# مطالعه اثرات محیط‌زیستی حضور نیترات و فسفات در رودخانه کارون با استفاده از مدل آکواتاکس


## چکیده

بررسی سرنوشت مواد مغذی در اکوسیستم‌های آبی از اهمیت بالایی در مدیریت محیط‌زیستی و حفظ تنوع‌زیستی برخوردار است. این تحقیق با هدف ارزیابی سرنوشت محیط‌زیستی مواد مغذی در رودخانه کارون و با استفاده از مدل آکواتاکس در سال ۱۴۰۲ انجام شده است. نمونه‌برداری از آب در ۱۰ نقطه مختلف (۴۰ نمونه در مجموع)، (۸۰ کیلومتر شمالی تا ۴۰ کیلومتر جنوبی) و به‌صورت فصلی انجام شد و مقادیر فسفات و نیترات با استفاده از روش اسپکتروفتومتری Hach اندازه‌گیری شدند. همچنین، پارامترهای اکسیژن محلول، EC، pH و TSS طبق متدهای استاندارد سنجش شد. نمونه‌برداری از رسوبات کف رودخانه با استفاده از دستگاه اکمن گراپ انجام و برای شناسایی و شمارش گونه‌های بنتیک از میکروسکوپ نوری استفاده شد. برای مدل‌سازی سرنوشت مواد مغذی، دو سناریو شامل S1 (کاهش ۱۵ درصدی مواد مغذی) و S2 (افزایش ۱۵ درصدی مواد مغذی) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص‌های تنوع‌زیستی شامل شانون، سیمپسون، کامارگو و بریلون به ترتیب برابر با ۱/۲۹۵، ۰/۵۸۵، ۰/۳۰۸ و ۱/۲۴۷ بود که حاکی از تنوع‌زیستی نسبتاً ضعیف در اکوسیستم رودخانه کارون است. همچنین، میانگین سالانه فسفات و نیترات به ترتیب ۴/۵۵ میلی‌گرم بر لیتر و ۶۴/۲۳ میلی‌گرم بر لیتر تخمین زده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کاهش ۱۵ درصدی غلظت مواد مغذی منجر به افزایش‌تنوع زیستی می‌شود، به‌طوری‌که میانگین شاخص شانون در سناریوی کاهش مواد مغذی به ۱/۴۸ و در سناریوی افزایش غلظت به ۱/۰۱ رسید. همچنین، مقادیر GPP (تولید اولیه ناخالص) در سناریوی کاهش مواد مغذی از ۳۱۴ گرم بر مترمربع در سال به ۲۲۳ گرم کاهش یافت، در حالی که در سناریوی افزایش مواد مغذی، GPP به ۴۵۳ گرم بر مترمربع رسید. شاخص Faunal Factor نیز نشان داد که در سناریوی کاهش مواد مغذی، این شاخص به تدریج افزایش یافته و در مقابل، در سناریوی افزایش مواد مغذی کاهش یافت. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش مواد مغذی می‌تولند به کاهش رقابت بین گونه‌ها و افزایش تنوع‌زیستی کمک کند.


**واژگان کلیدی:** اکوسیستم‌های آبی، تنوع‌زیستی، مواد مغذی، مدل Aquatox، آلودگی آب.


**محسن داودی**[۱]
**آزیتا کوشافر**[۱*]
**فاطمه کریمی اورگانی**[۱]
**حسین فتحیان**[۲]
**حدیده معبودی**[۳]

۱. گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۲. گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز، ایران.
۳. گروه شیلات، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* **نویسنده مسئول مکاتبات**
az.koushafar@iau.ac.ir


تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸

این مقاله برگرفته از رساله دکتری است.

## مقدمه

رودخانه‌ها نقش مهمی در حفظ تعادل اکوسیستم‌ها ایفا می‌کنند. در آینده‌ای نزدیک، پیش‌بینی می‌شود که آب به‌عنوان منبع اصلی مناقشات و محور توسعه کشورها مطرح شود (Noor *et al.,* 2023). مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر، از عناصر اساسی برای رشد و نمو گیاهان و جانوران در منابع آبی به‌شمار می‌روند (Hakkim *et al.,* 2024). با این حال، افزایش آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه ورود این مواد مغذی به اکوسیستم‌های آبی، تهدیدی جدی برای سلامت محیط‌زیست و کیفیت آب محسوب می‌شود (Sun *et al.,* 2024). عدم تعادل در سطوح نیتروژن و فسفر در اکوسیستم‌های آبی می‌تواند به وقوع پدیده‌هایی نظیر شکوفایی جلبک‌ها (Eutrophication) منجر شود که عواقب اکولوژیکی جدی به همراه دارد. شکوفایی جلبکی به‌ویژه از نوع سمی، منجر به کاهش شدید غلظت اکسیژن محلول در آب (Hypoxia) می‌گردد (Akinnawo, 2023).



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

مطالعات نشـان داده‌اند که غلظت نیتروژن (به‌ویژه نیترات) در آب‌های سـطحی در محدوده ۰/۱تا ۱ و فسـفر، ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر (mg/L)، وضعیت مطلوبی را نشان می‌دهد. همچنین نسبت نیتروژن به فسفر در اکوسیستم‌های آبی بر اساس توصیه EPA، بین ۱/۱ تا ۱/۲ است (Farchrul *et al.,* 2021). آمار جهانی نشان می‌دهد که حدود ۸۰ درصد از آب‌های سطحی در جهان تحت تأثیر آلودگی‌های ناشی از مواد مغذی قرار دارند. این وضعیت می‌تواند منجر به پدیده‌هایی نظیر شکوفایی جلبک‌ها و کاهش سطح اکسیژن محلول در آب شود (Zhu *et al.,* 2024). عوامل متعددی از جمله فعالیت‌های صـنعتی، خدماتی، کشـاورزی و حتی عوامل طبیعی در بروز آلودگی منابع آب سـطحی نقش دارند. فاضـلاب‌ها و کودهای شـیمیایی حاوی آلاینده‌هایی مانند فسـفات‌ها و نیترات‌ها به‌عنوان دلایل اصـلی آلودگی شـناخته می‌شوند (Craswell, 2021).

در ایران، انواع مختلفی از کودهای شـیمیایی نیتروژنی مورد اسـتفاده قرار می‌گیرند که به‌طور مسـتقیم یا غیرمسـتقیم در افزایش غلظت نیترات در آب‌های سـطحی مؤثر هسـتند. از جمله آن‌ها می‌توان به اوره، سـولفات آمونیوم، نیترات آمونیوم، دی‌آمونیوم فسـفات (DAP)، نیتروژن مایع و کودهای ترکیبی NPK اشـاره کرد (Hejazy *et al*., 2023). اوره ، یکی از پرکاربردترین کودها در کشـاورزی اسـت که حاوی ۴۶ درصـد نیتروژن است و در صـورت شسـتشـو توسـط باران یا آبیاری، می‌تواند به آب‌های سـطحی راه پیدا کند ( Martin *et al*., 2022). کودهای فسفاته مانند سوپر فسفات ساده (SSP) و سوپر فسفات تریپل (TSP) به‌عنوان منابع اصلی فسفر در کشاورزی شناخته می‌شوند. سوپر فسفات ساده حاوی حدود ۱۶ درصد $P_2O_5$ و سوپر فسفات تریپل حدود ۴۶ درصد $P_2O_5$ هستند (Khan *et al.,* 2023). بر اساس گزارشات سازمان جهانی بهداشت (WHO)، فاضلاب‌های خانگی نیز حاوی تا ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نیترات و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر فسفات هستند که از دیگر عوامل آلودگی منابع آب سطحی به مواد مغذی محسوب می‌شوند (Chen *et al.,* 2022).

یکی از چالش‌های اساسی در حفاظت و احیای رودخانه‌ها، درک عمیق روابط بین محیط‌های فیزیکی و شیمیایی و موجودات زنده ساکن در آن‌ها است (Tan *et al.,* 2023). برای شبیه‌سازی سرنوشت آلاینده‌ها در محیط‌های آبی، مدل‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌های WASP (Obin *et al.,* 2021) و QUAL2Kw (Oliveira *et al.,* 2012) اشاره کرد. مدل Aquatox یک مدل ریاضی سرنوشت محیط‌زیستی محسوب می‌شود که به‌عنوان یک مدل اکوسیستمی شناخته می‌شود. این مدل نه تنها سرنوشت مواد مغذی و مواد شیمیایی آلی را در منابع آبی پیش‌بینی می‌کند، بلکه اثرات مستقیم و غیرمستقیم آن‌ها بر روی موجودات زنده در محدوده مطالعه را نیز بررسـی می‌نماید (Park *et al.*, 2008). مدل WASP مبتنی بر مدل‌سـازی خطی، عمدتاً بر روی شـبیه‌سـازی کیفیت آب و انتقال آلاینده‌ها تمرکز دارد (Emst and Owens, 2009). مدل QUAL2Kw نیز برای شـبیه‌سـازی کیفیت آب در رودخانه‌ها و کانال‌ها طراحی شـده اسـت. این مدل تأثیرات هیدرولیکی بر کیفیت آب را در نظر می‌گیرد (Camargo *et al.,* 2010). اما مدل Aquatox به‌عنوان یک سیستم شبیه‌سازی اکوسیستمی، می‌تواند سرنوشت مواد مغذی اضافی و مواد شیمیایی آلی را پیش‌بینی کرده و تأثیرات آن‌ها بر اکوسـیسـتم‌های آبی، ماهی‌ها، بی‌مهرگان و گیاهان آبزی را تحلیل کند (Akkoyunlu and Karaaslan, 2015). با توجه به چالش‌های پیش‌رو در زمینه حفظ منابع آبی، اسـتفاده از مدل‌سـازی سـرنوشـت زیسـتی جامع مانند Aquatox، نقش مؤثری در مدیریت پایدار و حفاظت از اکوسـیسـتم‌های آبی دارد. مدل Aquatox در تحقیقات مختلفی مورد اسـتفاده قرار گرفته اسـت. در مطالعه Akkoyunlu and Karaaslan (۲۰۱۵)، این مدل جهت ارزیابی سـناریوهای مختلف بهبود کیفیت آب دریاچه Mogan مورد اسـتفاده قرار گرفت. Lombardo و همکاران (۲۰۱۵) نیز در مطالعه خود، از این مدل جهت بررسی شبکه غذایی در اکوسیستم بر پایه منابع نیترات و فسـفات اسـتفاده کردند. مدل WASP مبتنی بر مدل‌سـازی خطی، عمدتاً بر روی شـبیه‌سـازی کیفیت آب و انتقال آلاینده‌ها تمرکز دارد (Emst and Owens, 2009). مدل QUAL2Kw نیز برای شـبیه‌سـازی کیفیت آب در رودخانه‌ها و کانال‌ها طراحی شـده اسـت. این مدل تأثیرات هیدرولیکی بر کیفیت آب را در نظر می‌گیرد (Camargo *et al.,* 2010). اما مدل Aquatox به‌عنوان یک سـیسـتم شبیه‌سازی اکوسیستمی، می‌تواند سرنوشت مواد مغذی اضافی و مواد شیمیایی آلی را پیش‌بینی کرده و تأثیرات آن‌ها بر اکوسیستم‌های آبی، ماهی‌ها، بی‌مهرگان و گیاهان آبزی را تحلیل کند (Akkoyunlu and Karaaslan, 2015). با توجه به چالش‌های پیش‌رو در زمینه



