



Spatiotemporal Analysis of Global In-stream Phosphorus Concentrations from 2012 to 2021

R. Sheikholeslami^{1*}, M. Jalali², and S. Vahab³

Abstract

Phosphorus (P) is an essential nutrient in nature, playing a critical role in plant growth and food production. However, the interplay between environmental factors and human activities, particularly the excessive use of P-based fertilizers, can significantly impact P concentrations in surface waters. This leads to a decline in water quality and serious environmental consequences, such as eutrophication. This study investigates the spatiotemporal variations in monthly P concentrations in global surface waters from 2012 to 2021. To achieve this, data from various sources such as GEMStat, WATERBASE, WQP, and CESI were aggregated, integrated, and standardized into a comprehensive database named GloPhos using machine learning algorithms. Statistical analyses revealed that the global mean and median P concentrations were 0.13 and 0.06 mg/L, respectively. Furthermore, approximately 58% of the monitoring stations recorded P levels exceeding the permissible limit of 0.05 mg/L. The high-risk stations were predominantly located in France, India, and the United States. The findings of this study offer valuable insights for policymakers, aiding in developing effective management strategies to reduce P pollution and mitigate eutrophication in aquatic ecosystems. The proposed GloPhos database is freely available to support researchers in developing numerical models and future projections, contributing to efficient water quality management and the optimization of fertilizer usage.

Keywords: Water Quality, Phosphorus Pollution, Eutrophication, Surface Waters, Environmental Monitoring.

Received: December 7, 2024

Accepted: February 15, 2025

تحلیل تغییرات زمانی- مکانی غلظت فسفر در رودخانه‌های سطحی جهان در بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۲۱

سید رضی شیخ‌الاسلامی^{۱*}، مهرنوش جلالی^۲ و سارا وهاب^۳

چکیده

فسفر یکی از مواد مغذی اساسی در طبیعت است که به دلیل اهمیت آن در رشد گیاهان، برای تولید غذا ضروری است. با این حال، برهم‌کنش عوامل محیط‌زیستی و فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه مصرف بی‌رویه کودهای فسفردار، می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر غلظت فسفر در آب‌های سطحی و در نتیجه در کاهش کیفیت آب و پیامدهای زیست‌محیطی جدی، مانند بروز پدیده تغذیه‌گرایی، داشته باشد. این پژوهش به بررسی تغییرات زمانی- مکانی غلظت ماهانه فسفر در آب‌های سطحی جهان در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ می‌پردازد. بدین منظور، ابتدا داده‌های موجود در منابع معتبری مانند GEMStat، WATERBASE، WQP، و CESI، توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین در یک پایگاه داده جامع با نام GloPhos گردآوری، تلفیق و استانداردسازی شدند. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد میانگین و میانه غلظت فسفر به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۰۶ میلی‌گرم بر لیتر است و حدود ۵۸ درصد از ایستگاه‌های موردبررسی، غلظتی بالاتر از حد مجاز ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر ثبت کرده‌اند. ایستگاه‌های پرخطر در فرانسه، هند و آمریکا شناسایی شدند. یافته‌های این مطالعه کاربردهای مهمی برای سیاست‌گذاران دارد، از جمله کمک به تدوین استراتژی‌های مدیریتی به‌منظور کاهش آلودگی فسفر و پیشگیری از تغذیه‌گرایی در اکوسیستم‌های آبی. علاوه بر این، پایگاه داده GloPhos به‌صورت رایگان در دسترس قرار گرفته است تا به توسعه مدل‌های عددی و پیش‌بینی‌های آتی توسط محققان کمک کند تا به بهره‌گیری مؤثر در مدیریت کیفی منابع آب و بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی منجر شود.

کلمات کلیدی: کیفیت آب، آلودگی فسفر، تغذیه‌گرایی، آب‌های سطحی، پایش زیست‌محیطی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۹/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: razi.sheikholeslami@sharif.edu

2- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

3- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

DOI: [10.22034/iwrr.2025.492649.2804](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.492649.2804)

۱- استادیار گروه مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۴ امکان‌پذیر است.

مغذی‌ای همچون فسفر به پهنه‌های آبی شاهد پدیده تغذیه‌گرایی^۱ خواهیم بود که یک مشکل گسترده در اکوسیستم‌های آبی در سراسر جهان است (Atanasova et al., 2006). پدیده تغذیه‌گرایی باعث رشد بیش‌ازحد جلبک‌ها و پلانکتون‌ها می‌شود که نهایتاً تغییرات ساختاری در اکوسیستم‌های آبی مانند از دست رفتن زیبایی بصری منطقه، اکسیژن زدایی، کاهش کیفیت آب و کاهش تنوع زیستی را در پی خواهد داشت (Stelzer et al., 2022). آب‌های دچار شده به تغذیه‌گرایی همچنین می‌توانند به مناطق مرده^۲ تبدیل شوند که قادر به پشتیبانی از زندگی آبزیان نیستند.

تأثیر عوامل انسانی در بروز این مشکلات غیرقابل چشم‌پوشی است؛ زیرا جمعیت جهان به‌طور پیوسته در حال افزایش است و مشخصاً در نواحی نزدیک به رودخانه‌ها به دلیل شرایط مطلوب زندگی مانند در دسترس بودن زمین‌های حاصلخیز و آب کافی، تراکم جمعیت بیشتر است (Turner and Rabalais, 2003). بنابراین، رودخانه‌ها نقش عمده‌ای در جذب یا حمل فاضلاب صنعتی و شهری و تخلیه رواناب از منابع اصلی آلودگی را دارند.

از این‌رو، برای جلوگیری از بروز این پدیده، ارزیابی و پایش غلظت فسفر در مقیاس جهانی بسیار کارآمد خواهد بود. برای ارزیابی فسفر نیاز به مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی چرخه مواد مغذی از طریق هیدروسفر است. مدل‌های ریاضی از لحاظ پیچیدگی، مقیاس زمانی و روش‌های شبیه‌سازی بسیار متفاوت هستند. این مدل‌ها باعث ارائه درک بهتری از چگونگی تأثیر عوامل مختلف هیدرولوژیکی، جوی و انسانی و اثر متقابل آن‌ها بر جریان آب و مواد مغذی می‌شود (Wellen et al., 2015). چنین مدل‌هایی معمولاً برای بررسی الگوهای منطقه‌ای، قاره‌ای و جهانی کیفیت آب و با در نظر گرفتن شارهای بیوژئوشیمیایی بین جو، اکوسیستم‌های زمینی و آبی ساخته شده‌اند.

در دهه‌های گذشته، تلاش‌های زیادی جهت توسعه مدل‌های کیفیت آب بزرگ-مقیاس به‌منظور شبیه‌سازی چرخه مواد مغذی و ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی انجام شده است. این مدل‌ها را می‌توان در دودسته کلی جای داد: مدل‌های مبتنی بر فیزیک و مدل‌های داده محور (Sheikholeslami and Hall, 2023). مدل‌های مبتنی بر فیزیک به تجزیه و تحلیل رفتارهای شناخته‌شده در سیستم‌ها پرداخته و بر حل معادلات پایستگی (با فرضیات ساده‌سازی شده) تمرکز دارند. در مقابل، مدل‌های داده محور به علت ضعیف‌تر بودن فرضیات فیزیکی، معمولاً از روابط تجربی و آماری یا تکنیک‌های یادگیری ماشین بهره می‌برند. برای توسعه یک مدل کارآمد، تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی و مشاهداتی و انتخاب متغیرهای ورودی مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، استفاده از داده‌های باکیفیت برای تخمین پارامترها و صحت‌سنجی مدل‌های مبتنی بر

تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی چالش‌های مهمی را در مدیریت پایدار کیفیت آب که یکی از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل است، ایجاد کرده است. در طول قرن گذشته، آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی نظیر کاربرد بیش‌ازحد کودهای دامی و شیمیایی، ساخت گسترده سدها، تخلیه نامنظم فاضلاب‌های شهری و پساب‌های کشاورزی، جنگل‌زدایی، استخراج بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی و تغییرات اقلیمی تأثیرات مخربی بر کیفیت آب داشته است (Sheikholeslami and Ghorbani, 2024). ورود آلاینده‌های متعدد به آب‌ها و تجمع آن‌ها در آبزیان به‌واسطه خطراتی که برای انسان ایجاد می‌کند، بخش مهمی از آلودگی محیط‌زیست را شامل می‌شود. از جمله این آلودگی‌ها، آلودگی ناشی از وجود فسفر و ترکیبات آن است (Siebers et al., 2017).

