

Optical Monitoring of Coastal-Marine Environments through Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) (Southern Pars Region Case Study)

Mehdi Gholamalifard^{1✉} , Bonyad Ahmadi² , Maryam Naghdi³ , Seyed Mahmoud Ghasempouri⁴ ,
Ali Saber³ , Sohrab Mazloumi³ 

1. Corresponding Author, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran. Email: m.gholamalifard@modares.ac.ir
2. Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran. Email: bonyad.ahmadi@modares.ac.ir
3. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran. Email: maryam.naghdi@modares.ac.ir
4. Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran. Email: ghasempm@modares.ac.ir
5. Department of Environment, Marine environment and wetlands, Tehran, Iran. Email: a.saber@doe.ir
6. Department of Environment, Marine environment and wetlands, Tehran, Iran. Email: s.mazloumi@doe.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 9 February 2025
Received in revised form: 8 September 2025
Accepted: 12 September 2025
Available online : 21 September 2025

Keywords:

Colored Dissolved Organic Matter (CDOM), Conductivity, Depth (CTD) Device, Pars Special Economic Zone (PSEZ), Temperature.

ABSTRACT

Objective: Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) of terrestrial origin plays a crucial role in the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, and phosphorus in coastal regions. This component significantly influences water quality and ecosystem services by affecting light penetration. Despite the importance of CDOM in coastal ecosystems, most global studies have primarily relied on remote sensing techniques due to their efficiency in large-scale observations. However, remote sensing alone cannot fully capture the spatial and temporal variations of CDOM, making in situ field measurements essential for accurate assessments. In Iran, continuous and systematic monitoring of CDOM in coastal waters remains largely unexplored, leaving a significant knowledge gap regarding its seasonal dynamics and anthropogenic influences.

Method: This study aimed to address this gap by conducting field sampling using a conductivity, temperature, and depth (CTD) device to measure CDOM concentrations in the industrial zone of South Pars and Nayband Marine National Park. To ensure a comprehensive analysis, the study area was divided into four distinct sections: Nayband, the industrial zone, Bonood, and mangrove forests. Each section was selected based on its ecological significance and potential exposure to different sources of CDOM. A total of 144 sampling stations were surveyed across two seasonal periods: winter 2022–2023 and spring 2023. Water samples were collected from various depths to examine vertical distribution patterns of CDOM in addition to spatial variations. The collected data were analyzed to determine the extent of CDOM fluctuations between different regions and seasons.

Results: The findings revealed that CDOM concentrations varied significantly across different locations and seasons. The highest mean CDOM concentration was observed in the mangrove forests, reaching 6.27 ppb in spring and 3.84 ppb in winter. Similarly, in Nayband, CDOM concentrations were recorded at 1.35 ppb in spring and 7.55 ppb in winter. Additionally, the data indicated that CDOM levels were generally higher in coastal areas and surface water layers, which may be attributed to increased organic matter input from terrestrial sources, such as riverine discharge and coastal vegetation. The contrast between winter and spring concentrations suggests seasonal variations in CDOM production and degradation processes.

Conclusions: Measuring CDOM concentrations in Bonood, this study also explored potential sources and driving factors behind its variability. The results indicate that anthropogenic activities, particularly industrial and urban wastewater discharge, play a crucial role in shaping CDOM levels in coastal waters. Additionally, submarine groundwater discharge (SGD) was identified as a significant contributor, particularly in regions with high CDOM concentrations, such as Nayband and the mangrove forests. The interaction between natural and human-induced factors highlights the complexity of CDOM dynamics in coastal environments. Given the observed seasonal and spatial variations, continuous monitoring of CDOM is essential for understanding long-term trends and their implications for water quality management.

Cite this article: Gholamalifard, M., Ahmadi, B., Naghdi, M., Ghasempouri, S. M., Saber, A. and Mazloumi S. (2025). Optical Monitoring of Coastal-Marine Environments Through Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) (Southern Pars Region Case Study), Journal of Environmental Studies, 51 (2), 189- 210.
<http://doi.org/10.22059/JES.2025.389062.1008574>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.389062.1008574>

Introduction

Coastal habitats provide diverse and essential ecosystem services for both people and the environment. Given the close relationship between water quality, environmental health, and quality of life, monitoring these ecosystems is crucial. The quality of water is determined by a combination of its physical, chemical, and biological properties. Therefore, studying colored dissolved organic matter (CDOM) is essential for understanding the physical, chemical, biological, and geological processes governing coastal ecosystems. Analyzing CDOM optical properties helps infer its concentration and potential sources, which vary with origin in natural waters. For the first time, this study reports the levels of CDOM as an optically active component from the South Pars industrial zone and Nayband Marine National Park, highlighting its significance as a key water quality parameter in industrial regions during the winter and spring seasons. CDOM is defined and measured based on light absorption intensity or fluorescence emission. Therefore, a conductivity, temperature, and depth (CTD) device was used to determine the concentration of this component in the study area. The objective of this study is to investigate the magnitude, spatial distribution, and influencing factors of CDOM concentration.

Method

This study was conducted in the coastal areas of Nayband Gulf, covering 144 sampling stations across four distinct regions in Bushehr Province of Iran, namely Bonood region, mangrove forests, Nayband Gulf, and the industrial zone extending from Assaluyeh to Shirinoo. Sampling was performed during the winter and spring seasons. Data were recorded from depths of less than 20 meters using a CTD-115m device. Additionally, CDOM concentration was measured using a CYCLOPS-7 Turner Designs fluorometer. Following data collection, preliminary processing was performed on the CTD data, which included the removal of upcast measurements. Only downcast data were retained, as upcast measurements were less reliable due to the potential contact of the probe with the seabed, causing turbulence. After sampling, the water column was divided into three layers, including surface, middle, and deep, to analyze CDOM distribution patterns at different depths and assess the environmental factors influencing each layer.

Results

During the winter sampling in the Nayband region (eastern and western Nayband Gulf), the highest CDOM concentration was recorded at Station 18, near Haleh Pier, with a value of 83 ppb. Stations 1 and 2 followed with concentrations of 36.32 ppb and 18.54 ppb, respectively. In the western gulf, the lowest CDOM concentrations were observed at Stations 2, 3, and 4, where the values were recorded as zero. During the spring sampling, the highest CDOM concentration in the surface water layer was observed at Station 1 near the cape, with a value of 6.31 ppb, while the highest concentration in the entire water column was recorded at Station 7, with a value of 1.87 ppb. In winter, the highest concentration in surface waters was observed at Station 3, with a value of 77.03 ppb, whereas in spring, the highest concentration was recorded at Station 1, with a value of 19.06 ppb. During winter, Station 17 (near Kavian Petrochemical Complex) and Station 9 (near the Faraskou Oil Terminal in Assaluyeh) recorded the highest CDOM concentrations, with values of 56.44 ppb and 57.21 ppb, respectively. In spring, the highest concentrations were recorded at Station 30 (near the Mobin Petrochemical employees' hotel) and Station 21 (near the cooling water discharge point of the Kavian Petrochemical Complex), with values of 27.63 ppb and 35.29 ppb, respectively. In spring, the highest concentration was observed at Station 30, approximately 400 meters away from the Mobin Petrochemical employees' hotel and near the coral islands.

Discussion

Analysis of field data alongside previous studies reveals significant spatial fluctuations in CDOM concentrations across different regions, driven by both natural and anthropogenic factors. In the Nayband region, the highest mean CDOM levels were recorded at Stations 15 and 18 (near Haleh Pier and Nakhil Taghi). This increase, particularly in winter, is attributed to seasonally enriched runoff, precipitation events, continuous dredging operations, and the influence of SGD. Several studies have confirmed the presence of

SGD in this region, identifying it as a major pathway for the introduction of micronutrients and dissolved organic compounds into coastal waters.

The mangrove forests of Asaluyeh exhibited the second-highest CDOM concentrations. In this area, anoxic conditions, driven by microbial activity involving manganese and iron oxides, the presence of anoxic pores, and tidal exchange processes, play a critical role in enhancing CDOM levels. The proximity of SGD discharge points to human settlements and industrial infrastructures, including petrochemical dormitories, likely exacerbates organic pollution in this zone.

In contrast, Bonood, selected as a reference (control) site with minimal anthropogenic impact, exhibited the lowest CDOM levels. Its distinct hydrological characteristics, including the absence of major terrestrial inputs and the presence of coral reefs, result in a unique CDOM signature. Here, CDOM primarily originates from the biogeochemical breakdown of plant and marine biomass, nitrogen fixation, and other biological processes associated with reef ecosystems. Suspended carbonate particles, metals leaching from reef substrates, and the complex interplay between organic and inorganic matter contribute to the region's specific CDOM spectral properties.

Surprisingly, the South Pars Special Economic Zone, despite hosting multiple petrochemical and refinery facilities, showed lower CDOM concentrations than the Nayband and mangrove regions. While industrial effluents in this zone contain elevated levels of heavy metals (e.g., Zn, Cu, Ni, Cr, Cd), the reduced CDOM levels are likely due to a combination of physical and biogeochemical mechanisms, including flocculation, sedimentation, microbial degradation, photochemical breakdown, and oxidative mineralization of organic matter. These processes collectively limit the persistence of CDOM in the water column.

From an ecological perspective, elevated CDOM impairs light penetration into deeper layers, disrupting photosynthetic processes and primary production, particularly in sensitive coral ecosystems. The weak correlation between CDOM and chlorophyll-a observed in this study suggests that CDOM is predominantly derived from allochthonous (external) sources rather than phytoplanktonic production. In contrast, the significant positive correlation between CDOM and turbidity highlights the dominant role of physical and hydrodynamic drivers such as soil erosion, organic matter decomposition, and sediment transport. These results align with findings from studies in the Yellow River, China, which similarly reported a lack of correlation between CDOM and chlorophyll-a but a strong association with turbidity.

Conclusions

The results indicate that CDOM concentrations in the coastal areas of the study region are higher than those in offshore zones, which could be attributed to the influx of micronutrients, soil, and vegetation, as well as the presence of SGD along the Nayband coast (near Haleh pier) and Asaluyeh (mangrove forests). This increase is estimated to be greater in areas influenced by human activities and mangrove forests compared to other regions. The mangrove forests, due to root growth and decomposition, reverse tidal flows, SGD, and anoxic pores during the two studied seasons, have shown higher concentrations of organic matter than Bonood and the industrial area. Stations 31 (Mangrove), 15, and 18 (Nayband) demonstrate that human activities such as wastewater discharge, residential development, fishing docks, and oil terminals significantly impact CDOM levels. The literature also confirms the influence of SGD in the Nayband area. In the industrial zone, proximity to the Kavian refinery complex and the influx of heavy metals have resulted in elevated CDOM concentrations. However, contrary to expectations, CDOM levels in this region are lower than those in the mangrove and Nayband areas and, on average, are comparable to those in the Bonood region. This is likely due to reverse photo-oxidation, solar degradation, mixing, flocculation, and salinity driven by tidal currents, which may have reduced CDOM levels in these areas. In the Bonood region, considered a control area with minimal human activity, the influence of coral islands has caused some variation in CDOM, yet it still exhibits the lowest average among all regions. These findings highlight the significant impact of human and industrial activities on the increase of CDOM in coastal zones. Recommendations such as real-time monitoring, advancement of treatment technologies, integrated environmental management, stringent standards for polluting industries, protection of natural ecosystems, and the development of further research can contribute to reducing CDOM and improving water quality. Implementing these measures requires collaboration among scientific, executive, and regulatory institutions.

