

بررسی کلروفیل و تأثیر متغیرهای جوی بر تغییرات آن در خلیج فارس و دریای عمان در دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۰

چکیده

کلروفیل‌های موجود در آب، به‌عنوان شاخصی از وضعیت زیستی، نقش مهمی در پایش سلامت اکوسیستم‌های دریایی و ارزیابی بهره‌وری اولیه ایفا نموده و تغییرات آنها می‌تواند بازتاب دهنده‌ی شرایط محیطی و کیفیت آب باشد. شناخت و درک رابطه بین خصوصیات زیستی از جمله کلروفیل در پهنه‌های آبی و کمیت‌های جوی به‌ویژه گردوخاک از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از مطالعه حاضر بررسی تغییرات غلظت کلروفیل و نحوه برهم‌کنش آن با کمیت‌های جوی در خلیج فارس و دریای عمان است. بدین منظور از داده‌های میانگین ماهانه غلظت کلروفیل، گردوخاک سطحی، دمای ۲ متری، سرعت باد ۱۰ متری و بارش از سری داده‌های MERRA-2 با تفکیک مکانی $0.625^{\circ} \times 0.48^{\circ}$ در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۲۰ استفاده شده است. توزیع زمانی ماهانه و سالانه هر یک از کمیت‌ها در هردو محدوده به‌طور مجزا بررسی شد. به‌منظور تحلیل چگونگی تأثیر عوامل جوی بر کلروفیل ضریب همبستگی اسپیرمن و پیرسون و همچنین روش رگرسیون چندگانه به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که غلظت کلروفیل در دریای عمان نسبت به خلیج فارس بیشتر بوده و داده‌ها پراکندگی بیشتری دارند. همچنین بیشترین و کمترین مقدار کلروفیل به ترتیب در دوره سرد و گرم سال به دست آمد. توزیع ماهانه کلروفیل و دیگر عوامل جوی به جز دما در خلیج فارس و دریای عمان متفاوت است. بررسی نتایج ضریب همبستگی اسپیرمن نشان داد که در خلیج فارس به ترتیب افزایش گردوخاک (-0.64)، افزایش دما (-0.48) و کاهش بارش ($+0.29$) منجر به کاهش کلروفیل شده و در دریای عمان افزایش دما (-0.75)، افزایش سرعت باد (-0.43) و افزایش گردوخاک (-0.28) منجر به کاهش کلروفیل شده است. با کار بست روش رگرسیون مهم‌ترین عوامل مؤثر در تغییر غلظت کلروفیل در خلیج فارس به ترتیب گردوخاک و دما و در دریای عمان به ترتیب دما و گردوخاک به دست آمد. تأثیر بارش و باد بر غلظت کلروفیل در دو پهنه آبی جنوب ایران به‌طور دقیق تعیین نشد، زیرا این عوامل می‌توانند اثر غیرمستقیم بر کلروفیل داشته یا آن‌که تأثیرگذاری‌شان با عامل‌های دیگر مانند دما مرتبط باشد.

واژگان کلیدی: کلروفیل موجود در آب، متغیرهای جوی، گردوخاک، داده‌های MERRA-2، خلیج فارس، دریای عمان.