فسفر به‌عنوان یکی از عناصر مهم زیست‌محیطی تأثیرگذار در کیفیت آب و همچنین به‌عنوان یک ماده غذایی محدودکننده برای رشد گیاهان و توسعه اکوسیستم‌ها شناخته می‌شود که از طریق دو منبع انسانی و طبیعی می‌تواند به محیط‌زیست وارد شود (Némery and Garnier, 2016). منابع طبیعی شامل سنگ‌ها، مواد معدنی و منابع انسانی شامل فعالیت‌های کشاورزی (استفاده از کودهای شیمیایی) و فاضلاب‌های شهری و صنعتی هستند (George et al., 2018). اما، در حال حاضر رشد روزافزون جمعیت و نیاز به تأمین غذا، استفاده بیش از حد از کودهای فسفر دار را به دنبال داشته که این امر افزایش آلاینده‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی را منجر شده است. همچنین، وجود فسفر در پساب‌های صنعتی، خانگی و شوینده‌ها به این مشکل دامن می‌زند. زنجیره دنباله‌دار این اتفاقات بسیار مخاطره‌آمیز بوده و بر سلامت انسان‌ها و جانداران دریایی آسیب می‌رساند و در نتیجه هزینه اقتصادی بالایی را در پی دارد (Harvey and Menden-Deuer, 2011). باید توجه داشت وجود فسفر بیش از اندازه در آب، علاوه بر این که طعم و بوی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌تواند منجر به افزایش خطر بیماری‌های قلبی و آسیب به کلیه‌ها شود. کلیه‌ها نقش مهمی در تنظیم سطح فسفر در بدن دارند، بنابراین هنگامی که دریافت فسفر از توانایی کلیه‌ها برای دفع آن بیشتر شود، می‌تواند منجر به تشکیل سنگ کلیه و بروز بیماری‌های کلیوی نیز شود (Calvo and Uribarri, 2013).

ورود بی‌رویه فسفر به پهنه‌های آبی اثرات نامطلوب زیست‌محیطی بر روی اکوسیستم‌های آبی و خشکی نیز دارد که می‌تواند منجر به تغییراتی در چرخه فسفر، دسترسی و توزیع فسفر شود که موجب تجمع آن در برخی مناطق و محدود شدن آن در برخی مناطق دیگر می‌شود (Clark and Tilman, 2008). در صورت ورود بیش‌ازحد مواد

فیزیک ضروری است. همچنین، با توجه به رشد سریع مدل‌های یادگیری ماشین داده‌محور، اهمیت تحلیل داده‌های مشاهداتی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. به همین دلیل، صرف‌نظر از نوع مدل، ایجاد یک پایگاه داده منسجم و باکیفیت به‌عنوان یک ضرورت اساسی در فرآیند مدل‌سازی کیفیت آب به‌شمار می‌آید (Shekholeslami and Golkar, 2023). لذا هدف از انجام این پژوهش اولاً ارزیابی وضعیت آلودگی فوسفور و ثانیاً ارائه یک پایگاه داده‌ی منسجم شامل غلظت فوسفور در آب‌های سطحی در مقیاس جهانی است که می‌تواند محدودیت‌های پژوهش‌های گذشته را پوشش دهد.

در این راستا، می‌توان به پژوهش‌های متعددی که در راستای ارزیابی غلظت فوسفور در نقاط مختلف جهان صورت گرفته است، اشاره کرد. به‌عنوان مثال، در اروپا در طی تحقیقاتی که بر روی میزان غلظت فوسفور در کشورهای اسپانیا، فرانسه و ایتالیا صورت گرفت، محققان قادر به ارائه پایگاه داده فوسفور در بازه‌های زمانی متفاوتی شدند. در اسپانیا، مطالعه بر روی تمامی رودخانه‌های بخش شمالی کشور در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ صورت گرفت (Álvarez-Cabria et al., 2016)، درحالی‌که در فرانسه از ۱۸۵ حوضه آبخیز موجود در این کشور برای ارائه پایگاه داده‌ای از غلظت ماهانه و روزانه فوسفور در سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۶ استفاده شد (Guillemot et al., 2021). در ایتالیا نیز محققان برای توسعه یک پایگاه داده در بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۴ فقط از اطلاعات موجود بر روی رودخانه ادیگه^۳ که در شمال کشور واقع شده‌است، استفاده کردند (Zanoni et al., 2022).

در ادامه، در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳ دو پژوهش بر رودخانه ناکدونگ در کره جنوبی صورت گرفت که منجر به ارائه دو پایگاه داده فوسفور از ماه ژانویه سال ۲۰۱۳ تا ماه دسامبر سال ۲۰۱۶ (Yi et al., 2018) و از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ شده است (Kim et al., 2023). در چین نیز برای بررسی غلظت فوسفور ماهانه از اطلاعات رودخانه‌های متفاوتی همچون رودخانه تانگ در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳ (Xue et al., 2024)، رودخانه مینجانگ در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ (Tan et al., 2023) و رودخانه یانگتسه در بازه زمانی آوریل ۲۰۲۳ تا سپتامبر ۲۰۲۳ استفاده کردند (Yao et al., 2024). در سال ۲۰۲۰، در طی دو پژوهشی که به ترتیب در دو کشور استرالیا و ایالات‌متحده آمریکا صورت گرفت، محققان توانستند پایگاه داده‌ای از غلظت فوسفور ارائه دهند به‌طوری‌که در استرالیا این بررسی بر روی ۱۰۲ حوضه آبریز در ایالت ویکتوریا، در بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۹۴) صورت گرفت. نتیجتاً، پایگاه داده‌ای شامل غلظت ماهانه فوسفور، غلظت کل جامدات معلق، نیترات و هدایت الکتریکی تولید شد (Guo et al., 2020). در ایالات‌متحده آمریکا، چنین تحقیقی بر روی تمامی رودخانه‌های کشور صورت پذیرفت که منجر به ارائه پایگاه داده‌ای از غلظت ماهانه فوسفور و نیترژن در بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۸ شد (Shen et al., 2020).

همچنین، برای بهبود تحقیقات بر روی رودخانه‌های کشور آمریکا، گروهی دیگر از محققان در سال ۲۰۲۴ با استفاده از سیستم سنجش از راه دور پایگاه داده ماهانه فوسفور در طی سالیان ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۱ ارائه دادند (Ramtel et al., 2024). مطالعات قبلی باوجود اینکه داده‌های ارزشمندی از منابع مختلف گردآوری کرده‌اند، معمولاً با محدودیت‌هایی در پوشش جغرافیایی، بازه زمانی یا عدم استانداردسازی داده‌ها مواجه بوده‌اند. در حالیکه پایگاه داده توسعه داده‌شده در این مقاله چنین محدودیت‌هایی را با ارائه یک پوشش جامع زمانی و مکانی، از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱، برطرف کرده‌است.

۲- داده‌ها و روش‌شناسی

در این پژوهش برای تحلیل و ارزیابی داده‌های فوسفور از داده‌های مقدار کل غلظت فوسفور^۴ استفاده شده است. گونه‌های متفاوتی از فوسفور همچون فوسفور معدنی حل‌شده^۵، فوسفور آلی حل‌نشده^۶، فوسفور آلی کل^۷ و فوسفور محلول کل^۸ در پهنه‌های آبی وجود دارند، لیکن مقدار کل غلظت فوسفور گونه غالب در مقایسه با سایر گونه‌هاست و تأثیر بسزایی در کیفیت آب پهنه‌های آبی دارد. برای استخراج داده‌های مقدار کل غلظت فوسفور از تجمیع داده‌های منابع مختلفی همچون GEMstat، CESI، WATERBASE و WQP که در مجموع دارای ۲۷۲۶۵۰ تعداد مشاهده از ۳۴۵۰ ایستگاه موجود در جهان که در ۶۱ کشور مختلف (شکل ۱) در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۱۲ قرار دارد، استفاده شده است که در ادامه هر پایگاه داده به تفکیک معرفی شده‌اند.

۲-۱- پایگاه‌های مورد استفاده

▪ پایگاه داده CESI

پایگاه داده CESI، مجموعه‌ای جامع از شاخص‌های متفاوت کیفیت آب است که توسط سازمان زیست‌محیطی کانادا^۹ جمع‌آوری و ارائه شده است. این پایگاه از برنامه‌های مختلف نظارتی همچون فدرال، استانی و منطقه‌ای در سراسر رودخانه‌های کانادا در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸ برای ارائه داده استفاده می‌کند که در درجه اول بر ارزیابی شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی، با تأکید بر فلزات سنگین تمرکز دارد. از این رو، این پایگاه داده به‌عنوان یک منبع ارزشمند برای ارزیابی وضعیت کیفیت آب رودخانه‌های کانادا به‌شمار می‌آید. این مجموعه داده با ارائه حدوداً ۳۰۴۷۵ مشاهده کوچک‌ترین پایگاه در مقایسه با سایر پایگاه‌های داده است به‌طوری‌که میانگین تعداد مشاهدات در هر ایستگاه حدوداً ۱۴۵ عدد است (Environment and Climate Change Canada, 2022).