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

حفظ منابع آبی، استفاده از مدل‌سازی سرنوشت زیستی جامع مانند Aquatox، نقش مؤثری در مدیریت پایدار و حفاظت از اکوسیستم‌های آبی دارد. مدل Aquatox در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه Akkoyunlu and Karaaslan (۲۰۱۵)، این مدل جهت ارزیابی سناریوهای مختلف بهبود کیفیت آب دریاچه Mogan مورد استفاده قرار گرفت. Lombardo و همکاران (۲۰۱۵) نیز در مطالعه خود، از این مدل جهت بررسی شبکه غذایی در اکوسیستم بر پایه منابع نیترات و فسفات استفاده کردند. کارون پرآب‌ترین، بزرگ‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه ایران است که ۹۵۰ کیلومتر طول دارد و از ۱۰ شهر عبور می‌کند. این رودخانه علاوه بر اینکه زیستگاه بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری است، مسئول تأمین آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی در مناطق جنوب غرب ایران است (Hasheminasab *et al.,* 2022). گزارش‌های متعددی از آلودگی آب این رودخانه در سال‌های اخیر منتشر شده است. در مطالعاتی مانند Hedayatzadeh و همکاران (۲۰۲۴) و Zarei و Pourreza (۲۰۱۳)، سطح قابل توجهی از آلودگی به نیترات و فسفات در کارون مشاهده شده است. در تحقیق حاضر، با بررسی وضعیت آلودگی آن به مواد مغذی (نیترات و فسفات)، خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب این رودخانه در محدوده استان خوزستان (بین موقعیت ۳۱/۲۸۰۳۵۷ شرقی و ۲۵/۳۴۷۴۴۴۳ شمالی تا ۶۱/۲۷۶۱۴۳ شرقی و ۲۹/۳۴۵۹۸۰۴ شمالی) سنجش گردید. همچنین مؤلفه‌های هیدروگرافی شامل دبی، نرخ تبخیر، نرخ رسوب‌گذاری، میانگین اصطکاک، ضریب پخش ذرات و نرخ بقاء جرم و ارتباط بین این مؤلفه‌ها با مواد مغذی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق، نقش مؤثری در مدیریت محیط‌زیستی این رودخانه خواهد داشت.

## مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به لحاظ مبانی نظری و عملی در زمره مطالعات کاربردی قرار دارد و محدوده مورد مطالعه آن شامل بخش‌هایی از رودخانه کارون در حد فاصل شهر اهواز تا خرمشهر بوده است. پس از بازدید از منطقه و با توجه به امکانات موجود، تعداد ۱۰ ایستگاه مشخص برای نمونه‌برداری تعیین شد. این نمونه‌برداری به‌صورت فصلی (در چهار فصل سال ۱۴۰۲) و توسط دستگاه نمونه‌بردار نانسن انجام گرفت. همچنین، نمونه‌برداری از رسوبات کف رودخانه با استفاده از دستگاه اکمن گراپ با ۳ تکرار صورت پذیرفت. فسفات از طریق واکنش با یون مولیبدات، نیترات با احیای کادمیوم به یون نیتریت و سپس واکنش با سولفانیلیک اسید، و نیتریت نیز با واکنش مشابه با سولفانیلیک اسید سنجیده شد (Sastry *et al.,* 2002). اندازه‌گیری این مواد در رسوبات کف دریاچه به کمک اسپکتروفتومتری و بر اساس روش‌های استلندارد موجود انجام گردید. برای تعیین غلظت یون نیترات از برنامه ۳۵۵ با طول موج ۵۰۰ نانومتر و برای اندازه‌گیری یون نیتریت از برنامه ۳۷۱ با طول موج ۵۰۷ نانومتر و معرف Nitraver 3 استفاده شد. برای شناسایی و شمارش گونه‌های بنتیک از میکروسکوپ نوری استفاده شد. کلیدهای شناسایی علمی و منابع مرجع برای تعیین دقیق گونه‌ها به‌کار گرفته شدند. تعیین دانه‌بندی رسوبات بر اساس استاندارد ASTM C136 و بر اساس روش Sieve Analysis صورت گرفت. بدین‌منظور، نمونه‌های ۲۰ گرمی به‌صورت متوالی از سری صافی‌های با سایزهای مختلف عبور داده شد. دانه‌ها بر اساس اندازه خود در هر صافی ثبت شده و نسبت وزن نمونه به وزن مجموعه‌ی دانه‌های برجسته در هر سایز محاسبه گردید (Chepil, 1962). روش گردآوری اطلاعات و سنجش پارامترهای مرتبط با مدل‌سازی سرنوشت زیستی مواد مغذی در رودخانه کارون بر اساس مدل Aquatox در جدول ۱ ارائه شده است.



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

**جدول ۱: روش گردآوری اطلاعات و سنجش پارامترهای مرتبط با مدل سازی سرنوشت زیستی توسط مدل Aquatox**

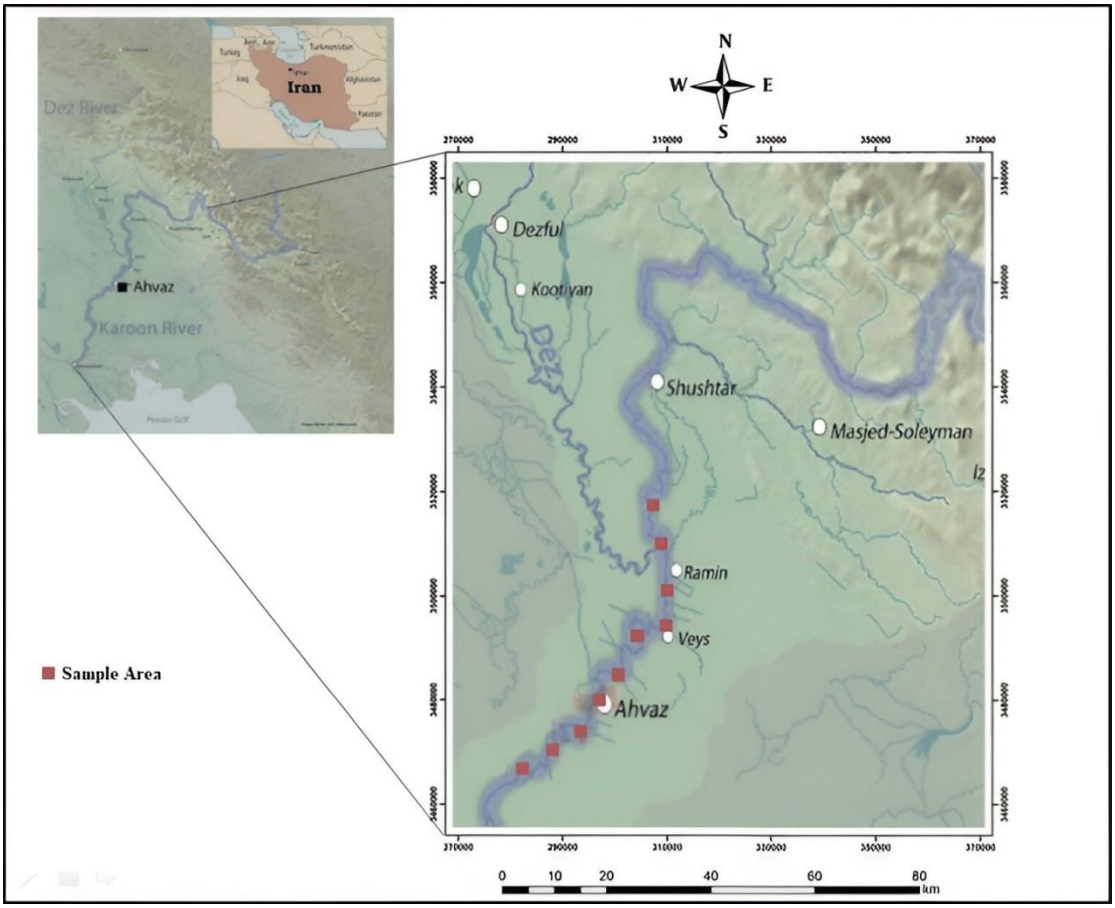
| داده | روش گردآوری | روش سنجش |
|---|---|---|
| نیترات و فسفات | نمونه‌برداری میدانی | اسپکتروفتومتری- Hach مدل dr200 |
| $CO_2$ و $O_2$ | نمونه‌برداری میدانی | مولتی‌متر مدل AZ 86031 |
| اکسیژن محلول | نمونه‌برداری میدانی | Winkler Method-EPA Method 1360/ |
| pH | نمونه‌برداری میدانی | PHمتر مدل Hach HQ40d |
| COD | نمونه‌برداری میدانی | APHA 5210B |
| BOD | نمونه‌برداری میدانی | APHA 5210B |
| TSS | نمونه‌برداری میدانی | 2540D- APHA-Gravimetric |
| EC | نمونه‌برداری میدانی | ECمتر مدل EZDO مدل 6022 |
| دما | نمونه‌برداری میدانی | دماسنج |
| دانه بندی | نمونه‌برداری میدانی | |
| کدورت | نمونه‌برداری میدانی | Turbidity Meter مدل Milwaukee MI415 PRO |
| نرخ تبخیر | معاونت آب و فاضلاب شهری | تبخیر تراوشی |
| نرخ رسوب گذاری | معاونت آب و فاضلاب شهری | نقشه باتیمتری |
| دانه بندی رسوبات | نمونه‌برداری میدانی | روش Sieve Analysis- استاندارد ASTM C136 |
| میانگین فاکتور اصطکاک | گزارش | روش Chézy |
| ضریب پخش ذرات بستر | معاونت آب و فاضلاب شهری | تست تراسری |
| نرخ بقا جرم | معاونت آب و فاضلاب شهری | معادلات دوبعدی بقاء جرم |
| گونه های گیاهی | سازمان حفاظت محیطزیست | - |
| بی‌مهرگان | سازمان حفاظت محیطزیست | - |
| ماهی‌ها | سازمان حفاظت محیطزیست | - |
| حجم کل آب کارون | سازمان حفاظت محیطزیست | - |
| تایپ مواد شیمیایی | سازمان حفاظت محیطزیست | - |
| داده های اقلیمی | سازمان هواشناسی | |

رودخانه کارون، به‌عنوان پرآب‌ترین و طولانی‌ترین رود ایران با طول ۸۶۰ کیلومتر، یکی از منابع حیاتی آب در جنوب غرب کشور محسوب می‌شود. مساحت آبخیز این رودخانه به ۶۵٬۲۳۰ کیلومتر مربع می‌رسد و دارای ۱۱ سد و نیروگاه است که در مراحل مختلف بهره‌برداری، ساخت یا پژوهش قرار دارند. حجم کل آب ذخیره‌شده در این سازه‌ها پس از تکمیل به ۲۱ میلیارد و ۵۵۹ میلیون متر مکعب خواهد رسید. متوسط آبدهی روزانه، ماهانه و محیط‌زیستی رود کارون به ترتیب ۵۳۶، ۶۳۱ و ۲۹۰ مترمکعب بر ثانیه است که این ارقام نشان‌دهنده اهمیت بالای این رود در تأمین منابع آبی منطقه است. مطالعات میدانی نشان می‌دهد که شاخص کیفیت آب (WQI) این رودخانه از فاصله ۱۴۰ کیلومتری شمال شهر اهواز به تدریج کاهش می‌یابد. این کاهش کیفیت عمدتاً ناشی از ورود مقادیر زیادی از



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

پساب‌های صنعتی و کشاورزی به بستر رودخانه است (Fathi *et al.*, 2022). موقعیت جغرافیایی رود کارون و نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ ارائه شده است.




