



# Physicochemical Assessment and Spatial Analysis of Water Quality in the Rivers of Lar National Park Using a Multivariate Statistical Approach

Mina Mahmoudi<sup>1</sup>, Asghar Abdoli<sup>\*2</sup>, Nematollah Khorasani<sup>3</sup>

1. Ph.D Student., Department of Natural Resources and Environment, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

E-mail: [mina.mahmoudi88@gmail.com](mailto:mina.mahmoudi88@gmail.com)

2. Professor., Department of Biodiversity and Ecosystem Management, Environmental Sciences Research Institute, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran. (Corresponding author) E-mail: [asabdoli@gmail.com](mailto:asabdoli@gmail.com)

3. Professor., Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

E-mail: [khorasan@ut.ac.ir](mailto:khorasan@ut.ac.ir)

| Article Info                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Article type:</b> Research Article</p> <p><b>Article history:</b><br/>Received 27 March 2026<br/>Revised 08 May 2026<br/>Accepted 13 June 2026<br/>Available online 22 June 2026</p> <p><b>Keywords:</b><br/><i>Spearman Correlation,<br/>Self Purification,<br/>Eutrophication,<br/>Point Sources,<br/>Lar National Park</i></p>                                                     | <p><b>Objective:</b> This study conducts a comprehensive evaluation of the physicochemical water quality and longitudinal monitoring of rivers in Lar National Park over two consecutive summers (2017 and 2018).</p> <p><b>Method:</b> Water samples were collected from 20 stations across 10 rivers and springs. Nine key parameters were measured, including temperature, acidity (pH), dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), total nitrogen, total phosphorus, turbidity, electrical conductivity (EC), and total dissolved solids (TDS), along with two derived indices (BOD/DO and N/P ratios). Statistical analyses, including Spearman correlation, hierarchical cluster analysis, and the Kruskal-Wallis test, were performed using R software</p> <p><b>Results:</b> Results indicated that overall water quality is favorable (mean BOD<sub>5</sub> ≤ 0/27 mg/L and DO ≥ 7/32 mg/L), with mean electrical conductivity ranging at 345 μS/cm; however, significant longitudinal heterogeneity was observed. Downstream sections, particularly the Siah-Polas River, exhibited intense anthropogenic pressure, with total phosphorus reaching a maximum of 0/59 mg/L at station LNP11 in 2018 and turbidity peaking at 9.2 NTU at station LNP12.</p> <p><b>Conclusions:</b> A significant negative correlation was found between elevation and total nitrogen (p=0/004 ,r=0/45). Furthermore, the Kruskal-Wallis test revealed significant spatial differences among upstream, midstream, and downstream groups for total nitrogen (p&lt;0/001) and electrical conductivity (p&lt;0/01), confirming the accumulation of anthropogenic pollutants downstream. These findings underscore the necessity for targeted management based on spatial zoning in Lar National Park.</p> |
| <p><b>Cite this article:</b> Mahmoudi, M., Abdoli, A., Khorasani, N. (2026). Physicochemical assessment and spatial analysis of water quality in the rivers of Lar National Park using a multivariate statistical approach. <i>Journal of Ecohydrology</i>, 13(2), 1342-1368. <a href="https://doi.org/10.22059/ije.2026.407619.1898">https://doi.org/10.22059/ije.2026.407619.1898</a></p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>© Mina Mahmoudi, Asghar Abdoli, Nematollah Khorasani</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p><b>Publisher:</b> University of Tehran Press.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p><b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.22059/ije.2026.407619.1898">https://doi.org/10.22059/ije.2026.407619.1898</a></p>                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |



## Extended Abstract

### Introduction

Rivers are vital components of aquatic ecosystems and their physicochemical quality directly impacts human health and biodiversity. Lar National Park, a unique mountainous ecosystem in Iran, plays a strategic role in supplying drinking water to Tehran province and harboring endangered species such as the Brown trout (*Salmo trutta macrostomus*). However, anthropogenic pressures, including nomadic livestock grazing, seasonal tourism, and unauthorized constructions, threaten the hydro-geochemical integrity of this protected area. Traditional water quality assessments often rely on generalized averages or single-parameter indices, which fail to capture localized Longitudinal Analysis dynamics.

The primary objective of this study is to comprehensively evaluate the physicochemical water quality of Lar National Park's rivers over two consecutive summers (2017 and 2018) using an integrated statistical and Longitudinal approach. We hypothesize that calculating derived stoichiometric indices (BOD/DO and N/P) combined with longitudinal Longitudinal Analysis analysis will reveal hidden, localized anthropogenic impacts more effectively than traditional raw-data assessments. This research targets environmental managers and ecologists, utilizing an observational and interpretive design to highlight Longitudinal Analysis practices and ecological bottlenecks, ultimately providing a scientific basis for targeted, longitudinally zoned management strategies.

### Method

This study employed an observational field monitoring design. Water samples were collected from 20 stations across 10 rivers and springs within Lar National Park. Nine primary physicochemical parameters, temperature, pH, dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), turbidity, electrical conductivity (EC), and total dissolved solids (TDS), were measured. Additionally, three derived indices (BOD/DO, and N/P) were calculated to assess organic load balance, nutrient limitation, and ionic composition. Field measurements (DO, pH, EC, turbidity) were conducted using a portable multiparameter device (Hach HQ40D, USA), while laboratory analyses (BOD<sub>5</sub>, TDS, TN, TP) followed standard APHA (2017) protocols. Data gathering procedures included in-situ hydrometric measurements (depth, width, velocity) to calculate discharge. Statistical analyses, including Spearman correlation, hierarchical cluster analysis (Ward.D2), and Kruskal-Wallis tests, were performed using R software (v4.2.2).

### Sampling Procedures

A purposive stratified sampling method was implemented along the river continuum, from upstream headwaters to downstream outlets. The sampling network covered the main tributaries (Varav, Delichay, Ab-Sefid, Almal, Gazal-Dareh, Siah-Plas, and Lar rivers) and major karstic springs (Khuni, Siah, and Doobar). Data were collected during the summer baseflow periods of 2017 and 2018. This specific timing was chosen to capture the peak of anthropogenic pressures (nomadic migration and tourism) under minimal natural dilution from snowmelt or seasonal

rainfall. No human or animal subjects were involved in the data collection; sampling was strictly non-invasive environmental monitoring.

### ***Sample Size, Power, and Precision***

The intended and achieved sample size comprised 20 stations monitored over 2 consecutive years, yielding 40 Longitudinal-temporal samples. The sample size was determined based on the longitudinal coverage required to represent the entire hydrological network of the national park, ensuring that all major sub-basins and spring inputs were captured. Given the non-normal distribution of environmental data and the limited number of spatial nodes, non-parametric statistical tests were utilized to maintain the precision and robustness of the parameter estimates without relying on strict normality assumptions.

### ***Mixed methods research***

While this study is fundamentally a quantitative environmental monitoring research, it integrates quantitative laboratory data with qualitative field observations (an explanatory integrated approach). During sampling, qualitative field notes regarding anthropogenic activities (e.g., density of nomadic encampments, livestock presence, and tourist infrastructure) were recorded at each station. This integration is appropriate given the paper's goals, as statistical anomalies (such as sudden nutrient spikes) require qualitative ecological context to be accurately attributed to specific point-source pollution rather than natural geochemical background variations. The combined approach adds significant value by transforming abstract statistical clusters into actionable, real-world management zones.

### **Results**

The overall water quality of Lar National Park was favorable, with mean BODs  $\leq 0/27$  mg/L and DO  $\geq 7/32$  mg/L, indicating no significant organic pollution at the park scale. However, significant longitudinal heterogeneity was observed. Downstream sections, particularly the Siah-Plas river (stations LNP11–LNP14), exhibited pronounced anthropogenic stress. Total phosphorus peaked alarmingly at 0/59 mg/L at LNP11 in 2018, and turbidity reached 9/2 NTU at LNP12.

Spearman correlation revealed a significant negative correlation between elevation and TN ( $r = -0/45$ ,  $p = 0/004$ ), confirming the downstream accumulation of anthropogenic nutrients. The Kruskal-Wallis test confirmed significant Longitudinal differences among upstream, midstream, and downstream groups for TN ( $p < 0/001$ ), N/P ratio ( $p < 0/001$ ), and EC ( $p < 0/01$ ). The regional N/P ratio ( $>100$ ) indicated severe phosphorus limitation (oligotrophic status), making the localized phosphorus peak at LNP11 a critical ecological warning sign. Notably, discharge (Q) showed no significant correlation with chemical parameters, highlighting that in this mountainous network with point-source pollution, flow volume alone cannot predict water quality; rather, localized inputs and downstream spring dilution govern the chemical regime.

**Conclusions**

The findings demonstrate that managing Lar National Park based on "park-wide average water quality" is inadequate and potentially misleading. The Longitudinal analysis identified Siah-Plas as a critical "hotspot" for anthropogenic stress, driven by its flat topography, accessibility from the Haraz road, and concentration of nomadic grazing. The study confirms that the river system possesses a natural self-purification capacity downstream, primarily driven by the massive dilution effect of karstic springs (Khuni, Siah, and Doobarar).

The practical significance of these outcomes dictates a shift from generalized monitoring to "Longitudinally zoned management." Strict regulatory restrictions on livestock and tourism must be enforced specifically in the Siah-Plas mid-reach. Furthermore, protecting the endangered Brown trout requires monitoring extreme thermal and nutrient conditions (ecological bottlenecks) rather than just favorable averages. These findings provide a direct, evidence-based framework for conservation policies in mountainous protected areas.

**Funding**

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

**Author Contributions**

All authors have contributed equally to data collection, data analysis, writing, reviewing, editing, and approval of the final manuscript.

**Conflict of interest**

The authors declare that there are no conflicts of interest in this research.

**Ethical considerations**

Environmental sampling permits were obtained from the Iranian Department of Environment prior to field operations. The study did not involve human participants or animal testing. The authors avoided data fabrication and falsification, ensuring all reported results are derived directly from the primary field and laboratory measurements.

**Data availability statement**

The datasets generated and analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

**Acknowledgements**

The authors would like to thank the Iranian Department of Environment and the local authorities of Lar National Park for their administrative support and assistance during the field sampling campaigns.



# ارزیابی فیزیکوشیمیایی و تحلیل مکانی کیفیت آب رودخانه‌های پارک ملی لار با رویکرد آماری چندمتغیره

مینا محمودی<sup>۱</sup>، اصغر عبدلی<sup>۲\*</sup>، نعمت‌اله خراسانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: [mina.mahmoudi8888@gmail.com](mailto:mina.mahmoudi8888@gmail.com)

۲- استاد، گروه تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) رایانامه: [asabdoli@gmail.com](mailto:asabdoli@gmail.com)

۳- استاد، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [khorasan@ut.ac.ir](mailto:khorasan@ut.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

**هدف:** این پژوهش به ارزیابی جامع کیفیت فیزیکوشیمیایی و پایش طولی آب رودخانه‌های پارک ملی لار در دو تابستان متوالی (۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) می‌پردازد.

نوع مقاله: پژوهشی

**روش پژوهش:** نمونه‌های آب از ۲۰ ایستگاه در ۱۰ رودخانه و چشمه جمع‌آوری شد. ۹ پارامتر اصلی شامل دما، اسیدیته (pH)، اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن‌خواهی زیستی (BOD<sub>5</sub>)، نیتروژن کل، فسفر کل، کدورت، هدایت الکتریکی (EC) و مواد جامد محلول کل (TDS) اندازه‌گیری شدند و دو شاخص مشتق‌شده (نسبت‌های BOD/DO و N/P) نیز محاسبه شد. تحلیل‌های آماری شامل همبستگی اسپیرمن، تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و آزمون کروسکال - والیس با استفاده از نرم‌افزار R انجام شد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد کیفیت کلی آب مطلوب است (میانگین  $BOD_5 \leq 0.27$  و  $DO \geq 7.33$  میلی‌گرم در لیتر) و میانگین EC در محدوده  $345 \mu S/cm$  قرار داشت؛ با این حال، ناهمگونی طولی معناداری مشاهده شد. بخش‌های پایین‌دست، به‌ویژه رودخانه سیاه‌پلاس، فشار انسان‌زاد شدیدی را نشان دادند؛ به طوری که فسفر کل در ایستگاه LNP11 در سال ۱۳۹۷ به حداکثر  $0.59$  میلی‌گرم در لیتر و کدورت در ایستگاه LNP12 به  $9.2$  NTU رسید.

کلیدواژه‌ها:

همبستگی اسپیرمن،

خودپالایی،

مغذی‌شدگی،

منابع نقطه‌ای،

پارک ملی لار.

**نتیجه‌گیری:** همبستگی منفی معناداری بین ارتفاع و نیتروژن کل مشاهده شد ( $r^2=0.45$ ,  $p=0.004$ ). علاوه بر این، آزمون کروسکال - والیس تفاوت‌های فضایی معناداری را میان گروه‌های بالادست، میانی و پایین‌دست برای نیتروژن کل ( $p<0.001$ ) و هدایت الکتریکی ( $p<0.001$ ) آشکار ساخت که تأییدکننده تجمع آلاینده‌های انسان‌زاد در پایین‌دست است. این یافته‌ها بر ضرورت مدیریت هدفمند و مبتنی بر منطقه‌بندی فضایی در پارک ملی لار تأکید دارد.

**استناد:** محمودی، مینا؛ عبدلی، اصغر؛ خراسانی، نعمت‌اله. (۱۴۰۵). ارزیابی فیزیکوشیمیایی و تحلیل مکانی کیفیت آب رودخانه‌های پارک ملی لار با رویکرد آماری



چندمتغیره. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۳(۲)، ۱۳۶۸-۱۳۴۲.

<https://doi.org/10.22059/ije.2026.407619.1898>

© مینا محمودی، اصغر عبدلی، نعمت‌اله خراسانی.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌ها به عنوان یکی از اصول بنیادین برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی و مدیریت پایدار منابع آب مطرح است (ایرانی، مصطفی‌زاده و موسوی مقانجوقی، ۲۰۲۵). رودخانه‌ها شریان‌های حیاتی اکوسیستم‌های آبی هستند و نقش کلیدی در تأمین آب شرب، کشاورزی، صنعت و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کنند (مغربی و همکاران، ۲۰۲۳). هرگونه تغییر در کیفیت فیزیکوشیمیایی آب این منابع، سلامت انسان و ساختار جوامع زیستی وابسته را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، پایش مستمر و جامع پارامترهای کیفی آب برای مدیریت هوشمند اکوسیستم‌های آبی ضروری است.