مقدمه

جلبک‌ها با تنوع گسترده، ساده‌ترین گروه از موجودات حاوی کلروفیل به شمار می‌آیند. شکوفایی جلبکی به معنی رشد آبی یا انباشت تعداد جلبک‌ها در یک سیستم زیست آبی است که با پدیده افزایش جمعیت فیتوپلانکتون همراه بوده و می‌تواند در آب شیرین و یا در محیط‌های دریایی اتفاق افتد (ربانی‌ها و همکاران، ۱۴۰۱). گاهی شکوفایی جلبکی از روی تغییر رنگ آب قابل تشخیص است، زیرا حاصل تجمع انبوه سلول‌های دارای رنگیزه است. شکوفایی زیان‌بخش جلبک‌ها ناشی از افزایش نوع سمی یا مضر فیتوپلانکتون‌ها بوده (شاپوری و جوانشیر، ۱۳۸۸) و اغلب قرمز یا قهوه‌ای فام است که با نام کشند سرخ شناخته می‌شود. در پهنه‌های آبی گونه‌های بسیاری از جلبک‌ها می‌توانند با انتقال از نقطه‌ای به نقطه دیگر باعث بروز کشند قرمز شوند. در اثر شکوفایی جلبکی اکسیژن محلول در آب کاهش یافته و موجودات آبی قادر به ادامه حیات نخواهند بود (Nausch et al., 2008). برخی از جلبک‌ها با قرارگیری بر روی آب‌شش ماهی‌ها می‌توانند موجب تلف شدن آنها شده و یا با رشد و گسترش در سطح آب از رسیدن نور و اکسیژن به اعماق دریا جلوگیری نمایند.

الهام مبارک حسن

گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات

el.mobarakhassan@iaua.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

این مقاله برگرفته از یافته‌های به دست آمده از یک پژوهش مستقل است.

فیتوپلانکتون نوعی جلبک تک‌سلولی است که به‌عنوان پایه زنجیره غذایی در اکوسیستم‌های آبی شناخته می‌شود، زیرا از نور خورشید برای فتوسنتز استفاده نموده و حاوی کلروفیل است. حدود نیمی از فعالیت فتوسنتز در سطح سیاره زمین و تولید بیش از 90 درصد ماده آلی محلول در آب به فعالیت این موجودات وابسته است (Shuchman *et al.*, 2013; Dacey 1986 and Wakeham,). تغییر مواد مغذی منجر به تغییر توده‌های فیتوپلانکتون می‌شوند. از آنجایی که فیتوپلانکتون‌ها حاوی کلروفیل هستند، غلظت کلروفیل معیاری برای اندازه‌گیری تراکم فیتوپلانکتون و رشد جلبک در آب است. مقدار کلروفیل در آب معمولاً به‌عنوان شاخصی از تراکم فیتوپلانکتون و فعالیت فتوسنتزی شناخته می‌شود.

جو یکی از مهم‌ترین مسیرهای انتقال و پخش مواد مغذی، معدنی، میکروارگانیزم‌ها و فلزات کمیاب از سطح قاره‌ها به اقیانوس‌هاست. تغییرات آب و هوایی با حمل مواد به داخل آب، ایجاد جریان‌های دریایی و به‌هم‌ریختگی سطحی آب بر تغییر غلظت کلروفیل تأثیر می‌گذارند. از جمله عامل‌های هواشناختی که بر جمعیت فیتوپلانکتون‌ها تأثیر دارند، می‌توان شار تابش خورشید، بارش، سرعت باد، دمای سطح آب، هواویز، گردوخاک و تابش در دسترس فتوسنتزی (Photosynthetically available radiation) را نام برد (Prospero *et al.*, 2010; Nezhlin *et al.*, 1981). گردوخاک یکی از مهم‌ترین عوامل هواشناختی است که در تحریک رشد فیتوپلانکتون‌ها مؤثر است. به این ترتیب که گردوخاک با منشأ بیابانی حاوی آهن و آلومینیوم بوده و با حل آنها در آب‌های سطحی تولید اولیه فیتوپلانکتون افزایش یافته و به‌عنوان محرک رشد عمل می‌کنند (Santos, 2010; Boyd *et al.*, 2000 Guieu *et al.*, 2002). از این رو گردوخاک به صورت غیرمستقیم بر تغییر غلظت فیتوپلانکتون‌ها تأثیر دارد. گردوخاک به‌عنوان منشأ خارجی در فراهم نمودن عنصرهای مورد نیاز فتوسنتز دریایی عمل می‌نماید. در محیط‌زیست طبیعی حدود یک‌چهارم آهن ورودی به اقیانوس از نهشت گردوخاک جوی تأمین می‌شود. رابطه گردوخاک و عمق نوری هواویزها (AOD (Aerosol Optical Depth) با کلروفیل در پهنه‌های آبی در مناطق مختلف دنیا مانند شرق آمریکا (Schollaert *et al.*, 2003)، شمال اقیانوس هند (Patra *et al.*, 2007)، دریای عرب (Kumar *et al.*, 2010) و نواحی گرم سیری اقیانوس اطلس (Santos *et al.*, 2010)، اقیانوس آرام شمالی با منشأ بیابان گبی (Bishop *et al.*, 2002) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتیجه حاصل از تحقیق‌های پیشین اثر مستقیم هواویزها بر افزایش کلروفیل در برخی منابع آبی را نشان می‌دهد. برخی مطالعه‌ها به تأخیر زمانی اثر ذرات معلق در تجمع کلروفیل اشاره نموده‌اند که علت آن زمان مورد نیاز برای حل شدن و تجمع رسوب آهن در آب است (دادی زاده و ملکوتی، ۱۳۹۳؛ سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی میزان کلروفیل در جنوب شرق دریای خزر نشان داد که بیشینه کلروفیل و غلظت گردوخاک سطحی در فصل پاییز و بیشینه عمق نوری هواویزها در فصل تابستان است (مبارک حسن، ۱۴۰۰).