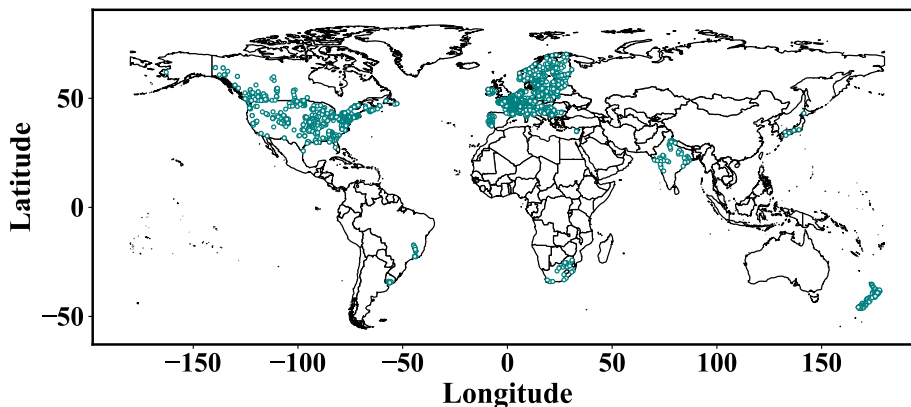


Fig. 1- Spatial distribution of stations measuring phosphorus
 شکل ۱- پراکندگی مکانی ایستگاه‌های اندازه‌گیری فسفر

محیط‌زیست ایالات متحده و شورای ملی نظارت بر کیفیت آب توسعه یافته است. این مجموعه داده در درجه اول اطلاعاتی از ایالات متحده را شامل می‌شود، اگرچه این پورتال داده‌هایی از چند کشور دیگر (مانند مکزیک، جزایر اقیانوس آرام) مرتبط با شبکه ملی اطلاعات آب^{۱۴} را شامل می‌شود. این مجموعه داده حدوداً ۹ میلیون نمونه کیفیت آب را در بازه زمانی ۱۸۹۸ تا ۲۰۲۰ ارائه می‌دهد. همچنین، تعداد ایستگاه‌های مشاهده برای هر پارامتر بسیار متفاوت است، به طوریکه از حداقل ۱ تا حداکثر ۵۹ هزار برای پارامترهای مختلف تغییر می‌کند و میانگین تعداد مشاهدات برای هر پارامتر کیفیت آب در هر ایستگاه حدوداً ۲۵ است (National Water Quality Monitoring (Council, 2024; Read et al., 2017).

۲-۲- پردازش داده‌ها

جهت دستیابی به یک پایگاه داده منسجم، پردازش بر روی داده‌های خام جمع‌آوری شده ضروری است. بدین صورت که در ابتدا داده‌های تمام منابع تجمع شد، در مواردی که در یک موقعیت جغرافیایی و یک زمان واحد، از منابع مختلف داده وجود داشت، برای گزارش عدد نهایی از میانه داده‌های موجود استفاده شد. پیش‌پردازش اولیه بر روی داده‌ها با حذف داده‌های پرت از مجموعه داده شروع می‌شود. حذف داده‌های پرت با استفاده از یکی از مدل‌های یادگیری ماشینی که جنگل‌های ایزوله^{۱۵} نام دارد، انجام شد. استفاده از جنگل ایزوله برای شناسایی نقاط پرت در داده‌ها برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ معرفی شد. این رویکرد از درختان باینری برای تشخیص ناهنجاری‌ها استفاده می‌کند که منجر به پیچیدگی زمانی خطی و استفاده کم از حافظه محاسباتی می‌شود که برای کلان‌داده‌ها بسیار مناسب است (Hariri et al., 2021). جنگل‌های ایزوله، مشابه جنگل‌های تصادفی، بر اساس درخت‌های تصمیم^{۱۶} ساخته می‌شوند؛ و از آنجایی که هیچ برچسب از پیش تعریف‌شده‌ای وجود ندارد، یک مدل بدون نظارت است.

▪ پایگاه داده GEMstat

پایگاه داده GEMstate، پایگاه آنلاین و جهانی کیفیت آب شیرین است که توسط سازمان بین‌المللی منابع آب و تغییرات جهانی، تحت چارچوب برنامه GEMS/Water محیط‌زیست سازمان ملل متحد^{۱۷} فعالیت می‌کند. این پایگاه داده شامل بیش از ۱۸ میلیون نمونه برای بررسی ۲۵۰ شاخص کیفیت آب در تقریباً ۱۵۰۰۰ ایستگاه سنجش در ۹۴ کشور مختلف در بازه زمانی ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۲ می‌شود. تعداد ایستگاه‌های سنجش برای هر پارامتر شاخص کیفیت آب بسیار متفاوت است، این تعداد از ۱۰ ایستگاه سنجش برای پارامترهایی مانند کربن محلول^{۱۱} تا بیش از ۴۲۷۴ ایستگاه برای مقدار کل فسفر متغیر است به طوریکه میانگین تعداد مشاهدات برای هر پارامتر کیفیت آب در هر ایستگاه حدود ۷۷ است (United Nations Environment Programme, 2024).

▪ پایگاه داده Waterbase

پایگاه داده Waterbase، پایگاه اطلاعاتی آژانس محیط‌زیست اروپا^{۱۲} است که حاوی اطلاعاتی در مورد کیفیت آب رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، آب‌های زیرزمینی و آب‌های انتقالی، ساحلی و دریایی در اروپا است که از داده‌های ارائه‌شده توسط آژانس‌های ملی آب اروپایی در چارچوب دستورالعمل WFD^{۱۳} استفاده می‌کند. این مجموعه داده قابلیت بررسی ۶۰۰ پارامتر مختلف کیفیت آب را دارا است. این مجموعه داده حدوداً ۳۰۰ هزار نمونه در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ دارد. همچنین، تعداد ایستگاه‌های مشاهده برای هر پارامتر بسیار متفاوت است، به طوریکه از حداقل ۴ تا حداکثر ۱۹۷۶ برای پارامترهای مختلف تغییر می‌کند و میانگین تعداد مشاهدات برای هر پارامتر کیفیت آب در هر ایستگاه حدوداً ۱۹ است (European Environment Agency, 2024).

▪ پایگاه داده WQP

پورتال کیفیت آب WQP یک پایگاه داده استاندارد کیفیت آب است که با همکاری سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، آژانس حفاظت

خاص هر ایستگاه انجام شد تا از عدم وجود ورودی‌های تکراری برای یک ایستگاه معین در یک‌زمان مشابه اطمینان حاصل شود به طوریکه هرگونه مقادیر تکراری شناسایی شده به‌طور سیستماتیک حذف شدند. علاوه بر این، به‌منظور اصلاح و یکپارچه‌سازی مجموعه داده‌ها، در مواردی که چندین ایستگاه در فاصله‌ای کمتر از یک کیلومتر از یکدیگر قرار داشتند، از روش خوشه‌بندی DBSCAN^{۱۱} استفاده شد. این روش نقاطی را که در یک منطقه متراکم قرار دارند شناسایی کرده و آن‌ها را به‌عنوان یک خوشه تجمیع می‌کند. در این فرآیند، تمامی داده‌های موجود در خوشه به یک مقدار واحد خلاصه شدند و مقدار میانه داده‌های خوشه به‌عنوان غلظت فسفر نهایی ایستگاه انتخاب شد. لازم به ذکر است که در چنین فاصله مکانی کوتاهی، تغییرات ناگهانی و چشمگیر در متغیرهایی مانند کاربری اراضی یا شرایط محیطی مورد انتظار نیست (شکل ۲). این روش خوشه‌بندی، یک الگوریتم ماشینی بدون نظارت است که در سال ۱۹۹۶ معرفی شد. DBSCAN نقاط را برحسب میزان نزدیکی آن‌ها با یکدیگر گروه‌بندی می‌کند بدین‌صورت که با جست‌وجوی مناطق متراکم، نقاط نزدیک به یکدیگر را شناسایی می‌کند. این الگوریتم به‌ویژه در پایگاه‌های داده‌های جهانی که نیاز به یافتن خوشه‌هایی با اشکال نامنظم و نقاط پرت است به‌خوبی عمل می‌کند (Deng, 2020).

در یک الگوریتم جنگل ایزوله، داده‌ها با استفاده از نمونه‌برداری تصادفی و پردازش در ساختار درختی بر اساس ویژگی‌های انتخابی تصادفی تجزیه و تحلیل می‌شوند. در این روش، نمونه‌هایی که برای جدا شدن از سایر داده‌ها نیاز به حرکت به عمق بیشتری در درخت دارند، کمتر به عنوان ناهنجاری شناسایی می‌شوند. از سوی دیگر، نمونه‌هایی که در شاخه‌های کوتاه‌تر جدا می‌شوند، به احتمال بیشتری ناهنجاری محسوب می‌شوند؛ زیرا درخت به راحتی آن‌ها را از دیگر مشاهدات جدا می‌کند. در جنگل ایزوله، پارامتری به نام "درصد حذف داده‌های ناهنجار" وجود دارد که با انتخاب مقدار مناسب آن، می‌توان میزان حذف داده‌های پرت را کنترل کرد. این مقدار بایستی بر اساس شناخت صحیح از داده‌ها تعیین شود. در نتیجه در این پژوهش، به کمک رسم هیستوگرام داده‌ها مشخص شد که تنها با حذف حدود ۰/۰۵ درصد از داده‌ها می‌توان به مجموعه داده‌ای منسجم‌تر و نتایج مطلوب‌تری دست یافت.

