های بهتری از پارامترهای فاضلاب و آلودگی در رودخانه را نشان داد. در پژوهشی ماهام‌متوگلا و همکاران [۱۰] با عنوان مدل‌سازی یکپارچه برای ارزیابی بهترین شیوه‌های برای بهبود کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل WASP و MapShed را مورد بررسی قرار دادند. مکان مورد مطالعه را در حوضه آبی‌سو (Acisu Creek) واقع در کشور ترکیه انتخاب کردند. در این رودخانه پارامترهای کل فسفر و نیتروژن را مورد بررسی قرار دادند. قسمت BMP برای مدیریت مراتع و فضولات دامی منجر به کاهش بار نیتروژن کل (TN) و فسفر کل (TP) به میزان ۴۳ و ۳۴ درصد از مراتع و ۶۱/۵ و ۵۷/۹ درصد از دام‌ها شد، اما بار سالانه حوضه آبریز تنها چهار درصد کاهش یافت. قسمت ترکیبی BMP که شیوه‌های کشاورزی، مدیریت مراتع و کنترل فضولات حیوانی را هدف قرار می‌دهد، حداکثر کاهش در کل بارهای سالانه آلودگی غیر نقطه‌ای را به میزان ۳۵ درصد برای TN و ۲۹ درصد برای TP فراهم کرد. ماهیت جامع این مطالعه به پیشرفت مدل‌سازی کیفیت آب با مدل WASP کمک می‌کند و بینش‌های ارزشمندی را برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری پایدار منابع آب ارائه می‌دهد؛ بنابراین هدف این پژوهش ارزیابی کاربرد مدل WASP در بررسی تأثیر آلودگی انسانی بر کیفیت آب (مطالعه موردی: رودخانه اترک) در منطقه حصارگرم‌خوان بجنورد است که دلیل آن، اهمیت رودخانه اترک و استفاده این آب برای زمین‌های کشاورزی استان خراسان شمالی ضرورت دارد و این پژوهش توسط مدل WASP شبیه‌سازی گردیده و میانگین خطای جذر مطلق (RMSE) نیز به دست آمد و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

#### منطقه مورد مطالعه رودخانه اترک

منطقه مورد مطالعه رودخانه اترک واقع در شهرستان بجنورد محدوده حصار گرم‌خان است که با مختصات جغرافیایی طول ۵۷ درجه و ۴۸ دقیقه و عرض ۳۷ درجه و ۵۱ دقیقه و ارتفاع ۹۳۳ متر از سطح دریا در ۱۷ کیلومتری شمال شرقی این شهر قرار دارد. گرم‌خان قبل از سال ۹۲ که با ادغام روستای مجاور (حصار) تبدیل به شهر



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و نقاط نمونه برداری رودخانه اترک

زیرین را پیش‌بینی می‌کند [۱۲].  
 اساس نظری مدل WASP، بقای جرم است. یک موازنه جرمی برای برخی از اجزای کیفیت آب دلخواه با غلظت  $C$ ، بیش از حجم کنترلی با اندازه دلخواه در مختصات دکارتی، معادله فرارفت - انتشار سه‌بعدی را به همراه دارد [۲۱] که فرمول آن در ادامه نشان داده شده است.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial U_x C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial U_y C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial U_z C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_L + S_B + S_K \quad (3)$$

که در آن:

$C$ : غلظت جزء کیفیت آب،  $M/L^3$  یا  $(m^3/L^3)$

$t$ : زمان،  $T$

$U_x, U_y, U_z$ : سرعت‌های طولی، جانبی و عمودی،  $L/T$

$E_x, E_y, E_z$ : ضرایب انتشار طولی، جانبی و عمودی،  $L^2/T$

$S_L$ : نرخ بارگذاری مستقیم و پراکنده،  $M/L^3 T$

$S_B$ : نرخ بارگذاری مرزی (شامل بالادست، پایین‌دست، اعماق دریا و جو)  $M/L^3 T$

$S_K$ : نرخ تبدیل جنبشی کل. مثبت منبع، منفی سینک،  $M/L^3 T$  است.

هم‌چنین میانگین خطای جذر مطلق (RMSE) پس از شبیه‌سازی نرم‌افزار مدل WASP انتخاب شد که فرمول آن در زیر نشان داده شده است.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{NS} * \frac{1}{J} \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^J \left( \frac{P_{obs} - P_{est}}{n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

زمان اندازه‌گیری در سه فصل بهار و تابستان و پاییز سال ۱۴۰۲ و

گردید از روستاهای تابع دهستان گرم‌خان از بخش مرکزی بجنورد مرکز استان خراسان شمالی به حساب می‌آید. این شهر اکنون بخشی هم به نام گرم‌خان دارد. در شکل (۱) محدوده مورد مطالعه رودخانه اترک نشان داده شده است.

#### مواد و روش‌ها

مدل WASP که ساختار دقیق آن در ادامه این پژوهش توضیح داده شده است، اغلب در مدل‌سازی کیفیت آب استفاده می‌شود. در حال حاضر، نسل هشتم این مدل در دسترس است. مدل برنامه شبیه‌سازی تحلیل کیفیت آب (WASP) توسط USEPA در اوایل دهه ۱۹۸۰ توسعه یافت و دارای سابقه طولانی توسعه و کاربرد در ایالات متحده آمریکا و سایر کشورهای جهان است [۱]. WASP، یک چارچوب کلی موازنه جرم پویا برای مدل‌سازی سرنوشت و انتقال آلاینده در آب‌های سطحی است. WASP قادر است در یک دو یا سه‌بعدی با جابجایی انتقالی و پراکنده بین محفظه‌های فیزیکی گسسته یا "بخش‌ها" برای تقریباً هر نوع بدنه آبی اعمال شود [۲۳]. همین‌طور WASP به کاربر اجازه می‌دهد تا سیستم‌های ۱، ۲ و ۳ بعدی و انواع مختلفی از آلاینده‌ها را بررسی کند [۱۳]. متغیرهای حالت برای ماژول‌های داده‌شده در ادامه آورده شده است [۲۲]. فرآیندهای زمان متغیر فرارفت، پراکنده‌گی، بارگذاری جرمی نقطه‌ای و پراکنده و تبادل مرزی در مدل نشان داده شده است [۱۴]. هم‌چنین WASP می‌تواند با مدل‌های هیدرودینامیکی و انتقال رسوب مرتبط شود که می‌تواند جریان، سرعت عمق، دما، شوری و شار رسوب را فراهم کند [۱۵]. این نسخه از WASP شامل مدل دیاژنز رسوب مرتبط با مدل فرعی سرشاری غذایی (Eutrophication) پیشرفته است که تقاضای اکسیژن رسوب و شار مواد مغذی از رسوبات

داده‌های رودخانه اترک از اداره آب منطقه‌ای استان خراسان شمالی می‌باشد.