دما و به‌ویژه دمای آب از دیگر عوامل هواشناختی است که در افزایش فیتوپلانکتون‌ها نقش دارد، به‌طوری که ارتباط دمای سطح آب و غلظت کلروفیل در دریای سیاه با استفاده از داده‌های سنجهش از دور ۶۰ درصد به دست آمد (Kavak and Karadogan, 2012). ارتباط بین دمای سطح آب و غلظت کلروفیل در تعیین مکان‌های مناسب پرورش ماهی در سواحل اندونزی همبستگی منفی بین آن دو نشان داد (Nurudin *et al.*, 2013). بررسی‌ها نشان می‌دهد در دمای بیش از ۳۰ درجه سلسیوس بالاترین رشد کلروفیل رخ داده است (Laosuwan *et al.*, 2022). رابطه دما و کلروفیل در پهنه‌های آبی مختلف ایران مانند عسلویه، بندر دیر و مناطقی از سیستان و بلوچستان بیان‌گر تأثیر افزایش دما در کاهش میزان کلروفیل بوده است (دادی زاده و ملکوتی، ۱۳۹۳؛ سواری و همکاران، ۱۳۹۴؛ شهری و همکاران، ۱۴۰۰). سلیمانی و همکاران (۱۳۹۵) دریافتند که میزان کلروفیل و تولید اولیه رابطه‌ی مستقیمی با نور و شدت تابش خورشید دارد. همچنین نتایج مبارک حسن (۱۴۰۰) نشان داد که در جنوب دریای خزر افزایش تابش خورشیدی منجر به کاهش کلروفیل و افزایش سرعت باد منجر به افزایش کلروفیل شده است.

بارش از جمله دیگر عوامل مؤثر در تغییر کلروفیل است، به‌طوری که ریزش باران موجب کم‌شدن شوری آب شده و محیط مناسبی برای رشد فیتوپلانکتون‌ها به‌وجود می‌آید. پس از بارش شدید، حجم فراوانی از ریز مغزی‌ها همراه با افزایش سطح آب در رودخانه‌ها به منابع