با توجه به ماهیت روزانه داده‌های استخراج‌شده، مرحله بعدی مستلزم تبدیل تمام داده‌های روزانه مربوط به هر ایستگاه به قالب ماهانه است. بدین‌صورت که مقادیر روزانه موجود در هر ایستگاه به صورت جداگانه بررسی شده است و مقدار میانه آنها به عنوان داده ماهانه برای ایستگاه مورد نظر جایگزین می‌شود. سپس یک بررسی دقیق از تمام مقادیر

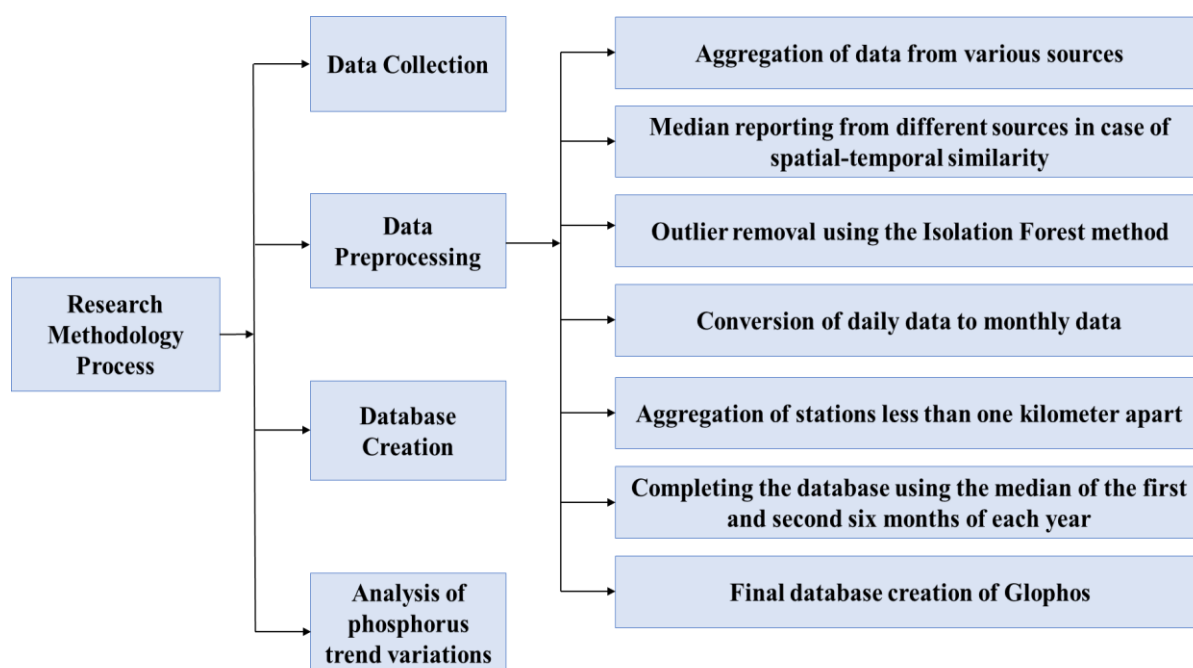


Fig. 2- Flowchart illustrating the methodology followed in the analysis

شکل ۲- فلوچارت فرآیند روش تحقیق در پژوهش حاضر

همان‌طور که از جدول ۱ قابل برداشت است، در آمریکا شمالی و اروپا تعداد ایستگاه‌ها بالاتر بوده و نتایج قابل اتکاتر هستند. در شکل ۳ نیز سهم هر یک از این پایگاه‌های داده در ایجاد پایگاه داده GloPhos مشخص شده است.

در نهایت نیز برای تکمیل کردن پایگاه داده در بازه مورد مطالعه، در زمان‌هایی که داده‌ای موجود نبوده، از میانه شش ماهه اول و دوم سال نزدیک به آن زمان برای کامل کردن داده در هر ایستگاه در هر ۱۲۰ ماه بازه مورد مطالعه استفاده شد. به کمک این روش یک مجموعه داده با نام GloPhos با ۴۱۵۲۰۰ داده اندازه‌گیری شده (مشاهداتی) به دست آمد. تعداد ایستگاه‌های موجود در هر قاره در GloPhos مطابق آنچه در جدول ۱ مشخص شده است، به دست می‌آید.

Table 1- Number of stations in each continent
جدول ۱- تعداد ایستگاه‌های موجود در هر قاره

Continent	Asia	Africa	Europe	North America	South America	Oceania
Number of Stations	65	30	2380	859	43	73

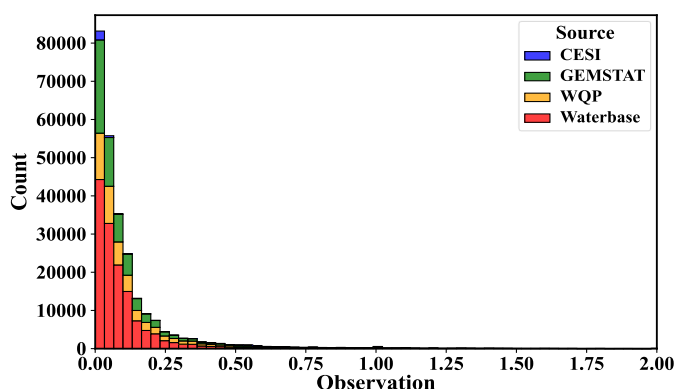


Fig. 3- Contribution of various global data sources to the development of the proposed dataset
شکل ۳- سهم منابع داده‌های جهانی مختلف در توسعه پایگاه داده پیشنهادی

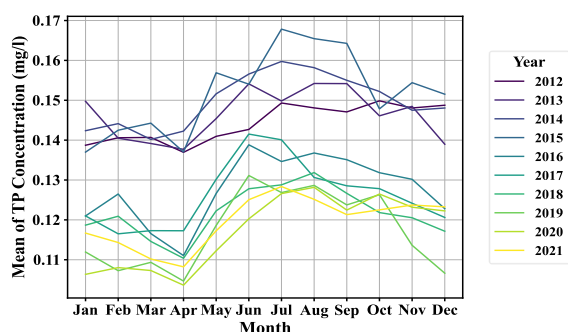


Fig. 4- Trend of monthly phosphorus variations over the study period (2012-2021)
شکل ۴- روند تغییرات ماهانه (میانگین) غلظت فسفر در طی سال‌های مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۰۱۲)

۳- نتایج عددی

۳-۱- تحلیل زمانی تغییرات غلظت فسفر

در ادامه برای بررسی روند تغییرات زمانی غلظت فسفر در مقیاس جهانی از مجموعه داده پردازش شده GloPhos استفاده شده است. در مرحله اول پس از انجام پیش‌پردازش داده‌ها (مطابق آنچه در بخش ۲-۲ ذکر شده است)، مقادیر ماهانه غلظت فسفر در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ برای تمام ایستگاه‌های موجود در پایگاه داده GloPhos بایستی استخراج شود. از این‌رو، از تمامی مقادیر موجود برای هر ایستگاه در ماه موردنظر در هر سال میانه گرفته شده است و به‌عنوان مقدار ماهانه غلظت فسفر برای ماه موردنظر ارائه شده است. در نهایت سری زمانی تغییرات ماهانه و سالانه فسفر در طی بازه زمانی مذکور، به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ قابل مشاهده است.

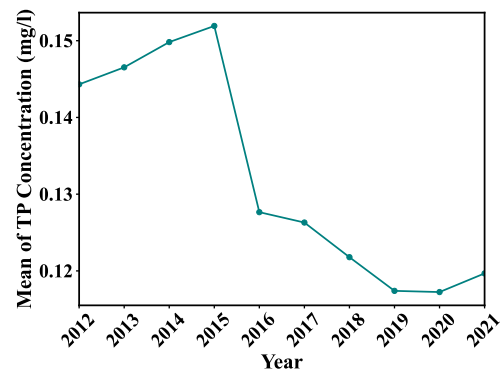


Fig. 5- Trend of yearly phosphorus variation over the study period (2012-2021)

شکل ۵- روند تغییرات سالانه غلظت فسفر در طی سال‌های مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۰۱۲)

همچنین از نمودار شکل ۴ می‌توان بدین نتیجه دست‌یافت که روند تغییرات ماهانه فسفر در طی ماه‌های مختلف در سال‌های مورد بررسی تقریباً مشابه به یکدیگر بوده است. بدین صورت که مقادیر فسفر در ماه آوریل (فصل بهار) به کمترین میزان خود و در ماه ژوئن و جولای (فصل تابستان) به حداکثر میزان خود می‌رسد که نشان‌دهنده تغییرات دما بر میزان غلظت فسفر در رودخانه‌های سطحی بسیار تأثیرگذار است. در این راستا، می‌توان گفت در اوایل بهار بسیاری از گیاهان در آغاز دوره رشد خود هستند که باعث جذب فسفر از خاک شده و نتیجتاً کاهش سطح فسفر در خاک را به دنبال خواهد داشت. همچنین، در این دوره بارش کمتری را شاهد هستیم که به نوبه خود میزان فسفر شسته شده به پهنه‌های آبی از مزارع کشاورزی، مناطق شهری و سایر منابع را کاهش می‌دهد (Babošová et al., 2021).