**شکل ۱: موقعیت رودخانه کارون و نقاط نمونه‌برداری**

پیش از مدل‌سازی سرنوشت زیستی ناشی از مواد مغذی بر اساس مدل آکواتاکس و تحلیل اثرات مواد مغذی بر ارگانیسم‌ها و وضعیت محیط‌زیستی محدوده مورد مطالعه، این مدل از لحاظ شبیه‌سازی غلظت مواد مغذی مختلف و مشخصات هیدرولیکی جریان شامل دبی جریان و عمق جریان، واسنجی و صحت‌سنجی گردید. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل آکوآتاکس در شبیه‌سازی غلظت مواد مغذی از نمونه‌برداری‌های انجام‌شده در طول دوره آماری استفاده گردید. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی دبی و عمق جریان از اطلاعات دبی و عمق جریان اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شد. برای ارزیابی دقت مدل نیز از نمودارهای گرافیکی مقایسه بین متغیرهای اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده و همچنین شاخص‌های آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب نش–ساتکلیف، میانگین قدر مطلق خطا و غیره استفاده گردید (Tipping and Lofts, 2013). مراحل مدل‌سازی سرنوشت زیستی مواد مغذی در رودخانه کارون توسط مدل Aquatox در جدول ۲ ارائه شده است.



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

**جدول ۲-مراحل مدل‌سازی سرنوشت زیستی مواد مغذی در رودخانه کارون توسط مدل Aquatox**

| Input Data | Input Parameters | |
|---|---|---|
| Stream | نوع شبیه‌سازی | ۱ |
| ۲۰/۰۹/۲۰۲۲–۲۰/۰۹/۲۰۲۳ | دوره شبیه‌سازی | ۲ |
| N=2.76<br>P=0.98<br>$CO_2$=0.5<br>$O_2$=5.7 | مغذی‌ها | ۳ |
| g/$m^2$ dry۱۳/۵Lablle detritus<br>g/$m^2$ dry۶۷/۵//Refractory: | رسوبات | ۴ |
| Eunotia<br>Peri Hi-Nut Dia Warm | گیاهان | ۵ |
| Freshwater Snail (*Lymnaea stagnalis*)<br>Leech (*Hirudo medicinalis*)<br>Segmented Worms (*Polychaeta*) | بی‌مهرگان | ۶ |
| Trigis asp *(Leuciscus vorax*)<br>Yellow Barbell (*Carasobarbus luteus*)<br>Yellowfin (*Luciobarbus xanthopterus*)<br>Common Carp (*Cyprinus carpio*)<br>Anguilloidei (*Anguilla Anguilla*) | ماهی‌ها | ۷ |
| km۹۵۰Length of river:<br>$km^2$۲۴/۷Surface Area:<br>m۳/۷Mean depth:<br>m۲۱Max depth:<br>mm/year۲۵۰۰Mean Evaporation: | خصوصیات محل | ۸ |
| billion cubic/meters ۱۴ | حجم آب | ۹ |
| $c^0$۲۴ | دمای آب | ۱۰ |
| m/s۵/۸ | بارگذاری باد | ۱۱ |
| Ly/d۵۱۸ | بارگذاری نور | ۱۲ |
| ۷/۵۱ | pH | ۱۳ |
| mg/l ۹۳/۶TSS: | جامدات غیرارگانیک | ۱۴ |
| type۳۱ | مواد شیمیایی | ۱۵ |
| Daily Inflow | جریان ورودی | ۱۶ |
| mm۲۶۷ | جریان مستقیم | ۱۷ |
| Oil & Steel | منبع نقطه‌ای آلودگی | ۱۸ |
| Vehicles | منبع غیرنقطه‌ای آلودگی | ۱۹ |



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

حجم کل آب کارون، ۱۴ میلیارد مترمکعب در سال به‌عنوان ورودی ۱ ساله در نظر گرفته شده است. حجم آب تأثیر مستقیمی بر روی غلظت مواد مغذی و آلودگی‌های موجود در رودخانه دارد. متوسط دمای سالانه آب کارون در این مطالعه برابر با ۲۴ درجه سانتی‌گراد است. بار باد برابر با ۵/۸ متر بر ثانیه است. سرعت باد می‌تواند تأثیر زیادی بر روی تبادل گازها (مانند اکسیژن) و همچنین بر روی حرکات سطحی آب داشته باشد. این امر می‌تواند به توزیع مواد مغذی و آلودگی‌ها در سطح آب کمک کند. بار نور برابر با ۵۱۸ لومن در روز است. نور یکی از عوامل حیاتی برای فتوسنتز گیاهان آبی است. میزان نور دریافتی می‌تواند تأثیر مستقیمی بر روی تولید اولیه و رشد گیاهان آبی داشته باشد که در نهایت بر روی چرخه مواد مغذی تأثیرگذار است. pH آب برابر با ۷/۵۱ است. غلظت جامدات معلق کل (TSS) برابر با ۹۳/۶ میلی‌گرم در لیتر است. بارگذاری نقطه‌ای شامل آلودگی‌های ناشی از صنایع نفت و فلزی عنوان شده است. بارگذاری غیرنقطه‌ای ناشی از "Vehicles" است. بارگذاری غیرنقطه‌ای معمولاً ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند ترافیک جاده‌ای است.

## تعیین شاخص‌های تنوع‌زیستی

از ۴ شاخص تنوع‌زیستی شامل Shannon، Simpson، Camargo و Brillouin، برای درک بهتر وضعیت اکوسیستم و اثرات مواد مغذی بر آن در رودخانه کارون استفاده شد. انتخاب این شاخص‌ها، بر اساس خروجی‌های مدل Aquatox در پیش‌بینی آن‌ها بوده است.

### محاسبه شاخص (Shannon)

شاخص Shannon یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای اندازه‌گیری تنوع‌زیستی است. این شاخص نه تنها تعداد گونه‌ها را در نظر می‌گیرد، بلکه توزیع فراوانی آن‌ها را نیز مد نظر قرار می‌دهد. هر چه مقدار H' بیشتر باشد، تنوع‌زیستی بیشتر است. مقادیر آن بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$H' = - \sum (p_i \cdot \ln(p_i)) \qquad \text{Eqs1}$$

که در آن:

$p_i$ = نسبت فراوانی گونه i به کل فراوانی‌ها است.

H' < 1 > ۰: تنوع کم

H' < 3 > ۱: تنوع متوسط

H' > 3: تنوع بالا (Allen *et al*., 2009).

### محاسبه شاخص ( Simpson)

شاخص Simpson به احتمال این که دو نمونه تصادفی از یک جمعیت، از یک گونه خاص انتخاب شوند، اشاره دارد. این شاخص به‌طور خاص بر روی گونه‌های غالب تمرکز دارد و می‌تواند به شناسایی خطر انقراض گونه‌های خاص کمک کند. مقادیر آن از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$D = \sum (p_i^2) \qquad \text{Eqs2}$$

که در آن:

$p_i$ = نسبت فراوانی گونه i به کل فراوانی‌ها

D نزدیک به ۰: تنوع بالاست

D نزدیک به ۱: تنوع پایین است (Gorelick, 2006).



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

### محاسبه شاخص Camargo

شاخص Camargo برای ارزیابی کیفیت آب و وضعیت اکوسیستم‌های آبی طراحی شده است. این شاخص به بررسی تنوع‌زیستی در ارتباط با کیفیت آب و آلودگی می‌پردازد. این شاخص از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{NS}{NT} \qquad \text{Eqs3}$$

که در آن:

NS = تعداد گونه‌های حساس به آلودگی

NT = تعداد کل گونه‌ها

C < 0.5: کیفیت آب ضعیف

C < 0.75 > ۰.۵: کیفیت آب متوسط

C > 0.75: کیفیت آب خوب (Camargo, 2008).

### محاسبه شاخص ( Brillouin)

شاخص Brillouin یکی دیگر از شاخص‌های تنوع‌زیستی است که به‌ویژه در جمعیت‌های کوچک و نادر کاربرد دارد. این شاخص با توجه به تعداد گونه‌ها و فراوانی آن‌ها محاسبه می‌شود. این شاخص نیز بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$H_b = \ln\left(\frac{N}{\prod n_i}\right) \qquad \text{Eqs4}$$

که در آن:

N = تعداد کل نمونه‌ها

$n_i$ = تعداد نمونه‌های مربوط به گونه i

تفسیر: مقادیر بیشتر نشان‌دهنده تنوع بیشتر و ساختار پیچیده‌تر جمعیت است(Palaghianu, 2016).

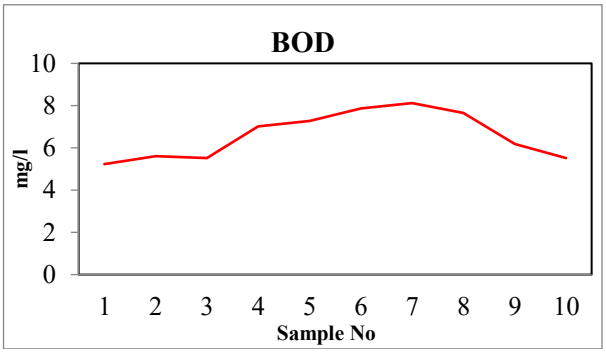
مقادیر شاخص ها، علاوه بر سناریو اصلی، در ۲ سناریو احتمالی تعیین شده و مورد مقایسه قرار گرفت.

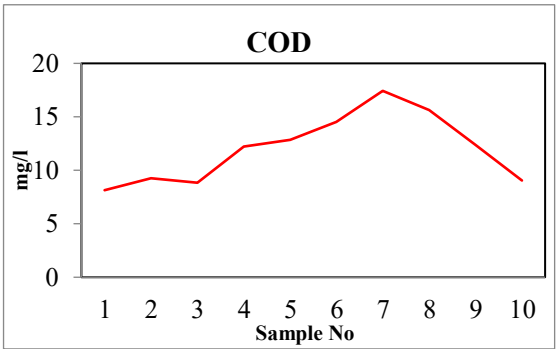
## نتایج

نتایج میانگین مؤلفه‌های کیفی آب رودخانه کارون در ۱۰ منطقه نمونه‌برداری در ۴ فصل در شکل ۲ ارائه شده است. به طور کلی خصوصیات کیفی آب در منطقه شماره ۱ که بیشترین فاصله را از شهر اهواز دارد، از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار بوده است. میانگین مقادیر BOD در نمونه شماره یک، ۵/۲۳ و در نمونه شماره هشت، ۸/۱۲ میلی‌گرم بر لیتر بوده است. مقادیر مطلوب‌تر BOD برای آب رودخانه کمتر از ۳ میلی‌گرم بر لیتر سنجش شده است. مقادیر متوسط BOD در نمونه‌های تحقیق حاضر در رود کارون، بیش از برخی مطالعات پیشین بوده است (Mahmoodabadi and Arshad, 2018). کمترین انحراف معیار مقادیر سنجش‌شده BOD بین فصول نمونه‌برداری در نمونه اول بوده است. متناسب با BOD، مقادیر COD نیز پس از نمونه‌های بالادست، به‌تدریج از ۷ تا ۱۸ میلی‌گرم بر لیتر افزایش داشته است. در نمونه‌هایی که مقادیر BOD و COD افزایش یافته است، مقدار DO کاهشی بوده است. آلوده‌ترین منطقه نمونه‌برداری، ایستگاه شماره ۸ بوده است که اولین منطقه پس از خروج از شهر اهواز است. این نتایج نشان‌دهنده اثر معنی‌دار آلاینده‌های شهری بر آلودگی رود کارون می‌باشد. مقادیر کدورت نیز بین ۱۶/۹ تا ۱۸/۷ NTU متغیر بوده است. این در حالی است که مقادیر کدورت قابل قبول برای آب رودخانه، کمتر از ۱۰ NTU می‌باشد (Huey *et al.*, 2010). مقادیر TSS و EC نیز روند نسبتاً مشابهی را داشته‌اند و از نمونه شماره ۱ تا ۸، مقادیر آنها افزایشی بوده است.