### نتایج و بحث

در ابتدا شاخص‌های موردبررسی به شرح جدول زیر ارائه می‌گردد. مرحله اول برای ماه‌های تیر تا آذر ۱۴۰۲ و مرحله دوم برای ماه‌های فروردین تا خرداد ۱۴۰۲ و مرحله سوم برای ماه‌های تیر تا آذر ۱۴۰۲ و فروردین تا خرداد ۱۴۰۲ می‌باشد. این مراحل به دلیل مقایسه دو فصل کم‌بارش سال نسبت به فصل بارش بیشتر سال که میزان آلودگی در این فصول بررسی شود است.

جدول ۱: شاخص‌های مورد استفاده در مراحل مختلف

شاخص	واحد	اول	دوم	سوم
نیترژن نیترات	mg L <sup>-1</sup>	✓	✓	
فیزیکوشیمیایی				✓
نیترژن کل				
انتروکوکوس فکالیس		✓	✓	
کل کلی‌فرم‌ها	CFU per 100 mL	✓	✓	
میکروبیولوژیک				
اشریشیاکلی		✓	✓	

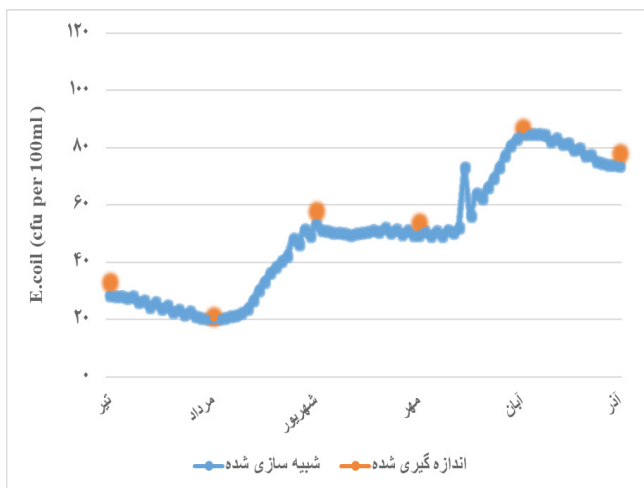
### واسنجی مدل

داده‌های هواشناسی و کیفیت آب و شیب و زبری مورد استفاده برای ساخت مدل برای مرحله ۱ (به دلیل مقایسه ماه‌های مختلف سال) با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده استفاده شد. در جدول ۲ مقادیر نیترژن نیترات و اشریشیاکلی (E.Coil) در ماه‌های تیر تا آذر سال ۱۴۰۲ به دست آورده شده است. نمودارهای زیر شاخص‌های کالیبره شده اشریشیاکلی و نیترژن نیترات را در مدل WASP نمایش می‌دهد.

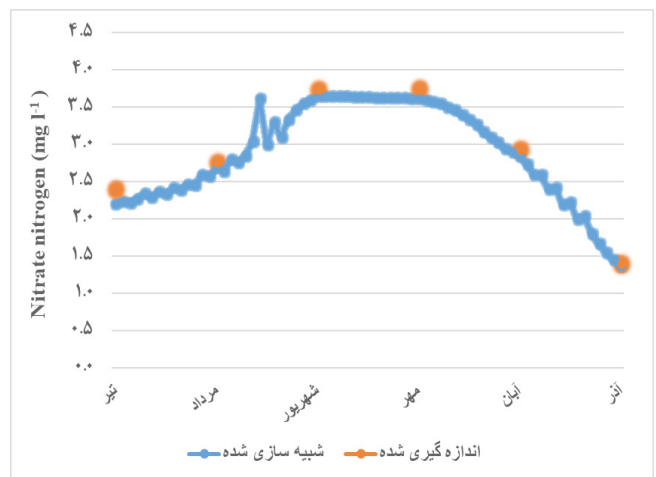
همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است برای اشریشیاکلی بیش‌ترین مقدار در آبان ماه و کم‌ترین مقدار در مردادماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در آبان ماه با ۸۴/۶۸ و کم‌ترین مقدار در مردادماه با ۱۹/۹۵ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۲) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی عالی و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۳۷۱۹ انجام دهد. هم‌چنین از شکل (۳) برای نیترژن نیترات بیش‌ترین مقدار در شهریورماه و کم‌ترین مقدار در آذرماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در شهریورماه با ۳/۷۳ و کم‌ترین مقدار در آذرماه با ۱/۳۹ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک

جدول ۲: مقادیر پارامترهای نیترژن نیترات و اشریشیاکلی محدوده رودخانه اترک

پارامتر	تیر ۱۴۰۲	مرداد ۱۴۰۲	شهریور ۱۴۰۲	مهر ۱۴۰۲	آبان ۱۴۰۲	آذر ۱۴۰۲
شبیه‌سازی شده	۲/۱۹	۲/۶۸	۳/۶۴	۳/۶۱	۲/۸۳	۱/۳۶
اندازه‌گیری شده	۲/۳۲	۲/۷۵	۳/۷۳	۳/۶۶	۲/۸۸	۱/۳۹
اشریشیاکلی	۲۸/۳۹	۱۹/۹۳	۵۳/۴۶	۴۹/۳۴	۸۴/۶۳	۷۳/۵۲
اندازه‌گیری شده (E.Coil)	۲۸/۴۱	۱۹/۹۵	۵۳/۴۹	۴۹/۳۹	۸۴/۶۸	۷۳/۵۶