پارک ملی لار یکی از اکوسیستم‌های کوهستانی منحصربه‌فرد با اهمیت بالا در تأمین آب شرب استان تهران و حفظ زیستگاه گونه‌های نادری مانند ماهی قزل‌آلای خال‌قرمز است که در فهرست گونه‌های در معرض انقراض جهانی قرار دارد (طباطبایی و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، فشارهای انسانی نظیر چرای دام‌های عشایر و گردشگری فصلی در مناطق حساس و ساخت‌وسازهای غیرمجاز در حاشیه رودخانه‌ها، تهدیدی جدی برای سلامت هیدروشیمیایی این اکوسیستم محسوب می‌شوند (سبحانی و همکاران، ۲۰۲۳). به عنوان مثال، فاضلاب رستوران‌های جاده هراز و آلودگی ناشی از استخرهای پرورش ماهی به عنوان دلایل اصلی آلودگی آب در نزدیکی پارک ملی لار ذکر شده‌اند (رخشان و همکاران، ۲۰۲۳). درک دقیق الگوهای کیفی آب در این منطقه برای حفاظت از گونه‌های بومی و تضمین کیفیت آب ورودی به سد لار ضروری است (طباطبایی و همکاران، ۲۰۲۴).

هدف از این پژوهش، ارزیابی جامع کیفیت فیزیکوشیمیایی آب رودخانه‌های پارک ملی لار در دو سال متوالی (تابستان ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) است. نوآوری اصلی این مطالعه در عبور از پایش‌های روتین مبتنی بر میانگین‌گیری کل حوضه است. این پژوهش با تلفیق «پروفایل‌برداری طولی» و «آمار چندمتغیره»، برای نخستین بار نشان می‌دهد چگونه فشارهای انسان‌زاد پراکنده، در نقاط خاصی (نقاط داغ) متمرکز می‌شوند و سیستم‌های رودخانه‌ای کوهستانی از طریق مکانیسم‌های طبیعی در پایین‌دست، ظرفیت خودپالایی خود را بازیابی می‌کنند. این رویکرد می‌تواند به عنوان پایه‌ای علمی برای طراحی سیستم پایش هوشمند و برنامه‌ریزی مدیریتی هدفمند در این منطقه تحت حفاظت مورد استفاده قرار گیرد (گودرزی و همکاران، ۲۰۲۲).

## پیشینه پژوهش

**پیشینه نظری-** در سیستم‌های رودخانه‌ای خطی مانند پارک لار، تحلیل فضایی از بالادست به پایین‌دست می‌تواند ابزاری قدرتمند در ردیابی منابع آلاینده باشد (گودرزی و همکاران، ۲۰۲۲). رویکردهای تلفیقی که هم‌زمان تحلیل آماری چندمتغیره و تفسیر اکولوژیکی فضایی را به کار می‌گیرند، امکان تشخیص نقاط بحرانی محلی و تفکیک تأثیرات طبیعی از فشارهای انسانی را فراهم می‌آورند (فیضی‌زاده، عبداللهی و شوکتی، ۲۰۲۲).

**پیشینه تجربی-** شواهد نشان می‌دهد ارزیابی‌های کیفی آب در مناطق کوهستانی اغلب بر میانگین‌های کلی یا شاخص‌های تک‌پارامتری متمرکز است که ناتوان در شناسایی الگوهای فضایی دقیق فشارهای انسانی هستند (لیو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). در مقابل، مطالعاتی دیگر نشان داده‌اند ترکیب آمار چندمتغیره با تحلیل فضایی می‌تواند در آشکارسازی تأثیرات موضعی فعالیت‌های انسانی مؤثر باشد (فیضی‌زاده، عبداللهی و شوکتی، ۲۰۲۲؛ گودرزی و همکاران، ۲۰۲۲).

مطالعات اخیر در سطح جهان و ایران نیز بر ضرورت گذر از ارزیابی‌های فقط مبتنی بر میانگین تأکید کرده‌اند. برای مثال، لیو و همکاران (۲۰۲۰) در حوضه رودخانه هولان چین نشان دادند ترکیب آمار چندمتغیره با ردیابی طولی آلاینده‌ها، دقت شناسایی منابع آلودگی را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد. در ایران نیز ایرانی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از پایش طولی در رودخانه زاب کوچک، تغییرات کیفیت آب را در امتداد جریان ارزیابی کردند و نشان دادند رویکردهای طولی در مقایسه با تحلیل‌های مقطعی،

درک بهتری از دینامیک خودپالایی رودخانه ارائه می‌دهند. با این وجود، شکاف تحقیقاتی در اکوسیستم‌های کوهستانی حفاظت‌شده ایران، که در آن‌ها منابع آلودگی به شدت نقطه‌ای و فصلی هستند، همچنان احساس می‌شود.

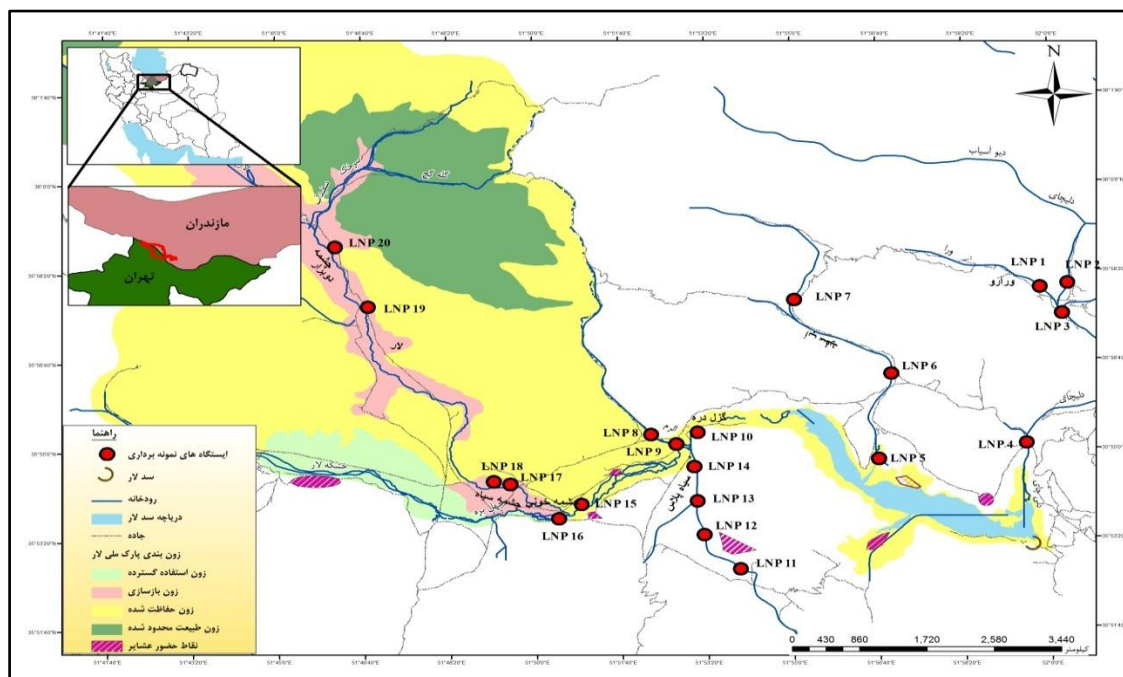
**مدل مفهومی** - این پژوهش با ترکیب تحلیل‌های آماری چندمتغیره (همبستگی اسپیرمن، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و آزمون کروسکال - والیس) و تفسیر فضایی طولی، یک چارچوب عملیاتی برای مدیریت پارک‌های ملی کوهستانی ارائه می‌دهد (گودرزی و همکاران، ۲۰۲۲). چارچوب، فراتر از توصیف آماری، پاسخ مستقیم به سؤالات مدیریتی می‌دهد و امکان شناسایی نقاط آسیب‌پذیر، پارامترهای هشداردهنده و طراحی نظارت هدفمند را فراهم می‌کند.

## روش‌شناسی پژوهش

در این مطالعه، نمونه‌برداری فیزیکوشیمیایی آب در دو دوره تابستانی از ۲۰ ایستگاه (LNP1-LNP20) در رودخانه‌های ورآرو، الرم، آب سفید، دلیچای، لار، چشمه سیاه، چشمه خونی، چشمه دوبرار، گزل دره و سیاه‌پلاس انجام شده است. «روش‌های استاندارد برای بررسی آب و فاضلاب»<sup>۱</sup> یک مرجع شناخته‌شده برای تجزیه و تحلیل کیفیت آب در سراسر جهان است (هاسکین، ۲۰۱۷). این نشریه به طور گسترده در مطالعات برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف کیفیت آب استفاده می‌شود (هاسکین، ۲۰۱۷). نام و مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری در جدول ۱ نشان داده شده است. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در محدوده پارک ملی لار در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. نام و مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری

| کد ایستگاه | نام رودخانه | طول جغرافیایی<br>(درجه) | عرض جغرافیایی<br>(درجه) | ارتفاع از سطح دریا<br>(متر) |
|------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| LNP1       | ورآرو       | ۵۲° ۰۰' ۲۸"             | ۳۵° ۵۸' ۱۷.۱"           | ۲۹۵۸                        |
| LNP2       | ورآرو       | ۵۱° ۵۹' ۳۷.۸"           | ۳۵° ۵۸' ۸.۹"            | ۲۹۵۰                        |
| LNP3       | ورآرو       | ۵۲° ۰۰' ۱۰.۴"           | ۳۵° ۵۷' ۳۷.۹"           | ۲۹۳۴                        |
| LNP4       | دلیچای      | ۵۱° ۵۹' ۳۲.۴"           | ۳۵° ۵۵' ۳.۶"            | ۲۵۵۹                        |
| LNP5       | آب سفید     | ۵۱° ۵۵' ۰۲.۵"           | ۳۵° ۵۷' ۴۹.۳"           | ۲۷۴۲                        |
| LNP6       | آب سفید     | ۵۱° ۵۵' ۵۸.۹"           | ۳۵° ۵۷' ۲.۶"            | ۲۶۶۳                        |
| LNP7       | آب سفید     | ۵۱° ۵۶' ۵۲.۹"           | ۳۵° ۵۶' ۹.۱"            | ۲۵۶۹                        |
| LNP8       | الرم        | ۵۱° ۵۲' ۲۱.۳"           | ۳۵° ۵۵' ۱۵"             | ۲۴۹۷                        |
| LNP9       | الرم        | ۵۱° ۵۲' ۵۸.۶"           | ۳۵° ۵۵' ۵.۹"            | ۲۵۱۵                        |
| LNP10      | گزل دره     | ۵۱° ۵۲' ۵۵.۴"           | ۳۵° ۵۵' ۸.۸"            | ۲۵۲۳                        |
| LNP11      | سیاه‌پلاس   | ۵۱° ۵۳' ۳۰"             | ۳۵° ۵۲' ۴۳.۸"           | ۲۵۵۴                        |
| LNP12      | سیاه‌پلاس   | ۵۱° ۵۳' ۱۲.۴"           | ۳۵° ۵۳' ۲۰.۱"           | ۲۵۲۸                        |
| LNP13      | سیاه‌پلاس   | ۵۱° ۵۳' ۱۰"             | ۳۵° ۵۴' ۴.۹"            | ۲۵۲۹                        |
| LNP14      | سیاه‌پلاس   | ۵۱° ۵۳' ۱۰.۲"           | ۳۵° ۵۴' ۵۸.۴"           | ۲۵۲۷                        |
| LNP15      | لار         | ۵۱° ۵۰' ۴۶.۶"           | ۳۵° ۵۳' ۵۰.۵"           | ۲۵۶۴                        |
| LNP16      | چشمه خونی   | ۵۱° ۵۰' ۲۲"             | ۳۵° ۵۳' ۴۵.۹۶"          | ۲۵۸۳                        |
| LNP17      | چشمه سیاه   | ۵۱° ۴۹' ۱۲"             | ۳۵° ۵۴' ۳۰"             | ۲۵۶۵                        |
| LNP18      | چشمه سیاه   | ۵۱° ۴۹' ۴۲.۵"           | ۳۵° ۵۴' ۲۵.۲"           | ۲۵۶۲                        |
| LNP19      | لار         | ۵۱° ۴۶' ۴۹.۹"           | ۳۵° ۵۷' ۲۵.۶"           | ۲۶۳۸                        |
| LNP20      | چشمه دوبرار | ۵۱° ۴۶' ۱۲.۷"           | ۳۵° ۵۸' ۲۹.۳"           | ۲۶۷۲                        |



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در محدوده پارک ملی لار

نمونه‌برداری در فصل تابستان انجام شد، زیرا این دوره متناظر با حداقل جریان پایه در رودخانه‌های کوهستانی منطقه است. شرایط جریان پایه نه تنها تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی را بدون رقابت با رواناب‌های فصلی بارش یا ذوب برف آشکار می‌کند، بلکه بیشترین فشارهای انسان‌زاد از جمله گردشگری فصلی، چرای عشایر و مصرف آب را منعکس می‌کند. همچنین، از آنجا که پارک ملی لار به عنوان یکی از منابع تأمین آب شرب تهران در نظر گرفته می‌شود، ارزیابی کیفیت آب در شرایط تنش‌زا (حداقل رقابت رقیق‌کنندگان طبیعی) اهمیت ویژه‌ای در مدیریت ریسک دارد. انتخاب دو سال متوالی نیز امکان بررسی پایداری الگوهای کیفی را در برابر نوسانات کوچک اقلیمی فراهم کرده است.

### پارامترهای اندازه‌گیری شده

ویژگی فیزیوگرافیک شامل ارتفاع از سطح دریا (با استفاده از دستگاه GPS Garmin eTrex 32x-2015) و همچنین، پارامترهای هیدرومتریک عمق و عرض رودخانه (به ترتیب با میله عمق‌سنج و طناب اندازه‌گیری، بر حسب متر) در هر ایستگاه ثبت شدند. دمای آب و هوا با استفاده از دماسنج جیوه‌ای در محل اندازه‌گیری شد و نتایج بر حسب درجه سانتی‌گراد ( $^{\circ}\text{C}$ ) گزارش شد. اکسیژن محلول (DO) با استفاده از دستگاه پرتابل HQ40D چندپارامتره (USA, Hach) مجهز به سنسور الکتروشیمیایی<sup>۱</sup> در محل اندازه‌گیری شد. مقادیر اکسیژن محلول بر حسب میلی‌گرم بر لیتر (mg/L) ثبت شد. درصد اکسیژن محلول<sup>۲</sup> (DO درصد) به صورت خودکار توسط دستگاه HQ40D بر اساس دمای آب، فشار جو (تخمین زده شده از ارتفاع) و غلظت DO محاسبه می‌شود. مقادیر این پارامتر بر حسب درصد (%) ثبت شد. اسیدیته (pH) با استفاده از الکترود شیشه‌ای دستگاه HQ40D اندازه‌گیری شد. کدورت<sup>۳</sup> با همان دستگاه HQ40D بر اساس اصل پراکندگی نور در زاویه ۹۰ درجه اندازه‌گیری شد.

1. Galvanic
2. Saturation
3. Turbidity



هدایت الکتریکی<sup>۱</sup> (EC) با دستگاه HQ40D اندازه‌گیری شد و نشان‌دهنده توانایی آب در هدایت جریان الکتریکی است که به طور مستقیم با غلظت یون‌های محلول (مانند  $\text{Na}^+$ ،  $\text{Cl}^-$  و  $\text{Ca}^{2+}$ ) مرتبط است. EC به عنوان شاخصی از شوری نسبی و بار یونی آب است. نتایج بر حسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) گزارش شد.