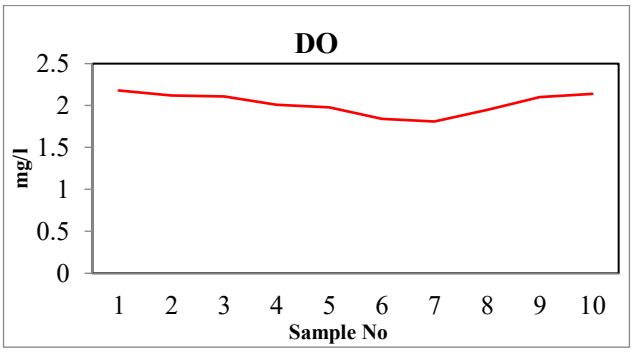


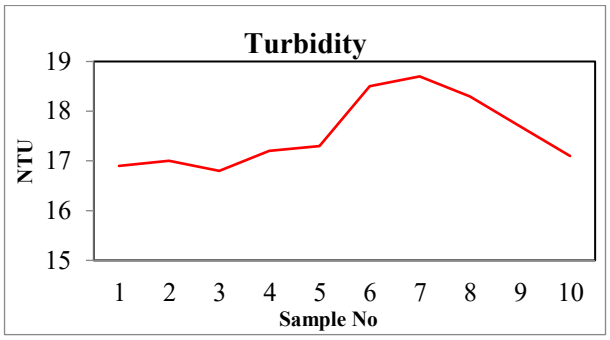
[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]



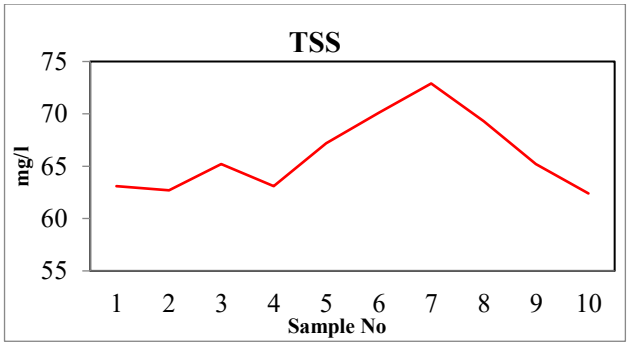



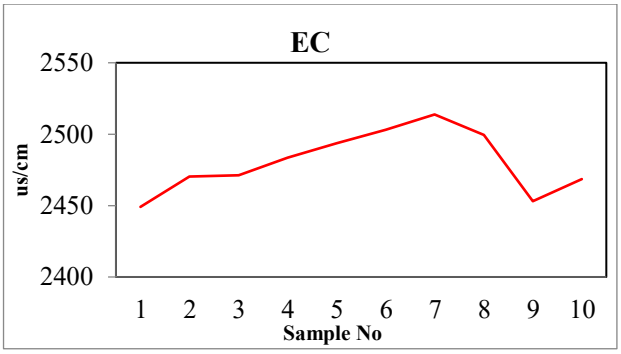

**شکل ۲: نتایج میانگین مقادیر BOD و COD در نمونه های آب رود کارون در ۴ دوره نمونه‌برداری در سال ۲۰۲۳**



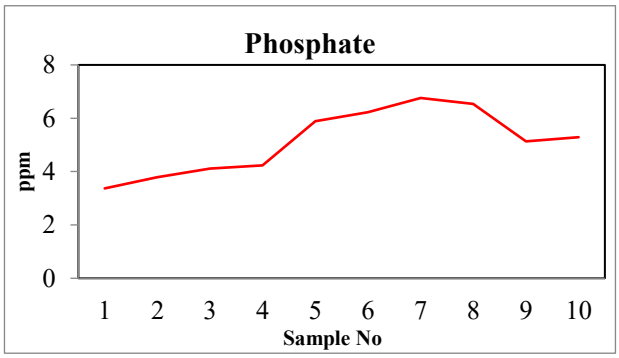



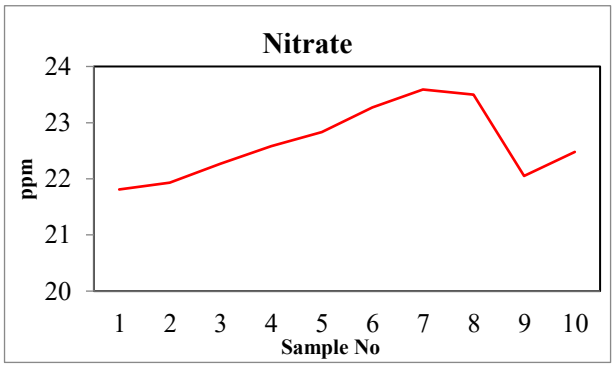

**شکل ۳: نتایج میانگین مقادیر DO و Turbidity در نمونه های آب رود کارون در ۴ دوره نمونه‌برداری در سال ۲۰۲۳**




**شکل ۴: نتایج میانگین مقادیرTSS و EC در نمونه های آب رود کارون در ۴ دوره نمونه‌برداری در سال ۲۰۲۳**




**شکل ۵: نتایج میانگین مقادیر Phosphate) و Nitrate در نمونه های آب رود کارون در ۴ دوره نمونه برداری در سال ۲۰۲۳**

میانگین مقادیر BOD در نمونه شماره یک 5.23و در نمونه شماره هشت، ۸/۱۲ میلی گرم بر لیتر بوده است. مقادیر مطلوب‌تر BOD برای آب رودخانه کمتر از ۳ میلی‌گرم بر لیتر سنجش شده است. مقادیر متوسط BOD در نمونه‌های تحقیق حاضر در رود کارون، بیش از برخی مطالعات پیشین بوده است(Mahmoodabadi and Arshad, 2018). کمترین انحراف معیار



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

مقادیر سنجش شده BOD بین فصول نمونه‌برداری در نمونه اول بوده است. متناسب با BOD، مقادیر COD نیز پس از نمونه های بالادست، به تدریج از ۷ تا ۱۸ میلی گرم بر لیتر افزایش داشته است. در نمونه هایی که مقادیر BOD و COD افزایش یافته است، مقدار DO کاهشی بوده است. آلوده ترین منطقه نمونه برداری، ایستگاه شماره ۸ بوده است که اولین منطقه پس از خروج از شهر اهواز است. این نتایج نشان دهنده اثر معنادار آلاینده های شهری بر آلودگی رود کارون می باشد. مقادیر کدورت نیز بین ۱۶/۹ تا NTU۱۸/۷ متغیر بوده است. این در حالیست که مقادیر کدورت قابل قبول برای آب رودخانه، کمتر از NTU۱۰ می‌باشد(Huey *et al*., 2010). مقادیر TSS و EC نیز روند نسبتا مشابهی را داشته اند و از نمونه شماره ۱ تا ۸، مقادیر آنها افزایشی بوده است.

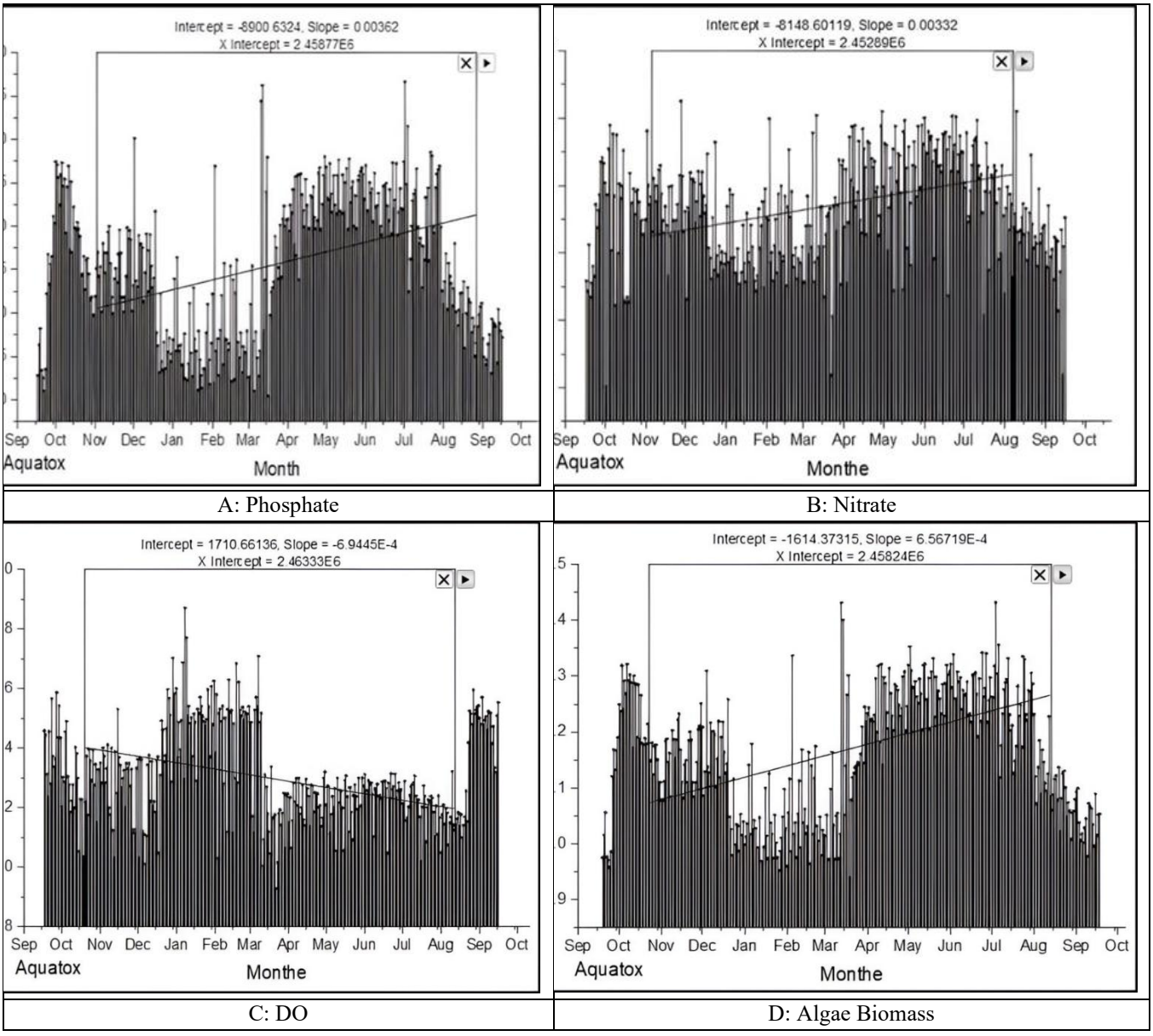
میانگین مقادیر شاخص‌های تنوع‌زیستی شامل شانون، سیمپسون، کامارگو و بریلون به‌ترتیب برابر با ۱/۲۹۵، ۰/۵۸۵، ۰/۳۰۸ و ۱/۲۴۷ بوده است. بررسی مکانی شاخص شانون نشان داد بیشترین مقدار در ایستگاه پیش از ورود به شهر اهواز و کمترین مقدار در محدوده پل پنجم ثبت شده و الگوی آن حاکی از تنوع زیستی متوسط تا ضعیف در طول رودخانه است. مقادیر شاخص سیمپسون نیز از ۰/۴۳۹ تا ۰/۶۸۹ متغیر بوده و بیانگر غالبیت گونه‌ای در برخی ایستگاه‌ها، به‌ویژه نواحی شهری، است. شاخص کامارگو در بازه ۰/۲۵۶ تا ۰/۴۱۱ قرار گرفت و مقدار نسبتاً پایین آن نشان‌دهنده توزیع نامتوازن گونه‌ها و احتمال اثرگذاری تنش‌های محیطی است. شاخص بریلون نیز در بازه ۱/۰۴۵ تا ۱/۵۴۳ تغییر داشت و با وجود اختلاف بین ایستگاه‌ها، الگوی کلی آن بر تنوع‌زیستی محدود در بخش‌های مختلف رودخانه تأکید می‌کند. بررسی شاخص‌های مختلف نشان می‌دهد که کیفیت زیستگاهی و وضعیت تنوع زیستی در ایستگاه‌های بالادست، خصوصاً پیش از ورود به شهر اهواز، مطلوب‌تر بوده است. ایستگاه‌های واقع در محدوده شهری مقادیر پایین‌تری از شاخص‌های تنوع‌زیستی و مقادیر بالاتر غالبیت گونه‌ای را نشان دادند.