برخلاف آن، در ماه‌های ژوئن و جولای کودهای فسفردار استفاده شده در فصل بهار در بارندگی‌های این فصل شسته شده و وارد پهنه‌های آبی می‌شود. همچنین، دمای گرم‌تر در این ماه‌ها سبب افزایش فعالیت‌های بیولوژیکی در اکوسیستم‌های آبی می‌شود. جلبک و سایر گیاهانی که برای رشد و تکثیر خود به فسفر احتیاج دارند در این ماه‌ها تکثیر شده که منجر به افزایش سطح فسفر می‌شود. همچنین، دمای بالاتر در ماه‌های ژوئن و جولای تجزیه مواد آلی را تسریع می‌کند. این فرآیند می‌تواند فسفر را از مواد گیاهی، بستر برگ و سایر بقایای آلی در خاک و آب آزاد کند و به افزایش سطح فسفر کمک کند (Saunders and Metson, 1971).

۳-۲- تحلیل مکانی تغییرات غلظت فسفر

برای بررسی روند تغییرات مکانی در غلظت فسفر، ارزیابی توزیع سطوح فسفر در هر ایستگاه سنجش ضروری است. از این رو، بایستی پراکندگی هر ایستگاه از نظر میزان غلظت فسفر ارزیابی شود تا الگوهای مرتبط با تغذیه‌گرایی در نقاط مختلف جهان به سادگی قابل شناسایی باشد. اولین قدم برای دستیابی به این هدف، بررسی فراوانی ایستگاه‌های سنجش آلودگی در سطوح متفاوت غلظت فسفر است به همین جهت از نمودار هیستوگرام غلظت فسفر (شکل ۶) استفاده شده است تا تصویر روشنی از تعداد ایستگاه‌های موجود در بازه‌های متفاوت غلظت فسفر ارائه دهد.

با توجه به نمودار شکل ۵ می‌توان گفت که غلظت جهانی فسفر به‌طور کلی در طی بازه زمانی ۱۰ ساله روندی نزولی را طی کرده است و کمترین میزان غلظت سالانه فسفر در سال ۲۰۲۰ و بیشترین غلظت در سال ۲۰۱۵ رخ داده است. به‌طوری‌که غلظت فسفر در سال ۲۰۱۵ تقریباً ۱/۵ برابر غلظت آن در سال ۲۰۲۰ است. از ابتدای سال ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۱۵ روند تغییرات غلظت فسفر، روندی افزایشی بوده است، به طوری‌که در سال ۲۰۱۵ به مقدار اوج خود (۰/۱۵۱ میلی‌گرم بر لیتر) رسیده است و پس از آن روندی کاهشی درپیش گرفته است و در سال ۲۰۲۱ به مقدار (۰/۱۱۹ میلی‌گرم بر لیتر) رسیده است.

این کاهش قابل توجه فسفر کل را می‌توان حاصل زنجیره دنباله‌داری از اتفاقاتی همچون افزایش آگاهی عموم از طریق رسانه‌ها، وضع قوانین و استانداردهای متنوع توسط دولت‌ها، پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌های کشاورزی و فرایندهای تصفیه فاضلاب دانست که باعث کاهش میزان فسفر ورودی به پهنه‌های آبی شده است (Griffin, 2017). به عنوان مثال کاشت گیاهانی همچون بامبو در مجاورت پهنه‌های آبی باعث جذب فسفر شده است که در نهایت سبب کاهش فسفر ورودی به حوضه‌های آبریز شده است (Wang et al., 2022). همچنین، از دیگر عوامل تأثیرگذار در کاهش ورودی فسفر به پهنه‌های آبی می‌توان به فراگیری ویروس کرونا در این دوران اشاره کرد (Yunus et al., 2020) که اخیراً نیز بسیاری از مطالعات و تحقیقات انجام شده به بهبود قابل توجه کیفیت آب در طول دوران قرنطینه اشاره کرده‌اند. این قرنطینه باعث کاهش فعالیت‌های انسانی، کاهش یا توقف تخلیه آلاینده‌ها شامل فلزات سنگین، فاضلاب صنعتی، نفت خام و پلاستیک به حوضه‌های آبریز شده‌اند (Najah et al., 2021; Sheikholeslami and Ghorbani, 2024b).

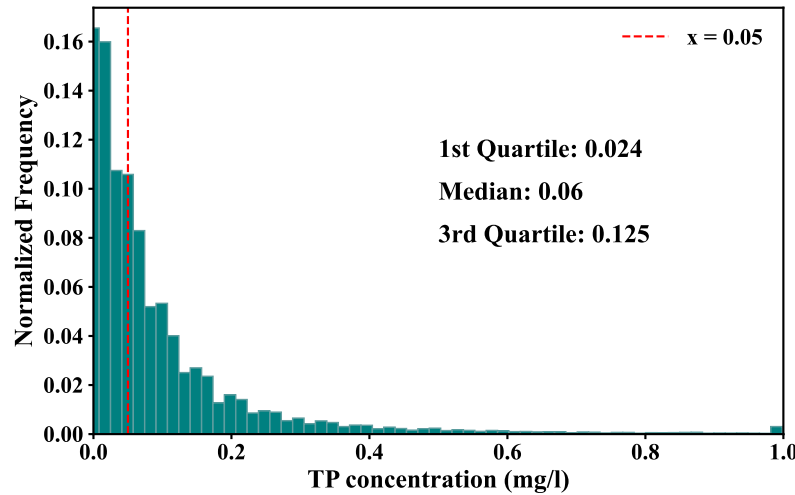


Fig. 6- Histogram of Phosphorus concentrations in monitoring stations
 شکل ۶- هیستوگرام توزیع غلظت فسفر مشاهده شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری

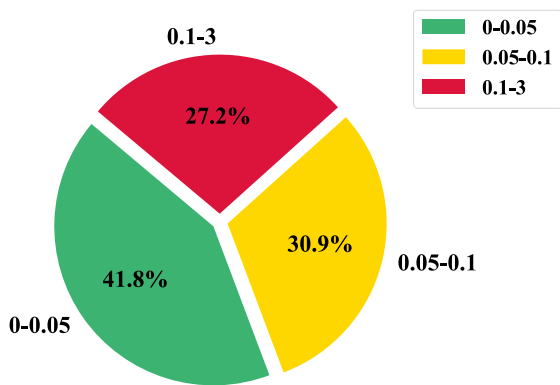


Fig. 7- Distribution of Phosphorus concentration with a threshold of 0.05 and 0.1 mg/lit
 شکل ۷- توزیع مشاهدات غلظت فسفر مشاهداتی بر حسب حد مجاز ۰/۰۵ و ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر

با توجه به اینکه ایستگاه‌های موجود به صورت پراکنده در سراسر جهان توزیع شده‌اند، بنابراین لازم است تا موقعیت ایستگاه‌های پرخطر از نظر تغذیه‌گرایی نیز مشخص شود؛ زیرا ممکن است تعداد محدودی از ایستگاه‌ها با میزان غلظت فسفر بیش از اندازه، میانگین کل را در معرض تغییر قرار دهند. بنابراین، در این پژوهش تصمیم بر آن شد تا مناطقی که حتی ۲۰ برابر حد مجاز (یعنی غلظت فسفر برابر با ۱ میلی‌گرم بر لیتر) دارند، به عنوان مناطق بسیار پرخطر و بحرانی برجسته‌تر شوند. بدین جهت برای بررسی و یافتن مناطق بسیار پرخطر از حد مجاز ۱ میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد تا ایستگاه‌هایی که دارای خطر بالای تغذیه‌گرایی هستند به راحتی شناسایی شوند.