Author Contributions

Data collection: Bonyad Ahmadi, Mehdi Gholamalifard, Seyed Mahmoud Ghasempouri; Research design: Mehdi Gholamalifard, Seyed Mahmoud Ghasempouri; Data analysis and interpretation: Bonyad Ahmadi; Visualization: Bonyad Ahmadi, Maryam Naghdi; Initial manuscript drafting: Bonyad Ahmadi, Maryam Naghdi; Writing of specialized sections (literature review, methodology, results, and discussion): Bonyad Ahmadi, Maryam Naghdi; Supervision and academic guidance: Mehdi Gholamalifard (Supervisor), Seyed Mahmoud Ghasempouri (Advisor); Response to reviewers: Bonyad Ahmadi, Maryam Naghdi; Final approval of the manuscript: Mehdi Gholamalifard; Financial support: Ali Saber, Sohrab Mazloumi.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors

Acknowledgements

The authors express their gratitude for the financial support and facilitation of this research to the Marine and Wetlands Deputy of the Department of Environment of Iran (Office for the Protection of Ecosystems and Marine Coasts) and Tarbiat Modares University.

We would also like to thank Dr. Seyed Hassan Mousavi, Engineer Pouria Sepahvand, and Engineer Nabiollah Khairabadi for their support and participation in the fieldwork, and Dr. Mehdi Tanhazarti and Dr. Ahmad Tarsali for their administrative and organizational facilities and coordination.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research was funded by the research grant of Tarbiat Modares University as part of a doctoral dissertation, with the IranDoc tracking code 1766739. Additionally, part of the results is derived from the research project titled "Environmental Changes Assessment and Habitat Risk Evaluation in the Coastal-Marine Area of South Pars," under contract number 234/s/1401 dated 30/05/1401.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



پایش نوری محیط‌های ساحلی - دریایی از طریق ماده آلی محلول رنگی (CDOM) (مطالعه موردی: منطقه پارس جنوبی)

مهدی غلامعلی فرد^۱✉، بنیاد احمدی^۲، مریم نقدی^۳، سید محمود قاسمپوری^۴، علی صابر^۵، سهراب مظلومی^۶

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، شهرستان نور، مازندران، ایران. رایانامه: m.gholamalifard@modares.ac.ir
۲. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، شهرستان نور، مازندران، ایران. رایانامه: bonyad.ahmadi@modares.ac.ir
۳. گروه علوم و مهندسی آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، شهرستان نور، مازندران، ایران. رایانامه: maryam.naghdi@modares.ac.ir
۴. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، شهرستان نور، مازندران، ایران. رایانامه: ghasempm@modares.ac.ir
۵. معاونت محیط‌زیست دریایی و تالاب‌ها، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران. رایانامه: a.saber@doe.ir
۶. معاونت محیط‌زیست دریایی و تالاب‌ها، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران. رایانامه: s.mazloumi@doe.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۶/۳۰

هدف: مواد آلی رنگی محلول (CDOM) با منشأ زمینی نقش حیاتی در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی کربن، نیتروژن و فسفر در مناطق ساحلی ایفا می‌کند. این مؤلفه تأثیر قابل توجهی بر کیفیت آب و خدمات اکوسیستمی دارد، زیرا بر نفوذ نور تأثیر می‌گذارد. علی‌رغم اهمیت CDOM در اکوسیستم‌های ساحلی، بیشتر مطالعات جهانی عمدتاً به تکنیک‌های سنجش از دور تکیه کرده‌اند. با این حال، سنجش از دور به تنهایی نمی‌تواند تغییرات مکانی و زمانی CDOM را به طور کامل بازتاب نماید، بنابراین اندازه‌گیری‌های میدانی در محل برای ارزیابی‌های دقیق ضروری هستند. در ایران تاکنون پایش مداوم و پیوسته بر CDOM در آب‌های ساحلی به طور عمده نادیده گرفته شده است.

روش‌شناسی: در این مطالعه با استفاده از دستگاه سنجش رسانایی، دما، عمق (CTD) با انجام نمونه‌برداری میدانی از محدوده صنعتی پارس جنوبی و پارک ملی دریایی نایبند به بررسی مواد آلی محلول رنگی پرداخته شد. برای سهولت در تحلیل نتایج، منطقه به چهار بخش نایبند، منطقه صنعتی، بنود و جنگل‌های مانگرو تقسیم‌بندی شد. هر بخش بر اساس اهمیت اکولوژیکی و احتمال قرار گرفتن در معرض منابع مختلف CDOM انتخاب گردید.

یافته‌ها: از تعداد ۱۴۴ ایستگاه مورد بررسی در فصول زمستان ۱۴۰۱ و بهار ۱۴۰۲ از نظر میانگین مواد آلی محلول رنگی، به ترتیب مناطق جنگل‌های مانگرو، نایبند دارای بیشترین غلظت CDOM بود. میانگین حداکثری مقدار CDOM در جنگل‌های مانگرو در فصل بهار ۶/۲۷ ppb و در زمستان ۳/۸۴ ppb برآورد شد. در نایبند نیز به ترتیب در فصل بهار ۱/۳۵ ppb و در زمستان ۷/۵۵ تعیین گردید. به طور کلی نتایج بیانگر غلظت بیشتر مواد آلی محلول رنگی در سواحل و در لایه سطحی آب است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهند که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و شهری، نقش عمده‌ای در تغییر سطوح CDOM در آب‌های ساحلی ایفا می‌کنند. همچنین، تخلیه آب‌های زیرزمینی زیر دریایی (SGD) به‌عنوان یک عامل قابل توجه در نظر گرفته شد، به‌ویژه در مناطقی با غلظت بالای CDOM مانند نایبند و جنگل‌های مانگرو تعامل میان عوامل طبیعی، انسان‌ساخت و پیچیدگی‌های دینامیک CDOM در محیط‌های ساحلی را به‌خوبی نمایان می‌سازد.

کلیدواژه‌ها:

دستگاه سنجش رسانایی، دما، عمق (CTD)
منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس جنوبی (PSEZ)،
مواد آلی محلول رنگی (CDOM).

استناد: غلامعلی فرد، مهدی؛ احمدی، بنیاد؛ نقدی، مریم؛ قاسمپوری، سید محمود؛ صابر، علی و مظلومی، سهراب. (۱۴۰۴). پایش نوری محیط‌های ساحلی - دریایی از طریق ماده آلی محلول رنگی (CDOM) (مطالعه موردی: منطقه پارس جنوبی). نشریه محیط‌شناسی، ۵۱(۲)، ۱۸۹ - ۲۱۰.

<http://doi.org/10.22059/JES.2025.389062.1008574>

© نویسندگان

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.389062.1008574>

مقدمه

مناطق ساحلی به‌عنوان مناطق انتقالی بین خشکی و دریا، عملکردهایی از جمله کنترل فرسایش، تصفیه طبیعی آب، ترسیب کربن و حمایت از ذخایر ماهی‌گیری ارائه می‌دهند (Duarte et al., 2013). در سال‌های اخیر، فشارهایی از جمله توسعه صنعتی، ورود آلاینده‌ها و تغییرات کاربری اراضی در این اکوسیستم‌ها افزایش داشته است. کیفیت آب یکی از شاخص‌های کلیدی سلامت این اکوسیستم‌ها است که تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قرار دارد (Gholizadeh, Melesse & Reddi, 2016). یکی از مهمترین پارامترهای نوری در بررسی کیفیت آب، مواد آلی محلول رنگی (CDOM) است که به دلیل نقش آن در فرآیندهای زیستی، فتوشیمیایی و چرخه کربن، اهمیت زیادی دارد (Mabit, Araújo & Singh, 2022). CDOM از اجزای 2 DOM است و با نام‌های *gelbstoff* و *gilvin* نیز شناخته می‌شوند. غلظت بالای این مؤلفه موجب تغییر رنگ آب به زرد تا قهوه‌ای می‌گردد. طیف جذبی CDOM در محدوده‌ی نور ماوراءبنفش - مرئی و فلورسانس است و انتشار آن در محدوده طول موج‌های سبز - آبی می‌باشد (Marcelli et al., 2014). این مواد با اندازه کمتر از 0.2 میکرومتر، به‌عنوان یکی از ترکیبات فعال نوری در محدوده بالای 250 نانومتر امواج الکترومغناطیسی، جذب بالایی داشته و روی رنگ آب، فتوشیمی و فتوبیولوژیکی آن مؤثرند. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که غلظت و ترکیبات CDOM در اکوسیستم‌های آبی بسته به منشأ تولید آن‌ها متغیر است (Clark, De Bruyn & Brahm, 2020) بررسی خصوصیات نوری CDOM در محیط‌های آبی طبیعی، امکان ارزیابی مقادیر و منابع نسبی این مؤلفه را فراهم می‌کند (McKnight et al., 2001; Tzortziou et al., 2011). این ماده می‌تواند از منابع دریایی و خشکی و در آب‌های شور و شیرین، از جمله فاضلاب انسانی (Stedmon et al., 2006)، رواناب‌های کشاورزی و انتقال مواد از بالادست به‌وسیله رودخانه‌ها (Mohammadpour & Pirasteh, 2021)، مناطق مسکونی (Cawley et al., 2012) و فعالیت‌های لایروبی برای حمل‌ونقل (Minu et al., 2014) نشأت بگیرد. به علاوه، در دسترس بودن نیتروژن موجب افزایش یوتریفیکاسیون سیستم‌های ساحلی (Conley et al., 2009; Staehr et al., 2017)، کاهش شفافیت آب، گسترش جلبک‌ها و گیاهان دریایی می‌گردد (Shao et al., 2016). همچنین این مواد با رهایی مولکول‌های آلی از موجودات در طی زوال ویروسی و میکروبی (شکست سلولی)، تغذیه و دفع نیز به وجود می‌آیند (Coble et al., 1998). ترکیبات آلی تشکیل‌دهنده CDOM واکنش‌پذیری بالایی با برخی یون‌ها در آب دارند (Bushaw et al., 1996). با این حال، اطلاعات محدودی درباره تأثیر فعالیت‌های صنعتی بر تغییرات این مواد در محیط‌های ساحلی ایران وجود دارد و بررسی فصلی این مؤلفه در نواحی صنعتی و حفاظت‌شده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت CDOM در ارزیابی کیفیت آب و تأثیر احتمالی آن از فعالیت‌های صنعتی، این پژوهش برای نخستین بار به بررسی مقادیر این مؤلفه فعال نوری در محدوده صنعتی پارس جنوبی و پارک ملی دریایی نایبند می‌پردازد. پژوهش حاضر به بررسی تغییرات مکانی و فصلی CDOM در نواحی مختلف خلیج نایبند، منطقه حرا، منطقه تقریباً بکر بنود و در نهایت منطقه صنعتی پارس جنوبی پرداخته و نقش عوامل هیدرولوژیکی، زیستی و انسانی را در تغییر غلظت این مؤلفه نوری ارزیابی می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند در بهبود درک ما از اثرات فعالیت‌های انسانی بر ویژگی‌های نوری آب‌های ساحلی مؤثر باشد و اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت اکوسیستم‌های دریایی فراهم کند.