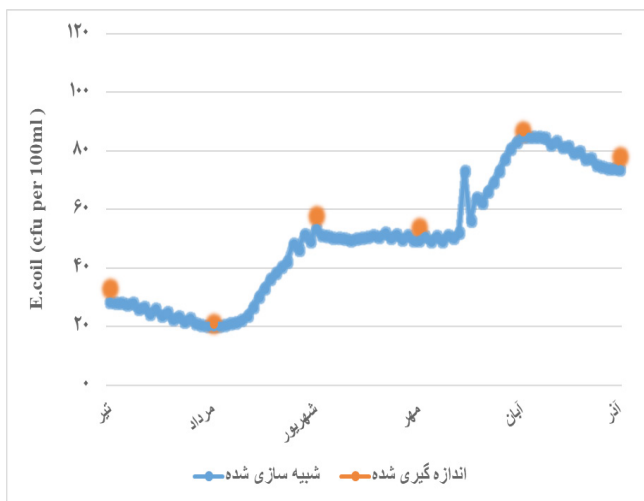
شکل ۳: شاخص‌های مورد استفاده در مرحله‌های مختلف - نیترژن نیترات



شکل ۲: شاخص‌های مورد استفاده در مرحله‌های مختلف - اشریشیاکلی (E. coli)

به دست آمد. شکل (۴) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۷۹۳۷ انجام دهد.

همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است برای کلی‌فرم کل بیش‌ترین مقدار در آبان ماه و کم‌ترین مقدار در مردادماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در آبان ماه با ۱۱۰/۳۹ و کم‌ترین مقدار در مردادماه با ۲۱/۳۲ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۵) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۷۳۷۱ انجام دهد.



شکل ۶: بارهای آلودگی در مرحله اول - اشریشیاکلی

همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است برای اشریشیاکلی بیش‌ترین مقدار در آبان ماه و کم‌ترین مقدار در مردادماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در آبان ماه با ۸۴/۶۸ و کم‌ترین مقدار در مردادماه با ۱۹/۹۵ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۶) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی بسیار خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۳۷۱۹ انجام دهد.

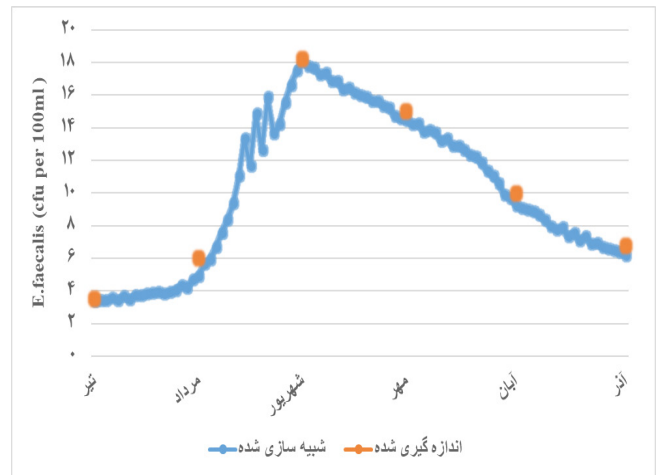
همان‌طور که از شکل (۷) مشخص است برای نیتروژن نترات بیش‌ترین مقدار در شهریورماه و کم‌ترین مقدار در آذرماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در شهریورماه با ۳/۷۳ و کم‌ترین مقدار در آذرماه با ۱/۳۹ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۷) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۷۷۲۴ انجام دهد.

هم‌چنین در شکل ۴ و ۵ و ۶، شاخص‌های میکروبیولوژیکی در

به هم به دست آمد. شکل (۳) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۷۷۲۴ انجام دهد.

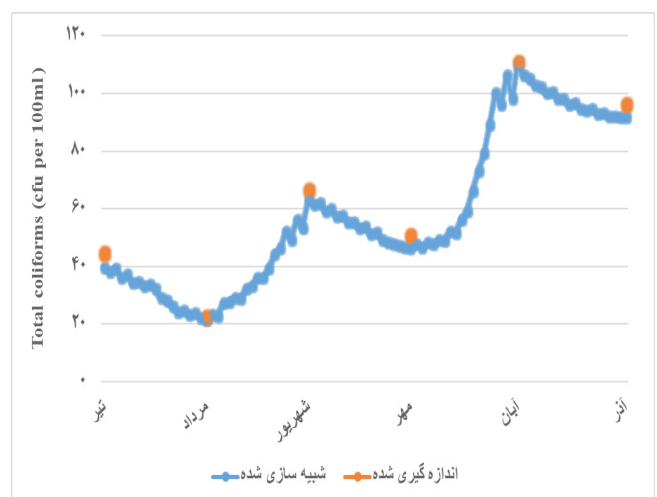
### تحلیل مرحله اول

دمای آب در دوره مورد تجزیه و تحلیل از ۱۹/۰۶ تا ۲۸/۱ درجه سانتی‌گراد متغیر بود که در آذرماه به کم‌ترین میزان و در مردادماه به بیش‌ترین میزان رسید. غلظت شاخص‌های شیمیایی و میکروبیولوژیکی تجزیه و تحلیل شده در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

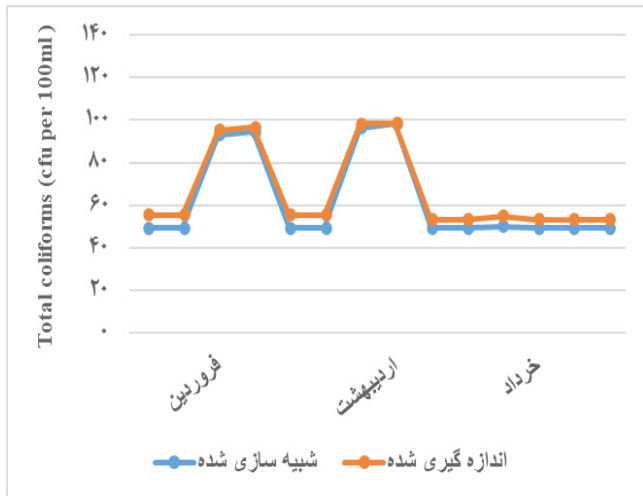


شکل ۴: بارهای آلودگی در مرحله اول - باکتری انتروکوکوس فکالیس (E. faecalis)

همان‌طور که از شکل (۴) مشخص است برای انتروکوکوس فکالیس بیش‌ترین مقدار در شهریورماه و کم‌ترین مقدار در تیرماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در شهریورماه با ۱۸/۱۹ و کم‌ترین مقدار در تیرماه با ۳/۴۸ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم



شکل ۵: بارهای آلودگی در مرحله اول - کلی‌فرم کل



شکل ۹: بارهای آلودگی در مرحله دوم - کلی فرم کل

مقدار می‌رسد. سپس تا آذر به تدریج کاهش می‌یابند. در طول دوره کوچک‌ترین جریان، غلظت نیترژن نیترات در سطح ثابتی است و در آن زمان تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. در دوره مورد تجزیه و تحلیل، غلظت نیترژن نیترات از ۱/۳۶ تا ۳/۶۴ میلی‌گرم در لیتر متغیر است.