مواد جامد محلول کل<sup>۲</sup> (TDS) با روش با استاندارد APHA (روش C ۲۵۴۰) در آزمایشگاه تعیین شد. برای این منظور، حجم مشخصی از نمونه آب فیلترشده (از صافی ۰/۴۵ میکرومتر) در بوتله چینی ریخته شد. سپس بوتله در حمام بخار تا تبخیر کامل قرار گرفت و پس از آن به مدت دو ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک‌کن نگهداری شد. پس از سرد شدن در دسیکاتور، وزن باقی‌مانده ثبت شد. در نهایت، مقدار TDS بر اساس اختلاف وزن قبل و بعد از تبخیر و حجم نمونه، محاسبه شد. مقادیر نهایی بر حسب میلی‌گرم در لیتر (mg/L) گزارش شدند.

نیتروژن کل پس از فیلتراسیون نمونه‌ها از صافی ۰/۴۵ میکرومتر، در آزمایشگاه شرکت مهندسی آب و فاضلاب استان تهران با روش اسپکتروفتومتری (واکنش رنگی با کادمیوم) اندازه‌گیری شد. غلظت‌ها بر حسب قسمت در میلیون (ppm) گزارش شد. فسفر کل ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) با روش اسپکتروفتومتری (واکنش با مولیبدات و تشکیل کمپلکس آبی) در همان آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. غلظت‌ها بر حسب قسمت در میلیون (ppm) گزارش شد.

اکسیژن‌خواهی زیستی ( $\text{BOD}_5$ ) با روش استاندارد ۵ روزه در آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب استان تهران اندازه‌گیری شد. در این روش، نمونه‌های آب پس از رقیق‌سازی مناسب در شیشه‌های BOD ریخته شده و به مدت پنج روز در انکوباتور با دمای  $20 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. غلظت اکسیژن محلول در ابتدا و انتهای دوره اندازه‌گیری و  $\text{BOD}_5$  با استفاده از رابطه استاندارد محاسبه شد. این پارامتر نشان‌دهنده میزان مواد آلی قابل تجزیه زیستی در آب است. مقادیر اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی پنج‌روزه ( $\text{BOD}_5$ ) بالاتر از ۳ میلی‌گرم در لیتر معمولاً نشان‌دهنده ورود پساب یا مواد آلی است (آراهماه، ماسلوکا و نوگروهو<sup>۳</sup>، ۲۰۲۵).  $\text{BOD}_5$  با استفاده از رابطه زیر (فرمول ۱) محاسبه شد.

$$\text{BOD}_5 \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(DO_i - DO_f) - (B_i - B_f) \times f}{P} \quad (1)$$

که در آن  $(DO_i)$  و  $(DO_f)$  به ترتیب غلظت اولیه و نهایی اکسیژن در نمونه،  $(B_i)$  و  $(B_f)$  غلظت اولیه و نهایی اکسیژن در شاهد (آب رقیق‌کننده)،  $(f)$  کسر حجمی آب رقیق‌کننده و  $(P)$  کسر حجمی نمونه آب است.

در این پژوهش، علاوه بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی خام، سه شاخص ترکیبی برای ارزیابی جامع‌تر وضعیت هیدروشیمیایی رودخانه‌ها محاسبه شد. مراجع علمی زیر این شاخص‌ها را پشتیبانی می‌کنند.

نسبت اکسیژن‌خواهی زیستی به اکسیژن محلول (BOD/DO) به عنوان شاخصی از تعادل بین بار آلودگی آلی و ظرفیت اکسیژن‌دهی محیط آبی در نظر گرفته می‌شود.

نسبت نیتروژن به فسفر (N/P) بر اساس غلظت‌های نیتروژن کل و فسفر کل محاسبه می‌شود و برای شناسایی مغذی محدودکننده در اکوسیستم‌های آبی به کار می‌رود (ردفیلد<sup>۴</sup>، ۱۹۵۸). این مفهوم بیان می‌کند که نسبت جرمی N:P در حدود ۷:۱ (معادل نسبت مولی ۱۶:۱) به عنوان نقطه تعادل در نظر گرفته می‌شود (آندرسن<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۵). نسبت‌های کمتر از ۱۰

1. Electrical Conductivity
2. Total Dissolved Solids
3. Arrahmah, Masluka & Nugroho
4. Redfield
5. Andersen

نشان‌دهنده محدودیت نیتروژن و نسبت‌های بالاتر از ۲۰ نشان‌دهنده محدودیت فسفر در تولید اولیه است (السر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

مقادیر TDS نشان‌دهنده مجموع مواد معدنی و نمک‌های محلول در آب است. مقادیر بالای TDS می‌تواند برای مصارف آشامیدنی و آبی‌پروری نامناسب باشد (چتین<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۴).

تمامی اندازه‌گیری‌های میدانی با رعایت اصول نمونه‌برداری استاندارد (مانند جلوگیری از آلودگی ثانویه، استفاده از ظروف مناسب، ثبت شرایط محیطی هم‌زمان) انجام شد و کیفیت داده‌ها با استفاده از نمونه‌های کنترل کیفیت (Duplicate, Blank, Spike) در آزمایشگاه تأیید شد.

علاوه بر پارامترهای فیزیکوشیمیایی، پارامترهای هیدرومتری شامل عمق متوسط رودخانه (با میله عمق‌سنج)، عرض رودخانه (با طناب اندازه‌گیری) و سرعت جریان آب (با روش شناور سطحی) در هر ایستگاه اندازه‌گیری شد. دبی آب ( $m^3/s$ ) بر اساس حاصل‌ضرب سطح مقطع تر (عمق  $\times$  عرض) در سرعت جریان محاسبه شد. اندازه‌گیری‌ها در هر دو سال نمونه‌برداری تکرار شد تا تأثیر تغییرات هیدرولوژیکی بر کیفیت آب ارزیابی شود.

### روش‌های آماری

در این پژوهش، پس از جمع‌آوری داده‌های فیزیکوشیمیایی آب از ۲۰ ایستگاه در رودخانه‌های پارک ملی لار در دو سال متوالی (تابستان ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷)، تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار R نسخه ۴.۲.۲ انجام شد. ابتدا آماره‌های توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر برای هر یک از پارامترهای اندازه‌گیری شده محاسبه شد. به منظور مقایسه وضعیت کیفی آب بین دو سال، از آزمون غیرپارامتری من - ویتنی<sup>۳</sup> استفاده شد؛ این آزمون به دلیل نرمال نبودن توزیع برخی از داده‌ها و حجم نمونه محدود ( $n = 20$  در هر سال)، گزینه‌ای مناسب‌تر از آزمون t بود.

برای بررسی روابط بین پارامترهای کلیدی، از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد که نسبت به داده‌های پرت و توزیع غیرنرمال مقاوم‌تر است. همچنین، تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی<sup>۴</sup> با روش Ward.D2 و فاصله اقلیدسی برای گروه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس شباهت در پروفایل کیفی آب اجرا شد.

در ادامه، به منظور بررسی الگوهای فضایی، همبستگی اسپیرمن بین ارتفاع از سطح دریا با پارامترهای فیزیکوشیمیایی محاسبه شد. همچنین، ایستگاه‌ها بر اساس موقعیت جغرافیایی در مسیر جریان آب (بالادست، میانی و پایین‌دست) به سه گروه تقسیم شدند و تفاوت بین این گروه‌ها با استفاده از آزمون کروسکال - والیس<sup>۵</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، برای تحلیل روند طولی تغییرات پارامترهای کلیدی (نیتروژن کل، فسفر کل و کدورت)، نمودارهای خطی از بالادست به پایین‌دست رودخانه‌ها ترسیم شد. تمامی سطوح معناداری در آزمون‌های آماری بر اساس آستانه  $p < 0/05$  در نظر گرفته شد.

### یافته‌های پژوهش

بررسی اولیه داده‌های هیدروشیمیایی در ۲۰ ایستگاه نمونه‌برداری نشان داد (جدول ۲) پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب در پارک ملی لار از الگوهای مکانی مشخصی پیروی می‌کنند. به طور کلی، ایستگاه‌های بالادست رودخانه‌های ورآرو (LNP1–LNP3)، دلیچای (LNP4) و آب‌سفید (LNP5–LNP7) دارای کیفیت آب پایدارتری بودند؛ به طوری که در این مناطق، هدایت الکتریکی در محدوده ۲۳۲ تا ۴۵۰  $\mu S/cm$ ، نیتروژن کل کمتر از ۳  $mg/L$  و فسفر کل در سطح پایه ( $\geq 0/۰۳ mg/L$ ) قرار داشت. در مقابل، ایستگاه‌های

1. Elser
2. Çetin
3. Mann-Whitney U test
4. Hierarchical Cluster Analysis
5. Kruskal-Wallis

پایین دست رودخانه سیاه پلاس (LNP11–LNP14) تغییرات بیشتری نشان دادند؛ به ویژه در LNP11 که فسفر کل در سال ۱۳۹۷ به  $59 \text{ mg/L}$  رسید و در LNP12 که کدورت به  $9/2 \text{ NTU}$  افزایش یافت. رودخانه های الرم (LNP8–LNP9) و گزل دره (LNP10) نیز الگوی میانی داشتند؛ با این تفاوت که گزل دره به دلیل دبی بالاتر (تا  $12/8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) و EC پایین تر، مشخصات هیدروشیمیایی متمایزی نشان داد. چشمه های خونی، سیاه و دوبرار (LNP16–LNP20) نیز به دلیل منشأ زیرزمینی، دارای دمای پایدارتر (۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی گراد) و EC متغیر ( $250-670 \text{ } \mu\text{S/cm}$ ) بودند. این تنوع مکانی در پارامترهای پایه، لزوم استفاده از تحلیل های آماری چندمتغیره برای شناسایی الگوهای پنهان و تفکیک تأثیرات طبیعی از فشارهای انسان زاد را توجیه می کند.

جدول ۲. پارامترهای هیدرومتری (عمق، عرض، سرعت و دبی) ایستگاه های نمونه برداری در تابستان ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷

| کد ایستگاه | نام رودخانه | سال ۱۳۹۶        |                 |                    | سال ۱۳۹۷                      |                 |                    |
|------------|-------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|
|            |             | میانگین عمق (m) | میانگین عرض (m) | میانگین سرعت (m/s) | دبی ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | میانگین عمق (m) | میانگین سرعت (m/s) |
| LNP 1      | ورآرو       | ۰/۴۸            | ۹/۱۵            | ۱/۲۰               | ۵/۲۴                          | ۰/۴۵            | ۱/۲۸               |
| LNP 2      | ورآرو       | ۰/۱۸            | ۳/۰۵            | ۰/۲۰               | ۰/۱۱                          | ۰/۱۵            | ۰/۳۹               |
| LNP 3      | ورآرو       | ۰/۴۲            | ۹/۳۰            | ۰/۵۹               | ۲/۳۰                          | ۰/۴۴            | ۰/۵۸               |
| LNP 4      | دلیچای      | ۰/۵۰            | ۱۰/۰۰           | ۰/۸۱               | ۴/۰۷                          | ۰/۴۶            | ۰/۶۱               |
| LNP 5      | آب سفید     | ۰/۲۷            | ۱۰/۷۰           | ۰/۹۰               | ۲/۵۹                          | ۰/۳۳            | ۱/۳۷               |
| LNP 6      | آب سفید     | ۰/۳۲            | ۵/۳۰            | ۰/۶۳               | ۱/۰۴                          | ۰/۳۵            | ۰/۶۹               |
| LNP 7      | آب سفید     | ۰/۲۰            | ۴/۶۰            | ۰/۷۰               | ۰/۶۴                          | ۰/۳۲            | ۱/۳۶               |
| LNP 8      | الرم        | ۰/۳۰            | ۴/۶۵            | ۰/۵۹               | ۰/۸۱                          | ۰/۳۰            | ۱/۳۰               |
| LNP 9      | الرم        | ۰/۲۶            | ۸/۷۵            | ۰/۶۷               | ۱/۵۲                          | ۰/۳۰            | ۰/۶۳               |
| LNP 10     | گزل دره     | ۰/۴۷            | ۲۸/۶۰           | ۰/۹۵               | ۱۲/۸۱                         | ۰/۳۸            | ۰/۸۳               |
| LNP 11     | سیاه پلاس   | ۰/۲۰            | ۳/۳۰            | ۰/۴۲               | ۰/۲۷                          | ۰/۱۶            | ۰/۵۹               |
| LNP 12     | سیاه پلاس   | ۰/۲۵            | ۳/۷۰            | ۱/۱۱               | ۱/۰۱                          | ۰/۱۸            | ۰/۵۱               |
| LNP 13     | سیاه پلاس   | ۰/۱۵            | ۵/۱۷            | ۰/۴۰               | ۰/۳۰                          | ۰/۲۴            | ۰/۴۷               |
| LNP 14     | سیاه پلاس   | ۰/۱۵            | ۴/۹۰            | ۰/۲۰               | ۰/۱۵                          | ۰/۲۷            | ۰/۵۹               |
| LNP 15     | لار         | ۰/۲۵            | ۳۵/۰۰           | ۰/۷۹               | ۶/۹۴                          | ۰/۴۸            | ۰/۵۴               |
| LNP 16     | چشمه خونی   | ۰/۲۳            | ۱۳/۵۳           | ۱/۲۵               | ۳/۸۹                          | ۰/۲۷            | ۱/۶۹               |
| LNP 17     | چشمه سیاه   | ۰/۱۰            | ۱/۶۰            | ۰/۲۹               | ۰/۰۵                          | ۰/۱۷            | ۰/۶۹               |
| LNP 18     | چشمه سیاه   | ۰/۲۰            | ۵/۸۰            | ۰/۸۱               | ۰/۹۴                          | ۰/۲۴            | ۰/۶۷               |
| LNP 19     | لار         | ۰/۱۸            | ۴/۹۳            | ۰/۷۷               | ۰/۷۰                          | ۰/۲۵            | ۰/۸۰               |
| LNP 20     | چشمه دوبرار | ۰/۲۵            | ۸/۳۳            | ۰/۶۳               | ۱/۳۰                          | ۰/۳۵            | ۰/۹۱               |

محاسبه شاخص های ترکیبی در این پژوهش نشان داد (جدول ۳) میانگین نسبت BOD/DO در هر دو سال کمتر از ۰/۰۵ و نسبت N/P بالاتر از ۱۰۰ قرار دارد. این مقادیر به ترتیب نشان دهنده عدم فشار آلودگی آلی در اکوسیستم رودخانه ها، محدودیت شدید فسفر (وضعیت الیگوتروفیک) و غالب بودن منابع طبیعی در ترکیب یونی آب است. این الگوها با معیارهای استاندارد کیفیت آب در سیستم های کوهستانی سالم (چاپرا<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸) و مفهوم محدودیت فسفر در اکوسیستم های آب شیرین (السر و همکاران، ۲۰۰۹؛ رن<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۹) هم راستا هستند. این تطابق نشان می دهد ترکیب یونی آب در رودخانه های مورد مطالعه در محدوده طبیعی قرار دارد و شواهدی از تأثیر ورودی های غیرطبیعی (مانند پساب های صنعتی یا مواد شوینده) بر این نسبت مشاهده نمی شود.