توزیع داده‌های مربوط به غلظت کل فسفر در سراسر جهان در شکل ۶ قابل نمایش است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود میانگین تمام داده‌های موجود برابر با ۰/۰۶۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده و حدوداً ۵۸ درصد ایستگاه‌ها به طور متوسط مقادیری بالاتر از ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر را دارا هستند که غلظت مجاز تعیین شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا برای جلوگیری از ایجاد تغذیه‌گرایی است (US EPA, 2014). علاوه بر این مقدار چارک اول (۰/۰۲۴ میلی‌گرم بر لیتر) و چارک سوم (۰/۱۲۵ میلی‌گرم بر لیتر) در این مجموعه داده نشان‌دهنده این است که به ترتیب ۲۵ و ۷۵ درصد ایستگاه‌ها غلظتی کمتر از ۰/۰۲۴ و ۰/۱۲۵ میلی‌گرم بر لیتر را دارا هستند.

لازم به ذکر است که حتی اگر غلظتی معادل دو برابر غلظت حد مجاز تعیین شده در نظر گرفته شود، تغییری در وضعیت ایستگاه‌ها مشاهده نمی‌شود (شکل ۷). این موضوع نشان‌دهنده این است که وضعیت آلودگی فسفر در اکثر حوزه‌های آبخیز نامناسب و بحرانی است. با بررسی تمامی داده‌های موجود در دسترس مشخص است که تقریباً ۸۳ درصد ایستگاه‌ها حتی برای یک‌بار غلظتی بالاتر از حد مجاز سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا را تجربه کرده‌اند. همچنین، برای اطمینان بیشتر از نتیجه به دست آمده، از دو برابر حد مجاز تعیین شده (۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر) استفاده شد که این مقدار به ۶۵ درصد کاهش یافت. با در نظر گرفتن غلظت ۰/۰۵، می‌توان نشان داد که به صورت کلی ۲۸۷۶ ایستگاه از ۳۴۵۰ ایستگاه‌های موجود در پهنه‌های آبی دارای وضعیت نامطلوب از نظر تغذیه‌گرایی هستند.

سرچشمه می‌گیرد و به سمت شمال به بلژیک منتهی می‌شود. این رودخانه برای حمل‌ونقل، تأمین آب و گردشگری اهمیت تاریخی دارد، رودخانه لیز در گذشته به‌عنوان یک آبراه مهم برای حمل‌ونقل کالا و مواد بین شمال فرانسه و بلژیک عمل می‌کرده، با این حال، امروزه با چالش‌های زیست‌محیطی مانند آلودگی ناشی از رواناب شهری، رواناب کشاورزی، تخلیه صنعتی، از بین رفتن زیستگاه و تغذیه‌گرایی مواجه شده است (Dörfliger et al., 2008). بدین صورت که در طی بازه موردنظر پژوهش، میانه غلظت فسفر به حداکثر میزان ۲/۱۷ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. موقعیت ایستگاه‌های پرخطر از نظر تغذیه‌گرایی (غلظت بالاتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر) با توجه به میانه آن‌ها در بازه مورد بررسی در هند، فرانسه و آمریکا واقع شده‌اند که در نمودار شکل ۸ و جدول ۲ قابل مشاهده است.

از میان ایستگاه‌های پرخطر از نظر تغذیه‌گرایی می‌توان به ایستگاه‌هایی که در کشورهای هند، فرانسه و آمریکا واقع شده‌اند، اشاره کرد. در هند، رودخانه یامونا^{۱۸} که از یخچال طبیعی یامونوتری سرچشمه می‌گیرد، یک رودخانه فرهنگی و اقتصادی مهم است. این رودخانه از چندین ایالت عبور می‌کند و ۱۳۷۶ کیلومتر طول دارد. این رودخانه از یک منطقه کشاورزی وسیع پشتیبانی می‌کند و آب را برای مصارف شرب، آبیاری و صنعتی در شهرهای بزرگ مانند دهلی فراهم می‌کند. رودخانه یامونا با چالش‌های زیست‌محیطی، از جمله آلودگی ناشی از فاضلاب خانگی، پساب‌های صنعتی، رواناب کشاورزی و تغذیه‌گرایی ناشی از مواد مغذی بیش‌ازحد مواجه است (Sharma et al., 2009). به طوری که در طی بازه موردنظر، میانه غلظت فسفر در این رودخانه به مقدار ۲/۰۴ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است.

رودخانه لیز^{۱۹}، یک رودخانه مهم در بلژیک و فرانسه است که تقریباً ۲۰۲ کیلومتر امتداد دارد و از شمال فرانسه در نزدیکی لیزبورگ

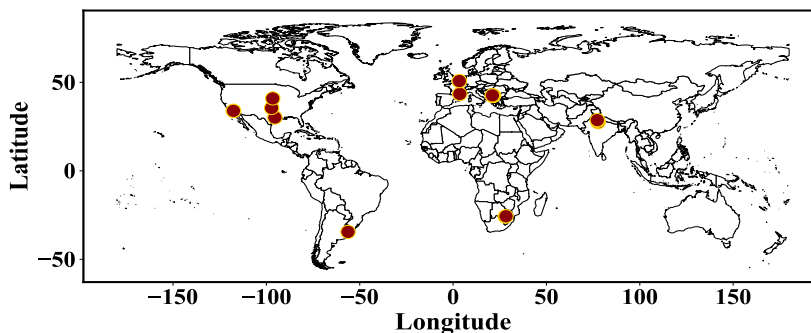


Fig. 8- High-risk stations in terms of eutrophication (P concentrations above 1 mg/lit)
شکل ۸- ایستگاه‌های پرخطر از نظر تغذیه‌گرایی (غلظت بالاتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر)

Table 2- Location of high-risk stations in terms of eutrophication (P concentrations above 1 mg/lit)
جدول ۲- موقعیت ایستگاه‌های پرخطر از نظر تغذیه‌گرایی (غلظت بالاتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر)

Country	River	Longitude	Latitude	Median Phosphorus Concentration (mg/l)
Uruguay	Canelón Grande	-56.281941	-34.498901	1.28
United States	Spring Creek	-95.436327	30.110495	1.01
United States	Santa Ana River	-117.645330	33.883349	1.035
United States	Salt Creek	-96.586122	40.905000	1.11
France	Hérault River	3.607640	43.434780	1.142
South Africa	Limpopo	28.147722	-25.663172	2.07
India	Yamuna	77.687233	27.504122	2.04
United States	North Canadian River	-97.193919	35.500341	1.3145
Republic of Kosovo	Lumi Prishtina	21.00849	42.62408	1.922
France-Belgium	Lys	3.34663	50.72797	2.17

همچنین برای نمایش موقعیت هر ایستگاه به تفکیک غلظت مربوطه از شکل ۹ استفاده شده است. بدین صورت که ایستگاههایی با غلظت میانه بالاتر و پایین تر از ۰/۰۵ میلی گرم بر لیتر به ترتیب با رنگ قرمز و سبز قابل مشاهده هستند. همان گونه که از نمودارها مشخص است، ۲۰۱۰ ایستگاه (حدوداً ۵۸ درصد ایستگاهها) دارای غلظت بالاتر از ۰/۰۵ میلی گرم بر لیتر و ۹۴۵ ایستگاه (حدوداً ۲۷ درصد ایستگاهها) دارای غلظت بالاتر از ۰/۱ میلی گرم بر لیتر است که در این میان اکثر ایستگاههای در معرض تغذیه گرایبی در اروپا و آمریکای شمالی واقع شده است که یکی از علل این امر می تواند حضور بالای جمعیت در این مناطق و در نتیجه نیاز به غذا است که باعث افزایش مصرف بالای کودهای شیمیایی شده است. همچنین مصرف مواد شوینده و برخی موارد صنعتی باعث افزایش روانابهای حاوی نیتروژن و فسفر و

سرازیر شدن آنها به پهنه های آبی شده است که موجب بروز تغذیه گرایبی شده است (Harvey and Menden-Deuer, 2011). برای درک بهتر پراکندگی ایستگاههای اندازه گیری فسفر برحسب میزان فسفر در بازه زمانی مذکور از نقشه ای به کمک نگاشت رنگ استفاده شده است (شکل ۱۰) که نشان دهنده مقادیر متفاوت فسفر در هر ایستگاه است. در این شکل برای ایستگاههایی که در بازه حد مجاز فسفر (۰ تا ۰/۰۵ میلی گرم بر لیتر) هستند از رنگ سبز، بازه ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی گرم بر لیتر از رنگ زرد، از ۰/۱ تا ۰/۵ از رنگ صورتی و برای ایستگاههایی که از نظر میزان فسفر بسیار پرخطر تلقی می شده اند ۰/۵ تا ۳ میلی گرم بر لیتر از رنگ قرمز استفاده شده است که به خوبی نشانگر نحوه پراکندگی ایستگاهها از نظر میزان فسفر اندازه گیری شده است.