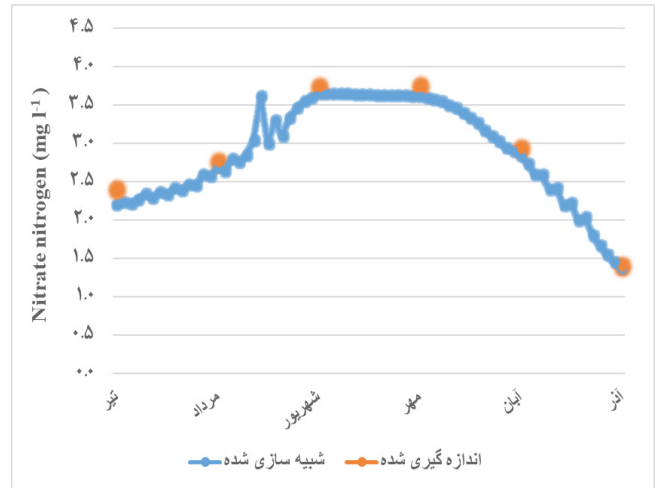
#### تحلیل مرحله دوم

در تحلیل مرحله دوم، غلظت و تعداد شاخص‌های شیمیایی و میکروبیولوژیکی در ماه‌های فروردین تا خرداد سال ۱۴۰۲ تجزیه و تحلیل گردید؛ که در نمودارهای زیر نشان داده شده است.

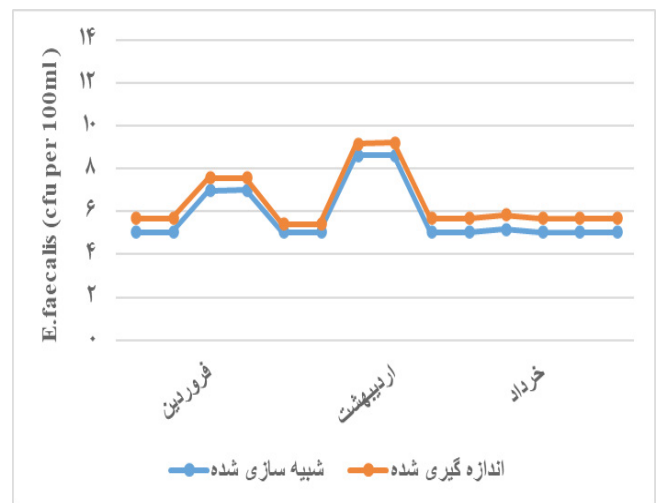
همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است برای انتروکوکوس فکالیس بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه و کم‌ترین مقدار در خردادماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه با ۸/۶۹ و کم‌ترین مقدار در خردادماه با ۵/۰۹ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۸) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی بسیار خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۴۹۶۶ انجام دهد.

همان‌طور که از شکل (۹) مشخص است برای کلی فرم کل بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه و کم‌ترین مقدار در خردادماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه با ۹۸/۳۹ و کم‌ترین مقدار در خردادماه با ۴۹/۲۵ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۹) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۷۲۴۵ انجام دهد.

همان‌طور که از شکل (۱۰) مشخص است برای اشریشیاکلی بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه به دلیل مشاهده افزایش باکتری در این ماه و کم‌ترین مقدار در خردادماه تجزیه و تحلیل گردید و



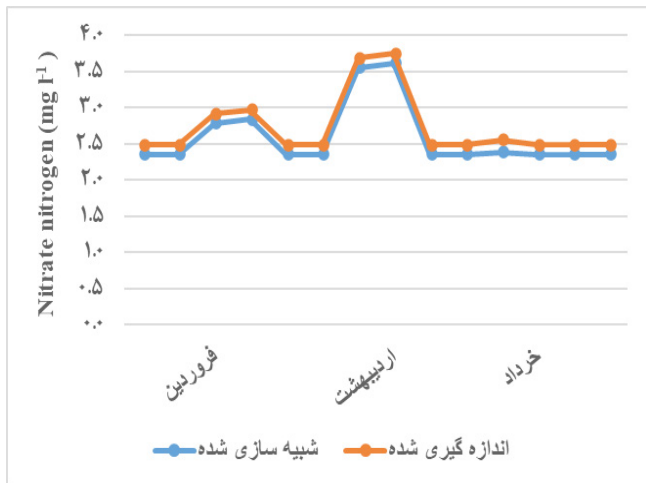
شکل ۷: بارهای آلودگی در مرحله اول - نیترژن نیترات



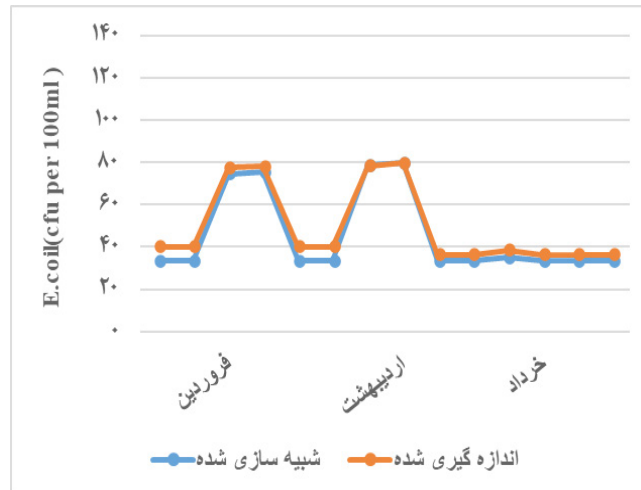
شکل ۸: بارهای آلودگی در مرحله دوم - باکتری انتروکوکوس فکالیس (E. Faecalis)