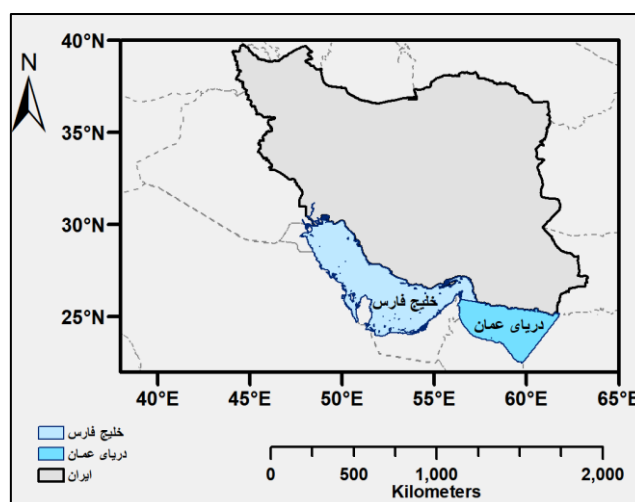
گسترده‌تر آبی انتقال یافته و رشد فیتوپلانکتون‌ها را به دنبال دارد. اگرچه می‌توان انتظار متفاوتی نیز داشت، به طوری که ورود حجم فراوان آب همراه با آلودگی سبب افزایش نیترات و فسفات در آب دریا شده و شرایط برای تغذیه گونه‌های مهاجم جلبک فراهم شده شود. شکوفایی جلبکی تقریباً هر ساله در خلیج فارس و دریای عمان رخ داده و خسارات اقتصادی زیادی در جنوب کشور به بار می‌آورد. از این رو در تحقیق حاضر تلاش بر آن است که ابتدا با استفاده از داده‌های سنجش از دور توزیع مکانی کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان مورد مقایسه قرار گیرد. همچنین مقدار کلروفیل و تغییرات سالانه و فصلی آن در دو پهنه آبی جنوب ایران بررسی و مقایسه خواهد شد. با توجه به موقعیت متفاوت دریای عمان و خلیج فارس عوامل مؤثر در شکوفایی جلبکی (غلظت کلروفیل) و نحوه عمل کرد آنها می‌تواند متفاوت باشد. به طوری که در دریای عمان دورپیوندها (Teleconnections) در بروز شکوفایی جلبکی و تسریع روند تغییرات آن بی‌تأثیر نیست. در خلیج فارس نیز گردوخاک حاصل از کشورهای حاشیه این پیکره آبی می‌تواند عامل تشدید یا بروز شکوفایی جلبکی باشد. بنابراین در ادامه ارتباط برخی عوامل جوی با تغییر جمعیت فیتوپلانکتون‌ها در خلیج فارس و دریای عمان مورد توجه قرار خواهد گرفت تا مشخص گردد که آیا عوامل جوی مؤثر در کلروفیل در این دو پهنه آبی تفاوت دارند یا عمل کرد آنها مشله است. در گام بعدی نیز مهم‌ترین عامل‌های پیش‌ساز در تغییر غلظت کلروفیل تعیین خواهند شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

دو پهنه آبی خلیج فارس و دریای عمان در جنوب ایران واقع شده و آب آن دو از اقیانوس هند تأمین می‌شود (شکل ۱). طول خلیج فارس ۹۹۰ کیلومتر بوده و بیشترین عرض آن ۳۷۵-۳۵۰ است. خلیج فارس یک محدوده کم‌عمق است که از تنگه هرمز با عمق حدود ۳۵ تا ۴۵ متر با شیب تندی به دریای عمان متصل می‌گردد. برخی از نقاط عمیق آن با ۱۹۲ متر در بخش جنوبی تنب واقع شده‌اند. این حوضه آبی متأثر از ارون‌درد است. غلظت آب در خلیج فارس بالا است که دلیل آن را می‌توان فزونی تبخیر از سطح آب نسبت به ورودی از رودخانه و بارش باران برشمرد (Tchernia, 1980).

دریای عمان، نیز ناشی از پیشروی آب اقیانوس هند به داخل خشکی در جنوب غرب آسیا است. سواحل شرقی ایران در شمال دریای عمان و کشورهای عمان و امارات در جنوب آن قرار دارند. نیمی از سواحل جنوبی ایران از تنگه هرمز تا بندر گواتر در مجاورت بخش شمالی دریای عمان تا ۷۸۴ کیلومتر گسترده شده‌اند. عمق دریای عمان در اطراف چابهار حدود ۳۳۹۸ متر بوده و به سمت غرب از کاسته می‌شود تا جایی که در نزدیکی تنگه هرمز به ۷۳ متر می‌رسد. در تحقیق حاضر این دو پهنه آبی مدنظر قرار گرفته و توزیع کلروفیل در آنها بررسی خواهد شد.