### نتایج مدل Aquatox

پس از ورود داده‌ها در مدل بر اساس موارد ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها، مقادیر تخمینی خروجی برای نیترات، فسفات، اکسیژن محلول و بیومس جلبکی ارائه شده است. دوره شبیه‌سازی از ۲۰ سپتامبر ۲۰۲۲ تا ۲۰ سپتامبر ۲۰۲۳ بود. از این رو دوره پیش‌بینی مربوط به زمان مشابه در سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۴ بوده است. مقادیر تخمین زده شده برای مواد مغذی، بیومس جلبکی و اکسیژن محلول در شکل ۶ ارائه شده است.



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]




**شکل ۶: تخمین مقادیر سالانه فسفات(A)، نیترات(B)، اکسیژن محلول(C) و بیومس جلبکی(D) توسط مدل Aquatox در آب رودخانه کارون**

یافته‌ها نشان می‌دهد که میانگین مقادیر سالانه فسفات در آب کارون ۴/۵۵ میلی‌گرم بر لیتر و برای نیترات ۲۳/۶۴ میلی‌گرم بر لیتر تخمین زده شده است. تحلیل منحنی‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقادیر نیترات و فسفات در دوره‌ی اکتبر به سطح بالایی رسیده است. بارش‌های پاییزی که موجب شستشوی مواد مغذی از زمین‌های کشاورزی و ورود آن‌ها به رودخانه می‌شود از دلایل احتمالی این نتایج است (Strokal *et al.,* 2016). همچنین، فعالیت‌های کشاورزی در این فصل افزایش می‌یابد و استفاده از کودهای شیمیایی می‌تواند به افزایش غلظت نیترات و فسفات در آب منجر شود. در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس، مقادیر نیترات و فسفات به کمترین سطح خود رسیده‌اند. افزایش حجم آب رودخانه در این دوره، نقش مهمی در کاهش مواد مغذی دارد. به طور کلی، نتایج مدل Aquatox نشان‌دهنده نوسانات فصلی در مقادیر نیترات و فسفات در آب رودخانه کارون بوده است که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد. این نوسانات تأثیرات قابل توجهی بر کیفیت آب و اکوسیستم‌های آبی داشته است. متوسط مقادیر نیترات و فسفات در سواحل رودخانه تگزاس به ترتیب ۹ تا ۱۲ و ۱ تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر بوده است (Kuwayamd *et al.,* 2020). همچنین مجموع نیترات و فسفات در نمونه‌های آب رودخانه قزل اوزون کمتر



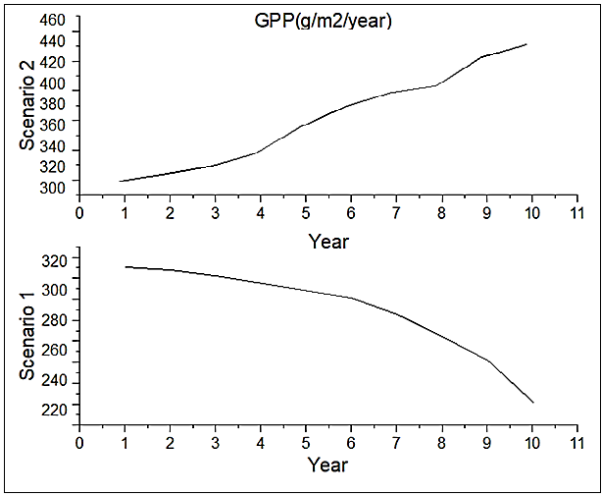
[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

از ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است (Afshari *et al.*, 2022). این نتایج نیز نشان‌دهنده سطح بالای آلودگی رود کارون به نیترات و فسفات در مقایسه با تحقیقات دیگر بوده است. ورود زهاب کشاورزی و پساب‌های صنعتی، نقش مؤثری در این آلودگی دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که میانگین مقادیر سالانه اکسیژن محلول (DO) در آب کارون ۲/۳۱ میلی‌گرم بر لیتر و برای بیومس جلبکی ۱/۱۶ گرم بر لیتر تخمین زده شده است. تحلیل داده‌های سری زمانی نشان می‌دهد که مقادیر اکسیژن محلول در دوره‌های ژانویه، فوریه و مارس به بالاترین سطح خود رسیده‌اند. این افزایش به دلیل دماهای پایین‌تر و کاهش فعالیت‌های متابولیکی جلبک‌ها و افزایش حجم ورودی آب بارندگی در این رودخانه است. از ماه‌های آوریل تا آگوست، کاهش قابل توجهی در مقادیر اکسیژن محلول مشاهده می‌شود که ناشی از افزایش دما و فعالیت‌های متابولیکی جلبک‌ها است.

## نتایج تخمین شاخص GPP (تولید ناخالص اولیه) در بازه ۱۰ ساله توسط مدل آکواتاکس

GPP مخفف "Gross Primary Production" است که به معنی "تولید ناخالص اولیه" می‌باشد. این شاخص به میزان کل کربن دی‌اکسید($CO_2$) جذب شده توسط گیاهان در یک اکوسیستم در طول یک دوره زمانی مشخص اشاره دارد. تولید ناخالص اولیه شامل تمام کربن تولید شده توسط فتوسنتز در گیاهان، جلبک‌ها و سایر ارگانیسم‌های فتوسنتزکننده است.

این مقدار شامل کربنی است که به‌صورت انرژی شیمیایی در مواد آلی ذخیره می‌شود و به‌عنوان منبع انرژی برای سایر موجودات زنده در زنجیره غذایی عمل می‌کند(Anav *et al.*, 2015). GPP به‌عنوان یک معیار از سلامت اکوسیستم و توانایی آن برای تولید انرژی و مواد غذایی در نظر گرفته می‌شود. واحد GPP به‌صورت گرم کربن در متر مربع در سال (g/m2/yr) است. در حال حاضر این نرخ در رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز حدود ۳۱۴ گرم بر متر مربع در سال است. مقایسه مقادیر تخمین شاخص GPP بر اساس ۲ سناریوی تعیین شده در مدل آکواتاکس در شکل ۷ ارائه شده است.




**شکل۷: تغییرات نرخ شاخص GPP در بازه ۱۰ ساله**

نتایج تحقیق حاضر در مورد سرنوشت محیطزیستی مواد مغذی در رودخانه کارون با استفاده از مدل اکواتاکس، نشان‌دهنده‌ی تأثیرات قابل‌توجه ورود مواد مغذی بر تولید ناخالص اولیه (GPP) در این اکوسیستم آبی است. در سناریوی اول که کاهش ۱۵ درصدی ورود مواد مغذی به آب رودخانه را در نظر گرفته است، مقادیر GPP به‌تدریج کاهش یافته و از ۳۱۴ گرم بر مترمربع در سال به ۲۲۳ گرم بر مترمربع در سال دهم رسید. این روند کاهشی نشان‌دهنده‌ی اثرات منفی کاهش مواد مغذی بر رشد و تولید گیاهان آبزی و در نتیجه بر اکوسیستم آبی است. به طور کلی، کاهش مواد مغذی می‌تواند منجر به کمبود انرژی در زنجیره غذایی و کاهش تنوع‌زیستی شود. در مقابل، سناریوی دوم که افزایش ۱۵ درصدی ورود مواد مغذی را مد نظر قرار داده است، مقادیر GPP به‌طور مداوم افزایش یافته و به ۴۵۳ گرم بر مترمربع در سال

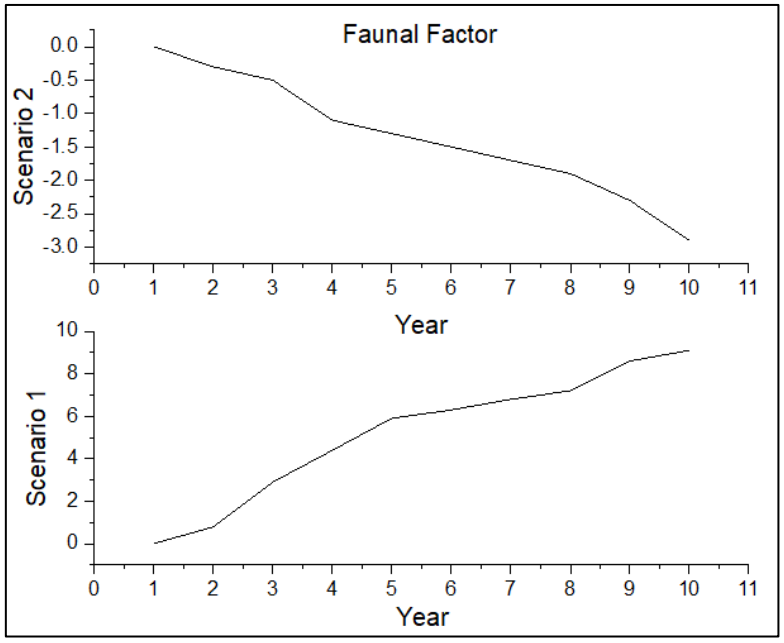


[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

دهم می‌رسد. این افزایش نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت مواد مغذی بر رشد و تولید بیومس گیاهی است که می‌تواند نتیجه‌ی بهبود شرایط زیستی و فراهم شدن منابع غذایی برای موجودات زنده در اکوسیستم باشد.