این الگو با ویژگی‌های رایج آب‌های سطحی در مناطق کوهستانی با بار یونی طبیعی سازگار است (روسیدی، ۲۰۱۸) و تأیید می‌کند که غلبه منابع طبیعی در تعیین ترکیب یونی آب منطقه حاکم است.

جدول ۳. جدول توصیفی پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب، تابستان ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷

| پارامتر                   | میانگین  | انحراف معیار | حداقل | حداکثر | میانگین  | انحراف معیار | حداقل | حداکثر |
|---------------------------|----------|--------------|-------|--------|----------|--------------|-------|--------|
|                           | سال ۱۳۹۶ |              |       |        | سال ۱۳۹۷ |              |       |        |
| دمای آب (°C)              | ۱۲/۲۹    | ۴/۱۱         | ۷/۲   | ۱۹/۸   | ۱۰/۷۷    | ۲/۸۹         | ۶/۹   | ۱۷     |
| اسیدیته                   | ۸/۱۹     | ۰/۳۳         | ۷/۳۲  | ۸/۵۸   | ۸/۲۴     | ۰/۳۶         | ۷/۴۸  | ۸/۷    |
| اکسیژن محلول (mg/L)       | ۷/۳۲     | ۱/۱۸         | ۴/۴۵  | ۱۰/۴۹  | ۹/۲      | ۲/۳۴         | ۶/۵۲  | ۱۱/۰۱  |
| BOD <sub>5</sub> (mg/L)   | ۰/۲۷     | ۰/۲۸         | ۰/۰   | ۰/۹    | ۰/۲۶     | ۰/۲۴         | ۰/۰   | ۰/۷    |
| نیتروژن کل (mg/L)         | ۲/۸۸     | ۱/۶          | ۰/۹   | ۶/۷    | ۲/۵۸     | ۰/۹۸         | ۱/۳   | ۵      |
| فسفر کل (mg/L)            | ۰/۰۲     | ۰/۰          | ۰/۰۲  | ۰/۰۳   | ۰/۳۲     | ۱/۳۱         | ۰/۰۲  | ۵/۹    |
| کدورت (NTU)               | ۰/۶۴     | ۰/۵۷         | ۰/۲   | ۱/۹    | ۱/۲۵     | ۲/۰۷         | ۰/۲   | ۹/۲    |
| هدایت الکتریکی (μS/cm)    | ۳۶۵/۴۵   | ۱۲۶/۲        | ۲۳۲   | ۶۰۳    | ۳۲۵/۱۳   | ۱۴۳/۱        | ۱۱۲/۶ | ۶۷۱    |
| مواد جامد محلول کل (mg/L) | ۲۲۴/۷    | ۷۷/۵۲        | ۱۴۰   | ۳۸۲    | ۱۷۹/۴۶   | ۸۴/۹۱        | ۱۰۱/۱ | ۳۶۶    |
| نسبت BOD/DO               | ۰/۰۴     | ۰/۰۵         | ۰/۰   | ۰/۲    | ۰/۰۳     | ۰/۰۲         | ۰/۰   | ۰/۰۷   |
| نسبت N/P                  | ۱۴۳      | ۷۸/۸۶        | ۳۰    | ۳۳۵    | ۱۱۹/۸۴   | ۵۸/۶۹        | ۰/۳۴  | ۲۵۰    |

نتایج آزمون غیرپارامتری من - ویتنی نشان داد (جدول ۴) بین دو دوره نمونه‌برداری تابستانی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷، تفاوت معناداری در چندین پارامتر فیزیکوشیمیایی وجود دارد. مهم‌ترین تغییرات مربوط به دمای هوا ( $p = 7/11 \times 10^{-8}$ )، اکسیژن محلول ( $p = 2/34 \times 10^{-4}$ ) و درصد اکسیژن محلول ( $p = 3/93 \times 10^{-4}$ ) بوده است. این یافته‌ها نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در شرایط هیدرولوژیکی و شیمیایی آب طی دو سال متوالی است. اکسیژن محلول (DO) یک شاخص حیاتی برای ارزیابی سلامت و بهره‌وری اکوسیستم‌های آبی است (آنوپاما<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۵؛ دامبر<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). مقادیر پایین اکسیژن محلول می‌تواند نشانه‌ای از آلودگی آلی یا فعالیت میکروبی شدید در محیط‌های آبی باشد (گوسوامی<sup>۳</sup>، ۲۰۲۵). اشباع DO بالای ۱۰۰ درصد می‌تواند نشان‌دهنده فتوسنتز فعال توسط گیاهان آبزی باشد (هولتگریو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). اشباع DO زیر ۸۰ درصد ممکن است نشان‌دهنده مصرف اکسیژن توسط فرایندهای تجزیه باشد. اکسیژن محلول پایین، که به عنوان هیپوکسی شناخته می‌شود، یک نگرانی قابل توجه در محیط‌های آبی است و اغلب با افزایش ورودی‌های مواد مغذی انسانی ارتباط دارد (هریسیک، المدا و هوک<sup>۵</sup>، ۲۰۱۷).

1. Anupama
2. Dumbre
3. Goswami
4. Holtgrieve
5. Hrycik, Almeida & Höök

جدول ۴. نتایج آزمون غیرپارامتری من - ویتنی برای مقایسه پارامترهای فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های محاسبه‌شده آب رودخانه‌های پارک ملی لار بین دو دوره تابستانی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷. مقدار  $p$  کمتر از ۰/۰۵ به عنوان آستانه معناداری در نظر گرفته شد

| پارامتر                  | W آماره | p_value               | پارامتر                                | W آماره | p_value               |
|--------------------------|---------|-----------------------|----------------------------------------|---------|-----------------------|
| دمای هوا                 | ۳۹۹     | $7/11 \times 10^{-8}$ | دمای آب                                | ۱۶۳     | $3/23 \times 10^{-1}$ |
| نسبت TDS/EC              | ۵/۳۴۲   | $1/17 \times 10^{-4}$ | نسبت BOD/DO                            | ۵/۲۱۳   | $5/17 \times 10^{-1}$ |
| اکسیژن محلول (DO)        | ۵/۶۳    | $2/34 \times 10^{-4}$ | فسفر کل                                | ۱۸۹     | $5/34 \times 10^{-1}$ |
| درصد اکسیژن محلول        | ۵/۶۸    | $3/93 \times 10^{-4}$ | اسیدیته                                | ۱۷۷     | $5/43 \times 10^{-1}$ |
| مواد جامد محلول کل (TDS) | ۵/۲۹۶   | $9/41 \times 10^{-3}$ | عرض رودخانه                            | ۲۰۴     | $9/52 \times 10^{-1}$ |
| متوسط عمق                | ۲۵۳     | $1/55 \times 10^{-1}$ | نیتروژن کل                             | ۵/۲۰۳   | $9/35 \times 10^{-1}$ |
| کدورت                    | ۵/۱۵۳   | $2/08 \times 10^{-1}$ | ارتفاع                                 | ۲۰۰     | $1/00 \times 10^{-1}$ |
| هدایت الکتریکی (EC)      | ۵/۲۴۶   | $2/13 \times 10^{-1}$ | اکسیژن خواهی زیستی (BOD <sub>5</sub> ) | ۵/۲۰۰   | $1/00 \times 10^{-1}$ |

کاهش معنادار دمای هوا در سال ۱۳۹۷ نسبت به ۱۳۹۶ (به طور میانگین از ۲۵/۱ به ۱۵/۱ درجه سانتی‌گراد) نشان‌دهنده تفاوت درون فصلی در زمان نمونه‌برداری (اواسط در مقابل انتهای شهریور) است. مطالعات نشان داده‌اند تغییرات دمایی می‌تواند به طور معناداری طی زمان متفاوت باشد، که می‌تواند نشان‌دهنده اثرات کاهش جریان آب باشد (احمد<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۵). این پدیده با سایر یافته‌ها همخوانی دارد که تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی را به عنوان عوامل مؤثر بر رژیم جریان و کیفیت آب رودخانه‌ها شناسایی کرده‌اند (دایر<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴).

بررسی تغییرات زمانی پارامترها نشان داد افزایش معنادار اکسیژن محلول در سال ۱۳۹۷ (از میانگین ۷/۳۲ به ۹/۲ میلی‌گرم در لیتر) بیانگر ارتقای وضعیت هوازی آب است. این بهبود احتمالاً ریشه در دو عامل فیزیکی دارد: نخست، کاهش میانگین دمای آب (از ۱۲/۲ درجه سانتی‌گراد در ۱۳۹۶ به ۱۰/۷ درجه سانتی‌گراد در ۱۳۹۷) که طبق قانون حلالیت گازها، ظرفیت نگهداری اکسیژن را افزایش می‌دهد؛ و دوم، افزایش میانگین دبی جریان آب از ۲/۳۳ به ۲/۶۹ مترمکعب بر ثانیه (حدود ۱۵ درصد رشد) که به تقویت اختلاط سطحی و هوادهی طبیعی بستر رودخانه منجر شده است (جدول ۲). این تغییرات مثبت، زیستگاه را برای موجودات آبی، به‌ویژه قزل‌آلای خال‌قرمز، مساعدتر می‌سازد.

از منظر اکولوژیکی، رابطه میان مواد مغذی و اکسیژن محلول خطی نبوده و تابع یک مکانیسم دومرحله‌ای است: در مرحله اول، غنی‌سازی مواد مغذی می‌تواند به شکوفایی جلبک‌ها و افزایش فتوسنتز منجر شود که در کوتاه‌مدت باعث تولید اکسیژن می‌شود؛ اما در مرحله دوم، تجزیه زیست‌توده‌های تولیدشده توسط باکتری‌های هوازی، اکسیژن را به شدت مصرف کرده و به کاهش DO و حتی شرایط هیپوکسیک می‌انجامد (احمد و همکاران، ۲۰۲۲؛ چاپرا، ۲۰۰۸). با توجه به مقادیر بسیار پایین BOD<sub>5</sub> و وضعیت محدودیت شدید فسفر که در بخش پیشین تشریح شد، می‌توان نتیجه گرفت که اکوسیستم مورد مطالعه در مرحله دوم (تجزیه شدید مواد آلی) قرار ندارد. بنابراین، افزایش مشاهده‌شده در اکسیژن محلول، عمدتاً بازتاب‌دهنده بهبود شرایط فیزیکی و هیدرولوژیکی (کاهش دما و افزایش دبی) است تا فرایندهای بیولوژیکی ناشی از یوتریفیکاسیون.

در مقابل، پارامترهایی مانند عمق رودخانه، کدورت، هدایت الکتریکی، اسیدیته، نیتروژن کل، فسفر کل و BOD<sub>5</sub> تفاوت معناداری بین دو سال نشان ندادند ( $p > 0/05$ ) (جدول ۴). کدورت نشان‌دهنده میزان ذرات معلق (مانند رس، شن، جلبک و مواد آلی) است و بر نفوذ نور، فتوسنتز و سلامت آبزیان تأثیر می‌گذارد. مقادیر بالای کدورت (بیش از ۵ NTU) می‌تواند نشان‌دهنده فرسایش خاک در حوضه آبخیز یا رواناب سطحی ناشی از بارش‌های شدید یا فعالیت‌های انسانی (مانند چرای دام یا گردشگری

فصلی) باشد (سانچز<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). نیتروژن کل یکی از مواد مغذی مهم است که در غلظت‌های بالا می‌تواند به مسائل زیست‌محیطی و بهداشتی منجر شود (آدلانا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵؛ کندال، الیوت و وانکل<sup>۳</sup>، ۲۰۰۸). فسفر کل نیز اغلب به عنوان یک ماده مغذی محدودکننده در بسیاری از اکوسیستم‌های آب شیرین عمل می‌کند (بستیون، شوم و ایوان دوروش<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸). حتی در غلظت‌های پایین، فسفر کل می‌تواند رشد جلبک‌ها را تحریک کند و به اوتریفیکاسیون بینجامد (بای<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۲).

این یافته‌ها نشان‌دهنده ثابت نسبی این پارامترها طی زمان است، اما نباید به عنوان عدم تغییر در کیفیت آب تفسیر شود، زیرا تغییرات در پارامترهای کلیدی مانند اکسیژن محلول می‌تواند تأثیر عمیق‌تری بر اکوسیستم داشته باشد (چاپرا، ۲۰۰۸). به‌ویژه در اکوسیستم‌های کوهستانی سردآب که میزان اکسیژن محلول به طور طبیعی بالاست، هرگونه نوسان در اکسیژن محلول می‌تواند شاخص حساسی از تغییرات هیدرولوژیکی یا فشارهای انسانی باشد (بوکاوکاس، بویکما و استوارت<sup>۶</sup>، ۲۰۲۳).

در نهایت، عدم تغییر معنادر BOD<sub>5</sub> بین دو سال ( $p = 1/0$ ) و مقادیر بسیار پایین این پارامتر (میانگین  $\geq 0/27$  میلی گرم در لیتر) نشان‌دهنده ثابت و ناچیز بودن بار آلی زیست‌تخریب‌پذیر در منطقه است (جدول ۴). بررسی هم‌زمان پارامترها (جدول‌های ۲ و ۳)، نشان می‌دهد داده‌های هیدروشیمیایی در این اکوسیستم یکدیگر را به طور معناداری تصدیق می‌کنند. برای مثال، مقادیر بسیار پایین و پایدار BOD<sub>5</sub> به طور مستقیم ثابت و مقادیر بالای اکسیژن محلول (DO) را تأیید می‌کند؛ به این معنا که فقدان مواد آلی زیست‌تخریب‌پذیر، دلیل اصلی حفظ ظرفیت اکسیژن‌دهی سیستم است. به طور مشابه، نسبت بالای N/P (بالتر از ۱۰۰) وضعیت الیگوتروفیک (محدودیت فسفر) و غلبه منابع طبیعی را به صورت متقابل اثبات می‌کند.