شکل ۱: محدوده مورد مطالعه شامل خلیج فارس و دریای عمان است که در جنوب ایران واقع شده‌اند.

داده و روش

داده‌های مربوط به کلروفیل در پهناهای آبی به‌طور مرتب اندازه‌گیری نشده و در صورت اندازه‌گیری نیز به‌آسانی در دسترس نیستند. علاوه بر آن نمونه‌برداری‌ها در برخی نقاط انجام شده و پوشش مکانی مناسب در تمامی گستره منابع آبی فراهم نمی‌نمایند. از این رو در تحقیق حاضر به‌منظور بررسی کلروفیل و عوامل مؤثر بر تغییر غلظت آن در پهناهای آبی جنوب کشور، داده‌های سنجش از دور تهیه و به کار گرفته شد. عملکرد سنجش از دور در ارزیابی کیفیت آب با توجه به بازتاب طیف‌های مختلف از سطح منابع آبی است. کلروفیل (رنگ‌دانه) موجود در فیتوپلانکتون‌ها در نزدیکی سطح آب تغییری در رنگ آن ایجاد می‌نماید که از فضا قابل مشاهده است، در نتیجه به کمک ابزارهای سنجش از دور و با استفاده از رنگ آب ویژگی‌های مانند غلظت کلروفیل تعیین می‌شود (Barale et al., 2010).

سنجنده مودیس (MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

مودیس اولین سنجنده تحقیقاتی کاربردی برای سنجش هواویزه‌هاست که در دسامبر ۱۹۹۹ روی ماهواره ترا (Terra) و در مه ۲۰۰۲ بر روی ماهواره آکوا (Aqua) نصب شد (Kaufman et al., 2002). ماهواره Aqua هرروز در ساعت مشخصی از یک منطقه روی کره زمین عبور می‌کند. زمان عبور آن از محدوده ایران، بین ۸ تا ۱۰:۴۰ UTC است. یکی از محصولات سنجنده مودیس کلروفیل است. برای تحقیق حاضر میانگین ماهانه کلروفیل میلی‌گرم بر مترمکعب حاصل از سنجنده مودیس ماهواره Aqua از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با تفکیک ۴ کیلومتر تهیه شد. جزئیات مربوط به آن در جدول آمده است.

داده‌های MERRA-2

دومین بازنگری تحلیلی برای تحقیقات و برنامه‌های کاربردی MERRA-2 نامیده می‌شود که پلتفرمی برای واکاوی داده‌های جوی است. محصولات MERRA، توسط ناسا و از بازتحلیل داده‌های ماهواره با استفاده از داده‌های دفتر ارزیابی و مدل جهانی ناسا (Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5) از سال ۱۹۸۰ تا حال در دست است (Molod et al., 2015). داده‌های مشاهداتی سنجش از دور شامل (MODIS, AVHRR (Advanced Very High-Resolution Radiometer, MISR (Multiangle Imaging Spectroradiometer) و AERONET (Aerosol Robotic Network) در این مدل به کار گرفته شده‌اند. محصولات MERRA-2 شامل داده‌های دوبعدی با تفکیک $(\text{longitude}) \times 0.667 \times (\text{latitude})$ /۵ درجه بوده و شامل ۵۷۶ نقطه طول جغرافیایی و ۳۶۱ نقطه عرض جغرافیایی هستند. در این مطالعه متغیرهای دمای ۲ متری، باد ۱۰ متری (باد سطحی) و بارش از داده‌های MERRA-2 استخراج شده است. توضیح بیشتر مربوط به متغیرها در جدول آمده است. در نسخه ۵/۱۲/۴ و در سال ۲۰۱۷، برآورد گردوخاک امکان‌پذیر شده است (Gelaro et al., 2017) و توضیح کامل آن در (Buchard et al., 2017) اشاره شده است. غلظت جرمی گردوخاک سطحی (Dust Surface Mass Concentration) برحسب کیلوگرم بر مترمکعب یکی از محصولات MERRA-2 است که در تحقیق حاضر به‌عنوان گردوخاک سطحی به کار گرفته شد. در ادامه متن غلظت گردوخاک سطحی در 10^9 ضرب شده و برحسب میکروگرم بر مترمکعب بیان می‌گردد.