## نتایج تخمین Faunal Biomass در بازه ۱۰ ساله توسط مدل آکواتاکس

فاکتور Faunal Factor به وزن کل جانداران غیرگیاهی در یک اکوسیستم اشاره دارد. این فاکتور به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی سلامت و تنوع‌زیستی یک زیستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مقدار به‌صورت گرم بر متر مربع (g/m2) بیان می‌شود. با توجه به نبود داده اولیه در خصوص Faunal Factor در رودخانه کارون، مدل آکواتاکس این فاکتور را در ۲ سناریو بر اساس درصد محاسبه کرده است. مقایسه مقادیر تخمین شاخص Faunal Biomass بر اساس ۲ سناریوی تعیین شده در مدل آکواتاکس در شکل ۸ ارائه شده است.




**شکل ۸: تغییرات نرخ شاخص Faunal Factor در بازه ۱۰ ساله**

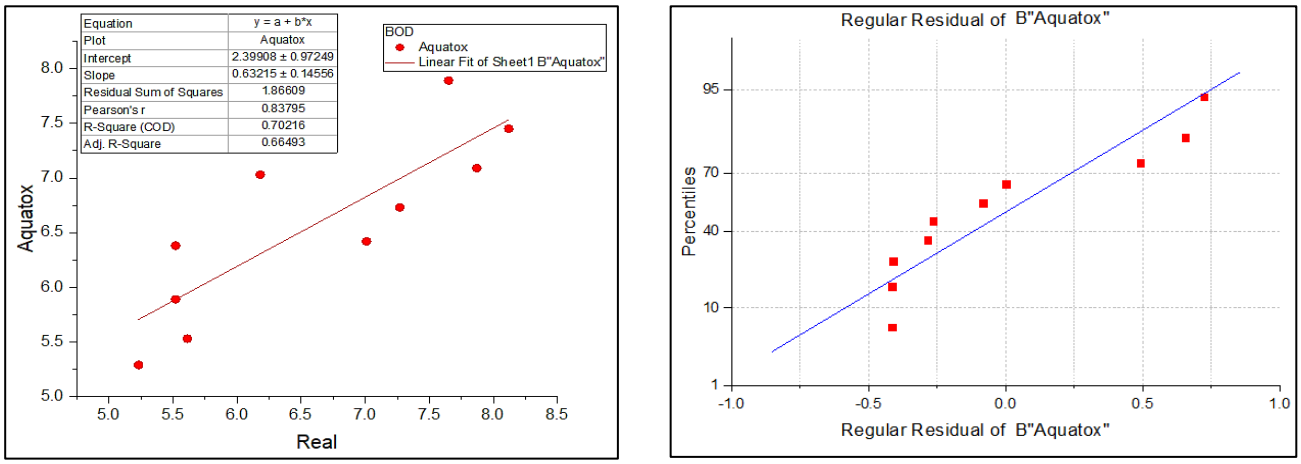
نتایج تحقیق، نشان‌دهنده‌ی تأثیر ورود مواد مغذی بر اکوسیستم آبی این رودخانه است. تغییرات در میزان مواد مغذی ورودی به آب، تأثیرات مستقیمی بر روی تنوع‌زیستی و وزن کل جانوران غیر از گیاهان (شاخص Faunal Factor) در بازه ۱۰ ساله داشته است. در سناریوی اول که کاهش ۱۵ درصدی ورود مواد مغذی به آب رودخانه را در نظر می‌گیرد، شاخص Faunal Factor به‌تدریج افزایش می‌یابد. مقادیر این شاخص در سال‌های مختلف به ترتیب ۰، ۰/۸، ۲/۹، ۴/۴، ۵/۹، ۶/۸۶/۳، ۷/۲، ۸/۶ و ۹/۱ درصد تخمین زده شده است. این روند افزایشی در نتیجه واکنش مثبت فون منطقه به کاهش مواد مغذی است. با کاهش نیترات و فسفات، رقابت بر سر منابع از جمله اکسیژن محلول کاهش یافته و بیومس جانوری افزایش می‌یابد. سناریوی دوم که افزایش ۱۵ درصدی مواد مغذی را در نظر می‌گیرد، مقادیر شاخص Faunal Factor به‌تدریج کاهش یافته و به ترتیب به ۰، ۰/۳-، ۰/۵-، ۱/۱-، ۱/۳-، ۱/۵-، ۱/۷-، ۱/۹-، ۲/۳- و ۲/۹- درصد می‌رسد. این روند کاهشی نشان‌دهنده‌ی تأثیر منفی افزایش مواد مغذی بر وزن جانداران غیر از گیاهان است. غلظت بالای نیترات و فسفات علاوه بر افزایش پتانسیل وقوع (Eutrophication) می‌شود، با کاهش اکسیژن محلول در آب و بروز شرایط نامساعد برای جانداران آبزی، منجر به کاهش بیومس جانوری خواهد شد.



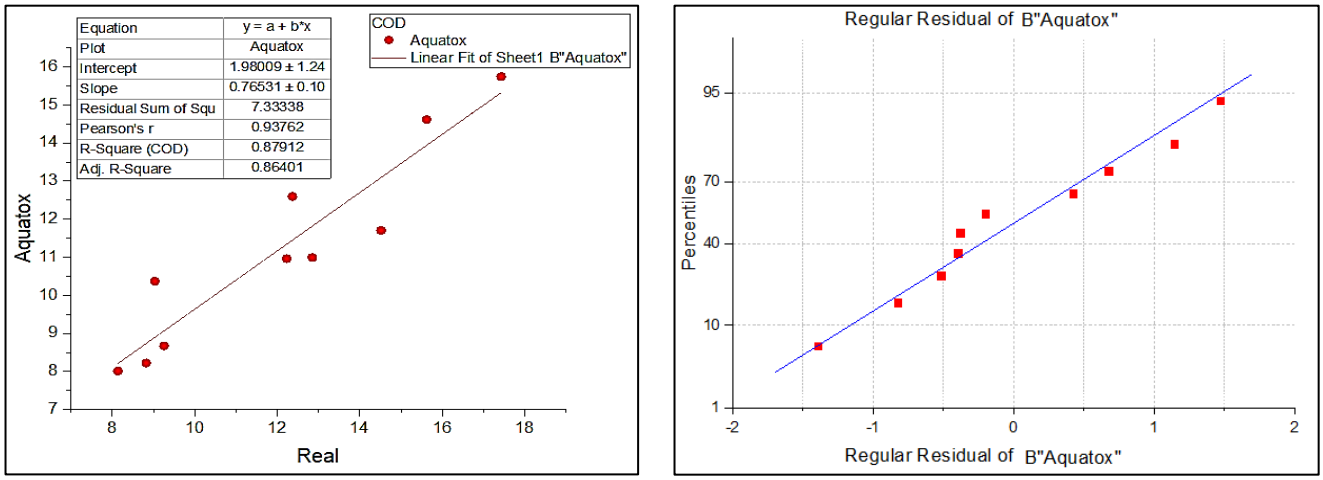
[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

## اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی بر اساس داده های اصلی و بر اساس داده های BOD، COD، DO و EC صورت گرفته است. داده‌های شبیه‌سازی شده به‌صورت سالانه بوده است. به منظور اعتبارسنجی، داده های منطقه دوره نمونه‌برداری با داده‌های میانگین سالانه مدل‌سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. از رگرسیون خطی و شاخص $R^2$ برای ارزیابی انطباق استفاده شد. نتایج ارزیابی انطباق داده های اندازه‌گیری شده با داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل آکواتاکس در شکل های ۹ و ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.



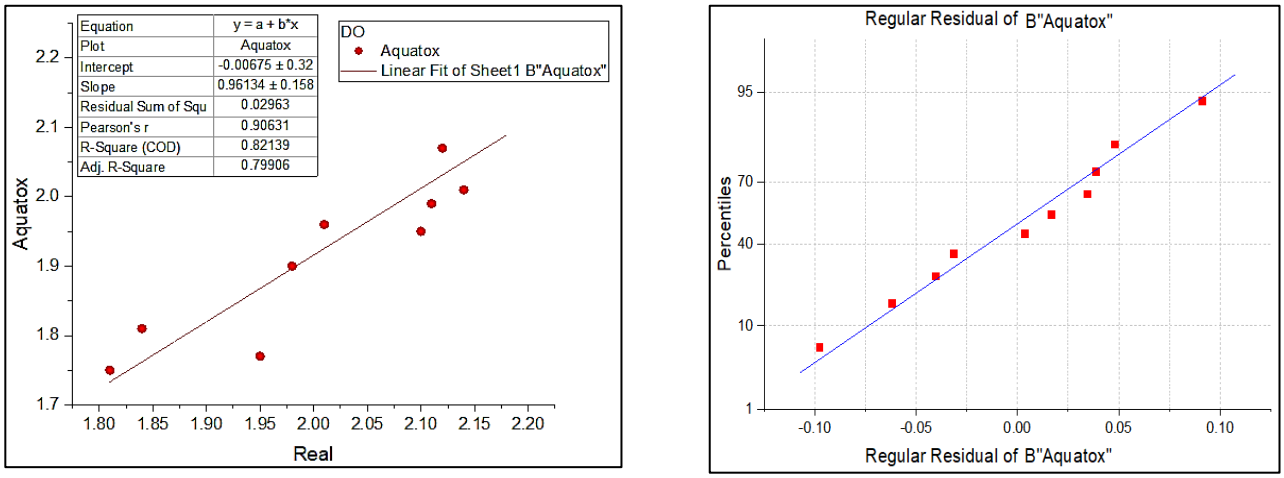

**شکل ۹: ارزیابی انطباق داده‌های واقعی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل آکواتاکس- BOD**



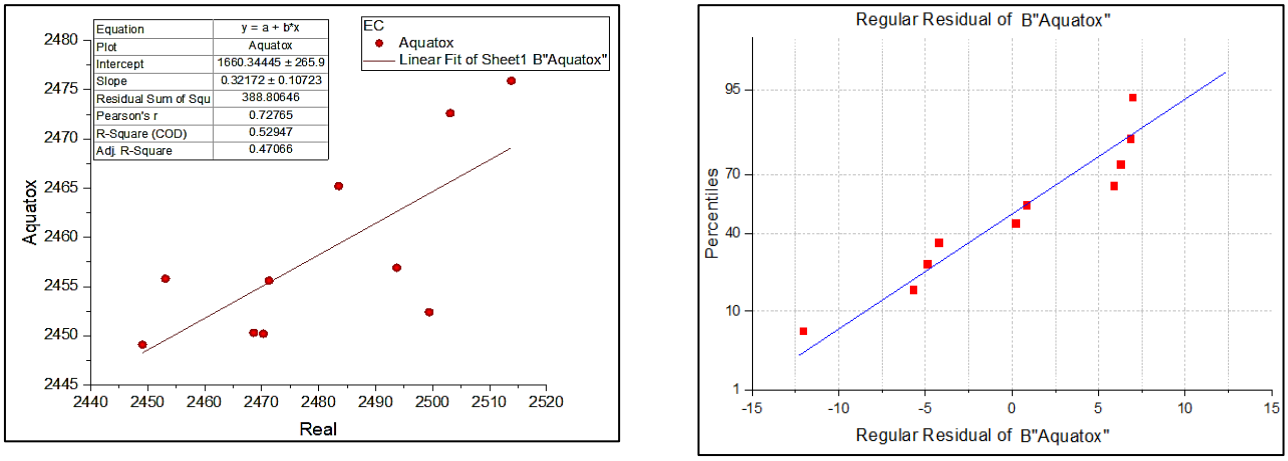

**شکل ۱۰: ارزیابی انطباق داده‌های واقعی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل آکواتاکس- COD**



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]