با این وجود، ثابت آماری اکثر پارامترها در آزمون من - ویتنی ( $p > 0/05$ ) نباید به عنوان یکنواختی مطلق تفسیر شود. در واقع، این «ثبات زمینه‌ای»<sup>۷</sup> باعث می‌شود که نوسانات موضعی و گذرا (مانند پیک فسفر در LNP11 یا کدورت در LNP12) به وضوح از خط پایه طبیعی متمایز شوند. بنابراین، تحلیل چندمتغیره نشان می‌دهد کیفیت آب در پارک ملی لار نه یک وضعیت ایستا، بلکه یک تعادل پویا است که در آن، تغییرات جزئی در یک پارامتر (مانند فسفر) بلافاصله در پارامترهای وابسته (مانند نسبت N/P) بازتاب می‌یابد. این هم‌افزایی داده‌ها، ضرورت تفسیر یکپارچه و سیستمی را در مدیریت اکوسیستم‌های کوهستانی آشکار می‌سازد. به منظور بررسی روابط بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده، تجزیه و تحلیل همبستگی انجام شد (شکل ۲). در نقشه حرارتی همبستگی اسپیرمن بین دوازده پارامتر فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های مشتق‌شده ( $X_1$  تا  $X_{12}$ ) در رودخانه‌های پارک ملی لار، الگوهای معناداری از تعاملات هیدروشیمیایی و اکولوژیکی منطقه آشکار می‌شود. بیشترین همبستگی‌های مثبت معنادار مربوط به همبستگی اکسیژن‌خواهی زیستی ( $X_4$ ) با نسبت BOD/DO ( $X_{10}$ )، نیتروژن کل ( $X_5$ ) و نسبت N/P ( $X_{11}$ )، EC ( $X_8$ ) با TDS ( $X_9$ ) (به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۶ و ۰/۸۳،  $r = 0/83$  معنادار در سطح ۵ درصد) مشاهده شد. از آنجا که TDS در این پژوهش به صورت مستقل و با روش وزن‌سنجی اندازه‌گیری شده است (نه محاسبه ضریبی از روی EC)، همبستگی قوی ۰/۸۳ نشان‌دهنده پیوند ذاتی این دو شاخص در آب‌های طبیعی منطقه است. انحراف جزئی این ضریب از حالت خطی کامل ( $r = 1$ )، بازتاب‌دهنده تغییرات طبیعی در ترکیب یونی آب (مانند تفاوت نسبت یون‌های کلسیم - بی‌کربنات به سدیم - کلرید در ایستگاه‌های مختلف) است (شکل ۲). این رابطه خطی نزدیک، همچنین در مطالعات دیگر در آب‌های طبیعی و رودخانه‌ای تأیید شده است (ون نیکرک، سیلبرباور و مالولکه<sup>۸</sup>، ۲۰۱۴). همچنین، همبستگی بسیار قوی بین نیتروژن کل و نسبت N/P نشان می‌دهد تغییرات این نسبت عمده‌تاً تحت تأثیر غلظت نیتروژن کل است، این یافته با پژوهش‌های موجود در مورد کنترل استوکیومتری مواد مغذی در

1. Sanchez
2. Adelana
3. Kendall, Elliott & Wankel
4. Bestion, Schaum & Yvon-Durocher
5. Bai
6. Bukaveckas, Buikema & Stewart
7. Background stability
8. Van Niekerc, Silberbauer & Maluleke

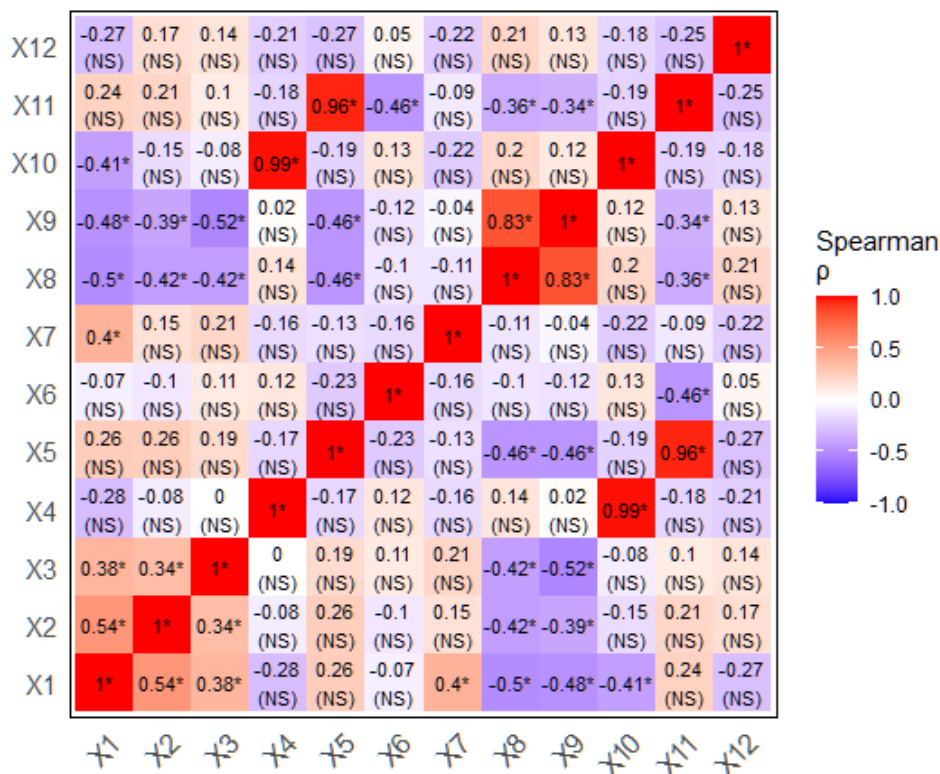
اکوسیستم‌های آب شیرین همخوانی دارد، به‌ویژه در شرایطی که فسفر به عنوان ماده محدودکننده عمل می‌کند (آندرسن و همکاران، ۲۰۲۵؛ السر و همکاران، ۲۰۰۹).

در حالی که در سال ۱۳۹۷، افزایش شدید فسفر کل ( $X_6$ ) در ایستگاه LNP11 (به ۵/۹ میلی گرم در لیتر) باعث کاهش نسبت N/P و ایجاد همبستگی منفی بین  $X_6$  و  $X_{11}$  ( $r = 0/46^*$ ) شده است. چنین الگویی با مفهوم کلاسیک ردفیلد (ردفیلد، ۱۹۶۰) و مطالعاتی که نشان می‌دهند افزایش فسفر می‌تواند تعادل N/P را به‌سرعت تغییر دهد، همسو است (بای و همکاران، ۲۰۲۲؛ بستین، شوم و ایوان دوروش، ۲۰۱۸).

در مقابل، نبود همبستگی معنادار بین اکسیژن محلول ( $X_3$ ) و اکسیژن‌خواهی زیستی ( $X_4$ ) (تقریباً صفر) یا بین اکسیژن محلول ( $X_3$ ) و نسبت BOD/DO ( $X_{11}$ ) ( $r = -0/08^{ns}$ ) نشان‌دهنده ثابت بالای کیفیت آب از نظر بار آلی است. این یافته با مقادیر بسیار پایین  $BOD_5$  (میانگین  $0/27 \geq$  میلی گرم در لیتر) و نسبت ( $BOD/DO \leq 0/04$ ) همخوانی دارد و تأیید می‌کند که سیستم تحت فشار آلودگی آلی قابل توجهی قرار ندارد. مقادیر بالاتر نسبت اکسیژن‌خواهی زیستی به اکسیژن محلول (BOD/DO) نشان‌دهنده فشار بیشتر مواد آلی قابل تجزیه زیستی و در نتیجه، خطر کاهش اکسیژن برای موجودات آبی است (چاپرا، ۲۰۰۸). بررسی همبستگی اسپیرمن بین دبی جریان ( $X_{13}$ ) و سایر پارامترهای فیزیکوشیمیایی نشان داد هیچ‌یک از همبستگی‌ها در سطح معناداری ۰/۰۵ قرار نگرفتند (شکل ۲). به طور خاص، همبستگی دبی با هدایت الکتریکی ( $r = 0/31$ )، غیر معنادار، مواد جامد محلول کل ( $r = 0/13$ )، غیر معنادار، نیترژن کل ( $r = 0/27$ )، غیر معنادار و اکسیژن محلول ( $r = 0/14$ )، غیر معنادار همگی غیر معنادار بودند.

عدم همبستگی معنادار میان دبی و غلظت آلاینده‌ها در مقیاس کل حوضه، ناشی از ماهیت «نقطه‌ای» منابع آلودگی است. در اکوسیستم لار، ورود آلاینده‌ها (مانند فضولات دام در سیاه‌پلاس) مستقل از دبی رودخانه و فقط بر اساس تراکم فعالیت انسانی در یک نقطه خاص رخ می‌دهد. بنابراین، جهش ناگهانی غلظت در این نقاط داغ، الگوی خطی رقیق‌شدگی ناشی از دبی را در مقیاس حوضه تحت‌الشعاع قرار می‌دهد.

اهمیت این تحلیل در آن است که تفسیر نتایج قبلی را واضح‌تر می‌سازد: افزایش مشاهده‌شده در اکسیژن محلول بین دو سال عمدتاً ناشی از کاهش دما بوده، نه افزایش دبی؛ زیرا در مقیاس فضایی، دبی بالا لزوماً با DO بالا همراه نیست. این یافته، نقش غالب عوامل فیزیکی (دما) بر عوامل هیدرولوژیکی (دبی) را در تعیین کیفیت آب این اکوسیستم کوهستانی تأیید می‌کند.

همبستگی اسپیرمن بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی و دبی (X<sub>۱۲</sub> تا X<sub>۱</sub>)

شکل ۲. نقشه حرارتی همبستگی اسپیرمن بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های مشتق شده در رودخانه‌های پارک ملی لار (X<sub>۱۲</sub> تا X<sub>۱</sub>). هر سلول حاوی ضریب همبستگی و علامت معناداری آماری است. ستاره (\*) نشان‌دهنده همبستگی معنادار در سطح  $p < 0.05$  و «ns» نشان‌دهنده غیرمعناداری است. لیست صفات X<sub>۱۲</sub> تا X<sub>۱</sub>: دمای آب، pH، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی زیستی (BOD<sub>5</sub>)، نیترژن کل، X<sub>6</sub>: فسفر کل، X<sub>7</sub>: کدورت (NTU)، هدایت الکتریکی، X<sub>9</sub>: مواد جامد محلول کل، X<sub>10</sub>: نسبت BOD/DO، X<sub>11</sub>: نسبت N/P و X<sub>12</sub>: دبی

تحلیل همبستگی اسپیرمن الگوهای معناداری از تعاملات فیزیکوشیمیایی و اکولوژیکی در رودخانه‌های پارک ملی لار آشکار ساخت. دمای آب (X<sub>۱</sub>) همبستگی مثبت معناداری با کدورت (X<sub>۷</sub>) ( $r=0.46^*$ ) نشان داد احتمالاً ناشی از افزایش فعالیت‌های سطحی (مانند چرای دام یا عبور گردشگران) در روزهای گرم‌تر است که به اختلال در بستر رودخانه و افزایش ذرات معلق منجر می‌شود. در مقابل، دما با هدایت الکتریکی (X<sub>۹</sub>، X<sub>۸</sub>)، TDS و نسبت BOD/DO (X<sub>۱۰</sub>) همبستگی منفی معناداری داشت (به ترتیب  $r=-0.48^*$ ،  $r=-0.5^*$  و  $r=-0.41^*$ )، که می‌تواند نشان‌دهنده کاهش غلظت یون‌ها و بار آلی در شرایط گرم‌تر، احتمالاً به دلیل رقابت با فرایندهای بیولوژیکی یا تبخیر، باشد.

اسیدیته (X<sub>۲</sub>) نیز با اکسیژن محلول (X<sub>۳</sub>) رابطه مثبت معناداری ( $r=0.34^*$ ) داشت که با قانون حلالیت گازها و نقش اسیدیته در ثبات شیمیایی محیط آبی سازگار است. همچنین، اسیدیته با EC و TDS همبستگی منفی ( $r=-0.39^*$  و  $r=-0.42^*$ ) نشان داد احتمالاً منعکس‌کننده تأثیر هوازدگی کانی‌های کربناته در مناطق با EC بالاتر است. اسیدیته پارامتر نشان‌دهنده اسیدی یا قلیایی بودن آب است و بر حلالیت مواد شیمیایی، سمیت فلزات و فعالیت بیولوژیکی تأثیر مستقیم دارد. محدوده مناسب اسیدیته برای اکوسیستم‌های آب شیرین معمولاً بین ۶/۵ تا ۸/۵ است (APHA, 2017).

نیترژن کل (X<sub>۵</sub>) با EC و TDS همبستگی منفی معنادار ( $r=0.46^*$ ) داشت که نشان می‌دهد منابع یونی طبیعی (مانند هوازدگی سنگ‌ها) در مناطقی با نیترژن کل پایین‌تر غالب هستند، در حالی که ورود نیترژن کل انسان‌زاد (مثلاً از فعالیت‌های عشایری) در مناطق پایین‌دست، با کاهش نسبی غلظت یون‌های زمین‌شناسی همراه است.

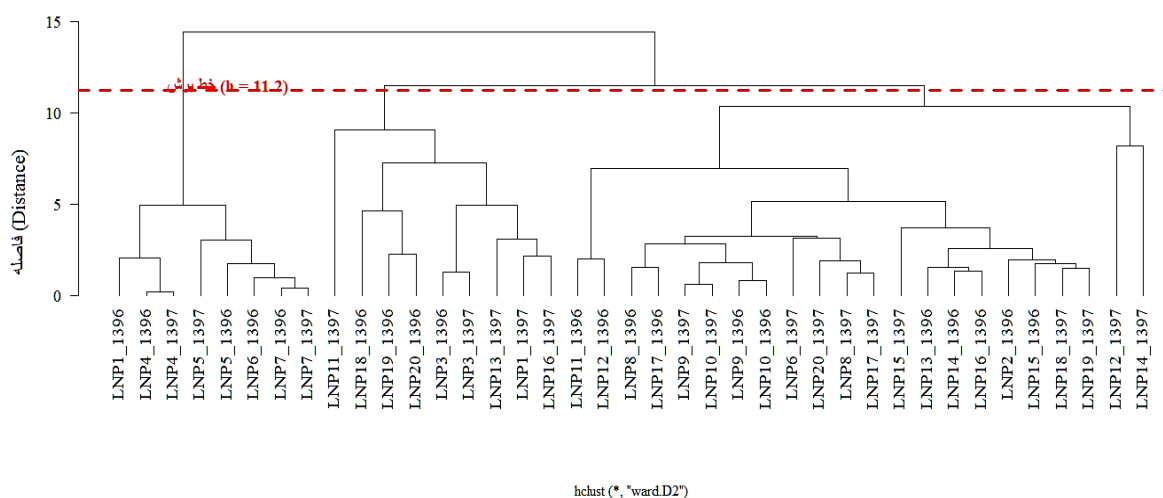


فسفر کل ( $X_6$ ) نیز با نسبت N/P ( $X_{11}$ ) همبستگی منفی قوی ( $r=-0/46^*$ ) داشت که کاملاً با اصل ردفیلد (۱۹۵۸) و مطالعات بعدی (السر و همکاران، ۲۰۰۹) همخوانی دارد که افزایش فسفر در محیط‌های فقیر از مواد مغذی، نسبت N/P را به سرعت کاهش می‌دهد.

در نهایت، همبستگی بین TDS و N/P ( $r=-0/34^*$ ) نشان می‌دهد ترکیب یونی آب (که در EC و TDS منعکس می‌شود) با وضعیت تغذیه‌ای سیستم (N/P) ارتباط معکوس دارد، احتمالاً به دلیل اینکه مناطق با بار یونی بالاتر (بالادست) تحت فشار کمتری از ورود مواد مغذی انسانی قرار دارند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که حتی در اکوسیستم‌های ظاهراً سالم، الگوهای فضایی دقیق از همبستگی‌ها می‌توانند نشانه‌های اولیه فشارهای انسانی را فاش کنند.