جدول ۱: متغیرهای مورد استفاده در تحقیق حاضر

نوع ماهواره	نام انگلیسی	نام فارسی	تفکیک پذیری مکانی	واحد اندازه‌گیری	واحد اندازه‌گیری (پس از تبدیل)
MERRA-2	Dust Surface Mass Concentration	گردوخاک سطحی		Kg.m^{-3}	میکروگرم بر مترمکعب
	Total surface precipitation	بارش سطحی		Kg.m^{-2}	میلی‌گرم بر مترمربع
	2 meter Temperature	دمای ۲ متری	0.667×0.5	$^{\circ}\text{C}$	سلسیوس
	10 meter eastward wind	باد سطحی		m.s^{-1}	متر بر ثانیه
10-meter northward wind			m.s^{-1}	متر بر ثانیه	
Aqua	Colorophyll a concentration	غلظت کلروفیل	۴ کیلومتر	mg.m^{-3}	میلی‌گرم بر مترمکعب

روش کار

به منظور بررسی متغیرهای انتخابی در محدوده خلیج فارس و دریای عمان ابتدا داده‌های سنجش از دور در فرمت NetCDF در میانگین ماهانه از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ از سایت giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>) استخراج شد. سپس به کمک نرم‌افزار R (نرم‌افزاری جهت محاسبه آماری و ترسیم نمودار) با توجه به محدوده مورد مطالعه سری زمانی داده‌ها برای تمامی متغیرها در دو حوضه آبی خلیج فارس و دریای عمان از ژانویه ۲۰۱۰ تا دسامبر ۲۰۲۰ استخراج شد. همه متغیرها در بازه زمانی درون سالانه، میانگین سالانه و میانگین ماهانه محاسبه شده و شاخص‌های آماری مربوط به آنها به دست آمد. تحلیل‌های در دو منطقه خلیج فارس و دریای عمان به طور مستقل انجام شده و سپس با همدیگر مقایسه شدند. در ابتدای بخش یافته‌ها، مباحث مربوط به توزیع زمانی غلظت کلروفیل ارائه شده و به منظور شناخت بهتر توزیع مکانی کلروفیل در این دو پهنه آبی جنوب کشور، به کمک نرم‌افزار Grads میانگین کلروفیل در هر ماه در طی سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ ترسیم شد. سپس در بخش بعدی متغیرهای جوی بررسی شدند. در آخرین گام به منظور شناسایی رابطه بین متغیرهای جوی و کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان همبستگی پیرسون و اسپیرمن محاسبه شد.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x-\bar{x}}{s_x^2} \right) \left(\frac{y-\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (1)$$

r معرف ضریب همبستگی بوده و X و Y دو متغیر مورد نظر هستند. علامت بار معرف میانگین و S^2 معرف واریانس است.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (2)$$

ρ ضریب همبستگی اسپیرمن، d_i تفاوت بین رتبه‌های دو متغیر برای هر مشاهده، n تعداد مشاهده است. این روش برای داده‌های که توزیع نرمال ندارند مناسب بوده و نسبت به داده‌های پرت حساسیت کمتری دارد. مقدار ضریب همبستگی در هر دو روش بین -1 تا $+1$ متغیر است. باهدف تعیین مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در کلروفیل، روش رگرسیون به کار گرفته شد. معادله رگرسیون (۳) در ادامه آمده است.