پیشینه پژوهش

پیشینه نظری

CDOM به‌عنوان یک شاخص مهم کیفیت آب، در فرآیندهای فتوشیمیایی، انتقال انرژی در زنجیره غذایی و تنظیم نفوذ نور در ستون آب نقش دارد (Letscher et al., 2015). همچنین، به‌عنوان یک شاخص حساس به تغییرات محیطی، در مطالعات مربوط به آلودگی آب، تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع آبی کاربرد گسترده‌ای دارد (Fichot & Benner, 2012). CDOM ناشی از فعالیت‌های انسانی ممکن

1. Colored Dissolved Organic Matter
2. Dissolved Organic Matter

است دچار اختلالات و تغییراتی از جمله تغییر فیزیکی (لخته‌سازی و اختلاط) (Jokinen et al., 2020)، بیولوژیکی (فعالیت‌های میکروبی)؛ (Zhou et al., 2015) و فتوشیمیایی (Helms et al., 2014) گردد. در مناطق ساحلی می‌تواند متأثر از جریان‌های بی‌هوازی^۱ منطقه حرا و اختلاط جزر و مد (Mori et al., 2019; Reading et al., 2017)، فرآیندهای ترکیب کربنات کلسیم با فلزات سنگین و انحلال آن (Martias et al., 2018) و در برخی مناطق وجود جریان‌ات زیرزمینی زیردریایی (SGD^۲) به‌عنوان بخش تحت اختلاط آب شیرین و شور باشد (Blanco et al., 2011; Nelson et al., 2015; Suryaputra et al., 2015). علاوه بر این، شوری می‌تواند با مهار و تحریک فعالیت‌های میکروبی، زیست جمعیت و تنوع میکروپلانکتون‌ها در ستون آب، منشأ و خواص فیزیکی- شیمیایی مواد آلی محلول را کنترل کند (Butturini et al., 2022) با افزایش فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی، شوری به‌عنوان یک عامل کلیدی در تغییر ویژگی و CDOM در بدنه‌های آبی قلمداد می‌شود.

پیشینه تجربی

جنگل‌های مانگرو به‌عنوان راکتورهای بیوژئوشیمیایی نقش مؤثری در تجزیه مواد آلی دارند (Kristensen et al., 2008) و یکی از منابع اصلی مواد آلی محلول (DOM) محسوب می‌شوند (Bouillon et al., 2003)، به‌طوری‌که با وجود پوشش کمتر از ۰/۱ درصد در سطح زمین، بیش از ۱۰ درصد جریان DOM خاک‌زا به اقیانوس‌ها را تولید می‌کنند (Dittmar et al., 2006). این مناطق همچنین بر کربن معدنی (Sippo et al., 2016) و فلزات کمیاب محلول در مصب‌ها تأثیرگذارند (Holloway et al., 2016). از سوی دیگر، ورودی SGD، شامل آب‌های زیرزمینی شیرین و تبادل آب منفذی شور، حاوی غلظت بالای DOM، مواد مغذی و فلزات کمیاب است و نقش مهمی در انتقال عناصر به نواحی ساحلی دارد (Moore, 2010; Charette et al., 2005; Reading et al., 2017). مطالعات جهانی متعددی با استفاده از داده‌های میدانی و سنجش از دور، به منشأ و ویژگی‌های CDOM در اکوسیستم‌های دریایی پرداخته‌اند. از جمله، ارتباط CDOM با پوشش زمین و شیب شوری در چین (Zhao et al., 2017)، نقش ورودی‌های رودخانه‌ای و صخره‌های مرجانی در کالدونیای نو (Martias et al., 2018) و تأثیر صخره‌های مرجانی در اقیانوس آرام (Russell et al., 2019). همچنین، منابع زمینی و انسانی مانند رواناب و تبادل آب منفذی در مانگروها از منابع اصلی CDOM شناخته شده‌اند (Yan et al., 2021)، درحالی‌که فرآیندهایی مانند اختلاط جزرومدی، تجزیه نوری و تجزیه میکروبی منجر به تغییر ترکیبات آن می‌شوند. شوری نیز از طریق فرآیندهایی نظیر لخته‌سازی و کاهش حلالیت بر غلظت CDOM اثرگذار است (Butturini et al., 2022). مطالعه‌ای در رودخانه لیائو نشان داد که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در نزدیکی صنایع پتروشیمی، موجب کاهش CDOM می‌شود (Shao et al., 2023). با وجود پیشینه گسترده جهانی، تحقیقات درباره CDOM در ایران بسیار محدود است. در یکی از معدود مطالعات، محمدپور و پیراسته (۲۰۲۱) با داده‌های ماهواره‌ای مودیس^۳ نشان دادند که نسبت بازتاب در باندهای ۶۶۷ و ۵۵۵ نانومتر شاخص مؤثری برای پایش CDOM است. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای جامع درباره CDOM در آب‌های ساحلی ایران صورت نگرفته است. پژوهش حاضر برای نخستین بار به اندازه‌گیری میدانی CDOM در این مناطق پرداخته و با تحلیل عوامل مؤثر، مبنایی برای درک ویژگی‌های نوری و ترکیبات CDOM در سواحل ایران فراهم می‌آورد.

روش‌شناسی پژوهش

ایستگاه‌های نمونه‌برداری

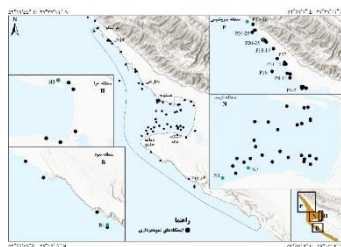
منطقه مورد مطالعه در استان بوشهر و در مجاورت منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس (عسلویه) واقع شده و چهار پهنه اکولوژیکی متمایز با شرایط محیطی و تنوع‌زیستی خاص را در بر می‌گیرد. جنگل‌های حراً با نقش کلیدی در تصفیه آب، تحت فشار آلودگی‌های شهری و سباب‌های رودخانه‌ای قرار دارند. خلیج نیمه‌بسته نایبند با کاربری‌های ماهیگیری و گردشگری، از عوامل طبیعی و انسانی تأثیر می‌پذیرد.

1. Anoxia

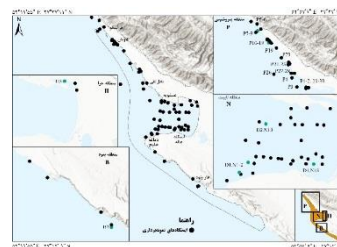
2. Submarine Groundwater Discharge

3. MODIS

منطقه بنود به‌عنوان اکوسیستمی نسبتاً بکر و مرجانی، کمتر در معرض فعالیت‌های انسانی بوده، در حالی که منطقه صنعتی با تخلیه گسترده پساب پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی، کانون آلودگی به‌شمار می‌رود. توسعه شتابان صنعتی و تغییرات کاربری اراضی طی دو دهه گذشته، چالش‌هایی جدی برای پایداری و سلامت اکولوژیکی این پهنه ساحلی ایجاد کرده است. با توجه به تنوع‌زیستی غنی و حساسیت بالای محیط‌زیستی، این منطقه یکی از زیستگاه‌های کلیدی دریایی در سواحل ایران محسوب می‌شود (Ahmadi et al., 2025a). در راستای پیشبرد این پژوهش، تعداد ۱۴۴ ایستگاه از چهار منطقه یاد شده طی دو فصل زمستان ۱۴۰۱ (۷۴ ایستگاه) و بهار ۱۴۰۲ (۷۰ ایستگاه) در خلیج نایبند نمونه‌برداری شدند (شکل ۱).



(۲)



(۱)

شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ (۱) فصل زمستان و (۲) فصل بهار، ایستگاه‌های نمونه‌برداری مناطق بوم‌شناختی در نقشه با حرف اختصاری B: منطقه بُنود؛ H: جنگل‌های حرا؛ N: خلیج نایبند و P: مناطق پتروشیمی و پالایشگاه مشخص شده است. نقاط سبز رنگ نشان‌دهنده ایستگاه‌های کلیدی نمونه‌برداری هستند که در متن اصلی مورد بحث قرار گرفته‌اند (منبع: نگارندگان)

روش اندازه‌گیری CDOM

در این پژوهش، نمونه‌برداری با دستگاه CTD-115m (Sea & Sun Technology GmbH) در مناطق کم‌عمق (کمتر از ۲۰ متر) انجام شد. اندازه‌گیری CDOM با فلورومتر CYCLOPS-7 ساخت Turner Designs و با طول موج‌های تحریک ۳۶۵ نانومتر و انتشار ۴۷۰ نانومتر صورت گرفت (Carroll, Chigounis & Gilbert, 2005; Creelman, Luy & Beland, 2021). پیش از عملیات میدانی، حسگرها طبق دستورالعمل سازنده و با محلول‌های مرجع استاندارد در آزمایشگاه کالیبره شدند. نمونه‌برداری در تاریخ‌های ۱۴ تا ۱۶ اسفند ۱۴۰۲ و ۱۵ و ۱۸ خرداد ۱۴۰۳، در شرایط جوی آرام و دریا صاف انجام شد. فشار به‌عنوان نماینده عمق (در اعماق کمتر از ۱۰۰۰ متر) و عمق ایستگاه‌ها با اکوساندر دستی ثبت شد. برای ساده‌سازی تحلیل، ستون آب به سه لایه سطحی، میانی و بستر تفکیک شد؛ لایه میانی شامل عمق بین دو لایه دیگر بود تا تغییرات CDOM در عمق‌های مختلف دقیق‌تر بررسی شود.

یافته‌های پژوهش

مقایسه مناطق مختلف مورد بررسی

میانگین غلظت CDOM در جدول ۱ نشان می‌دهد که این مؤلفه در جنگل‌های مانگرو طی دو فصل نمونه‌برداری مقدار بیشتری داشته است. همچنین، جدول ۲ با مرور مطالعات جهانی، مقادیر و منابع احتمالی CDOM را نشان می‌دهد که در ایران و سایر مناطق، به‌دلیل اکوسیستم‌های مشابه، دارای ویژگی‌های مشترکی هستند.

[illegible]

جدول ۰۲. بررسی منابع احتمالی وجود CDOM در اکوسیستم‌های مشابه مورد بررسی ایران و جهان (منبع: یافته‌های تحقیق)