ماه‌های اول دوره تجزیه و تحلیل با کم‌ترین تعداد باکتری مشخص می‌شود. باکتری انتروکوکوس فکالیس در دوره میانی (شهریورماه) به بیش‌ترین تعداد می‌رسد، درحالی‌که باکتری‌های کلی فرم کل<sup>۱</sup> از جمله اشریشیاکلی<sup>۲</sup> در دوره پایانی (آبان ماه) به بیش‌ترین تعداد می‌رسند. در دوره تعمیق کم آب، باکتری‌های کلی فرم کل از جمله اشریشیاکلی، روند صعودی خفیفی از خود نشان می‌دهند، درحالی‌که باکتری انتروکوکوس فکالیس<sup>۳</sup> در دوره کم‌آبی، تغییرات معنی‌داری در تعداد نشان نمی‌دهد. در دوره مورد تجزیه و تحلیل، تعداد باکتری‌های انتروکوکوس فکالیس از ۳/۳۶ تا ۱۸/۰۶ CFU در ۱۰۰ میلی‌لیتر، کلی باکتری‌های کلی فرم از ۲۱/۳ تا ۱۱۰ CFU در ۱۰۰ میلی‌لیتر، اشریشیاکلی از ۱۹/۹۳ تا ۸۴/۶۳ CFU در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر متغیر است. از سوی دیگر در شکل (۷)، شاخص‌های شیمیایی در ماه‌های اول (از جمله شهریورماه) دوره تجزیه و تحلیل به بالاترین

1. Total Coliforms
2. E.Coli
3. Enterococcus Faecalis



شکل ۱۱: بارهای آلودگی در مرحله دوم - نیتروژن نترات



شکل ۱۰: بارهای آلودگی در مرحله دوم - اشریشیاکلی (E. coli)

فروردین، از  $CFU \ 33/42$  در  $100$  میلی لیتر به  $CFU \ 74/61$  در هر  $100$  میلی لیتر و برای ماه اردیبهشت، به  $CFU \ 79/54$  در هر  $100$  میلی لیتر افزایش یافت. در شکل (۱۱) نیتروژن نترات تجزیه و تحلیل گردید. در مورد شاخص‌های شیمیایی در ماه‌های فروردین و اردیبهشت و خرداد، غلظت نیتروژن نترات اندک بود (از  $2/36$  به  $3/62$  میلی گرم در لیتر).

### تحلیل مرحله سوم

در تحلیل مرحله سوم برای ماه‌های تیر تا آذر و ماه‌های فروردین تا خرداد سال  $1402$ ، نیتروژن کل تجزیه و تحلیل گردید؛ که غلظت شاخص تجزیه و تحلیل شده در شکل‌های زیر نشان داده شده است. هم‌چنین در جدول ۳ مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نیتروژن کل آورده شده است.

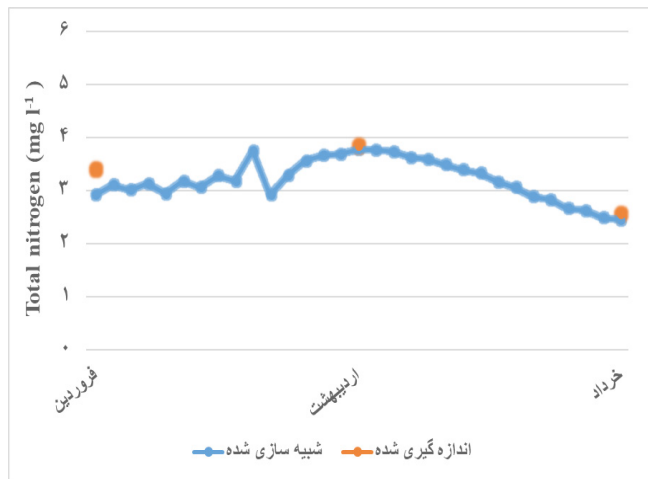
جدول ۳: مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نیتروژن کل (میلی گرم) در مرحله سوم

ماه	اندازه‌گیری شده	شبیه‌سازی شده
فروردین ۱۴۰۲	۲/۹۷۵	۲/۹۱۸
اردیبهشت ۱۴۰۲	۳/۸۵۴	۳/۷۷۱
خرداد ۱۴۰۲	۲/۵۵۰	۲/۴۵۰
تیر ۱۴۰۲	۲/۳۶۱	۲/۲۶۳
مرداد ۱۴۰۲	۲/۸۸۴	۲/۸۶۱
شهریور ۱۴۰۲	۳/۸۹۶	۳/۸۷۴
مهر ۱۴۰۲	۳/۸۴۵	۳/۷۸۵
آبان ۱۴۰۲	۲/۹۸۶	۲/۹۷۸
آذر ۱۴۰۲	۱/۴۱۸	۱/۴۰۶

مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه با  $79/62$  و کم‌ترین مقدار در خردادماه با  $33/49$  به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۱۰) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با  $0/07211$  انجام دهد.

همان‌طور که از شکل (۱۱) مشخص است برای نیتروژن نترات بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه به دلیل مشاهده بیش‌ازحد کود شیمیایی و کم‌ترین مقدار در خردادماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه با  $3/75$  و کم‌ترین مقدار در خردادماه با  $2/41$  به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۱۱) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی خوب و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با  $0/07509$  انجام دهد.

در شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰، افزایش بیش‌تری در غلظت، در مورد شاخص‌های میکروبیولوژیکی رخ داد. تعداد باکتری انتروکوکوس فکالیس در نتیجه ماه فروردین بیش از  $1/2$  برابر و در نتیجه ماه اردیبهشت بیش از  $1/6$  برابر افزایش یافت. در مورد ماه فروردین، از  $CFU \ 5/04$  در  $100$  میلی لیتر به  $CFU \ 6/98$  در هر  $100$  میلی لیتر و برای ماه اردیبهشت، به  $CFU \ 8/62$  در هر  $100$  میلی لیتر افزایش یافت. افزایش مشابهی برای باکتری‌های کلی فرم کل مشاهده می‌شود. تعداد آن‌ها بیش از  $1/8$  برابر در نتیجه ماه فروردین و بیش از دو برابر در نتیجه ماه اردیبهشت افزایش یافت. در مورد ماه فروردین، از سطح  $CFU \ 49/16$  در  $100$  میلی لیتر به  $CFU \ 93/06$  در هر  $100$  میلی لیتر افزایش یافت و برای ماه اردیبهشت، به  $CFU \ 98/34$  در هر  $100$  میلی لیتر افزایش یافت. با این حال، افزایش قابل توجهی بیش‌تری در تعداد باکتری‌ها در مورد اشریشیاکلی مشاهده شد. تعداد آن‌ها بیش از  $2/2$  برابر در نتیجه هر دو ماه افزایش یافت. در مورد ماه



ب



الف

شکل ۱۲: بارهای نیتروژن کل رودخانه اترک در محدوده حصارگرم خان در فصول مختلف سال ۱۴۰۲

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی در چهارچوب استاندارد ملی ایران

نوع	واحد	شرب		کشاورزی	
		استاندارد شرب	مرحله دوم	استاندارد کشاورزی	مرحله دوم
انتروکوکوس فکالیس	CFU per 100 mL	۰	۸/۶۲	۱۰۰	۸/۶۲
کل کلی فرم		۰	۹۸/۳۴	۲۰۰۰	۹۸/۳۴
اشریشیاکلی		۰	۷۹/۵۴	۲۰۰	۷۹/۵۴

غلظت نیتروژن کل در رودخانه در اولین نوع تحلیل شده در ماه‌های تیر تا آذر مشاهده گردید. افزایش غلظت نیتروژن کل از ۲/۲۶۳ به ۳/۸۷۴ میلی‌گرم در لیتر تجزیه و تحلیل گردید. از سوی دیگر، در دومین نوع تجزیه و تحلیل شده در ماه‌های فروردین تا خرداد، افزایش غلظت نیتروژن کل در رودخانه از ۲/۹۱۸ تا ۳/۷۷۱ میلی‌گرم در لیتر تجزیه و تحلیل گردید.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد شبیه‌سازی مقادیر فوق با مدل WASP بسیار نزدیک به مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری بوده که نشان از این است مدل WASP مدلی قابل قبول برای کیفیت آب می‌باشد. نتایج تجزیه و تحلیل انتروکوکوس فکالیس در مرحله ۲، مقدار ۸/۶۲ به دست آمد که از آنجایی که استاندارد انتروکوکوس فکالیس برای آشامیدن بایستی صفر باشد لذا برای آشامیدن خطرناک است و فقط برای کشاورزی که استاندارد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌لیتر بایستی باشد قابل قبول است. هم‌چنین نتایج تجزیه و تحلیل کل کلی فرم در مرحله ۲، مقدار ۹۸/۳۴ به دست آمد که از آنجایی که استاندارد کل کلی فرم برای آشامیدن بایستی صفر باشد لذا برای آشامیدن خطرناک بوده و فقط برای کشاورزی که استاندارد ۲۰۰۰ در ۱۰۰ میلی‌لیتر بایستی باشد قابل قبول است. همین‌طور نتایج تجزیه و تحلیل اشریشیاکلی در مرحله ۲، مقدار ۷۹/۵۴ به دست آمد که از آنجایی که استاندارد اشریشیاکلی برای آشامیدن بایستی صفر باشد لذا برای آشامیدن

الف) نوع یک (ماه‌های تیر تا آذر)  
ب) نوع دو (ماه‌های فروردین تا خرداد)  
همان‌طور که از شکل (۱۲-الف) مشخص است برای نیتروژن کل بیش‌ترین مقدار در شهریورماه و کم‌ترین مقدار در آذرماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در شهریورماه با ۳/۸۹۶ و کم‌ترین مقدار در آذرماه با ۱/۴۱۸ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۱۲-الف) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی عالی و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۳۹۳۹ انجام دهد. هم‌چنین از شکل (۱۲-ب) مشخص است برای نیتروژن کل بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه و کم‌ترین مقدار در خردادماه تجزیه و تحلیل گردید و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز بیش‌ترین مقدار در اردیبهشت‌ماه با ۳/۸۴ و کم‌ترین مقدار در خردادماه با ۲/۵۵ به دست آمد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک به هم به دست آمد. شکل (۱۲-ب) نشان‌دهنده آن است که مدل WASP توانسته است شبیه‌سازی را با دقتی عالی و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۴۹۸۹ انجام دهد.

با توجه به شکل (۱۲)، به‌عنوان یک نتیجه از معرفی بار نیتروژن کل به رودخانه اترک در بخش حصارگرم خان، تغییر قابل توجهی در

خطرناک بوده و فقط برای کشاورزی که استاندارد ۲۰۰ در ۱۰۰ میلی لیتر بایستی باشد قابل قبول است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد بیشترین میزان باکتری های انتروکوکوس فکالیس و کلی فرم کل و اشیریشیاکلی در ماه اردیبهشت است که تهدیدی جدی بوده و بنابراین، بایستی از هرگونه آلودگی نهایت جلوگیری گردد و اطراف رودخانه نیز از نظر فنی ایمن شود. هم چنین نتایج تحقیقات انجام شده، امکان مشاهده فرآیندهای رقیق سازی آلاینده و خود پالایی رودخانه را فراهم می کند.