**شکل ۱۱: ارزیابی انطباق داده‌های واقعی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل آکواتاکس- DO**




**شکل ۱۲: ارزیابی انطباق داده‌های واقعی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل آکواتاکس- EC**

نتایج به‌دست‌آمده از اعتبارسنجی مدل آکواتاکس در مطالعه اثرات محیط‌زیستی نیترات و فسفات در رودخانه کارون، نشان‌دهنده توانایی این مدل در پیش‌بینی برخی از پارامترهای کیفی آب است. با توجه به مقادیر واقعی و تخمین زده شده برای پارامترهای BOD، COD، DO و EC، مشخص شده است که مدل آکواتاکس در پیش‌بینی COD با ضریب همبستگی ($R^2$) برابر با ۰/۸۷، بهترین عملکرد را داشته است. این نشان‌دهنده تطابق نزدیک نتایج مدل با داده‌های واقعی است و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. ضریب همبستگی برای مقادیر BOD و DO به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۸۲ بوده است که دقت قابل قبولی در تخمین این دو پارامتر، به‌ویژه اکسیژن محلول را نشان می‌دهد. با این حال، نتایج برای پارامتر EC با ضریب همبستگی ۰/۵۲ نشان‌دهنده عدم دقت کافی مدل در پیش‌بینی این پارامتر است. این نتایج به دلیل پیچیدگی‌های موجود در رفتار الکتریکی آب و تأثیرات متغیرهای محیطی بر آن و نیز تأثیر کمتر مواد مغذی بر این مؤلفه است.

## بحث و نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان داد مقادیر قابل‌توجه مواد مغذی در اکوسیستم آبی رودخانه کارون بوده است. میانگین سالانه فسفات و نیترات به ترتیب ۴/۵۵ میلی‌گرم بر لیتر و ۲۳/۶۴ میلی‌گرم بر لیتر بود. بر اساس توصیه (EPA)، برای جلوگیری از رشد بیش از حد جلبک‌ها، غلظت فسفات در آب‌های سطحی باید کمتر از ۱/۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد (Bayeh *et al.*, 2024). در این تحقیق، مقدار اکسیژن محلول به ۲/۳۱



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

میلی‌گرم بر لیتر رسیده که نشان‌دهنده شرایط نامساعد برای حیات آبزیان است. مقادیر پایین اکسیژن محلول به مرگ و میر آبزیان و کاهش تنوع گونه‌ها منجر می‌شود. بیومس جلبکی نیز در این تحقیق به مقدار ۱/۱۶ گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد، که این میزان نیز نشان‌دهنده افزایش رشد جلبک‌ها و احتمالاً شرایط نامساعد برای سایر موجودات زنده است (Larance *et al.,* 2025). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افزایش بیومس جلبکی می‌تواند باعث کاهش تنوع‌زیستی و اختلال در زنجیره غذایی اکوسیستم‌های آبی شود (Paerl and Otten, 2013). در واقع، وقتی جلبک‌ها به طور غیرقابل‌کنترل رشد می‌کنند، منابع غذایی برای سایر آبزیان کاهش می‌یابد. تحقیقات دیگر نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند. مطالعه‌ای در رودخانه‌ی دانوب نشان داد که افزایش ۳/۷ درصدی غلظت نیترات در یک بازه ۵ ساله منجر به کاهش قابل توجه تنوع‌زیستی و تغییرات شدید در ساختار جامعه آبزیان گردید (Baird *et al.,* 2016). مقادیر بالای مواد مغذی می‌تواند منجر به ایجاد شرایط بی‌هوازی (anoxic conditions) در آب‌ها شود که تأثیرات منفی بیشتری بر روی تنوع‌زیستی خواهد داشت (Damseth *et al.,* 2024). مدل Aquatox به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شبیه‌سازی سرنوشت مواد مغذی در اکوسیستم‌های آبی، نتایج قابل‌توجهی را در سناریوهای مختلف ارائه داد. در سناریوی کاهش ۱۵ درصدی مواد مغذی، میانگین شاخص شانون به ۱/۴۸ افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود تنوع‌زیستی در مقایسه با سناریوی افزایش ۱۵ درصدی مواد مغذی است که میانگین شاخص شانون به ۱/۰۱ کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش غلظت مواد مغذی می‌تواند به کاهش رقابت بین گونه‌ها و افزایش تنوع‌زیستی کمک کند. این یافته‌ها با نتایج تحقیقاتی که نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاهش مواد مغذی بر تنوع‌زیستی هستند، همخوانی دارد (Smith *et al.,* 2010). نتایج نشان‌دهنده تأثیرات مستقیم تغییرات مواد مغذی بر شاخص‌های زیستی دیگر نیز بود. افزایش شاخص‌های سیمپسون و کامارگو در سناریوی کاهش مواد مغذی، حرکت اکوسیستم به سمت تعادل و پایداری را تأیید کرد. این تغییرات می‌تواند به بهبود شرایط محیط‌زیستی و افزایش کیفیت آب منجر شود که در نهایت به نفع حیات آبزیان خواهد بود. در این راستا، نتایج مطالعه کارپنتر و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان داده که کاهش سطوح مواد مغذی منجر به کاهش رشد جلبک‌ها و در نتیجه بهبود شرایط اکولوژیکی در رودخانه ساسکاچوان شمالی در کانادا گردید (Morales-Martin *et al.,* 2018).

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که GPP (تولید اولیه ناخالص) در سناریوی کاهش مواد مغذی از ۳۱۴ گرم بر مترمربع در سال به ۲۲۳ گرم کاهش یافت. این کاهش احتمالاً ناشی از محدودیت منابع غذایی بوده که بر زنجیره غذایی اکوسیستم تأثیرگذار است. تولید اولیه ناخالص تحت تأثیر غلظت مواد مغذی قرار دارد و کاهش این غلظت منجر به کاهش GPP می‌شود (Fernandez-Martinez *et al.,* 2018). تغییرات در غلظت مواد مغذی همچنین تأثیرات قابل توجهی بر ساختار جامعه زیستی دارد. در سناریوی کاهش مواد مغذی، شاخص Faunal Factor به‌تدریج افزایش یافت، در حالی که در سناریوی افزایش مواد مغذی این شاخص کاهش پیدا کرد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاهش مواد مغذی بر ساختار جامعه زیستی است که می‌تواند منجر به افزایش پایداری اکوسیستم شود (Briones *et al.,* 2018). رودخانه‌ها به‌عنوان سیستم‌های پیچیده‌ای از نظر هیدرولیک و محیط‌زیست عمل می‌کنند و درگیر فرآیندهای اکولوژیکی و شیمیایی مختلف در درون خود می‌شوند. رودخانه کارون به‌عنوان پرآب‌ترین رودخانه ایران، تحت تأثیر فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و همچنین پساب‌های شهری است که منجر به افزایش غلظت این مواد غذایی در آب و رسوبات آن می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدیریت سرنوشت مواد مغذی در اکوسیستم‌های آبی، به‌ویژه در رودخانه کارون، نقش بسزایی در حفظ و ارتقاء تنوع‌زیستی دارد. با استفاده از مدل اکواتاکس و بررسی دو سناریوی مختلف، مشخص شد که تغییرات در غلظت مواد مغذی تأثیرات قابل توجهی بر روی تنوع‌زیستی و پایداری اکوسیستم‌ها دارد. در سناریوی کاهش ۱۵ درصدی مواد مغذی، تنوع‌زیستی افزایش یافت و این نشان‌دهنده اهمیت کنترل ورود مواد مغذی به آب‌های سطحی است.

میانگین شاخص‌های تنوع‌زیستی مانند شانون و سیمپسون در سناریوی کاهش مواد مغذی بهبود یافت، که نشان‌دهنده افزایش تنوع گونه‌ها و کاهش رقابت بین آن‌ها است. این نتایج حاکی از آن است که کاهش غلظت نیترات و فسفات می‌تواند به بهبود وضعیت اکوسیستم‌های آبی کمک کند و فضای مناسب‌تری برای رشد گونه‌های مختلف فراهم آورد. همچنین، تغییرات در مقادیر GPP و Faunal Factor نیز به



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

وضوح نشان‌دهنده تأثیرات مثبت کاهش مواد مغذی بر روی عملکرد اکوسیستم بود. سناریوی افزایش ۱۵ درصدی مواد مغذی منجر به کاهش تنوع‌زیستی و افزایش رقابت بین گونه‌ها شد. نتایج نشان داد که در این شرایط، مقادیر GPP به‌طور مداوم افزایش می‌یابد، اما این افزایش در واقع می‌تواند نشانه‌ای از عدم تعادل در اکوسیستم باشد. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که مدیریت صحیح مواد مغذی در رودخانه‌ها باید به‌عنوان یک اولویت در سیاست‌های محیط‌زیستی مورد توجه قرار گیرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های کنترل آلودگی و مدیریت منابع آب با هدف کاهش ورود مواد مغذی به اکوسیستم‌های آبی تدوین شود. این اقدامات منجر به حفظ و ارتقاء تنوع‌زیستی و پایداری اکوسیستم آبی کارون شود.

## منابع

**Akinnawo, S. O., 2023.** Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. Environmental Challenges, 12, 100733. https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733

**Akkoyunlu, A., and Karaaslan, Y., 2015.** Assessment of improvement scenario for water quality in Mogan Lake by using the AQUATOX Model. Environmental Science and Pollution Research, 22(18), 14349-14357. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5027-0

**Anav, A., Friedlingstein, P., Beer, C., Ciais, P., Harper, A., Jones, C., and Zhao, M., 2015.** Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review. Reviews of Geophysics, 53(3), 785-818.

**AFSHARI, A., ALAMDARI, P., GOLCHIN, A., and Askari, M. S. 2022.** Investigating the effect of fish ponds on water quality of Ghezel Ozan river. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 24(2 (117) ), 273-284. SID. https://sid.ir/paper/1064991/en

**Allen, B., Kon, M. and Bar-Yam, Y. 2009.** A new phylogenetic diversity measure generalizing the Shannon index and its application to phyllostomid bats. The American Naturalist, 174(2), 236-243.