منطقه	دلایل بروز احتمالی CDOM	پژوهش‌های صورت پذیرفته	ضریب جذب و مقدار CDOM	زمان انجام پژوهش	مناطق مورد مطالعه پژوهشی در جهان
تخلیه فاضلاب و نزدیکی به مسکن	(Liu et al., 2020)	۲۸۰ نانومتر، حداکثر: ۴/۶۴، ۱۵/۳۷ حداقل: ۴/۷۷ m^{-1} میانگین:	– بخش میانی و پایینی رودخانه یانگ تسه – دریای خزر	تابستان	جنوب شرقی چین
جریان‌های معکوس جزر و مدی و انتقال رسوبات و منافذ آنوکسیک	(Cao et al., 2017)	۳۲۵ نانومتر، میانگین: ۰/۱۸ $m^{-1} \pm ۰/۳۱$	فصل بهار/تابستان	۱۹ مه ۲۰۲۱	خلیج مانیل یکی از مهمترین آب‌های فیلیپین
قابلیت جذب نور و منع نفوذ به سطوح زیرین	(D'Sa et al., 2021) (Manuel et al., 2021)	در طول جزر و مد بالا و پایین طی یک دوره دو روزه سه هفته به طور مداوم در آب‌های زیرزمینی ساحلی کم عمق	نزدیک ساحل در خلیج Maunlua، اوآهو، هاوایی	شمال شرقی خلیج مکزیک	ریف Shiraho (اوکیناوا، ژاپن)
وجود تخلیه آب زیرزمینی زیردریایی (SGD)	(Blanco et al., 2011)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	در رودخانه‌های می‌سی‌سی‌پی و آچافالایا و در آب‌های سطحی شمال خلیج مکزیک (NGoM)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر
انتقال مواد آلی سطحی و رقیق‌سازی توسط باران، تأثیرات انسانی و لایروبی برای حمل و نقل	(Yamashita et al., 2007)	۳۲۰ نانومتر و ۴۲۰ نانومتر	دسامبر ۲۰۰۴ تا ژانویه ۲۰۰۵	در منطقه قطب جنوب	– سایت ساحلی در کوچی دریای عرب – دریای خزر
وجود تخلیه آب زیرزمینی زیردریایی (SGD)	(Fichot & Benner, 2012)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	رودخانه‌های می‌سی‌سی‌پی و آچافالایا و در آب‌های سطحی شمال خلیج مکزیک (NGoM)	خلیج Maunlua
وجود تخلیه آب زیرزمینی زیردریایی (SGD)	(Nelson et al., 2015)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	شمال شرقی خلیج مکزیک	اوکیناوا، ژاپن
فعالیت‌های انسانی	(Suryaputra et al., 2015)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	شمال شرقی خلیج مکزیک	اوکیناوا، ژاپن
کاهش: فرآیندهای فیزیکی: لخته‌سازی ذرات، چسبیدن CDOM به آن و در نهایت ته‌نشینی، اختلاط توده‌های با غلظت مختلف	(Blanco et al., 2011)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	شمال شرقی خلیج مکزیک	اوکیناوا، ژاپن
افزایش: تخلیه پساب صنعتی و ورود هیدروکربن و فلزات سنگین به آب، ورود منگنز و باریم موجود در ترکیبات COD به‌عنوان ریزمغذی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی	(Tedetti et al., 2011)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	شمال شرقی خلیج مکزیک	اوکیناوا، ژاپن
کاهش: فرآیندهای فیزیکی: لخته‌سازی ذرات، چسبیدن CDOM به آن و در نهایت ته‌نشینی، اختلاط توده‌های با غلظت مختلف	(Mori et al., 2019; Yan et al., 2021)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	شمال شرقی خلیج مکزیک	اوکیناوا، ژاپن
فرآیندهای بیولوژیکی	(Jokinen et al., 2020)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	شمال شرقی خلیج مکزیک	اوکیناوا، ژاپن
فرآیندهای فتوشیمیایی	(Zhou et al., 2015)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	شمال شرقی خلیج مکزیک	اوکیناوا، ژاپن
فرآیندهای فتوشیمیایی	(Helms et al., 2014)	۲۷۵ نانومتر و ۲۹۵ نانومتر	فصلی	شمال شرقی خلیج مکزیک	اوکیناوا، ژاپن

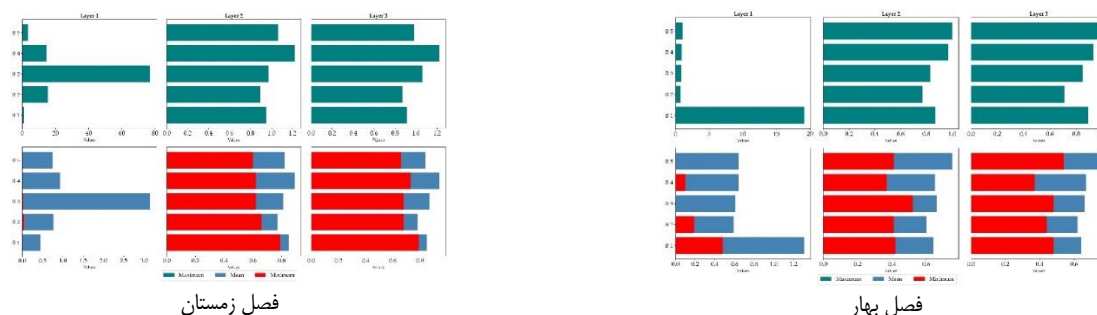
ادامه جدول ۲. بررسی منابع احتمالی وجود CDOM در اکوسیستم‌های مشابه مورد بررسی ایران و جهان (منبع: یافته‌های تحقیق)

منطقه	دلایل بروز احتمالی CDOM	پژوهش‌های صورت پذیرفته	ضریب جذب و مقدار CDOM	زمان انجام پژوهش	مناطق مورد مطالعه پژوهشی در جهان
		(Nieto-Cid et al., 2006)		فصلی با حداکثر مقدار در پاییز	Riia de Vigo (اسپانیا)
		(Osburn et al., 2009)		از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ با حداقل مقدار در اواخر تابستان	شمالگان غربی کانادا
	اکسیداسیون	(Yan et al., 2021)			در بندر Hainan Dongzhai
	تجزیه مواد گیاهی، زمینی یا آبی و یا از طریق تثبیت نیتروژن	(Zepp et al., 2008)			در سایت‌های واقع در کلیدهای پایین و میانی و تورنگاهای خشک
	انحلال کربنات کلسیم ناشی از صخره‌ها و اتصال فلزات سنگین موجود در سازندهای کربنات کلسیم با CDOM	(Martias et al., 2018)	۳۵۰ نانومتر	فصل تولید بهار/تابستان مارس ۲۰۱۶	تالاب شرقی کالدونیای جدید (NC، جنوب غربی اقیانوس آرام)
	چرخه نور و جزر و مد	(Archibald et al., 2019)			صخره‌های مرجانی جزیره One Tree Great Barrier Reef
۴.		(D'Sa et al., 2021)	۳۲۵ نانومتر میانگین: $\pm 0.18 \text{ m}^{-1}$ ۰/۳۱	فصل بهار/تابستان	خلیج مانیل یکی از مهمترین آب‌های فیلیپین
		(Manuel et al., 2021)		۱۹ مه ۲۰۲۱	خلیج مانیل یکی از مهمترین آب‌های فیلیپین
	محدودیت دسترسی به نور برای صخره‌های مرجانی با افزایش مقدار CDOM	(Chen & Zhu, 2022)		۸ آوریل ۲۰۱۳ تا ۲۶ دسامبر ۲۰۱۸	رودخانه ساکرامنتو و خلیج سانفرانسیسکو شمالی، ایالات متحده
		Mohammadpour & Pirasteh, 2021	حساس به طول موج‌های مرئی کمتر از ۶۰۰ نانومتر		آب‌های ساحلی خلیج فارس و دریای عمان

توزیع مکانی-زمانی CDOM

منطقه بنود

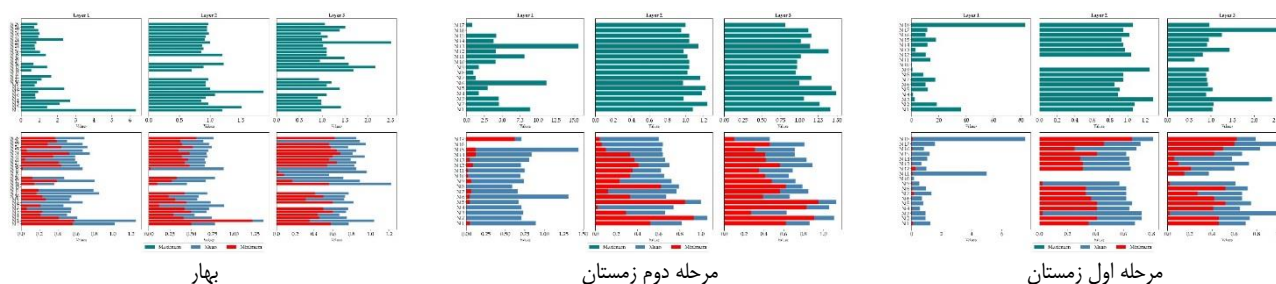
نمودار CDOM در زمستان ۱۴۰۱ و بهار ۱۴۰۲ نشان‌دهنده تفاوت‌های مکانی در توزیع این مؤلفه در آب‌های منطقه بنود است (شکل ۲). در زمستان، بیشترین غلظت CDOM در ایستگاه ۳ (۷۷/۰۳) و در بهار در ایستگاه ۱ (۱۹/۱۶) در سطح آب ثبت شده است. توزیع در لایه‌های زیرین در هر دو فصل مشابه بود. بیشینه میانگین CDOM در هر دو فصل در نواحی دور از ساحل و کمترین مقدار آن نزدیک غار بنود (زمستان: ۰/۴۵ و بهار: ۰/۵۹) مشاهده شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها در سطح آب انجام شده‌اند (جدول ۱).



شکل ۲. نمودار توزیع مکانی زمانی CDOM در منطقه بنود (منبع: یافته‌های تحقیق)

منطقه نایبند

در جریان نمونه‌برداری زمستانه در خلیج نایبند، طی دو مرحله از ۱۸ و ۱۷ ایستگاه به ترتیب در شرق و غرب خلیج نمونه‌برداری انجام شد. در مرحله اول (شرق خلیج)، بیشترین غلظت CDOM با مقدار ۸۳ ppb در ایستگاه ۱۸ نزدیک اسکله هاله ثبت شد. پس از آن، ایستگاه‌های ۱ و ۲ با مقادیر ۳۶/۳۲ و ۱۸/۵۴ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در بیشتر ایستگاه‌ها، غلظت CDOM در سطح و ستون آب بسیار پایین (بین ۱ تا ۲ ppb) (به‌ویژه در ۶۱/۱۱ درصد سطح و ۸۸/۸۹ درصد کل عمق) مشاهده شد. در مرحله دوم (غرب خلیج)، کمترین غلظت CDOM (صفر) در ایستگاه‌های نزدیک به ساحل (ایستگاه‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۴ و ۱۷) ثبت شد. در مقابل، بیشترین مقادیر در ایستگاه‌های دورتر از ساحل مانند ایستگاه ۱۳ (نزدیک اسکله عسلویه)، ایستگاه ۶ و ایستگاه ۱ (نزدیک دماغه) با مقادیر ۱۵/۶۳، ۱۱/۱۹ و ۸/۸۸ ppb به ثبت رسید.



شکل ۳. نمودار توزیع مکانی زمانی CDOM در منطقه نایبند (منبع: یافته‌های تحقیق)

در فصل بهار، بیشترین غلظت CDOM در لایه سطحی آب در ایستگاه ۱ (نزدیک دماغه) با مقدار ۶/۳۱ ppb در ستون آب ایستگاه ۷ (نزدیک مجتمع اقامتی آریاساسول) با ۱/۸۷ ppb و در بستر ایستگاه ۲۳ (فاصله دور از ساحل عسلویه) با ۲/۵۱ ppb ثبت شد. به‌طور کلی، حداکثر غلظت در لایه سطحی نسبت به ستون آب ۴۱/۳۸ درصد و نسبت به بستر ۳۱/۰۳ درصد بیشتر بوده است. همچنین، جدول ۱ نشان می‌دهند که در فصل زمستان، منطقه نایبند (به‌ویژه اطراف اسکله هاله) بیشترین غلظت CDOM را داشته است. همچنین، ایستگاه‌های ساحلی نسبت به ایستگاه‌های دور از ساحل، غلظت‌های بالاتری را نشان دادند. در اغلب ایستگاه‌ها، میانگین بیشینه CDOM در لایه سطحی آب مشاهده شده است. در نمونه‌برداری زمستان، حداکثر میانگین CDOM در ایستگاه ۱۸ با مقدار ۷/۵۵ ppb نزدیک اسکله صیادی هاله و حداقل آن در ایستگاه ۱۰ با مقدار ۰/۱۶ ppb در فاصله دور از ساحل اندازه‌گیری شد. در مرحله دوم زمستان، و در مرحله دوم نمونه‌برداری در ایستگاه‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب با مقادیر ۱/۴۴ ppb و صفر با موقعیتی نزدیک به سواحل و دور از سواحل نایبند برآورد شده است. همچنین بر اساس نتایج نمونه‌برداری در فصل بهار مقادیر حداکثر و حداقل میانگین CDOM در ایستگاه‌های شماره دو نزدیک به دماغه خلیج نایبند با غلظت ۱/۳۵ و ۱۴ در نزدیکی اسکله صیادی هاله با غلظت ۰/۳۶ ppb واقع شده است (جدول ۱).