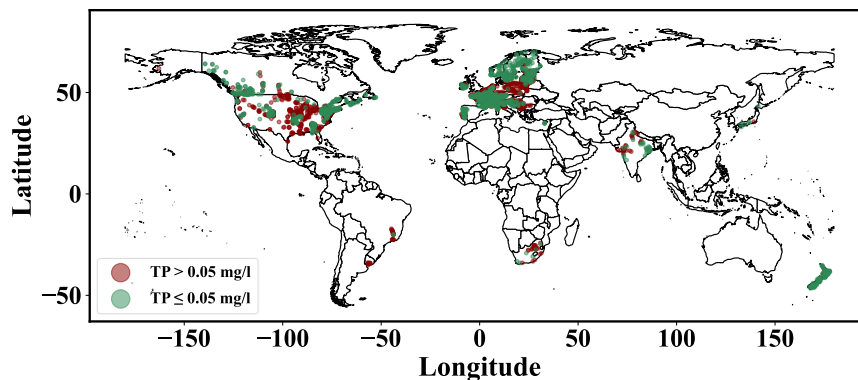


Fig. 9- The location of stations categorized by region-based concentration for permissible limit of 0.05 mg/lit

شکل ۹- موقعیت ایستگاهها به تفکیک غلظت منطقه بر اساس حد مجاز ۰/۰۵ میلی گرم بر لیتر

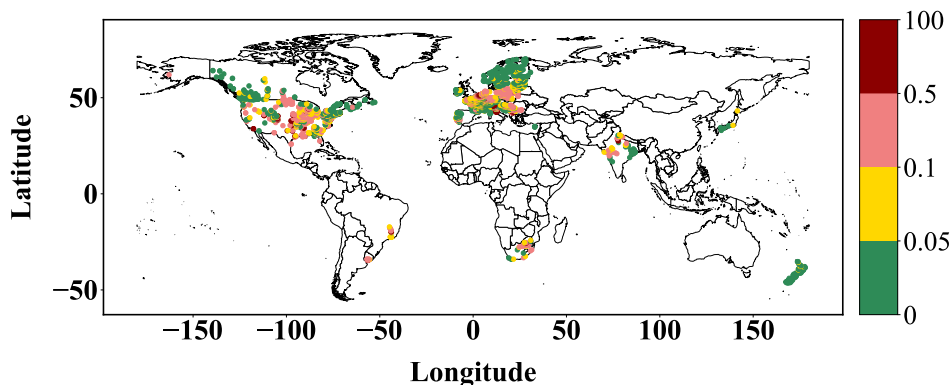


Fig. 10- Colormap of Phosphorus Concentration (mg/lit)

شکل ۱۰- توزیع غلظت فسفر به کمک نگاشت رنگ

برای درک بهتر از موقعیت ایستگاههای اندازه گیری فسفر، توزیع طولی و عرضی میانه غلظت فسفر در طی بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ در شکل ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده است. همان گونه که از شکل نمایان است غلظت بیشینه فسفر در عرض جغرافیایی ۴۰ و طول جغرافیایی ۲۰ رخ

داده است که نشان دهنده ایستگاههای واقع شده در اروپاست که از نظر وضعیت تغذیه گرایبی بسیار پرخطر تلقی می شود. همچنین، می توان بدین نتیجه رسید که کمترین مقدار فسفر در مکانهایی با نرخ پایین بارش و دمای پایین رخ داده است. به طور کلی حداکثر مقادیر غلظت

فسفر عموماً در نیم کره شمالی (20°N-60°N) و کمترین مقدار آن در نیم کره جنوبی رخ داده است.

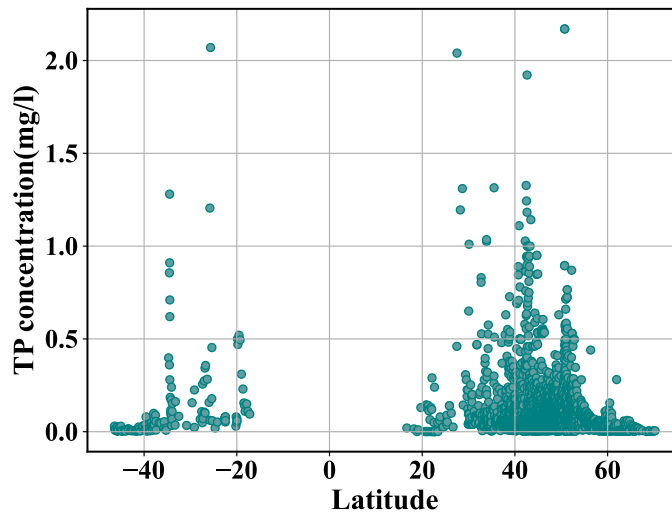


Fig. 11- Median of Phosphorus concentration diagram based on latitude

شکل ۱۱- نمودار میانه غلظت فسفر بر حسب عرض جغرافیایی

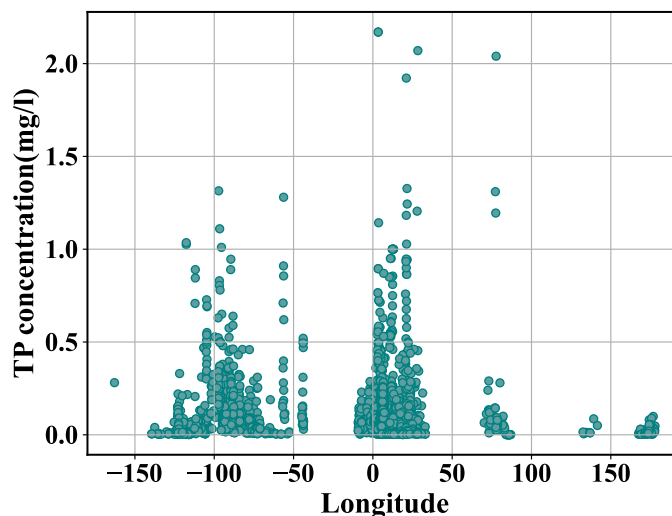


Fig. 12- Median of Phosphorus concentration diagram based on longitude

شکل ۱۲- نمودار میانه غلظت فسفر بر حسب طول جغرافیایی

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا (۰/۰۵ میلی گرم بر لیتر) است. در واقع، نتایج نشان داد حدود ۵۸ درصد از ایستگاه های بررسی شده در سطح جهان غلظت فسفری بیشتر از این حد مجاز را ثبت کرده اند. این مسئله به طور خاص به پدیده تغذیه گرایشی در بسیاری از حوضه های آبخیز اشاره دارد و نشان دهنده وضعیت نامطلوب جهانی از نظر غلظت فسفر است. این مسئله به عنوان یک تهدید بزرگ

پس از انجام تحلیل ها و بررسی های آماری بر روی داده های موجود، نتایج نشان می دهد که اگرچه غلظت فسفر در سال ۲۰۱۵ به بیشترین مقدار خود و در سال ۲۰۲۰ به کمترین مقدار طی بازه زمانی مطالعه (۲۰۱۲-۲۰۲۱) رسیده است، همچنان غلظت فسفر در بسیاری از نقاط جهان به طور قابل توجهی بالاتر از حد مجاز تعیین شده توسط سازمان

- 15- Isolation Forest
- 16- Decision Trees
- 17- Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
- 18- Yamuna
- 19- Lys River
- 20- Lisburg

زیست‌محیطی مطرح است که عوامل مختلفی از جمله افزایش جمعیت جهانی، نیاز بیشتر به تولید مواد غذایی و افزایش مصرف کودهای شیمیایی از علل اصلی آن به‌شمار می‌روند. همچنین، میانگین جهانی غلظت فسفر در این بازه زمانی حدود ۰/۱۳ میلی‌گرم بر لیتر برآورد شد که تقریباً ۲/۵ برابر بیشتر از حد مجاز تعیین شده است. این وضعیت می‌تواند منجر به تخریب زیست‌بوم‌ها، آلودگی آب و خاک و حتی تهدید سلامت انسان‌ها شود. از این‌رو، بررسی و کنترل غلظت فسفر در مدیریت کیفیت منابع آب امری ضروری است.

نتایج این مطالعه می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب در تدوین راهبردهای مدیریتی مؤثر برای کنترل غلظت فسفر کمک کند. به‌طور خاص، پایگاه داده GloPhos به‌عنوان ابزاری کاربردی، می‌تواند برای شناسایی مناطق پرخطر، اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و ارزیابی تأثیر سیاست‌های کاهش مصرف کودهای شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، یافته‌های این پژوهش می‌تواند در بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی و کشاورزی، کاهش بار آلودگی حوضه‌های آبخیز و طراحی مدل‌های پیش‌بینی برای مدیریت کیفی منابع آب مفید باشند. توجه به این نکات در حفظ اکوسیستم‌های آبی، کاهش تغذیه‌گرایی و تضمین پایداری زیست‌محیطی نقش مهمی ایفا خواهد کرد. به‌عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی، توصیه می‌شود که علاوه بر تمرکز بر غلظت فسفر در رودخانه‌ها، بررسی‌هایی در سایر پهنه‌های آبی مانند دریاچه‌ها، مخزن‌ها و سدها صورت گیرد. همچنین، جمع‌آوری داده‌ها درباره سایر مواد مغذی تأثیرگذار بر کیفیت آب، مانند نیتروژن، نیز می‌تواند دیدگاه جامع‌تری در زمینه مدیریت منابع آب و جلوگیری از آلودگی ارائه دهد.