به طور کلی، این الگوهای همبستگی تأیید می‌کنند که سیستم‌های آبی پارک ملی لار تحت تأثیر عوامل طبیعی (مانند دما و ارتفاع) و فشارهای موضعی انسانی (مانند ورود مواد مغذی و ذرات معلق) قرار دارند، اما از نظر کلی وضعیت کیفی آب در محدوده مطلوبی باقی مانده است. این نقشه حرارتی نشان می‌دهد پارامترهای مرتبط با آلودگی آلی ( $DO$ ،  $BOD_5$ )، مواد مغذی (نیتروژن کل، فسفر کل) و خصوصیات یونی (TDS، EC) بیشترین تعاملات را با یکدیگر دارند. این یافته‌ها بر اهمیت پایش هم‌زمان این پارامترها برای ارزیابی کیفیت آب و تشخیص منابع آلودگی تأکید دارد (چاپرا، ۲۰۰۸؛ گوسوامی، ۲۰۲۵). همچنین، ثبات اسیدیته و کدورت در منطقه نشان‌دهنده شرایط محیطی نسبتاً پایدار است، اما وجود همبستگی‌های قوی در برخی پارامترها نیازمند توجه مدیریتی به منظور حفظ سلامت اکوسیستم رودخانه‌ها است.

$X_1$  تا  $X_{12}$  بر اساس (Ward.D2) درخت خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی



شکل ۳. درخت خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (Ward.D2) (بر اساس فاصله اقلیدسی استاندارد شده) بر اساس ۱۲ پارامتر فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های مشتق شده ( $X_1$  تا  $X_{12}$ ) بین ۴۰ نمونه (۲۰ ایستگاه  $2 \times 2$  سال) در رودخانه‌های پارک ملی لار. هر برگ درخت نشان‌دهنده یک نمونه است که با کد ایستگاه و سال (مثلاً LNP1\_1396) برچسب‌گذاری شده است. ارتفاع هر شاخه نشان‌دهنده فاصله یا عدم شباهت بین گروه‌ها است. این درخت به طور خودکار ۳ خوشه اصلی را تشخیص داده است.

تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (شکل ۳)، الگوهای فضایی - زمانی قابل توجهی از تغییرات کیفی آب در رودخانه‌های پارک ملی لار آشکار می‌کند. در این مطالعه، خط برش درخت خوشه‌بندی به گونه‌ای تعیین شد که در سطحی حدود ۷۵ درصد شباهت درون گروهی قرار گیرد؛ معیاری که تعادل بهینه‌ای میان همگنی درون خوشه‌ای و تمایز برون خوشه‌ای ایجاد می‌کند. این تقسیم‌بندی به سه خوشه، کمترین تعداد گروهی است که توانست سه واحد مدیریتی - اکولوژیکی متمایز را آشکار سازد: (۱) ایستگاه‌های بالادست و میانی با کیفیت آب پایه؛ (۲) ایستگاه‌های پایین‌دست تحت فشار انسان‌زاد (محدوده سیاه‌پلاس)؛ (۳) ایستگاه‌های چشمه‌ای و خروجی‌های زیرسطحی. این سطح از تجمع، از خرد کردن مصنوعی ایستگاه‌های همگن (که در خوشه‌بندی‌های ۴ یا

۵ گانه رخ می‌دهد) پرهیز می‌کند و در عین حال، الگوهای فشار انسانی را برای برنامه‌ریزی مدیریتی عملیاتی، به‌وضوح نمایان می‌سازد.

بر این اساس، این تحلیل ۴۰ نمونه (۲۰ ایستگاه در دو سال) را به سه گروه اصلی تقسیم کرده است که هر یک با ویژگی‌های منحصر به فردی همراه هستند. خوشه اول شامل ایستگاه‌های بالادست و میانی رودخانه‌های ورآرو، دلیچای و آب سفید در هر دو سال است (مثل LNP1\_1396, LNP4\_1397, LNP5\_1396). این ایستگاه‌ها به دلیل موقعیت جغرافیایی و دوری از فشارهای انسانی، کیفیت آب ثابت‌تری دارند و در نتیجه، در یک گروه همگن قرار گرفته‌اند (جهانی و صفاری‌ها، ۲۰۲۰).

خوشه دوم شامل ایستگاه‌های پایین‌دست رودخانه‌های سیاه‌پلاس و لار (مثل LNP11\_1396, LNP12\_1397, LNP15\_1397) است که به دلیل مواجهه با فعالیت‌های انسانی (مانند چرای عشایری و گردشگری فصلی) و احتمالاً ورود مواد مغذی (به‌ویژه فسفر کل در LNP11\_1397)، دارای الگوهای کیفی متفاوتی هستند. این یافته با گزارش‌های میدانی درباره حضور فعالیت‌های عشایری و گردشگری در این بخش‌ها همخوانی کامل دارد (رخشان و همکاران، ۲۰۲۳).

خوشه سوم شامل ایستگاه‌هایی مانند LNP8\_1396, LNP9\_1397 و LNP10\_1396 است که الگوی کیفی متمایزی نشان می‌دهند؛ این خوشه به دلیل زمان ماند بیشتر آب در سفره‌های زیرزمینی و تعامل طولانی‌مدت با سنگ‌های معدنی، دارای دمای پایدارتر و املاح محلول متفاوتی نسبت به رواناب‌های سطحی خوشه‌های اول و دوم هستند.

هرچند الگوی کلان خوشه‌بندی در دو سال پایدار بود (مثلاً خوشه دوم همواره ایستگاه‌های پایین‌دست سیاه‌پلاس را در بر می‌گرفت)، جابه‌جایی جزئی برخی ایستگاه‌های حاشیه‌ای (مانند LNP15) میان خوشه‌ها در سال‌های مختلف، نشان‌دهنده «پویایی هیدروشیمیایی» سیستم است. این نوسانات بیانگر آن است که کیفیت آب در این ایستگاه‌های انتقالی، به‌شدت تحت تأثیر شدت فعالیت‌های انسانی قرار دارد. بنابراین، این تحلیل نه تنها الگوهای پایدار را آشکار می‌کند، بلکه حساسیت و آسیب‌پذیری پویای نقاط مرزی را نیز شناسایی می‌کند که برای طراحی استراتژی‌های پایش هوشمند و منعطف در پارک ملی لار ضروری است.

در مطالعات کیفیت آب، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی ابزاری قدرتمند برای شناسایی گروه‌های همگن از ایستگاه‌ها بر اساس شباهت در پروفایل فیزیکوشیمیایی است؛ با این حال، این روش تنها بر اساس الگوهای آماری عمل می‌کند و موقعیت جغرافیایی و جهت جریان آب را در نظر نمی‌گیرد (لینگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). در سیستم‌های رودخانه‌ای خطی مانند پارک ملی لار، که آب از بالادست به پایین‌دست جریان دارد و فعالیت‌های انسانی عمدتاً در بخش‌های پایین‌دست متمرکز هستند (رخشان و همکاران، ۲۰۲۳)، درک روند تغییرات طولی پارامترهای کیفی آب ضروری است. بنابراین، تحلیل فضایی پس از خوشه‌بندی نه تنها به تأیید یافته‌های آماری کمک می‌کند، بلکه آن‌ها را در چارچوب اکولوژی منظره و هیدرولوژی رودخانه تفسیر می‌کند و امکان شناسایی منابع واقعی فشارهای انسانی (مانند چرای دام یا گردشگری) را فراهم می‌آورد (لیو و همکاران، ۲۰۲۰). بدون این تحلیل، خطر این وجود دارد که الگوهای آماری به‌درستی به عوامل محیطی و مدیریتی مرتبط نشوند.

در این مطالعه، خط برش در نمودار درختی طوری انتخاب شد که سه خوشه معنادار از نظر اکولوژیکی و مدیریتی تشکیل شوند: (۱) ایستگاه‌های بالادست و میانی با کیفیت آب پایه؛ (۲) ایستگاه‌های پایین‌دست تحت فشار انسانی (سیاه‌پلاس)؛ (۳) ایستگاه‌های تحت تأثیر چشمه‌ها. این تقسیم‌بندی، علاوه بر پایداری آماری (فاصله زیاد بین شاخه‌ها در سطح برش)، با الگوهای فضایی و یافته‌های میدانی (مانند حضور عشایر و گردشگران در سیاه‌پلاس) کاملاً همخوانی دارد. انتخاب سه خوشه، حداقل تعداد گروه‌هایی است که هم الگوهای فشار انسانی را آشکار می‌کند و هم برای برنامه‌ریزی مدیریتی عملیاتی است.

تحلیل فضایی انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد تغییرات کیفی آب در رودخانه‌های پارک ملی لار به طور معناداری با موقعیت جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا مرتبط است. بر اساس جدول ۵، نیتروژن کل ( $X_5$ ) همبستگی منفی معناداری با ارتفاع دارد، یعنی با حرکت از بالادست به پایین‌دست، غلظت نیتروژن کل افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده تجمع فشارهای انسانی در

پایین دست است. در مقابل، هدایت الکتریکی و TDS همبستگی مثبت معناداری با ارتفاع دارند؛ زیرا به خلاف انتظار کلاسیک در پیوستگی رودخانه‌ای، در شبکه لار، رودخانه در پایین دست پذیرای حجم عظیمی از ورودی‌های زیرزمینی و چشمه‌ها (مانند چشمه خونی با دبی بیش از ۴ مترمکعب بر ثانیه) است. این چشمه‌ها به دلیل حجم رقیق‌کنندگی بسیار بالا، غلظت یون‌ها را در رودخانه اصلی به شدت کاهش می‌دهند. این «اثر رقیق‌شدگی تصاعدی توسط آب‌های زیرزمینی پرفشار»، بر اثر تجمع هوازگی در طول مسیر غلبه کرده و باعث کاهش EC در پایین دست شده است.

این الگو در جدول ۶ نیز با آزمون کروسکال - والیس تأیید می‌شود، به‌ویژه برای نیتروژن کل ( $p < 0.001$ )، نسبت N/P ( $p < 0.001$ )، و هدایت الکتریکی ( $p < 0.001$ )، که تفاوت بسیار معناداری بین سه گروه فضایی (بالادست، میانی، پایین دست) نشان می‌دهند. این یافته‌ها به‌وضوح نشان‌دهنده فشارهای انسانی است.

در مقابل، پارامترهایی مانند اکسیژن محلول، کدورت و فسفر کل اگرچه در سطح کل منطقه تفاوت معناداری نشان نمی‌دهند، اما در سطح ایستگاهی (مثل LNP11 برای فسفر کل یا LNP12 برای کدورت) نوسانات شدیدی دارند که تنها با تحلیل فضایی قابل شناسایی است. افزایش غلظت فسفر کل در LNP11 (تا ۵/۹ میلی گرم در لیتر در سال ۱۳۹۷) و کدورت در LNP12 (تا ۹/۲ NTU) همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، نشان‌دهنده ورود منابع نقطه‌ای انسان‌زاد است. بنابراین، این تحلیل نه تنها الگوهای کلی را آشکار می‌کند، بلکه حساسیت بیشتری نسبت به خوشه‌بندی در شناسایی نقاط بحرانی محلی دارد و به عنوان ابزاری ضروری برای تفسیر اکولوژیکی و طراحی استراتژی‌های مدیریتی هدفمند در پارک ملی لار عمل می‌کند (یانیدار<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۳).

| جدول ۵. همبستگی اسپیرمن بین ارتفاع و پارامترها |           |         | جدول ۶. نتایج کروسکال - والیس برای مقایسه سه گروه روند طولی |           |                         |
|------------------------------------------------|-----------|---------|-------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------|
| پارامتر                                        | ارتفاع    | p_value | پارامتر*                                                    | کای اسکور | p_value                 |
| X1                                             | -۰/۲۴۶۸۹  | ۰/۱۳    | X1                                                          | ۸/۲۷      | $۱/۶۰ \times ۱۰^{-۰۲}$  |
| X2                                             | -۰/۳۱۳۶   | ۰/۰۵    | X2                                                          | ۷/۹۵      | $۱/۸۸ \times ۱۰^{-۰۲}$  |
| X3                                             | -۰/۰۷۷۶۲  | ۰/۶۴    | X3                                                          | ۹/۹۸      | $۶/۱۲ \times ۱۰^{-۰۱}$  |
| X4                                             | ۰/۳۱۵۶۲   | ۰/۰۵    | X4                                                          | ۳/۶۶      | $۱/۶۱ \times ۱۰^{-۰۱}$  |
| X5                                             | -۰/۴۵۱۸۴  | ۰/۰۰۴   | X5                                                          | ۲۴/۸۰     | $۴/۱۲ \times ۱۰^{-۰۰۶}$ |
| X6                                             | ۰/۰۳۱۳۴۸۳ | ۰/۹۶    | X6                                                          | ۰/۶۷      | $۷/۱۶ \times ۱۰^{-۰۱}$  |
| X7                                             | -۰/۲۷۸۷۹  | ۰/۰۹    | X7                                                          | ۱/۰۲      | $۶/۰۲ \times ۱۰^{-۰۱}$  |
| X8                                             | ۰/۴۹۳۱۸۶  | ۰/۰۰۱۴  | X8                                                          | ۱۳/۷۱     | $۱/۰۶ \times ۱۰^{-۰۰۳}$ |
| X9                                             | ۰/۳۷۹۹۳۹  | ۰/۰۱۷   | X9                                                          | ۱۲/۸۴     | $۱/۶۳ \times ۱۰^{-۰۰۳}$ |
| X10                                            | ۰/۳۳۹۸۳   | ۰/۰۳۴   | X10                                                         | ۳/۹۵      | $۱/۳۹ \times ۱۰^{-۰۱}$  |
| X11                                            | -۰/۳۷۹۴۵  | ۰/۰۱۷   | X11                                                         | ۸/۲۸      | $۱/۰۷ \times ۱۰^{-۰۰۴}$ |

\*لیست صفات: X<sub>1</sub> تا X<sub>12</sub>: دمای آب، X<sub>2</sub>: pH، X<sub>3</sub>: اکسیژن محلول، X<sub>4</sub>: اکسیژن‌خواهی زیستی (BOD<sub>5</sub>)، X<sub>5</sub>: نیتروژن کل، X<sub>6</sub>: فسفر کل، X<sub>7</sub>: کدورت  
(NTU)، X<sub>8</sub>: هدایت الکتریکی، X<sub>9</sub>: مواد جامد محلول کل، X<sub>10</sub>: نسبت BOD/DO و X<sub>11</sub>: نسبت N/P

در تأیید الگوهای تحلیل طولی استخراج‌شده، تحلیل روند طولی سه پارامتر کلیدی (نیتروژن کل، فسفر کل و کدورت) از بالادست به پایین دست رودخانه‌های پارک ملی لار (شکل ۴)، یک الگوی مکانی مشترک و معنادار را آشکار می‌سازد که بیانگر یک مکانیسم واحد در سطح حوضه آبخیز است. این سه پارامتر، هرچند از نظر ماهیت شیمیایی متفاوت‌اند، اما در پاسخ به گرادیان فضایی، رفتاری هماهنگ از خود نشان می‌دهند.

نیتروژن کل (X<sub>5</sub>) در بخش بالادست (LNP1–LNP7) با میانگینی حدود ۲ میلی گرم در لیتر ثابت و در محدوده طبیعی باقی می‌ماند، اما در ایستگاه LNP8 (رودخانه الرم) ناگهان افزایش می‌یابد و تا LNP12 به حداکثر خود (حدود ۵ میلی گرم در لیتر)

می‌رسد. این افزایش ناگهانی در بخش میانی و سیاه‌پلاس، نشان‌دهنده ورود مواد مغذی از منابع خارجی است. سپس در پایین‌دست (LNP13–LNP20)، غلظت نیتروژن کل به تدریج کاهش می‌یابد و به محدوده ۲ تا ۳ میلی گرم در لیتر بازمی‌گردد.