منطقه صنعتی

در این منطقه، ایستگاه‌ها عمدتاً نزدیک خروجی پالایشگاه و پتروشیمی‌ها قرار دارند و نوسانات غلظت CDOM در فصل‌های بهار و زمستان مشابه منطقه نایبند بوده است، با غلظت بالاتر در لایه سطحی. در زمستان، بیشترین غلظت‌ها در ایستگاه‌های نزدیک ساحل و تأسیسات پتروشیمی مشاهده شد، به‌ویژه ایستگاه ۱۷ (نزدیک پتروشیمی کاویان) با ۵۷/۲۱ ppb و ایستگاه ۹ (نزدیک پایانه نفتی فراسکوی عسلویه) با ۵۷/۲۱ ppb ثبت شده‌اند. همچنین، ۴۰ درصد ایستگاه‌ها در لایه سطحی و ۱۰ درصد در لایه‌های عمیق‌تر میانگین غلظت بالاتر از ۱ ppb داشتند (شکل ۵).

در نمونه‌برداری‌های بهار، بیشترین غلظت CDOM در ایستگاه‌های ۳۰ (نزدیک هتل کارکنان پتروشیمی مبین) و ۲۱ (کنار آب خنک‌کننده پتروشیمی کاویان) با مقادیر ۶۳/۲۷ و ۲۹/۳۵ ppb ثبت شد. از بین ۳۰ ایستگاه، هفت ایستگاه غلظتی بالاتر از ۲ ppb داشتند.

در منطقه صنعتی، بیشترین غلظت در زمستان در ایستگاه ۱۷ (نزدیک خنک‌کننده پتروشیمی کاویان) و در بهار در ایستگاه ۳۰ (حدود ۴۰۰ متر از هتل کارکنان مبین) و اطراف جزایر مرجانی مشاهده شد. کمترین غلظت‌ها در زمستان و بهار به ترتیب در ایستگاه‌های ۳۰ و ۹ (نزدیک بندر عسلویه و پارک ملی نخل تقی) ثبت گردید.



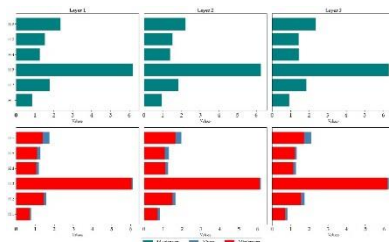
بهار

زمستان

شکل ۵. نمودار توزیع مکانی زمانی CDOM در منطقه صنعتی (منبع: یافته‌های تحقیق)

حرا

نمونه‌برداری زمستانی در منطقه حرا به دلیل شرایط خاص و عمق پایین آب فقط در سه ایستگاه انجام شد. بیشترین میانگین غلظت CDOM در ایستگاه انتهایی محل تخلیه پساب ثبت شد، پس از آن ایستگاه مرکزی جنگل حرا و در نهایت ایستگاه ورودی جنگل حرا با کمترین مقدار قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها در عمقی کمتر از یک متر گرفته شدند.



شکل ۶. نمودار توزیع مکانی زمانی CDOM در منطقه حرا (منبع: یافته‌های تحقیق)

در فصل بهار نیز بیشینه غلظت CDOM در ایستگاه شماره ۳، در نزدیکی کمپ مسکونی پتروشیمی آریاساسول، با مقدار ۶/۲۷ مشاهده شد. در فصل زمستان نیز ایستگاه ۳۱ در بطن جنگل‌های حرا بیشترین غلظت را به خود اختصاص داد. کمترین مقادیر CDOM در هر دو فصل در ایستگاه ورودی جنگل ثبت شد و بالاترین غلظت‌ها در نقطه تخلیه پساب مشاهده گردیدند. این نتایج در جدول‌های ۱ و ۳ و شکل ۶ ارائه شده‌اند.

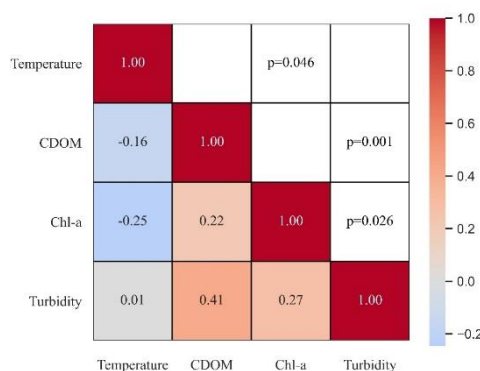
براساس جدول ۳، غلظت CDOM در زمستان در همه مناطق بیشتر از بهار است که احتمالاً به دلیل کاهش تجزیه نوری و پخش کمتر مواد آلی در آب سردتر می‌باشد. بیشترین غلظت در نزدیکی ساحل و منابع آلودگی انسانی و صنعتی دیده می‌شود. در مناطق صنعتی و نایبند، اثرات آلودگی به‌وضوح مشاهده شده و در منطقه حرا، بیشترین مقدار CDOM نزدیک تخلیه فاضلاب و کمترین آن در ورودی جنگل ثبت شده است.

ارتباط CDOM با پارامترهای بیوفیزیکی

نتایج تحلیل آماری (شکل ۷) نشان داد که بین CDOM با دمای آب و کلروفیل a همبستگی معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود ندارد ($r = -0.16$ و $r = 0.22$). با این حال، همبستگی متوسط و معناداری در سطح ۹۹ درصد بین CDOM و کدورت آب مشاهده شد ($r = 0.41$)، که بیانگر وابستگی قابل توجه CDOM به تغییرات کدورت در این اکوسیستم‌های آبی است.

جدول ۳. مقایسه فصلی و مکانی مقادیر CDOM (ppb) در مناطق مختلف مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق)

منطقه	فصل	حداکثر CDOM	موقعیت پیشینه	حداقل CDOM	موقعیت کمینه
۴. شمال	زمستان	۷۷/۰۳	ایستگاه ۳ (سطح آب)	۰	ایستگاه‌های ۱، ۴ و ۵ (سطح آب)
	بهار	۱۹/۱۶	ایستگاه ۱ (سطح آب)	۰	ایستگاه‌های ۳ و ۵
۵. جنوب	زمستان	۸۳	ایستگاه ۱۸ در نزدیکی اسکله هاله (سطح آب)	۰	ایستگاه‌های ۲، ۵، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱۴ و ۱۷ (سطح آب)
	بهار	۶/۳۱	ایستگاه ۱ دماغه خلیج (ستون آب)	۰	ایستگاه ۸ (سطح آب)، ۱۶، ۱۹ و ۲۸ (بستر)
۶. جنوب غربی	زمستان	۵۷/۲۹	ایستگاه ۱۷ در نزدیکی مجتمع پتروشیمی کاویان (سطح آب)	۰	ایستگاه‌های شماره ۲ (ستون آب)، ۳ و ۱۲ (لایه سطحی)
	بهار	۶۳/۲۷	ایستگاه ۳۰ روبروی شیرینو-مرجان، هتل کارکنان پتروشیمی مبین (سطح آب)	۰	ایستگاه ۳۰ روبروی شیرینو-مرجان، هتل کارکنان پتروشیمی مبین (سطح آب)
	زمستان	۳/۹۸	ایستگاه ۳۱ در بطن جنگل‌های حرای عسلویه (سطح آب)	۰/۴۲	ایستگاه ۳۰
	بهار	۶/۳۱	ایستگاه ۳ خوابگاه پتروشیمی آریاساسول (بستر آب)	۰/۷	ایستگاه ۱، ورودی حرا (سطح آب)



شکل ۷. ماتریس همبستگی متغیرهای بیوفیزیکی-شیمیایی در منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق)

بحث

مقادیر CDOM در مناطق مختلف تحت تأثیر عوامل محیطی و منابع انسانی، نوسانات زیادی داشته‌اند. براساس داده‌های میدانی (جدول‌های ۱ و ۳) و مطالعات پیشین، منشأهای احتمالی CDOM شناسایی شده‌اند. در منطقه نایبند، بیشترین غلظت CDOM در نزدیکی اسکله‌های هاله و نخل‌تقی مشاهده شد. افزایش زمستانی CDOM احتمالاً به‌دلیل رواناب‌های غنی از مواد آلی پس از بارش‌های فصلی بوده است (Khozayemehnezhad & Nazeri Tahroudi, 2019)، مشابه نتایج گزارش‌شده در کالدونیای جدید (Dupouy et al., 2020)، همچنین، فعالیت‌های انسانی و لایروبی مداوم (Minu et al., 2014) ممکن است در این افزایش نقش داشته باشند. یکی از عوامل مؤثر در نواحی ساحلی، تخلیه SGD است (Blanco et al., 2011; Nelson et al., 2015; Suryaputra et al., 2015). پتانسیل وجود SGD در اطراف اسکله هاله و جنگل‌های حرای عسلویه گزارش شده و ایستگاه‌های ۱۵، ۱۸ و ۳۱ (در نایبند و حرا) از مناطق کلیدی تخلیه به‌شمار می‌روند (نظری، سامانی و منبری، ۱۳۹۶؛ نظری، سامانی و فیض‌نیا، ۱۳۹۶؛ Samani, Farzin & Rahmati, 2021). بدیهی است که بیشتر ریزمغذی‌ها در نواحی ساحلی و در فاصله‌ای نزدیک تا حدود ۵ کیلومتری تحت تأثیر SGD قرار دارند (Hwang et al., 2016; Samani et al., 2021). این فرآیند از بُعد اکولوژیکی موجب ورود ریزمغذی‌ها و آلاینده‌ها به ویژه در مناطق خلیجی می‌شود (Hwang et al., 2016; Russoniello et al., 2016; Samani et al., 2021). ترکیبات آلی محلول ناشی از خاک و پوشش گیاهی نیز از این طریق وارد آب می‌شوند (Fichot & Benner, 2012; Tedetti et al., 2011). پس از نایبند، منطقه حرا در جایگاه دوم از نظر غلظت CDOM قرار دارد. این ترکیبات می‌توانند بر رشد و تنفس ریشه حرا اثرگذار باشند (Kristensen et al., 2008). در شرایط بی‌هوازی جنگل‌های حرا، تجمع مواد آلی و شکل‌گیری منافذ آنوکسیک، همراه با فعالیت‌های میکروبی مبتنی بر اکسیدهای منگنز و آهن، از عوامل مؤثر در افزایش