### نتیجه گیری

شبیه سازی های انجام شده برای سه مرحله توسعه یافته، نتایج متنوعی از غلظت ها و تعداد شاخص های شیمیایی و میکروبیولوژیکی تجزیه و تحلیل ذکر شد. در دوره کم دبی (مرحله ۱)، شاخص های شیمیایی و میکروبیولوژیکی تجزیه و تحلیل گردید که بیشترین مقدار نیتروژن نترات در ماه شهریور و کمترین در ماه آذر به دست آمد. در مرحله ۱ هم چنین شاخص میکروبیولوژیکی نیز تجزیه و تحلیل قرار گرفت که بیشترین مقدار انتروکوکوس فکالیس در ماه شهریور و کمترین مقدار در ماه تیر و هم چنین بیشترین مقدار کلی فرم کل در ماه آبان و کمترین مقدار در ماه مرداد و همین طور بیشترین مقدار اشیریشیاکلی در ماه آبان و کمترین مقدار در مرداد تجزیه و تحلیل گردید که نشان دهنده بیشترین مقدار شاخص های فیزیکوشیمیایی و میکروبیولوژیکی در ماه های شهریور و آبان است. علاوه بر این، در مرحله ۳ نیز، نیتروژن کل در دو تجزیه تحلیل یکی در ماه تیر تا آذر و دیگری در ماه فروردین تا خرداد انجام شد که در تجزیه و تحلیل اول بیشترین مقدار نیتروژن کل در ماه شهریور و کمترین مقدار در ماه آذر و در تجزیه و تحلیل دوم بیشترین مقدار نیتروژن کل در ماه اردیبهشت و کمترین در ماه خرداد به دست آمد. نشان دهنده بیشترین مقدار نیتروژن کل در ماه های شهریور (تجزیه و تحلیل اول) و اردیبهشت (تجزیه و تحلیل دوم) است. هم در مورد مرحله ۱ و هم در مرحله ۳، بیان شده است که تجزیه و تحلیل های به دست آمده تأثیری بر عملکرد و کارایی رودخانه دارد. از سوی دیگر در مرحله ۲، امکان مشاهده پارامترهای قابل توجه، هم برای شاخص های فیزیکوشیمیایی و هم برای شاخص های میکروبیولوژیکی را فراهم می کند که در شاخص فیزیکوشیمیایی، بیشترین مقدار نیتروژن نترات در ماه اردیبهشت و کمترین مقدار در ماه خرداد تجزیه و تحلیل گردید و هم چنین در شاخص میکروبیولوژیکی بیشترین مقدار انتروکوکوس فکالیس و کلی فرم کل و اشیریشیاکلی در ماه اردیبهشت و کمترین مقدار در ماه خرداد تجزیه و تحلیل گردید. جدول ۴ حداکثر مقادیر شاخص های به دست آمده در مرحله ۲، در تجزیه و تحلیل با مدل WASP را نشان می دهد و آن ها را با استاندارد ملی ایران مقایسه می کند. طبق استاندارد ملی ایران (استاندارد شماره ۳) مقدار مجاز انتروکوکوس فکالیس برای آب آشامیدن بایستی صفر در ۱۰۰ میلی لیتر باشد و برای مصارف تفریحی و کشاورزی ۱۰۰

در ۱۰۰ میلی لیتر می باشد. هم چنین استاندارد مقدار مجاز کلی فرم کل برای آب آشامیدن بایستی صفر در ۱۰۰ میلی لیتر باشد و برای مصارف تفریحی و کشاورزی ۲۰۰۰ در ۱۰۰ میلی لیتر می باشد. همین طور استاندارد مقدار مجاز اشیریشیاکلی برای آب آشامیدن بایستی صفر در ۱۰۰ میلی لیتر باشد و برای مصارف تفریحی و کشاورزی ۲۰۰ در ۱۰۰ میلی لیتر می باشد. لذا پیشنهاد می گردد با توجه به تحقیقات انجام شده مدل WASP به لطف مدل سازی فرآیندهای رخ داده در نیمرخ طولی بستر رودخانه، می تواند پشتیبانی قابل توجهی را برای تصمیم گیرندگان فراهم کند. امکان استفاده از مدل WASP برای شبیه سازی سناریوهای اضطراری می تواند از مدیریت بحران، توسعه برنامه های اقدام و آماده سازی خدمات در صورت بروز خطر پشتیبانی کند.

### منابع

1. Ambrose, J. R., Martin, R.B., J. L., and Wool, T.A. 1991. WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model - Model Theory, User's Manual and Programmer's Guide. USEPA, Athens, GA.
2. Anna, G. P., and Iwona, G. 2023. The Importance of Enterococci in the Monitoring of Fecal Pollution in River Water in Forests and Urban Areas. *Water*, 15(21): 1–15.
3. Cope, B., Shaikh, T., Parmar, R., Chapra, S., and Martin, J. 2020. Literature Review on Nutrient-Related Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.
4. Dumlu, E., and Elci, S. 2022. Application of the WASP Model for Assessment of Aeration Impact on Water Quality of Porsuk River, Turkey. *Scientific Research Communications*. 2022, 2(2): 1-12.
5. Ejigu, M. T. 2021. Overview of water quality modeling. *Cogent Engineering*, 8(1): 18–29.
6. Gordillo, G., Morales-Hernandez, M., and Garcia-Navarro, P. 2020. Finite volume model for the Simulation of 1D unsteady river flow and water quality based on the WASP. *Journal of Hydro informatics*, 22(2): 327–345.
7. Lin, Y. P., Mukhtar, H., Huang, K. T., Petway, J.R., Lin, C. M., Chou, C. F., and Liao, S.W. 2020. Real-Time Identification of Irrigation Water Pollution Sources and Pathways with a Wireless Sensor Network and Blockchain Framework. *Sensors*, 20(13): 36–43.
8. Mamani Larico, A. J., and Zuniga Medina, S. A. 2019. Application of WASP model for assessment of water quality