خاطر نشان می‌سازد پایگاه داده توسعه داده شده در مقاله حاضر با درخواست از نویسنده مسئول به صورت رایگان در دسترس قرار خواهد گرفت.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Eutrophication
- 2- Dead zone
- 3- Adige river
- 4- Total Phosphorus
- 5- Dissolved Inorganic Phosphorus
- 6- Dissolved Organic Phosphorus
- 7- Total Inorganic Phosphorus
- 8- Total dissolved phosphorus
- 9- Environment and Climate Change Canada (ECCC)
- 10- United Nations Environment Programme
- 11- Dissolved Carbon
- 12- European Environment Agency
- 13- Water Framework Directive
- 14- National Water Information System

- Allan JD (2004) Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35(2002):257–284
- Álvarez-Cabria M, Barquín J, and Peñas FJ (2016) Modelling the spatial and seasonal variability of water quality for entire river networks: relationships with natural and anthropogenic factors. *Science of the Total Environment* 545–546:152–162
- Atanasova N, Todorovski L, Džeroski S, and Kompare B (2006) Constructing a library of domain knowledge for automated modelling of aquatic ecosystems. *Ecological Modelling* 194(1-3):14–36
- Babošová M, Porhajašová JI, and Čeryová T (2021) Spatial and seasonal changes in total and phosphate phosphorus concentrations in the water of national nature reserve Čičov oxbow in the southwestern part of the slovak republic. *Polish Journal of Environmental Studies* 30(4):3481–3487
- Calvo MS and Uribarri J (2013) Public health impact of dietary phosphorus excess on bone and cardiovascular health in the general population. *American Journal of Clinical Nutrition* 98(1):6–15
- Clark CM and Tilman D (2008) Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature* 451(7179):712–715
- Deng D (2020) Dbscan clustering algorithm based on density. *Proceedings of the 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation* 949–953
- Dörfliger N, Jourde H, Ladouche B, and Fleury P (2008) Active water management resources of karstic water catchment: the example of Le Lez spring (Montpellier, South France). *Uniwersytet śląski, KIP Articles*, 6574 7(1):343–354
- Environment and Climate Change Canada (2022) National long-term water quality monitoring data-open government portal. "Available at: <https://open.canada.ca/data/en/dataset/67b44816-9764-4609-ace1-68dc1764e9ea>"
- European Environment Agency (2024) Waterbase-water Quality icm. "Available at: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/fbf3717c-cd7b-4785-933a-d0cf510542e1>"
- George TS, Giles CD, Menezes-Blackburn D, Condrón LM, Gama-Rodrigues AC, Jaisi D, Lang F, Neal AL, Stutter MI, Almeida DS, Haygarth PM (2018) Organic phosphorus in the terrestrial environment: A perspective on the state of the art and future priorities. *Plant and Soil* 427(1–2):191–208
- Griffin NJ (2017) The rise and fall of dissolved phosphate in South African rivers. *South African Journal of Science* 113(11–12)
- Guillemot S, Fovet O, Gascuel-Oudou C, Gruau G, Casquin A, Curie F, Minaudo C, Strohmenger L, and Moatar F (2021) Spatiotemporal controls of c-n-p dynamics across headwater catchments of a temperate agricultural region from public data analysis. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(5):2491–2511
- Guo D, Lintern A, Angus Webb J, Ryu D, Bende-Michl U, Liu S, and William Western A (2020) A data-based predictive model for spatiotemporal variability in stream water quality. *Hydrology and Earth System Sciences* 24(2):827–847
- Hariri S, Kind MC, and Brunner RJ (2021) Extended isolation forest. *Transactions on Knowledge and Data Engineering* 33(4):1479–1489
- Harvey EL and Menden-Deuer S (2011) Avoidance, movement, and mortality: The interactions between a protistan grazer and *Heterosigma akashiwo*, a harmful algal bloom species. *Limnology and Oceanography* 56(1):371–378
- Kim S, Seo Y, Malik A, Kim S, Heddam S, Yaseen ZM, Kisi O, and Singh VP (2023) Quantification of river total phosphorus using integrative artificial intelligence models. *Ecological Indicators* 153:110437
- Najah A, Teo FY, Chow MF, Huang YF, Latif SD, Abdullah S, Ismail M, and El-Shafie A (2021) Surface water quality status and prediction during movement control operation order under covid-19 pandemic: Case studies in malaysia. *International Journal of Environmental Science and Technology* 18(4):1009–1018
- National Water Quality Monitoring Council (2024) Water quality data home. "Available at: <https://www.waterqualitydata.us/>"
- Némery J and Garnier J (2016) Biogeochemistry: The fate of phosphorus. *Nature Geoscience* 9(5):343–344
- Piano S Lo, Sheikholeslami R, Puy A, and Saltelli A (2023) Sensitivity auditing: A practical checklist for auditing decision-relevant models. *Oxford University Press* 121–136
- Ramtel P, Feng D, and Gardner J (2024) Toward large-scale riverine phosphorus estimation using remote sensing and machine learning. *Journal of*

- Geophysical Research: Biogeosciences. John Wiley & Sons, Ltd 129(8):e2024JG008121
- Read EK, Carr L, De Cicco L, Dugan HA, Hanson PC, Hart JA, Kreft J, Read JS, and Winslow LA (2017) Water quality data for national-scale aquatic research: the water quality portal. *Water Resources Research* 53(2):1735–1745
- Saunders WMH and Metson AJ (1971) Seasonal variation of phosphorus in soil and pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 14(2):307–328
- Sharma MP, Singal SK, and Patra S (2009) Water quality profile of Yamuna river, India. *Journal of Water, Energy and Environment* 3(5):19–24
- Sheikholeslami R and Ghorbani P (2024) Assessing Chlorophyll-a variations in Caspian Sea during the COVID-19 pandemic. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, *Bull Environ Contam Toxicol* 113(1):1–7
- Sheikholeslami R and Golkari M (2023) Quantifying the influence of data uncertainty on manure phosphorus runoff simulations: A global analysis of major river basins. *American Geophysical Union, AGUFM 2023:H01-12*
- Sheikholeslami R and Hall JW (2023) Global patterns and key drivers of stream nitrogen concentration: A machine learning approach. *Science of The Total Environment* 868:161623
- Shen LQ, Amatulli G, Sethi T, Raymond P and Domisch S (2020) Estimating nitrogen and phosphorus concentrations in streams and rivers, within a machine learning framework. *Scientific Data* 7(1):1–11
- Siebers N, Sumann M, Kaiser K, and Amelung W (2017) Climatic effects on phosphorus fractions of native and cultivated north American grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* 81(2):299–309
- Stelzer JAA, Mesman JP, Gsell AS, de Senerpont Domis LN, Visser PM, Adrian R, and Ibelings BW (2022) Phytoplankton responses to repeated pulse perturbations imposed on a trend of increasing eutrophication. *Ecology and Evolution* 12(3):1–15
- 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
- Turner RE and Rabalais NN (2003) Linking landscape and water quality in the Mississippi river basin for 200 years. *BioScience* 53(6):563–572
- United Nations Environment Programme (2024) Gemstat-the global water quality database. "Available at: <https://gemstat.org/>"
- US EPA (2014) Water quality standards regulations: wisconsin | us epa. "Available at: <https://www.epa.gov/wqs-tech/water-quality-standards-regulations-wisconsin>"
- Wang R, Cai C, Zhang J, Sun S, and Zhang H (2022) Study on phosphorus loss and influencing factors in the water source area. *International Soil and Water Conservation Research* 10(2):324–334
- Wellen C, Kamran-Disfani AR, and Arhonditsis GB (2015) Evaluation of the current state of distributed watershed nutrient water quality modeling. *Environmental Science and Technology* 49(6):3278–3290
- Xue J, Yuan C, Ji X, and Zhang M (2024) Predictive modeling of nitrogen and phosphorus concentrations in rivers using a machine learning framework: A case study in an urban-rural transitional area in Wenzhou China. *Science of The Total Environment* 910:168521
- Yao H, Huang Y, Lv P, and Luo H (2024) Phosphorus prediction in the middle reaches of the Yangtze river based on GRA-CEEMDAN-CNLSTM-DBO. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group UK 14(1):1–19
- Yi HS, Park S, An KG, and Kwak KC (2018) Algal bloom prediction using extreme learning machine models at artificial weirs in the Nakdong River, Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute 15(10):2078
- Yunus AP, Masago Y, and Hijioka Y (2020) COVID-19 and surface water quality: improved lake water quality during the lockdown. *Science of The Total Environment* 731:139012
- Zanoni MG, Majone B, and Bellin A (2022) A catchment-scale model of river water quality by machine learning. *Science of the Total Environment* 838:156377