CDOM محسوب می‌شود (Mori et al., 2019; Reading et al., 2017). در شرایط بی‌هوازی، اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز و آهن می‌توانند به‌عنوان گیرنده‌های الکترون برای فرآیندهای میکروبی عمل کنند (Froelich et al., 1979). همچنین، جریان‌های جزر و مدی با جابه‌جایی متناوب آب و مواد آلاینده بین خشکی و دریا، در افزایش CDOM نقش دارند (Statham, 2012). نقطه برداشت میانگین حداکثر CDOM در حرا در مجاورت محل SGD و در نزدیکی خوابگاه پتروشیمی آریاساسول قرار دارد که احتمالاً تحت تأثیر پساب و فعالیت‌های انسانی است. از سوی دیگر، خاصیت جذب نوری CDOM مانع نفوذ نور به لایه‌های زیرین آب شده و می‌تواند فرآیندهای اکولوژیکی در عمق، به‌ویژه فتوسنتز را مختل کند (D'Sa et al., 2021; Manuel et al., 2021). بنود به‌عنوان منطقه‌ای بکر با صخره‌های مرجانی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاص فاقد جریان ورودی از خشکی است که به‌عنوان منطقه شاهد انتخاب شد. بیشترین غلظت CDOM در نزدیکی زیستگاه‌های مرجانی و تحت تأثیر عوامل محیطی و زیستی متنوع مشاهده شد (Ahmadi et al., 2025a; Archibald et al., 2019). در این اکوسیستم‌ها، CDOM از تجزیه مواد گیاهی و آبی و فرآیندهایی مانند تثبیت نیتروژن ناشی می‌شود (Larkum et al., 1988; Wiebe et al., 1975; Zepp et al., 2008). همچنین، ذرات کربنات معلق حاصل از کلسیفیکاسیون صخره‌ها می‌توانند در افزایش CDOM نقش داشته باشند (Stoddart, 1969). ترکیب ذرات آلی و معدنی در آب‌های پیرامون صخره‌ها متغیر است و ویژگی‌های طیفی CDOM را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Charpy et al., 1997; Russell et al., 2019). پولپ‌های مرجانی و موجودات وابسته، منابع تولید رسوبات کربناته، مواد آلی محلول و ترکیبات تریپتوفان هستند (Haas et al., 2013; Haas et al., 2011). انحلال کربنات کلسیم به‌طور مستقیم بر CDOM تأثیر ندارد، اما تخریب زیستی صخره‌ها و جلبک‌ها و همچنین فلزات نیکل، کبالت و منگنز موجود در صخره‌ها با اتصال به CDOM، ویژگی‌های نوری آن را تغییر می‌دهند (Martias et al., 2018). از دیگر عوامل مؤثر می‌توان به اکسیداسیون نوری، جزر و مد، و بازچرخش آب در میان رسوبات نفوذپذیر اشاره کرد که موجب تغییر در غلظت CDOM می‌شوند. به‌طور کلی، حضور CDOM در مناطق مرجانی نتیجه تعامل پیچیده‌ای از ورودی‌های زمینی، فعالیت‌های زیستی و شرایط محیطی است (Archibald et al., 2019). با افزایش CDOM، نفوذ نور کاهش یافته و در نتیجه، رشد و تولید اولیه مرجان‌ها محدود می‌شود (Chen & Mohammadpour & Pirasteh, 2021; D'Sa et al., 2021; Manuel et al., 2021; Zhu, 2022). در منطقه ویژه اقتصادی پارس جنوبی، حضور ۸ پالایشگاه، ۱۶ فاز عملیاتی و بیش از ۲۷ واحد پتروشیمی، تأثیرات گسترده‌ای بر اکوسیستم دریایی دارند (Ahmadi et al., 2025b). بیشترین غلظت CDOM در نزدیکی محل تخلیه آب‌های خنک‌کننده پتروشیمی کاویان ثبت شده است؛ جایی که همچنین غلظت فلزات سنگین به‌طور معناداری از حدود استاندارد فراتر رفته است (Bigharaz et al., 2015). ورود پساب‌های صنعتی به آب‌های ساحلی باعث افزایش قابل‌توجه آلودگی ناشی از هیدروکربن‌ها و فلزات سنگین در این منابع آبی شده است (Bigharaz et al., 2015). فلزاتی مانند روی، مس، کادمیوم، نیکل، کروم و آهن در این منطقه بیشترین غلظت را داشته و با گروه‌های عاملی CDOM واکنش داده، باعث افزایش پایداری و تغییر ویژگی‌های طیفی و فلورسانس آن می‌شوند (Weng et al., 2002). فلزات سنگین فعالیت میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده مواد آلی را کاهش داده و در نتیجه، سبب ماندگاری بیشتر CDOM در آب می‌شوند (Sandrin & Maier, 2003). افزایش میزان کل مواد جامد محلول^۱ (TDS) نیز با افزایش CDOM ارتباط دارد و ممکن است از طریق تحریک رشد جلبک‌ها، کاهش تجزیه زیستی، و افزایش حلالیت ناشی از حضور یون‌هایی چون سدیم، منجر به تجمع بیشتر CDOM شود (Boehm & Quinn, 2016; Li et al., 2019; Song et al., 1973). از سوی دیگر، کاهش پتانسیل اسمزی ناشی از شوری بالا، فعالیت‌های میکروبی را محدود کرده و تجزیه CDOM را کاهش می‌دهد (Belkin et al., 2015; Wen et al., 2016). عناصر منگنز و باریم نیز که از فعالیت‌های انسانی ناشی می‌شوند، با واکنش به گروه‌های عاملی CDOM، در افزایش غلظت آن نقش دارند (Holloway et al., 2016; Mori et al., 2019). ترکیبات آلی حاوی منگنز و باریم، به دلیل برخورداری از گروه‌های عاملی نظیر کربوکسیلیک و فنلی، با این عناصر واکنش نشان داده و منجر به افزایش غلظت CDOM در محیط می‌شوند (Blazevic et al., 2016; Wang et al., 2024). با وجود همه این عوامل افزایش‌دهنده، برخلاف انتظار، مقادیر CDOM در منطقه صنعتی کمتر از سایر مناطق برآورد شده است. این نتایج با یافته‌های (Shao et al., 2023)

هم‌راستا است که به تأثیر فصل‌ها نیز اشاره دارد. علت این کاهش می‌تواند به فرآیندهای فیزیکی مانند لخته‌سازی، اتصال CDOM به ذرات معلق و ته‌نشینی آن‌ها مربوط باشد (Jokinen et al., 2020). همچنین، فرآیندهای بیولوژیکی مانند مصرف CDOM توسط میکروارگانیسم‌ها برای تأمین انرژی و کربن می‌تواند نقش مهمی در کاهش غلظت این مؤلفه در منطقه صنعتی داشته باشد (Ahmadi et al., 2025b). فرآیندهای فتوشیمیایی ناشی از تابش خورشید، مانند تجزیه CDOM، نقش مهمی در کاهش غلظت این مؤلفه نوری دارند (Zhou et al., 2015; Helms et al., 2014). همچنین، اکسیداسیون یا کانی‌سازی مواد آلی به دی‌اکسیدکربن و آب، بازگشت مواد مغذی و کربن به اکوسیستم را ممکن می‌سازد (Yan et al., 2021). ترکیبات شیمیایی مختلف، از جمله آلاینده‌ها، می‌توانند با تأثیر بر زیست‌توده فیتوپلانکتونی که منبع مهمی از CDOM است، رشد و بقای این موجودات را کاهش دهند. این امر نه تنها تولید CDOM را کاهش می‌دهد، بلکه تعادل اکوسیستم و فرآیندهای زیست‌شیمیایی وابسته به CDOM را نیز مختل می‌کند (Ahmadi et al., 2020; García-Nieto et al., 2024). در اکوسیستم‌های آبی، کلروفیل a به عنوان شاخص تولید اولیه فیتوپلانکتونی شناخته می‌شود و معمولاً افزایش آن با افزایش CDOM همراه است، زیرا فیتوپلانکتون‌ها با تولید و ترشح مواد آلی، تغییرات CDOM را شکل می‌دهند (Bai et al., 2015; Tzortziou et al., 2022; Bhattacharya & Osburn, 2020). اما در این مطالعه، رابطه معناداری بین این دو مشاهده نشد که نشان می‌دهد منابع اصلی CDOM بیشتر از ورود مواد آلی خارجی ناشی می‌شوند تا تولید زیستی داخلی (Ahmadi et al., 2024). از سوی دیگر، همبستگی مثبت و معنادار CDOM با کدورت آب، نشان‌دهنده نقش پررنگ‌تر فرآیندهای فیزیکی و هیدرودینامیکی مانند فرسایش خاک، تجزیه مواد آلی و حمل‌ونقل رسوبات در تغییرات CDOM است (Das et al., 2016; Farjalla et al., 2009; Fonte et al., 2013).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که غلظت CDOM در مناطق ساحلی به‌طور معناداری بالاتر از نواحی دور از ساحل است؛ این تفاوت عمدتاً ناشی از ورود رواناب‌های سطحی، ریزمغذی‌ها، مواد آلی از گیاهان، و نیز حضور SGD در مناطقی چون نایبند و جنگل‌های حرای عسلویه است. مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در ایستگاه‌های ۱۸، ۱۵ و ۳۱، بیشترین سطح CDOM را ثبت کرده‌اند که به منابعی چون فاضلاب شهری، فعالیت اسکله‌ها، تأسیسات نفتی و رشد و تجزیه زیست‌توده در جنگل‌های حرای بین‌جزرومدی نسبت داده می‌شود. اگرچه منطقه صنعتی با وجود مجاورت با تأسیسات پالایشگاهی غلظت CDOM بالایی را نشان می‌دهد، اما میانگین آن پایین‌تر از منطقه حرا و نایبند بوده که ممکن است تحت تأثیر فرآیندهای فیزیکوشیمیایی مانند تجزیه نوری، اختلاط آبی، لخته‌سازی و افزایش شوری قرار گرفته باشد. در مقابل، منطقه بنود به‌عنوان ناحیه شاهد با کمترین مداخلات انسانی، پایین‌ترین میانگین CDOM را داشته است. در راستای کاهش CDOM و بهبود کیفیت آب در این اکوسیستم‌های حساس، پیشنهاد می‌شود پایش مداوم و دقیق کیفیت آب در مناطق ساحلی و صنعتی انجام شود، فناوری‌های تصفیه پیشرفته در خروجی فاضلاب‌ها مستقر گردد، مقررات سخت‌گیرانه‌تری برای کنترل آلاینده‌های صنعتی تدوین و اعمال شود، حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی مانند جنگل‌های حرا و جزایر مرجانی تقویت گردد و در نهایت، با توسعه پژوهش‌های میان‌رشته‌ای و ارتقای همکاری میان نهادهای اجرایی، پژوهشی و نظارتی، مدیریت یکپارچه منابع ساحلی دنبال شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: بنیاد احمدی، مهدی غلامعلی‌فرد، سید محمود قاسمپوری؛ طراحی پژوهش: مهدی غلامعلی‌فرد، سید محمود قاسمپوری؛ تحلیل و تفسیر داده‌ها: بنیاد احمدی، بصری‌سازی: بنیاد احمدی، مریم نقدی؛ تهیه پیش‌نویس اولیه مقاله: بنیاد احمدی، مریم نقدی؛ نگارش بخش‌های