- I., Tchorzewska-Cieslak, B., and Rak, J. R. 2021. Risk Assessment of Water Intakes in South-Eastern Poland in Relation to the WHO Requirements for Water Safety Plans. *Resources*, 10(10): 1-15.
18. Tejero, I., Suarez, J., Ascorbe, A., Liano, A., Sainzn, J.A., and Temprano, J. 2025. Dynamic Simulation of Water Quality in Rivers. WASP Application to the River Nalon (Spain). *Short course on Introduction to Pollution Modelling*, 13(1): 1–10.
19. Terry, J., and Lindenschmidt, K. E. 2023. Water Quality and Flow Management Scenarios in the Qu'Appelle River-Reservoir System Using Loosely Coupled WASP and CE-QUAL-W2 Models. *Water*, 15(1): 20–30.
20. Thushari, G., and Senevirathna, J. 2020. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6(8): 1–16.
21. United States Environmental Protection Agency. US Army Corps of Engineers. 2022. Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS). Available online, (accessed on 20 November 2022).
23. Wang, D., Wang, K., and Chen, Y. 2021. Optimal Return Policies and Micro-Plastics Prevention Based on Environmental Quality Improvement Efforts and Consumer Environmental Awareness. *Water*, 13(1): 15-37.
24. Wollenberg, E., Vermeulen, S. J., Girvetz, E., Loboguerrero, A.M., and Ramirez-Villegas, J. 2016. Reducing risks to food security from climate change. *Global Food Security*, 11(1):43–34 .
25. Wool, T. A., Ambrose, R. B., Martin, J. L., and Comer, A. 2020. WASP 8: The Next Generation in the 50-year Evolution of USEPA's Water Quality Model. *Water*, 12(5): 1-33.
26. Wu, S., Wu, S., Yi, Z., Zeng, F., Wu, W., Qiao, Y., and Tian, Y. 2018. Hydrogel-based fluorescent dual pH and oxygen sensors loaded in 96-well plates for high-throughput cell metabolism studies. *Sensors*. 18(2): 564–575.
27. Zelazny, M., Bryła, M., Ozga-Zielinski, B., and Walczykiewicz, T. 2023. Applicability of the WASP Model in an Assessment of the Impact of Anthropogenic Pollution on Water Quality-Dunajec River Case Study. *Sustainability*, 15(1): 24–44.
28. Zhai, Y., Han, Y., Xia, X., Li, X., Lu, H., Teng, Y., and Wang, J. 2021. Anthropogenic Organic Pollutants in Groundwater Increase Releases of Fe and Mn from Aquifer for eutrophication control for a reservoir in the Peruvian Andes. *Lakes Reservoirs Research Management*, 24(1): 37–47.
9. Mbuh, M. J., Mbih, R., and Wendi, C. 2019. Water Quality modeling and sensitivity analysis using Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) in the Shenadoah River Watershed. *Physical Geography*, 40(2): 1–24.
10. Muhammetoglu, A., Orhan, P., Akdegirmen, O., Dugan, S. T., and Muhammetoglu, H. 2023. An integrated modeling approach to assess Best Management Practices (BMPs) for improving stream water quality using the MapShed and WASP8 Models. *Water Resources Management*, 37(15): 6237-6253.
11. Neale, P. J., Williamson, C. E., Banaszak, A. T. Hader, D. P., Hylander, S., Ossola, R., Rose, K. C. Wangberg, S. A., and Zepp, R. 2023. The response of aquatic ecosystems to the interactive effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and climate change. *Photochemical Photobiological Sciences*, 22(1): 1093–1127.
12. Obin, N., Tao, H., Ge, F., and Liu, X. 2021. Research on Water Quality Simulation and Water Environmental Capacity in Lushui River Based on WASP Model. *Water*, 13(1): 28–39.
13. Schlattmann, A., Neuendorf, F., and Burkhard, K. 2022. Ecological Sustainability Assessment of Water Distribution for the Maintenance of Ecosystems, their Services and Biodiversity. *Environmental Management*, 70(6): 329–349.
14. Shabani, A., Woznicki, S. A., Mehaffey, M., Butcher, J., Wool, T. A., and Whung, P. Y. 2021. A coupled hydrodynamic (HEC-RAS 2D) and water quality model (WASP) for simulating flood-induced soil, sediment, and contaminant transport. *J of Flood Risk Managment*, 14(4): 1-16.
15. Stocker, M. D., Jeon, D. J., Sokolova, E., Lee, H., Kim, M. S., and Pachepsky, Y. A. 2020. Accounting for the Three-Dimensional Distribution of Escherichia coli Concentrations in Pond Water in Simulations of the Microbial Quality of Water Withdrawn for Irrigation. *Water*, 12(1): 1708–1719.
16. Swarnkar, K., Gupta, K., and Nikam, V. 2024. Water Quality monitoring and modeling for an urban storm drainage channel in Thane, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(5): 440–450.
17. Szpak, D., Boryczko, K., Zywiec, J., Piegdon,

30. Zieminska-Stolarska, A., and Kempa, M. 2021. Modeling and Monitoring of Hydrodynamics and Surface Water Quality in the Sulejow Dam Reservoir, Poland. *Water*, 13(3): 1-19.

Sediments: Impacts of Pollution Degree, Mineral Content, and pH. *Water*, 13(1): 19-29.

29. Zhao, J., Zhang, F., Chen, S., Wang, C., Chen, J., Zhou, H., and Xue, Y. 2020. Remote Sensing Evaluation of Total Suspended Solids Dynamic with Markov Model: A Case Study of Inland Reservoir across Administrative Boundary in South China. *Sensors (Basel)*, 20(23): 6911-6939.



## Abstract

**Evaluation of the Application of the WASP Model in Investigating the Impact of Human Pollution on Water Quality (Case Study: Atrak River)**Gh. H. Akbari<sup>1\*</sup>, S. Partani<sup>2</sup> and I. Lotfi<sup>3</sup>

Received: 2025/11/08 Accepted: 2026/02/18

In this study, the WASP model was used for the water quality of the Atrak River located in the Hesar Garmkhan area of Bojnord. For this purpose, during the months of April to June and July to December 2023, the indices and parameters of *Enterococcus faecalis*, total coliforms, *Escherichia coli*, water temperature, nitrate nitrogen, and total nitrogen were simulated. The simulation of the above parameters was carried out in three stages: the first stage in the months of July to December, the second stage in the months of April to June, and the third stage, total nitrogen in the months of April to June and July to December. So that the results obtained were almost similar to the results obtained from the measured observations, and the Root Mean Square Error (RMSE) also confirmed this. For the first and second stages, the results related to the accuracy of the model indicate an error of less than 0.08 for the simulation of parameters, as well as an error of less than 0.04 for *Escherichia coli* and an error of less than 0.02 for nitrate nitrogen, which is considered an acceptable accuracy. For the third stage, the results related to the accuracy of the model indicate an error of less than 0.04 for the simulation of total nitrogen, which is considered an acceptable accuracy. Based on the results obtained, the WASP model has very good accuracy in simulating the Atrak River located in the Hesar-e-Garmkhan area and can be suggested as a suitable model for simulating the river.

**Keywords: Atrak river, Hesar-garmkhan, E.Faecalis, Total coliforms, E.Coil.**

1. Associate Professor of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, University of Bojnord, Bojnord, Iran. Email: akbari@ub.ac.ir (\*Corresponding Author)

2. Assistant Professor of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, University of Bojnord, Bojnord, Iran.

3. Master of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, University of Bojnord, Bojnord, Iran.