فسفر کل ( $X_6$ ) در اکثر ایستگاه‌ها در محدوده پایه ( $\geq 0.03$  میلی گرم در لیتر) باقی ماند. تنها استثنا، افزایش موقت به ۳ میلی گرم در لیتر در LNP11 در سال ۱۳۹۷ بود که احتمالاً ناشی از یک منبع نقطه‌ای موقت (مانند فعالیت عشایری) است. این پیک در سال قبل یا در ایستگاه‌های مجاور تکرار نشد که نشان‌دهنده ماهیت گذرا و موضعی آن است. چنین غلظت‌های بالایی از فسفر کل (بالتر از ۰/۱ میلی گرم در لیتر) معمولاً با افزایش ریسک مغذی‌شدگی و تغییرات در جوامع فیتوپلانکتونی همراه است (بای و همکاران، ۲۰۲۲).

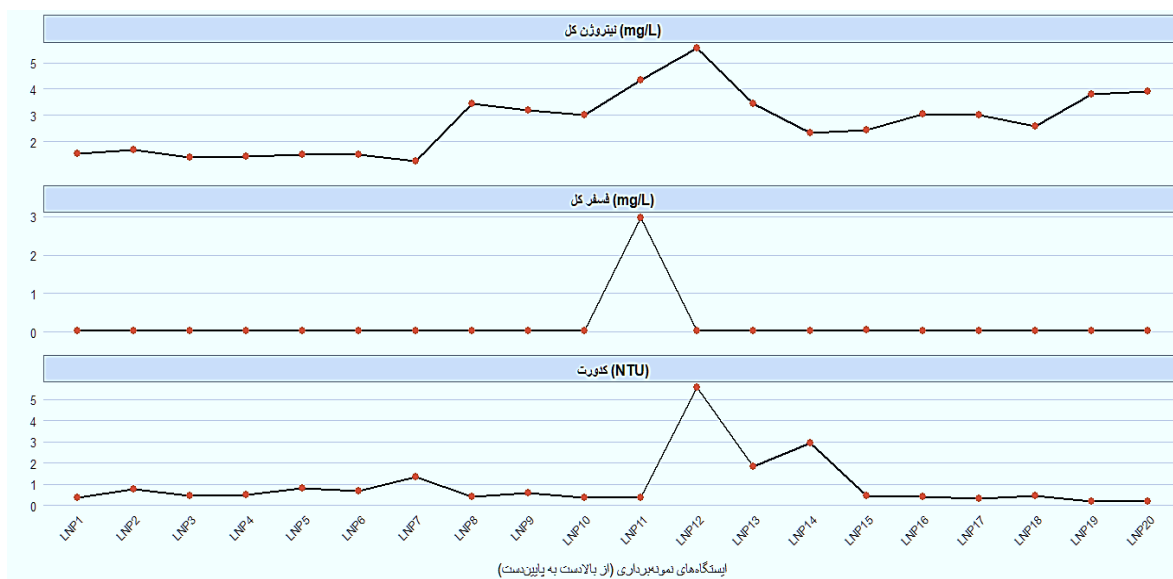
کدورت ( $X_7$ ) نیز در بخش بالادست کم و ثابت است (محدوده ۰/۲ تا ۰/۶ NTU)، اما در LNP12 به حداکثر خود (۹/۲ NTU در سال ۱۳۹۷) می‌رسد و سپس در پایین‌دست کاهش می‌یابد. مقادیر کدورت بالاتر از ۵ NTU اغلب به عنوان شاخصی از فرسایش سطحی یا اختلال در بستر رودخانه تفسیر می‌شوند (سانچز و همکاران، ۲۰۲۳).

تفسیر یکپارچه الگوی مشترک: بررسی هم‌زمان این سه پارامتر نشان می‌دهد همگی از یک الگوی «افزایش ناگهانی» رسیدن به پیک «کاهش تدریجی» پیروی می‌کنند. بر اساس بازدیدهای میدانی مکرر طی دوره نمونه‌برداری و مطالعات پیشین در منطقه (جهانی و صفاری‌ها، ۲۰۲۰؛ رخشان و همکاران، ۲۰۲۳)، منطقه سیاه‌پلاس (LNP11–LNP12) به دلیل همواری نسبی بستر، دسترسی آسان از جاده هراز و وجود آب پایدار، به عنوان محل اصلی اتراق عشایر و چرای دام در فصل تابستان عمل می‌کند. این تمرکز فعالیت‌های انسانی، ورود ناگهانی و نقطه‌ای مواد مغذی (از فضولات دام) و ذرات معلق (از لگدکوب شدن بستر و فرسایش کناره‌ها) را در این بخش از رودخانه توضیح می‌دهد (سانچز و همکاران، ۲۰۲۳؛ گریم، تیرپاک و وینستون<sup>۱</sup>، ۲۰۲۴).

در مقابل، کاهش تدریجی این پارامترها در ایستگاه‌های پایین‌دست (LNP13 به بعد) عمدتاً ناشی از اثر رقیق‌شدگی است. با حرکت به سمت پایین‌دست، رودخانه لار از طریق ورودی‌های متعددی تغذیه می‌شود: چشمه خونی (LNP16) با دبی حدود ۴/۵۵ مترمکعب بر ثانیه، چشمه سیاه (LNP17 و LNP18) با دبی در مجموع حدود ۱/۶ مترمکعب بر ثانیه، و چشمه دوبرار (LNP20) با دبی حدود ۲ مترمکعب بر ثانیه (جدول ۲). این ورودی‌های آب با کیفیت بالاتر، همراه با افزایش عرض و عمق بستر رودخانه لار، غلظت آلاینده‌ها را به طور تصاعدی کاهش می‌دهند (داویس–کالی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۳؛ سانگاره<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، مکانیسم‌های ثانویه مانند ته‌نشینی ذرات معلق (با کاهش شیب بستر در پایین‌دست)، جذب زیستی توسط گیاهان آبی و فاصله‌گیری از منبع آلودگی نیز در کاهش تدریجی غلظت‌ها نقش مکمل دارند (شوشا، مارانگر و لاپیر<sup>۴</sup>، ۲۰۲۱).

این الگوی مشترک تأیید می‌کند که فشار انسان‌زاد در پارک ملی لار ماهیت نقطه‌ای و متمرکز دارد و سیستم رودخانه‌ای از طریق مکانیسم‌های طبیعی رقیق‌شدگی، تا حدی توانایی خودپالایی در پایین‌دست را حفظ کرده است. با این وجود، تداوم ورود مواد مغذی در نقاط بحرانی (به‌ویژه سیاه‌پلاس) می‌تواند در بلندمدت ظرفیت خودپالایی سیستم را فراتر از آستانه تحمل ببرد.

1. Grimm, Tirpak & Winston
2. Davies-Colley
3. Sangare
4. Shousha, Maranger & Lapierre



شکل ۴. روند طولی پارامترهای کلیدی (نیتروژن کل، فسفر کل و کدورت) در ۲۰ ایستگاه نمونه برداری از بالادست به پایین دست رودخانه های پارک ملی لار. محور افقی، ترتیب جغرافیایی ایستگاه ها از بالادست (LNP1) تا پایین دست (LNP20) نشان می دهد. هر نقطه نشان دهنده میانگین مقدار پارامتر در دو سال نمونه برداری (۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) است. لیست ایستگاه ها بر اساس موقعیت: بالادست: LNP1-LNP7 (ورآرو، دلیچای، آب سفید؛ میانی: LNP8-LNP10 (الرم، گزل دره؛ و پایین دست: LNP11-LNP20 (سیاه پلاس، لار، چشمه خونی، چشمه سیاه و چشمه دو برار)

## بحث

ترکیب شاخص های کیفیت آب در این پژوهش نشان داد پارک ملی لار علی رغم فشارهای موضعی، در مقیاس کلان در وضعیت مطلوبی قرار دارد. مقادیر بسیار پایین  $BOD_5$  (میانگین  $0.27 \text{ mg/L}$ ) و همبستگی صفر آن با  $DO$ ، نشان دهنده نبود بار آلی زیست تخریب پذیر در سیستم است. این یافته با نتایج مطالعات کریشناونی، شایلاجا و چاپلا<sup>۱</sup> (۲۰۲۴) در ارزیابی آب های سطحی همخوانی دارد که نشان دادند در اکوسیستم های با حداقل دخالت انسانی، ظرفیت اکسیژن دهی محیط آبی حفظ می شود. افزایش معنادار  $DO$  در سال ۱۳۹۷ نیز بیش از آنکه ناشی از تغییرات بیولوژیکی باشد، بازتاب دهنده قانون حلالیت گازها (کاهش دما) و بهبود شرایط فیزیکی بستر است. این الگو با یافته های بوکاوکاس، بویکما و استوارت (۲۰۲۳) در دریاچه های الیگوتروفیک کوهستانی همسو است که نشان دادند نوسانات  $DO$  در این اکوسیستم ها بیشتر تابع رژیم حرارتی است تا بار آلی.

از منظر اکولوژیکی، رابطه مواد مغذی و اکسیژن محلول تابع یک مکانیسم دمرحله ای است: در مرحله اول، غنی شدگی مواد مغذی به فتوسنتز و تولید اکسیژن منجر می شود، اما در مرحله دوم، تجزیه زیست توده توسط باکتری های هوازی باعث مصرف شدید اکسیژن و شرایط هیپوکسیک می شود (احمد و همکاران، ۲۰۲۲؛ چاپرا، ۲۰۰۸). با توجه به مقادیر پایین  $BOD_5$  و وضعیت محدودیت شدید فسفر، اکوسیستم مورد مطالعه در مرحله دوم قرار ندارد و ظرفیت اکسیژن دهی آن حفظ شده است. این تصدیق متقابل بین  $BOD$  پایین و  $DO$  بالا، نشان دهنده تعادل پویای سیستم است.

یافته های این پژوهش (پیک هم زمان نیتروژن، فسفر و کدورت در LNP11-LNP12 و کاهش تدریجی آن ها در پایین دست) یک سناریوی اکولوژیکی واحد را ترسیم می کند: «ورود نقطه ای آلاینده ها، عدم رقیق شدگی فوری، و خودپالایی تدریجی». شواهد میدانی و مطالعات پیشین (جهانی و صفاری ها، ۲۰۲۰؛ رخشان و همکاران، ۲۰۲۳) تأیید می کنند که منطقه سیاه پلاس به دلیل توپوگرافی هموار و دسترسی از جاده هراز، کانون تمرکز چرای دام و گردشگری است.

نکته حائز اهمیت آن است که چرا این آلودگی در بالادست سیاه‌پلاس رقیق نشده است؟ بررسی‌های هیدرومتری نشان داد ایستگاه‌های میانی (مانند LNP11-LNP12) دبی بسیار پایینی دارند (کمتر از  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). داویس - کالی (۲۰۱۳) و سانگاره و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان دادند در رودخانه‌های با دبی پایه پایین، حتی ورودی‌های کوچک انسانی می‌تواند به جهش ناگهانی غلظت آلاینده‌ها منجر شود. با این حال، سیستم رودخانه‌ای لار در پایین‌دست توانایی خودپالایی نسبی نشان داده است؛ به طوری که ورودی چشمه‌های خونی، سیاه و دوبرار (با دبی مجموعاً بیش از  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) باعث رقیق‌شدگی تصاعدی آلاینده‌ها شده است. این مکانیسم «اثر رقیق‌شدگی توسط منابع زیرزمینی» با یافته‌های شوشا، مارانگر و لاپیر (۲۰۲۱) در رودخانه‌های معتدل که نقش چشمه‌ها را در تثبیت استوکومتری مواد مغذی در پایین‌دست تأیید کردند، همخوانی کامل دارد.

مقادیر کدورت بالاتر از ۵ NTU در LNP12 (تا ۹/۲ NTU) نیز نشان‌دهنده فرسایش سطحی یا اختلال در بستر رودخانه است (سانچز و همکاران، ۲۰۲۳؛ گریم، تیرپاک و وینستون، ۲۰۲۴). این افزایش ناگهانی کدورت در کنار پیک نیتروژن و فسفر، الگوی واحدی از فشار انسانی متمرکز را ترسیم می‌کند. دمای آب نقش غالب‌تری ایفا کرد؛ به طوری که همبستگی مثبت دما با کدورت و همبستگی منفی آن با EC و TDS، نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان فرایندهای فیزیکی (تبخیر و حلالیت) و بیولوژیکی (فعالیت سطحی دام در روزهای گرم) است.

نسبت N/P بالاتر از ۱۰۰ در سطح منطقه، نشان‌دهنده محدودیت شدید فسفر در تولید اولیه است. این یافته با اصل کلاسیک ردفیلد (ردفیلد، ۱۹۵۸) و مطالعات مدرن السر و همکاران (۲۰۰۹) و رن و همکاران (۲۰۱۹) در اکوسیستم‌های آب شیرین کوهستانی همسو است. همبستگی بسیار قوی بین نیتروژن کل و نسبت N/P نیز نشان می‌دهد تغییرات این نسبت عمدتاً تحت تأثیر غلظت نیتروژن کل است، به‌ویژه در شرایطی که فسفر به‌عنوان ماده محدودکننده عمل می‌کند (آندرسن و همکاران، ۲۰۲۵).

با این حال، پیک موضعی فسفر در LNP11 (تا  $0.59 \text{ mg/L}$ ) هشداردهنده است. بای و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند حتی افزایش‌های موقت و نقطه‌ای فسفر می‌تواند به تغییر ساختار جوامع فیتوپلانکتونی و افزایش ریسک مغذی‌شدگی موضعی منجر شود. بنابراین، اگرچه سیستم در حال حاضر در وضعیت الیگوتروفیک قرار دارد، اما «نقاط داغ» مانند سیاه‌پلاس پتانسیل تبدیل شدن به کانون‌های یوتروفیکاسیون را در صورت تداوم ورود مواد مغذی دارند.

مقایسه دو روش خوشه‌بندی و تحلیل طولی تغییرات نشان داد تحلیل طولی (از بالادست به پایین‌دست) حساسیت بسیار بالاتری در شناسایی نوسانات موضعی دارد. لینگ و همکاران (۲۰۱۷) نیز تأکید کردند که در سیستم‌های رودخانه‌ای خطی، خوشه‌بندی چندمتغیره ممکن است تفاوت‌های ظریف ناشی از گرادیان جریان را پنهان کند، در حالی که تحلیل فضایی می‌تواند مسیر حرکت آلاینده را ردیابی کند.

با وجود همخوانی کلی، دو روش خوشه‌بندی و تحلیل فضایی در سطح جزئیات تفاوت‌های مهمی داشتند. به خلاف روش خوشه‌بندی، تحلیل فضایی نشان داد حتی در این بخش‌های نسبتاً سالم، فسفر کل در LNP15 و LNP16 (رودخانه لار و چشمه خونی) به طور ناگهانی افزایش یافته است که احتمالاً نشانه ورود مواد آلاینده از منابع انسانی است. این یافته، حساسیت بالاتر تحلیل فضایی به تغییرات محلی را نشان می‌دهد.