**Baird, J., Jollineau, M., Plummer, R. and Valenti, J. 2016.** Exploring agricultural advice networks, beneficial management practices and water quality on the landscape: A geospatial social-ecological systems analysis. Land use policy, 51, 236-243. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.11.017

**Bayeh, A., Tibebe, D., Misganaw, S., Kassa, Y., G-hiwot, M., Awoke, T. and Markos, A. 2024**. Evaluation and characterization of wastewater generated from University of Gondar, Ethiopia. South African Journal of Chemical Engineering, 48(1), 285-291. https://hdl.handle.net/10520/ejc-chemeng-v48-n1-a27

**Briones, M. J. 2018.** The serendipitous value of soil fauna in ecosystem functioning: the unexplained explained. Frontiers in Environmental Science, 6, 149. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00149

**Camargo, J. A. 2008.** Revisiting the relation between species diversity and information theory. Acta biotheoretica, 56(4), 275-283.

**Camargo, R. D. A., Calijuri, M. L., Santiago, A. D. F. and Couto, E. D. A. D., 2010.** Water quality prediction using the QUAL2Kw model in a small karstic watershed in Brazil. Acta Limnologica Brasiliensia, 22, 486-498.

**Chen, P., Zhao, W., Chen, D., Huang, Z., Zhang, C. and Zheng, X. 2022.** Research progress on integrated treatment technologies of rural domestic sewage: a review. Water, 14(15), 2439. https://doi.org/10.3390/w14152439

**Craswell, E. 2021.** Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. SN Applied Sciences, 3(4), 518. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8

**Damseth, S., Thakur, K., Kumar, R., Kumar, S., Mahajan, D., Kumari, H. and Sharma, A. K. 2024**. Assessing the impacts of river bed mining on aquatic ecosystems: A critical review of effects on water quality and biodiversity. HydroResearch, 7, 122-130. https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.01.004

**Ernst, M. R. and Owens, J. 2009.** Development and application of a WASP model on a large Texas reservoir to assess eutrophication control. Lake and Reservoir Management, 25(2), 136-148. https://doi.org/10.1080/07438140902821389

**Fachrul, M. F., Rinanti, A., Hendrawan, D. I., Salsabil, M. A. and Alreekabi, N. K. 2021.** Distribution of nitrate, phosphate and N/P ratio in Maninjau Lake, West Sumatra, Indonesia. In IOP Conference Series: Earth



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

and Environmental Science (Vol. 754, No. 1, p. 012028). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/754/1/012028

**Fathi, P., Ebrahimi Dorche, E., Zare Shahraki, M., Stribling, J., Beyraghdar Kashkooli, O., Esmaeili Ofogh, A. and Bruder, A. 2022.** Revised Iranian Water Quality Index (RIWQI): a tool for the assessment and management of water quality in Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 194(7), 504. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10121-9

**Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I. A., Sardans, J., Luyssaert, S., Campioli, M. and Peñuelas, J. 2014.** Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance. Nature climate change, 4(6), 471-476. https://doi.org/10.1038/nclimate2177

**Gorelick, R. 2006.** Combining richness and abundance into a single diversity index using matrix analogues of Shannon's and Simpson's indices. Ecography, 29(4), 525-530.

**Hasheminasab, S., Rahimi, D., Zakerinejad, R. and Kropáček, J. 2022.** Assessment of climate change impact on surface water: a case study—Karoun River Basin, Iran. Arabian Journal of Geosciences, 15(9), 904. https://doi.org/10.1007/s12517-022-09969-5

**Hakkim, A. H., Kirthiga, S. S., Jain, S. G., Divya, A. M., Raghavan, R. and Gopinath, A. 2024.** Nitrates and phosphates: Boon or bane for waterbodies. In Aquatic Pollution (pp. 279-289). CRC Press.

**Hedayatzadeh, F., Ildoromi, A., Hassanzadeh, N., Bahramifar, N. and Banaee, M. 2024.** Pollution, spatial distribution, and health risks assessment of nutrient concentration in surface water resources of Maroon—Jarahi Basin in southwestern Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 196(6), 517. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12685-0

**Hejazy, M., Norouzi, R., Abdi, F. and Javid, F. 2023.** The impact of aquaculture activities on nitrogenous and phosphorous pollution of water resources in northern Iran. Arabian Journal of Geosciences, 16(4), 255. https://doi.org/10.1007/s12517-023-11347-8

**Huey, G. M. and Meyer, M. L. 2010.** Turbidity as an indicator of water quality in diverse watersheds of the Upper Pecos River Basin. Water, 2(2), 273-284. https://doi.org/10.3390/w2020273

**Khan, S., Ali, M. and Ahmed, A. 2023.** Impacts of Diverse Phosphatic Fertilizer Applications on Metal .Dynamics and Environmental Sustainability. Indus Journal of Animal and Plant Sciences, 1(02), 43-47

**Kuwayama, Y., Olmstead, S. M., Wietelman, D. C. and Zheng, J. 2020.** Trends in nutrient-related pollution as a source of potential water quality damages: A case study of Texas, USA. Science of the Total Environment, 724, 137962. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137962

**Larance, S., Wang, J., Delavar, M. A. and Fahs, M. 2025.** Assessing Water Temperature and Dissolved Oxygen and Their Potential Effects on Aquatic Ecosystem Using a SARIMA Model. Environments, 12(1), 25. Lombardo, A., Franco, A., Pivato, A., & Barausse, A. (2015). Food web modeling of a river ecosystem for risk assessment of down-the-drain chemicals: A case study with AQUATOX. Science of The Total Environment, 508, 214-227. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.038

**Mahmoodabadi, M. and Arshad, R. R. 2018.** Long-term evaluation of water quality parameters of the Karoun River using a regression approach and the adaptive neuro-fuzzy inference system. Marine pollution bulletin, 126, 372-380. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.051

**Martin, T. M., Esculier, F., Levavasseur, F. and Houot, S. 2022.** Human urine-based fertilizers: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 52(6), 890-936. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1838214

**Morales-Marín, L., Wheater, H. and Lindenschmidt, K. E. 2018.** Potential changes of annual-averaged nutrient export in the south saskatchewan river basin under climate and land-use change scenarios. Water, 10(10), 1438. https://doi.org/10.3390/w10101438

**Noor, R., Maqsood, A., Baig, A., Pande, C. B., Zahra, S. M., Saad, A. and Singh, S. K. 2023.** A comprehensive review on water pollution, South Asia Region: Pakistan. Urban Climate, 48, 101413. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101413

**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(20), 2819. https://doi.org/10.3390/w13202819



[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

**Oliveira, B., Bola, J., Quinteiro, P., Nadais, H. and Arroja, L. 2012.** Application of Qual2Kw model as a tool for water quality management: Cértima River as a case study. Environmental monitoring and assessment, 184, 6197-6210. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2413-z

**Park, R. A., Clough, J. S. and Wellman, M. C. 2008.** AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems. Ecological Modelling, 213(1), 1-15. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.01.015

**Paerl, H. W. and Otten, T. G. 2013.** Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. Microbial Ecology, 65(4), 995-1010. https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y

**Palaghianu, C. 2016.** A tool for computing diversity and consideration on differences between diversity indices. arXiv preprint arXiv:1602.04005.

**Sastry, K. V. H., Moudgal, R. P., Mohan, J., Tyagi, J. S. and Rao, G. 2002.** Spectrophotometric determination of serum nitrite and nitrate by copper–cadmium alloy. Analytical biochemistry, 306(1), 79-82. https://doi.org/10.1006/abio.2002.5676

**Smith, K. E., Dom, N., Blust, R. and Mayer, P. 2010.** Controlling and maintaining exposure of hydrophobic organic compounds in aquatic toxicity tests by passive dosing. Aquatic toxicology, 98(1), 15-24.

**Strokal, V., Kurovska, A. and Strokal, M. 2023.** More river pollution from untreated urban waste due to the Russian-Ukrainian war: a perspective view. Journal of Integrative Environmental Sciences, 20(1), 2281920. https://doi.org/10.1080/1943815X.2023.2281920

**Sun, H., Tian, Y., Li, L., Zhuang, Y., Zhou, X., Zhang, H. and Huang, K. 2024.** Unraveling spatial patterns and source attribution of nutrient transport: Towards optimal best management practices in complex river basin. Science of the Total Environment, 906, 167686. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167686

**Tan, Z., Ren, J., Li, S., Li, W., Zhang, R. and Sun, T. 2023.** Inversion of nutrient concentrations using machine learning and influencing factors in Minjiang River. Water, 15(7), 1398. https://doi.org/10.3390/w15071398

**Tipping, E. and Lofts, S. 2013.** Metal mixture toxicity to aquatic biota in laboratory experiments: application of the WHAM-FTOX model. Aquatic toxicology, 142, 114-122. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.08.003

**Zarei, H. and Pourreza Bilondi, M. 2013.** Factor analysis of chemical composition in the Karoon River basin, southwest of Iran. Applied Water Science, 3, 753-761. https://doi.org/10.1007/s13201-013-0123-0

**Zhu, D., Li, Q. and Yan, B. 2024.** Assessment of Nutrients and Heavy Metals in the Sediments of the Dali River and Wuding River. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 1-14. https://doi.org/10.1080/15320383.2024.2366917

[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]

# Environmental Fate of Nutrients in the Karun River Aquatic Ecosystem Using the Aquatox Model

**Mohsen Davoudi**[1]
**Azita Koushafar**[1*]
**Fatemeh Karimi Organi**[1]
**Hossein Fathian**[2]
**Hadideh Maboudi**[3]

*1. Department of Environment, Ahv. C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.*
*2. Department of Water Resources Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.*
*3. Department of fisheries, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.*

***Corresponding author:**
az.koushafar@iau.ac.ir

Received date: **June/01/2025**
Accepted date: **December/29/2025**

## Abstract

The study of nutrient fate in aquatic ecosystems is of paramount importance for environmental management and biodiversity conservation. This research aimed to assess the environmental fate of nutrients in the Karun River using the Aquatox model in 2023. Water sampling was conducted seasonally at 10 different points (40 samples in total) (80 km north to 40 km south), and phosphate and nitrate levels were measured using the Hach spectrophotometry method. Additionally, the parameters Dissolved Oxygen (DO), Electrical Conductivity (EC), pH, and Total Suspended Solids (TSS) were measured according to standard methods. Benthic sediment samples were collected using an Ekman grab. A light microscope was used for the identification and counting of benthic species. For modeling the fate of nutrients, two scenarios were considered: S1 (15% reduction in nutrients) and S2 (15% increase in nutrients). The results showed that the average biodiversity indices, including Shannon, Simpson, Camargo, and Brillouin, were 1.295, 0.585, 0.308, and 1.247, respectively, indicating relatively poor biodiversity in the Karun River ecosystem. Furthermore, the annual average concentrations of phosphate and nitrate were estimated to be 4.55 mg/L and 64.23 mg/L, respectively. The simulation results revealed that a 15% reduction in nutrient concentration led to an increase in biodiversity; the average Shannon index reached 1.48 in the nutrient reduction scenario and 1.01 in the concentration increase scenario. Furthermore, the values of GPP (Gross Primary Production) decreased from 314 g per square meter per year to 223 g in the nutrient reduction scenario, while GPP reached 453 g per square meter per year in the nutrient increase scenario. The Faunal Factor index also showed a gradual increase in the nutrient reduction scenario, and conversely, a decrease in the nutrient increase scenario. Overall, the results of this research indicated that a reduction in nutrients can contribute to decreased interspecific competition and increased biodiversity.

**Keywords:** Aquatic ecosystems, Biodiversity, Nutrients, Aquatox model, Water pollution.

[ Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30 ]