تخصصی (مرور ادبیات، روش‌شناسی، نتایج و بحث): بنیاد احمدی، مریم نقدی؛ نظارت بر پژوهش و راهنمایی تخصصی: مهدی غلامعلی فرد (استاد راهنما)، سید محمود قاسمپوری (استاد مشاور)؛ پاسخ به داوران: بنیاد احمدی، مریم نقدی؛ تأیید نسخه نهایی: مهدی غلامعلی فرد؛ پشتیبانی مالی: علی صابر، سهراب مظلومی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نگارش حاضر از محل اعتبار پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس در قالب رساله دکتری با کد رهگیری ایرانداک ۱۷۶۶۷۳۹ تأمین گردیده است. همچنین بخشی از نتایج طرح پژوهشی تحت عنوان «بررسی تغییرات محیطی و ارزیابی ریسک زیستگاهی در محدوده ساحلی - دریایی پارس جنوبی» به قرارداد شماره ۲۳۴/ص/۱۴۰۱ مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۳۰ است که بدین وسیله مراتب سپاسگزاری و قدردانی بابت حمایت مالی و تسهیل انجام پژوهش از معاونت دریایی و تالاب‌ها سازمان حفاظت محیط‌زیست (دفتر حفاظت از زیست‌بوم‌ها و سواحل دریایی) و دانشگاه تربیت مدرس، ابراز می‌گردد. همچنین از آقایان دکتر سید حسن موسوی، مهندس پوریا سپهوند و مهندس نبی الله خیرآبادی، بابت همراهی و مشارکت در کار میدانی و آقایان دکتر مهدی تنه‌ایزرتی و دکتر احمد ترسلی بابت تسهیلات و هماهنگی‌های اداری و سازمانی تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., Ghasempouri, S. M., & Kutser, T. (2025a). Comparative analysis of k-nearest neighbors distance metrics for retrieving coastal water quality based on concurrent in situ and satellite observations. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117816. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117816>
- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., Ghasempouri, S. M., & Kutser, T. (2025b). Comparative assessment of machine learning algorithms for retrieving colored dissolved organic matter (CDOM) from Sentinel-2/MSI images in the coastal waters of the Persian Gulf. *Ecological Informatics*, 103171. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103171>
- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., Kutser, T., Vignudelli, S., & Kostianoy, A. (2020). Spatio-temporal variability in bio-optical properties of the southern caspian sea: A historic analysis of ocean color data. *Remote Sensing*, 12(23), 3975. <https://doi.org/10.3390/rs12233975>
- Ahmadi, B., Gholamalifard, M., Naghdi, M., & Kostianoy, A. G. (2024). Improvement of bio-optical characteristics of seawater in the Southern Caspian Sea Basin triggered by COVID-19 lockdowns: Insights from remote sensing data. *Ecologica Montenegrina*, 76, 133-153. <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.8>
- Archibald, J. P., Santos, I. R., & Davis, K. L. (2019). Diel versus tidal cycles of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and radon in a coral reef in the Great Barrier Reef. *Regional studies in marine science*, 29, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100659>
- Bai, L., Liu, X., Hua, K., Deng, J., Wang, C., Jiang, H., & Wang, A. (2022). Seasonal variations of fluorescent dissolved organic matter control estrone biodegradation potential in eutrophic waters affected by allochthonous and autochthonous sources. *Journal of Hydrology*, 612, 128227. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128227>
- Belkin, N., Rahav, E., Elifantz, H., Kress, N., & Berman-Frank, I. (2015). Enhanced salinities, as a proxy of seawater desalination discharges, impact coastal microbial communities of the eastern Mediterranean Sea. *Environmental microbiology*, 17(10), 4105-4120. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12979>
- Bhattacharya, R., & Osburn, C. L. (2020). Spatial patterns in dissolved organic matter composition controlled by watershed characteristics in a coastal river network: The Neuse River Basin, USA. *Water research*, 169, 115248. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115248>
- Bigharaz, M., Almasi, Z., & Nasrabdi, M. (2015). Exploring and evaluating health, safety and environment conditions of oil industry staff in southern pars special economic energy zone as a result of oil, gas, and petrochemical industry development. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 7, 202-213. <https://innspub.net/exploring-and-evaluating-health-safety-and-environment-conditions-of-oil-industry-staff-in-southern-pars-special-economic-energy-zone-as-a-result-of-oil-gas-and-petrochemical-industry-development/>
- Blanco, A. C., Watanabe, A., Nadaoka, K., Motooka, S., Herrera, E. C., & Yamamoto, T. (2011). Estimation of nearshore groundwater discharge and its potential effects on a fringing coral reef. *Marine Pollution Bulletin*, 62(4), 770-785. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.01.005>
- Blazevic, A., Orlowska, E., Kandioller, W., Jirsa, F., Keppler, B. K., Tafili-Kryeziu, M., Linert, W., Krachler, R. F., Krachler, R., & Rempel, A. (2016). Photoreduction of terrigenous Fe-humic substances leads to bioavailable iron in oceans. *Angewandte Chemie*, 128(22), 6527-6532. <https://doi.org/10.1002/ange.201600852>
- Boehm, P. D., & Quinn, J. G. (1973). Solubilization of hydrocarbons by the dissolved organic matter in sea water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(11), 2459-2477. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90292-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90292-5)
- Bouillon, S., Frankignoulle, M., Dehairs, F., Velimirov, B., Eiler, A., Abril, G., Etcheber, H., & Borges, A. V. (2003). Inorganic and organic carbon biogeochemistry in the Gautami Godavari estuary (Andhra Pradesh, India) during pre-monsoon: The local impact of extensive mangrove forests. *Global biogeochemical cycles*, 17(4). <https://doi.org/10.1029/2002GB002026>
- Bushaw, K. L., Zepp, R. G., Tarr, M. A., Schulz-Jander, D., Bourbonniere, R. A., Hodson, R. E., Miller, W. L., Bronk, D. A., & Moran, M. A. (1996). Photochemical release of biologically available nitrogen from aquatic dissolved organic matter. *Nature*, 381(6581), 404-407. <https://doi.org/10.1038/381404a0>
- Butturini, A., Herzsprung, P., Lichtenfeld, O., Alcorlo, P., Benaiges-Fernandez, R., Berlanga, M., Boadella, J., Campillo, Z. F., Gomez, R., & Sanchez-Montoya, M. d. M. (2022). Origin, accumulation and fate of dissolved organic matter in an extreme hypersaline shallow lake. *Water research*, 221, 118727. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118727>

- Cao, W., Guan, Q., Li, Y., Wang, M., & Liu, B. (2017). The contribution of denitrification and anaerobic ammonium oxidation to N₂ production in mangrove sediments in Southeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 17, 1767-1776. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1653-0>
- Cawley, K. M., Ding, Y., Fourqurean, J., & Jaffé, R. (2012). Characterising the sources and fate of dissolved organic matter in Shark Bay, Australia: a preliminary study using optical properties and stable carbon isotopes. *Marine and Freshwater Research*, 63(11), 1098-1107. <https://doi.org/10.1071/MF12028>
- Charette, M. A., Sholkovitz, E. R., & Hansel, C. M. (2005). Trace element cycling in a subterranean estuary: Part 1. Geochemistry of the permeable sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(8), 2095-2109. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.10.019>
- Charpy, L., Dufour, P., & Garcia, N. (1997). Particulate organic matter in sixteen Tuamotu atoll lagoons (French Polynesia). *Marine Ecology Progress Series*, 151, 55-65. <https://doi.org/10.3354/meps151055>
- Chen, J., & Zhu, W. (2022). Consistency evaluation of landsat-7 and landsat-8 for improved monitoring of colored dissolved organic matter in complex water. *Geocarto International*, 37(1), 91-102. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1734872>
- Coble, P. G., Del Castillo, C. E., & Avril, B. (1998). Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 45(10-11), 2195-2223. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)00068-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)00068-X)
- Conley, D. J., Paerl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. F., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Lancelot, C., & Likens, G. E. (2009). Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. In (Vol. 323, pp. 1014-1015): American Association for the Advancement of Science. DOI: 10.1126/science.1167755
- D'Sa, E. J., Kim, H.-C., Ha, S.-Y., & Joshi, I. (2021). Ross Sea dissolved organic matter optical properties during an Austral summer: Biophysical influences. *Frontiers in Marine Science*, 8, 749096. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.749096>
- Das, S., Hazra, S., Lotlikar, A. A., Das, I., Giri, S., Chanda, A., Akhand, A., Maity, S., & Kumar, T. S. (2016). Delineating the relationship between chromophoric dissolved organic matter (CDOM) variability and biogeochemical parameters in a shallow continental shelf. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42(3), 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2016.08.001>
- Dittmar, T., Hertkorn, N., Kattner, G., & Lara, R. J. (2006). Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. *Global biogeochemical cycles*, 20 (1). <https://doi.org/10.1029/2005GB002570>
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature climate change*, 3(11), 961-968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Dupouy, C., Röttgers, R., Tedetti, M., Frouin, R., Lantoine, F., Rodier, M., Martias, C., & Goutx, M. (2020). Impact of contrasted weather conditions on CDOM absorption/fluorescence and biogeochemistry in the eastern lagoon of New Caledonia. *Frontiers in Earth Science*, 8, 54. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00054>
- Farjalla, V. F., Marinho, C. C., Faria, B. M., Amado, A. M., Esteves, F. d. A., Bozelli, R. L., & Girollo, D. (2009). Synergy of fresh and accumulated organic matter to bacterial growth. *Microbial Ecology*, 57, 657-666. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9466-8>
- Fichot, C. G. & Benner, R. (2012). The spectral slope coefficient of chromophoric dissolved organic matter (S₂₇₅₋₂₉₅) as a tracer of terrigenous dissolved organic carbon in river-influenced ocean margins. *Limnology and Oceanography*, 57(5), 1453-1466. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.5.1453>
- Fonte, E. S., Amado, A. M., Meirelles-Pereira, F., Esteves, F. A., Rosado, A. S., & Farjalla, V. F. (2013). The combination of different carbon sources enhances bacterial growth efficiency in aquatic ecosystems. *Microbial Ecology*, 66, 871-878. <https://doi.org/10.1007/s00248-013-0277-1>
- Froelich, P. N., Klinkhammer, G., Bender, M. L., Luedtke, N., Heath, G. R., Cullen, D., Dauphin, P., Hammond, D., Hartman, B., & Maynard, V. (1979). Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(7), 1075-1090. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90095-4)
- García-Nieto, P. J., García-Gonzalo, E., Fernández, J. R. A., & Muñiz, C. D. (2024). Forecast of chlorophyll-a concentration as an indicator of phytoplankton biomass in El Val reservoir by utilizing various machine learning techniques: a case study in Ebro river basin, Spain. *Journal of Hydrology*, 639, 131639. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131639>
- Haas, A. F., Nelson, C. E., Rohwer, F., Wegley-Kelly, L., Quistad, S. D., Carlson, C. A., Leichter, J. J., Hatay, M., & Smith, J. E. (2013). Influence of coral and algal exudates on microbially mediated reef metabolism. *PeerJ*, 1, e108. <https://doi.org/10.7717/peerj.108>