با این وجود، محدودیت اصلی این پژوهش، نمونه‌برداری صرف در فصل تابستان (دوره جریان پایه) است. لیو و همکاران (۲۰۲۰) و دنگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند الگوهای کیفیت آب در دوره‌های ذوب برف و بارش‌های فصلی می‌تواند به طور چشمگیری تغییر کند. بنابراین، تعمیم نتایج این پژوهش به کل سال باید با احتیاط انجام شود و پایش چندفصلی برای درک کامل دینامیک سیستم ضروری است.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش نشان داد کیفیت فیزیکوشیمیایی آب رودخانه‌های پارک ملی لار در مقیاس کلان در وضعیت مطلوبی قرار دارد (میانگین  $BOD_5 \leq 0.27$  میلی گرم در لیتر و  $DO \geq 7.32$  میلی گرم در لیتر)؛ با این حال، پایش طولی انجام شده ناهمگونی معناداری را در امتداد جریان آشکار ساخت. شناسایی «نقاط داغ» آلودگی در بخش‌های میانی و پایین دست رودخانه سیاه‌پلاس (LNP11 تا LNP14) با پیک هم‌زمان نیتروژن کل، فسفر کل و کدورت، نشان داد فشارهای انسان‌زاد در این اکوسیستم کوهستانی ماهیتی کاملاً نقطه‌ای و متمرکز دارند و نه پراکنده. در مقابل، مکانیسم طبیعی خودپالایی از طریق ورودی‌های زیرزمینی پرفشار (چشمه‌های خونی، سیاه و دوبرار با دبی مجموعی بیش از ۸ مترمکعب بر ثانیه) در پایین دست، توانسته است غلظت آلاینده‌ها را به طور تصاعدی کاهش دهد و کیفیت آب را به شرایط پایه بازگرداند.

نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که ارزیابی کیفیت آب پارک ملی لار بر اساس «میانگین‌های کل حوضه» نه تنها ناکارآمد، بلکه می‌تواند همراه‌کننده باشد و نقاط بحرانی آلودگی را پنهان سازد. رویکرد پایش طولی تلفیق شده با آمار چندمتغیره، حساسیت بسیار بالاتری نسبت به روش‌های روتین در شناسایی نوسانات موضعی و ردیابی مسیر حرکت آلاینده‌ها دارد.

بنابراین، پیشنهاد می‌شود مدیریت پارک، کنترل‌های سخت‌گیرانه‌ای را برای فعالیتهای عشایری و گردشگری در محدوده سیاه‌پلاس اعمال کند و هم‌زمان، پایش مستمر را در ایستگاه‌های پایین دست برای اطمینان از حفظ ظرفیت خودپالایی سیستم ادامه دهد. این رویکرد نه تنها از تخریب بیشتر جلوگیری می‌کند، بلکه از سلامت اکوسیستم منحصربه‌فرد پارک ملی لار و به‌ویژه زیستگاه قزل‌آلای خال‌قرمز حمایت می‌کند. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، پایش در فصل بهار (زمانی که پالس‌های ناگهانی ذوب برف و رواناب‌های سطحی رخ می‌دهد) نیز انجام شود تا تأثیر شوک‌های هیدرولوژیک بر شست‌وشوی آلاینده‌های انباشته شده در حوضه آبخیز نیز ارزیابی شود.

## ملاحظات اخلاقی

### مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

### تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌هاست.

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

### سپاسگزاری

نویسندگان از سازمان محیط زیست ایران و مقامات محلی پارک ملی لار به خاطر حمایت و کمک‌های اداری‌شان طی عملیات نمونه‌برداری میدانی و همچنین، از داوران محترم برای ارائه پیشنهادها و ارزشمند در بازنگری مقاله سپاسگزاری می‌کنند.

## منابع

- 1 Adelana, S. M. A. (2005). Nitrate health effects. *Water Encyclopedia*, 4, 30–42. <https://doi.org/10.1002/047147844X.dw21>
- 2 Ahmed, M. F., Mokhtar, M. B., Lim, C. K., & Majid, N. A. (2022). Identification of water pollution sources for better Langat River basin management in Malaysia. *Water*, 14(12), 1-20. <https://doi.org/10.3390/w14121904>
- 3 Ahmed, N., Mohammad, A., Knuteson, S. L., & Samara, F. (2025). Evaluating temporal changes in water quality due to urbanization: a multi-year observational study in Khalid Khor, Sharjah, UAE. *Frontiers in Marine Science*, (12), 1-20. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1538897>
- 4 Andersen, I. M., Taylor, J. M., Graeber, D., Kelly, P. T., Hoke, A. K., Robbins, C. J., & Scott, J. T. (2025). Redfield revisited: Insights into freshwater seston carbon: nitrogen: phosphorus stoichiometry. *Limnology and Oceanography*. 70(S2), S14-S26.
- 5 <https://doi.org/10.1002/lno.70133>
- 6 Anupama, P., Kumar, E. V., Ajanth, S., Anugna, K., & Venkatesh, J. (2025). ML-Based Predicting of Dissolved Oxygen Levels for Sustainable River Ecosystem Management. *Journal of Science Engineering Technology and Management Sciences*, 2(8), 590–601. <https://doi.org/10.64771/jsetms.2025.v02.i08.pp590-601>
- 7 APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). Washington DC: American Public Health Association.
- 8 Arrahmah, S., Masluka, L., & Nugroho, D. (2025). Analisis Bahan Organik dan Keterkaitannya terhadap Parameter Lingkungan Di Muara Sungai Banger, Pekalongan. *Buletin Oseanografi Marina*, 14(2), 181–189. <https://doi.org/10.14710/buloma.v14i2.54195>
- 9 Bai, X., Jiang, Z., Fang, Y., Zhu, L., & Feng, J. (2022). Effects of environmental concentrations of total phosphorus on the plankton community structure and function in a microcosm study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148412>
- 10 Bestion, E., Schaum, C., & Yvon-Durocher, G. (2018). Nutrient limitation constrains thermal tolerance in freshwater phytoplankton. *Limnology and Oceanography Letters*, 3(6), 436–443. <https://doi.org/10.1002/lol2.10096>
- 11 Bukaveckas, P. A., Buikema, L., & Stewart, C. (202۳). Effects of climate change and variability on thermal regime and dissolved oxygen resources of oligotrophic lakes in the Adirondack Mountain region. *Aquatic Sciences*, 86(۹). <https://doi.org/10.1007/s00027-023-01021-2>
- 12 Çetin, M., Alsenjar, O., Hiuhu, A., Gölpınar, M. S., & Can, M. E. (2024). Assessing the Relationship Between Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids of Different Water Resources in a Large-scale Irrigation Scheme in the Eastern Mediterranean Basin of Türkiye. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 39(2), 254–266. <https://doi.org/10.36846/CJAFS.2024.148>
- 13 Chapra, S. C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland press. Long Grove. Illinois. 866.
- 14 Davies-Colley, R. J. (2013). River water quality in New Zealand: an introduction and overview. *Ecosystem Services in New Zealand: Conditions and Trends*. Manaaki Whenua Press, Lincoln, 432–447.



- 15 Deng, L., Li, W., Liu, X., Wang, Y., & Wang, L. (2023). Landscape patterns and topographic features affect seasonal river water quality at catchment and buffer scales. *Remote Sensing*, 15(5). 1-12 <https://doi.org/10.3390/rs15051438>
- 16 Dumbre, A., Koli, D., Vaivude, P., & Dumbre, S. (2023). Utilizing machine learning within artificial intelligence to enhance dissolved oxygen estimation in the Mississippi River via temperature-driven polynomial regression. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 11(XI), 811–821. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.56636>
- 17 Dyer, F., ElSawah, S., Croke, B., Griffiths, R., Harrison, E., Lucena-Moya, P., & Jakeman, A. (2014). The effects of climate change on ecologically-relevant flow regime and water quality attributes. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(1), 67–82. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0744-8>
- 18 Elser, J. J., Andersen, T., Baron, J. S., Bergström, A-K., Jansson, M., Kyle, M., Nydick, K. R., Steger, L., & Hessen, D. O. (2009). Shifts in lake N: P stoichiometry and nutrient limitation driven by atmospheric nitrogen deposition. *Science*, 326(5954), 835–837. <https://doi.org/10.1126/science.1176199>
- 19 Feizizadeh, B., Abdollahi, Z., & Shokati, B. (2022). A GIS-based spatiotemporal impact assessment of droughts in the hyper-saline Urmia Lake Basin on the hydro-geochemical quality of nearby aquifers. *Remote Sensing*, 14(11), 1-24. <https://doi.org/10.3390/rs14112516>
- 20 Goswami, R. (2025). Assessing Anthropogenic Stress on The Hugli Riverine Ecosystem During Monsoon: Associating Environmental Sustainability. *IJSAT-International Journal on Science and Technology*, 16(3). ۱-۹ <https://doi.org/10.71097/IJSAT.v16.i3.7895>
- 21 Goudarzi, F., Hedayatiaghmashhadi, A., Kazemi, A., & Fürst, C. (2022). Optimal location of water quality monitoring stations using an artificial neural network modeling in the Qarah-Chay River Basin, Iran. *Water*, 14(6), 1-16. <https://doi.org/10.3390/w14060870>
- 22 Grimm, A. G., Tirpak, R. A., & Winston, R. J. (2024). Monitoring the impacts of rainfall characteristics on sediment loss from road construction sites. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(22), 32428–32440. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33361-3>
- 23 Haskins, J. (2017). *Standards for water, wastewater updated in book: New edition brings water safety to forefront for public health*. American Public Health Association.
- 24 Holtgrieve, G. W., Schindler, D. E., Branch, T. A., & A'mar, Z. T. (2010). Simultaneous quantification of aquatic ecosystem metabolism and reaeration using a Bayesian statistical model of oxygen dynamics. *Limnology and Oceanography*, 55(3), 1047–1063. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.3.1047>
- 25 Hrycik, A. R., Almeida, L. Z., & Höök, T. O. (2017). Sub-lethal effects on fish provide insight into a biologically-relevant threshold of hypoxia. *Oikos*, 126(3), 307–317. <https://doi.org/10.1111/oik.03678>
- 26 Irani, T., Mostafazadeh, R., & Mousavi Moghanjoghi, S. (2025). Changes in water quality condition at sequential monitoring stations based on IRWQI along the Little Zab River in Northwestern Iran. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14982-1>
- 27 Jahani, A., & Saffariha, M. (2020). Human activities impact prediction in vegetation diversity of Lar National Park in Iran using artificial neural network model. *Integrated Environmental*

- Assessment and Management*, 17(1), 42–52. <https://doi.org/10.1002/ieam.4349>
- 28 Kendall, C., Elliott, E. M., & Wankel, S. D. (2008). Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems, p 375–449. *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, 2nd Ed Blackwell Publishing, Oxford, United Kingdom.[Google Scholar].
  - 29 Krishnaveni, B., Shailaja, K., & Chapla, J. (2024). Water quality assessment of Bibinagar Lake by physico-chemical parameters. *Environmental Reports*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.51470/ER.2024.6.1.01>
  - 30 Ling, T.-Y., Gerunsin, N., Soo, C.-L., Nyanti, L., Sim, S.-F., & Grinang, J. (2017). Seasonal changes and spatial variation in water quality of a large young tropical reservoir and its downstream river. *Journal of Chemistry*, 2017(2), 1-16. <https://doi.org/10.1155/2017/8153246>
  - 31 Liu, Y., Li, H., Cui, G., & Cao, Y. (2020). Water quality attribution and simulation of non-point source pollution load flux in the Hulan River basin. *Scientific Reports*, 10(1), 3012. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59980-7>
  - 32 Maghrebi, M., Noori, R., Danandeh Mehr, A., Lak, R., Darougheh, F., Razmgir, R., Farnoush, H., Taherpour, H., Alavai Moghaddam, S. M. R., Araghi, A., & Kløve, B. (2023). Spatiotemporal changes in Iranian rivers' discharge. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 11(1), 1-16. <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00002>
  - 33 Rakhshan, M., Mahmoudi, H., Abdoli, A., Veisi, H., & Babrgir, S. (2023). The interaction of local people and natural area in Haraz drainage basin; Case study: Ab-e Ask village. *Frontiers in Water*, (4), 1-11. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.949691>
  - 34 REDFIELD, A. (1960). The biological control of chemical factors in the environment. *Science Progress*, 11, 150–170.
  - 35 Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46(3), 205 – 221.
  - 36 Ren, Z., Niu, D., Ma, P., Wang, Y., Fu, H., & Elser, J. J. (2019). Cascading influences of grassland degradation on nutrient limitation in a high mountain lake and its inflow streams. *Ecology*, 100(8). <https://doi.org/10.1002/ecy.2755>
  - 37 Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1), 1-7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
  - 38 Sanchez, R., Groc, M., Vuillemin, R., Pujo-Pay, M., & Raimbault, V. (2023). Development of a frugal, in situ sensor implementing a ratiometric method for continuous monitoring of turbidity in natural waters. *Sensors*, 23(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/s23041897>
  - 39 Sangare, L. O., Ba, S., Toure, A., Samake, M., & Zheng, T. (2023). Assessment of the water quality of the Niger River in Bamako, Mali, based on the Water Quality Index. *Water Supply*, 23(2), 671–687. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.029>
  - 40 Shousha, S., Maranger, R., & Lapierre, J., F. (2021). Different forms of carbon, nitrogen, and phosphorus influence ecosystem stoichiometry in a north temperate river across seasons and land uses. *Limnology and Oceanography*, 66(12), 4285–4298. <https://doi.org/10.1002/lno.11960>
  - 41 Sobhani, P., Esmaeilzadeh, H., Wolf, I. D., Marcu, M. V., Lück, M., & Sadeghi, S. M. M. (2023).

- Strategies to manage ecotourism sustainably: Insights from a SWOT-ANP analysis and IUCN guidelines. *Sustainability*, 15(14), 1-23. <https://doi.org/10.3390/su151411013>
- 42 Tabatabaei, S. N., Hashemzadeh Segherloo, I., Abdoli, A., Afzali, S. F., Normandeau, E., Laporte, M., Hallerman, E. M., & Bernatchez, L. (2024). eDNA metabarcoding as a means to track distributions of different fish species in a protected area. *Environmental DNA*, 6(2), 1-15. <https://doi.org/10.1002/edn3.505>
- 43 Van Niekerk, H., Silberbauer, M. J., & Maluleke, M. (2014). Geographical differences in the relationship between total dissolved solids and electrical conductivity in South African rivers. *Water Sa*, 40(1), 133–138. <https://doi.org/10.4314/wsa.v40i1.16>
- 44 Yanidar, R., Hartono, D. M., Moersidik, S. S., & Andres, Y. (2023). Mapping the Spatial Variation of Rivers Water Quality using Multivariate Analysis. A Case Study of Greater Jakarta, Indonesia. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 6(1), 1–19. <https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v6i1.16198>