- Haas, A. F., Nelson, C. E., Wegley Kelly, L., Carlson, C. A., Rohwer, F., Leichter, J. J., Wyatt, A., & Smith, J. E. (2011). Effects of coral reef benthic primary producers on dissolved organic carbon and microbial activity. *PloS one*, 6(11), e27973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027973>
- Helms, J. R., Mao, J., Stubbins, A., Schmidt-Rohr, K., Spencer, R. G., Hernes, P. J., & Mopper, K. (2014). Loss of optical and molecular indicators of terrigenous dissolved organic matter during long-term photobleaching. *Aquatic sciences*, 76, 353-373. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0340-0>
- Holloway, C. J., Santos, I. R., Tait, D. R., Sanders, C. J., Rose, A. L., Schnetger, B., Brumsack, H.-J., Macklin, P. A., Sippo, J. Z., & Maher, D. T. (2016). Manganese and iron release from mangrove porewaters: a significant component of oceanic budgets? *Marine Chemistry*, 184, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2016.05.013>
- Hwang, D.-W., Lee, I.-S., Choi, M., & Kim, T.-H. (2016). Estimating the input of submarine groundwater discharge (SGD) and SGD-derived nutrients in Geoje Bay, Korea using ²²²Rn-Si mass balance model. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.073>
- Jokinen, S. A., Jilbert, T., Tiitonen-Filppula, R., & Koho, K. (2020). Terrestrial organic matter input drives sedimentary trace metal sequestration in a human-impacted boreal estuary. *Science of the total environment*, 717, 137047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137047>
- Khozayemhnezhad, H., & Nazeri Tahroudi, M. (2019). Annual and seasonal distribution pattern of rainfall in Iran and neighboring regions. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4442-9>
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T., & Marchand, C. (2008). Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: a review. *Aquatic botany*, 89(2), 201-219. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.005>
- Larkum, A., Kennedy, I., & Muller, W. (1988). Nitrogen fixation on a coral reef. *Marine Biology*, 98, 143-155. <https://doi.org/10.1007/BF00392669>
- Letscher, R. T., Knapp, A. N., James, A. K., Carlson, C. A., Santoro, A. E., & Hansell, D. A. (2015). Microbial community composition and nitrogen availability influence DOC remineralization in the South Pacific Gyre. *Marine Chemistry*, 177, 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2015.06.024>
- Liu, D., Du, Y., Yu, S., Luo, J., & Duan, H. (2020). Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River. *Water research*, 168, 115132. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115132>
- Manuel, A., Blanco, A., & Cabrera, O. (2021). Mapping Coloured Dissolved Organic Matter in Manila Bay Using SENTINEL-3 and Wasi. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 207-212. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W6-2021-207-2021>
- Marcelli, M., Piermattei, V., Madonia, A., & Mainardi, U. (2014). Design and application of new low-cost instruments for marine environmental research. *Sensors*, 14(12), 23348-23364. <https://doi.org/10.3390/s141223348>
- Martias, C., Tedetti, M., Lantoiné, F., Jamet, L., & Dupouy, C. (2018). Characterization and sources of colored dissolved organic matter in a coral reef ecosystem subject to ultramafic erosion pressure (New Caledonia, Southwest Pacific). *Science of the total environment*, 616, 438-452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.261>
- McKnight, D. M., Boyer, E. W., Westerhoff, P. K., Doran, P. T., Kulbe, T., & Andersen, D. T. (2001). Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnology and Oceanography*, 46(1), 38-48. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.1.0038>
- Minu, P., Lotliker, A. A., Shaju, S., SanthoshKumar, B., Ashraf, P. M., & Meenakumari, B. (2014). Effect of optically active substances and atmospheric correction schemes on remote-sensing reflectance at a coastal site off Kochi. *International journal of remote sensing*, 35(14), 5434-5447. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.926420>
- Mohammadpour, G., & Pirasteh, S. (2021). Interference of CDOM in remote sensing of suspended particulate matter (SPM) based on MODIS in the Persian Gulf and Oman Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 113104. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113104>
- Moore, W. S. (2010). The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Annual review of marine science*, 2, 59-88. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081019>
- Mori, C., Santos, I. R., Brumsack, H.-J., Schnetger, B., Dittmar, T., & Seidel, M. (2019). Non-conservative behavior of dissolved organic matter and trace metals (Mn, Fe, Ba) driven by porewater exchange in a subtropical mangrove-estuary. *Frontiers in Marine Science*, 6, 481. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00481>
- Nelson, C. E., Donahue, M. J., Dulaiova, H., Goldberg, S. J., La Valle, F. F., Lubarsky, K., Miyano, J., Richardson, C., Silbiger, N. J., & Thomas, F. I. (2015). Fluorescent dissolved organic matter as a multivariate biogeochemical tracer of submarine groundwater discharge in coral reef ecosystems. *Marine Chemistry*, 177, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2015.06.026>

- Nieto-Cid, M., Álvarez-Salgado, X. A., & Pérez, F. F. (2006). Microbial and photochemical reactivity of fluorescent dissolved organic matter in a coastal upwelling system. *Limnology and Oceanography*, 51(3), 1391-1400. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.3.1391>
- NO, G., MANUALS, I., & NO, G. (2004). Submarine groundwater discharge.
- Osburn, C. L., Retamal, L., & Vincent, W. F. (2009). Photoreactivity of chromophoric dissolved organic matter transported by the Mackenzie River to the Beaufort Sea. *Marine Chemistry*, 115 (1-2), 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2009.05.003>
- Reading, M. J., Santos, I. R., Maher, D. T., Jeffrey, L. C., & Tait, D. R. (2017). Shifting nitrous oxide source/sink behaviour in a subtropical estuary revealed by automated time series observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 194, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.05.017>
- Russell, B. J., Dierssen, H. M., & Hochberg, E. J. (2019). Water column optical properties of Pacific coral reefs across geomorphic zones and in comparison to offshore waters. *Remote Sensing*, 11(15), 1757. <https://doi.org/10.3390/rs11151757>
- Russoniello, C. J., Konikow, L. F., Kroeger, K. D., Fernandez, C., Andres, A. S., & Michael, H. A. (2016). Hydrogeologic controls on groundwater discharge and nitrogen loads in a coastal watershed. *Journal of Hydrology*, 538, 783-793. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.013>
- Samani, A. N., Farzin, M., Rahmati, O., Feiznia, S., Kazemi, G. A., Foody, G., & Melesse, A. M. (2021). Scrutinizing relationships between submarine groundwater discharge and upstream areas using thermal remote sensing: A case study in the northern Persian gulf. *Remote Sensing*, 13(3), 358. <https://doi.org/10.3390/rs13030358>
- Sandrin, T. R., & Maier, R. M. (2003). Impact of metals on the biodegradation of organic pollutants. *Environmental Health Perspectives*, 111(8), 1093-1101. <https://doi.org/10.1289/ehp.5840>
- Shao, T., Liang, X., Zhuang, D., Zheng, K., & Wang, T. (2023). Seasonal variations in CDOM characteristics and effects of environmental factors in coastal rivers, Northeast China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(11), 29052-29064. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24165-4>
- Shao, T., Song, K., Du, J., Zhao, Y., Ding, Z., Guan, Y., Liu, L. & Zhang, B. (2016). Seasonal variations of CDOM optical properties in rivers across the Liaohe Delta. *Wetlands*, 36, 181-192. <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0622-2>
- Sippo, J. Z., Maher, D. T., Tait, D. R., Holloway, C., & Santos, I. R. (2016). Are mangroves drivers or buffers of coastal acidification? Insights from alkalinity and dissolved inorganic carbon export estimates across a latitudinal transect. *Global biogeochemical cycles*, 30(5), 753-766. <https://doi.org/10.1002/2015GB005324>
- Song, K., Shang, Y., Wen, Z., Jacinthe, P.-A., Liu, G., Lyu, L., & Fang, C. (2019). Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis. *Water research*, 150, 403-417. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.004>
- Staehr, P. A., Testa, J., & Carstensen, J. (2017). Decadal changes in water quality and net productivity of a shallow Danish estuary following significant nutrient reductions. *Estuaries and Coasts*, 40, 63-79. <https://doi.org/10.1007/s12237-016-0117-x>
- Statham, P. J. (2012). Nutrients in estuaries—An overview and the potential impacts of climate change. *Science of the total environment*, 434, 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.088>
- Stedmon, C. A., Markager, S., Søndergaard, M., Vang, T., Laubel, A., Borch, N. H., & Windelin, A. (2006). Dissolved organic matter (DOM) export to a temperate estuary: seasonal variations and implications of land use. *Estuaries and Coasts*, 29, 388-400. <https://doi.org/10.1007/BF02784988>
- Stedmon, C. A., & Nelson, N. B. (2015). The optical properties of DOM in the ocean. In *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter* (pp. 481-508). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405940-5.00010-8>
- Stoddart, D. R. (1969). Ecology and morphology of recent coral reefs. *Biological Reviews*, 44(4), 433-498. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1969.tb00609.x>
- Suryaputra, I. G., Santos, I. R., Huettel, M., Burnett, W., & Dittmar, T. (2015). Non-conservative behavior of fluorescent dissolved organic matter (FDOM) within a subterranean estuary. *Continental Shelf Research*, 110, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.011>
- Tedetti, M., Cuét, P., Guigue, C., & Goutx, M. (2011). Characterization of dissolved organic matter in a coral reef ecosystem subjected to anthropogenic pressures (La Réunion Island, Indian Ocean) using multi-dimensional fluorescence spectroscopy. *Science of the total environment*, 409(11), 2198-2210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.058>
- Tzortziou, M., Neale, P. J., Megonigal, J. P., Pow, C. L., & Butterworth, M. (2011). Spatial gradients in dissolved carbon due to tidal marsh outwelling into a Chesapeake Bay estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 426, 41-56. <https://doi.org/10.3354/meps09017>

- Tzortziou, M., Zeri, C., Dimitriou, E., Ding, Y., Jaffé, R., Anagnostou, E., Pitta, E., & Mentzafou, A. (2015). Colored dissolved organic matter dynamics and anthropogenic influences in a major transboundary river and its coastal wetland. *Limnology and Oceanography*, 60 (4), 1222–1240. <https://doi.org/10.1002/lno.10092>
- Wang, H., Zhang, J., Li, Z., Shi, B., Li, S., & Huang, H. (2024). The new fate of MCLR revealed by dialysis equilibrium and theoretical calculations: Influence from DOM and Fe (II)/Mn (II). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12 (6), 114671. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114671>
- Wen, Z., Song, K., Zhao, Y., Du, J., & Ma, J. (2016). Influence of environmental factors on spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Inner Mongolia Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20 (2), 787–801. <https://doi.org/10.5194/hess-20-787-2016>
- Weng, L., Temminghoff, E. J., Lofts, S., Tipping, E., & Van Riemsdijk, W. H. (2002). Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil. *Environmental science & technology*, 36(22), 4804–4810. <https://doi.org/10.1021/es0200084>
- Wiebe, W., Johannes, R., & Webb, K. (1975). Nitrogen fixation in a coral reef community. *Science*, 188(4185), 257–259. DOI: 10.1126/science.188.4185.257
- Yamashita, Y., Tsukasaki, A., Nishida, T., & Tanoue, E. (2007). Vertical and horizontal distribution of fluorescent dissolved organic matter in the Southern Ocean. *Marine Chemistry*, 106(3–4), 498–509. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.05.004>
- Yan, L., Xie, X., Peng, K., Wang, N., Zhang, Y., Deng, Y., Gan, Y., Li, Q., & Zhang, Y. (2021). Sources and compositional characterization of chromophoric dissolved organic matter in a Hainan tropical mangrove-estuary. *Journal of Hydrology*, 600, 126572. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126572>
- Zepp, R. G., Shank, G. C., Stabenau, E., Patterson, K. W., Cyterski, M., Fisher, W., Bartels, E., & Anderson, S. L. (2008). Spatial and temporal variability of solar ultraviolet exposure of coral assemblages in the Florida Keys: Importance of colored dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*, 53(5), 1909–1922. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.5.1909>
- Zhao, Y., Song, K., Wen, Z., Fang, C., Shang, Y., & Lv, L. (2017). Evaluation of CDOM sources and their links with water quality in the lakes of Northeast China using fluorescence spectroscopy. *Journal of Hydrology*, 550, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.027>
- Zhou, Y., Jeppesen, E., Zhang, Y., Niu, C., Shi, K., Liu, X., Zhu, G., & Qin, B. (2015). Chromophoric dissolved organic matter of black waters in a highly eutrophic Chinese lake: freshly produced from algal scums? *Journal of Hazardous Materials*, 299, 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.024>