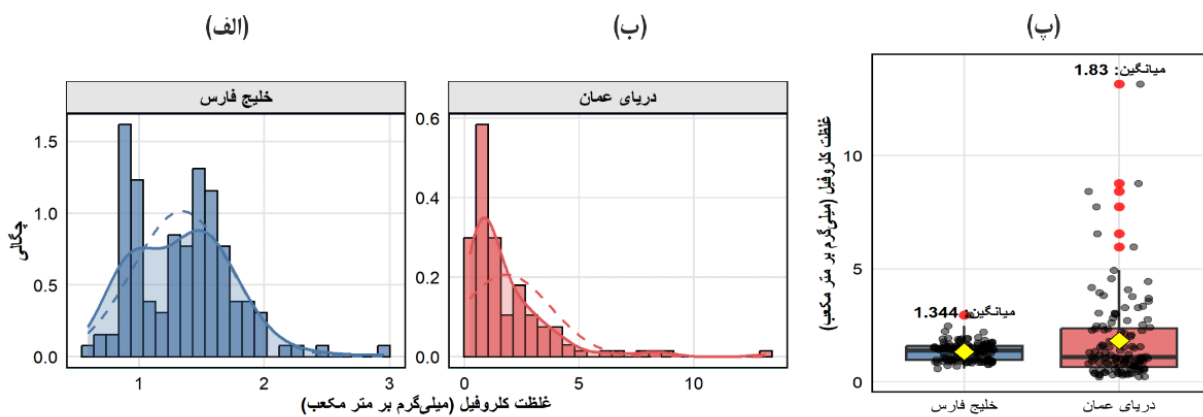
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \epsilon \quad (3)$$

در روش رگرسیون، کلروفیل متغیر وابسته (y)، گردوخاک سطحی، بارش، دمای ۲ متری و باد ۱۰ متری به عنوان متغیرهای مستقل (x_i) در نظر گرفته شدند. β_i معرف ضریب هر متغیر و ϵ مقدار ثابت است. علاوه بر آن روش رگرسیون، همبستگی مطلق پیرسون و اسپیرمن نیز با تعیین سهم هر یک از متغیرها به سهم کل محاسبه گردید تا در تعیین و رتبه‌بندی عوامل مؤثر در کلروفیل مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج

بررسی تغییرات کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۲۰

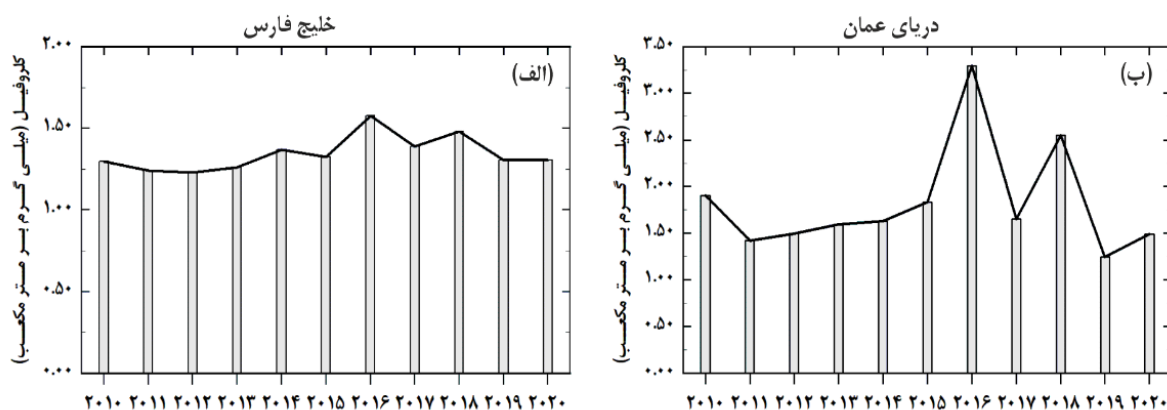
توزیع فراوانی کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان از ژانویه ۲۰۱۰ تا دسامبر ۲۰۲۰ در شکل ۲ ارائه شده است. توزیع فراوانی کلروفیل در خلیج فارس تا مقدار ۳ میلی گرم بر مترمکعب را نشان می‌دهد. توزیع کلروفیل دو نمایی بوده و بیشترین تمرکز داده‌ها در مقادیر کمتر از ۲ میلی گرم بر مترمکعب است. گرچه توزیع کلروفیل به توزیع نرمال (خطچین) نزدیک است، اما دو نمایی بودن داده‌های واقعی با توزیع نرمال متفاوت است. توزیع فراوانی کلروفیل در دریای عمان نسبت به خلیج فارس تفاوت‌های بارزی دارد. به طوری که بیشترین مقادیر کلروفیل در خلیج فارس در محدوده کمتر از ۵ میلی گرم بر مترمکعب بوده و در دریای عمان تا نزدیکی ۱۵ میلی گرم بر مترمکعب می‌رسد. توزیع کلروفیل در دریای عمان چوله بوده و از توزیع نرمال پیروی نمی‌نماید. فزونی مقدار کلروفیل در دریای عمان نسبت به خلیج فارس بارز است. در تحقیق‌های پیشین نیز به این موضوع اشاره شده است (ربانی‌ها و همکاران، ۱۴۰۱). بیشترین غلظت کلروفیل ۱۱/۲ میلی گرم بر مترمکعب در سپتامبر در نزدیکی سواحل مازندران به دست آمد (مبارک حسن، ۱۴۰۰) که نشان می‌دهد کلروفیل در آن مناطق نسبت به خلیج فارس مقادیر بالاتری دارد.



شکل ۲: توزیع فراوانی کلروفیل (میلی‌گرم بر مترمکعب) در (الف) خلیج فارس، (ب) دریای عمان و (پ) نمودار جعبه‌ای مقایسه کلروفیل در دو منطقه

به منظور مقایسه آماری و تعیین پراکندگی داده‌های غلظت کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان نمودار جعبه‌ای (Box Plot) نیز ترسیم شد (شکل ۲-پ). نمودار جعبه‌ای داده‌ها را خلاصه‌سازی نموده و با هدف مقایسه و تشخیص پراکندگی داده‌ها استفاده می‌شود. متغیرهای نمایش داده شده در این نمودار شامل میانه، میانگین، بیشینه، چارک اول (۲۵٪) و چارک سوم (۷۵٪) بوده و همچنین داده‌های پرت نیز شناسایی می‌شوند. علاوه بر آن برای مقایسه یک متغیر در شرایط مختلف به کار می‌رود. شکل ۲-پ نشان می‌دهد گرچه میانگین غلظت کلروفیل در خلیج فارس ۱/۳۴ و در دریای عمان ۱/۸۳ میلی‌گرم بر مترمکعب بوده و تقریباً نزدیک هستند، اما توزیع پراکندگی در دریای عمان نسبت به خلیج فارس بسیار بیشتر بوده و داده‌های متعددی در محدوده خارج از ۲۵ تا ۷۵ درصد داده‌ها قرار دارند. در خلیج فارس بیشتر داده‌ها حول میانگین بوده و در محدوده ۲۵ تا ۷۵ درصد قرار دارند. به این ترتیب، می‌توان دریافت که غلظت کلروفیل در خلیج فارس نسبت به دریای عمان کمتر است. در دریای عمان مقادیر حدی کلروفیل ثبت شده و توزیع آن بسیار پراکنده است. ضریب همبستگی بین کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان ۰/۴۴ به دست آمد که نشان می‌دهد تغییرات کلروفیل در هر یک از این دو پهنه رابطه قوی با همدیگر نداشته و عوامل مؤثر بر آنها متفاوت است.

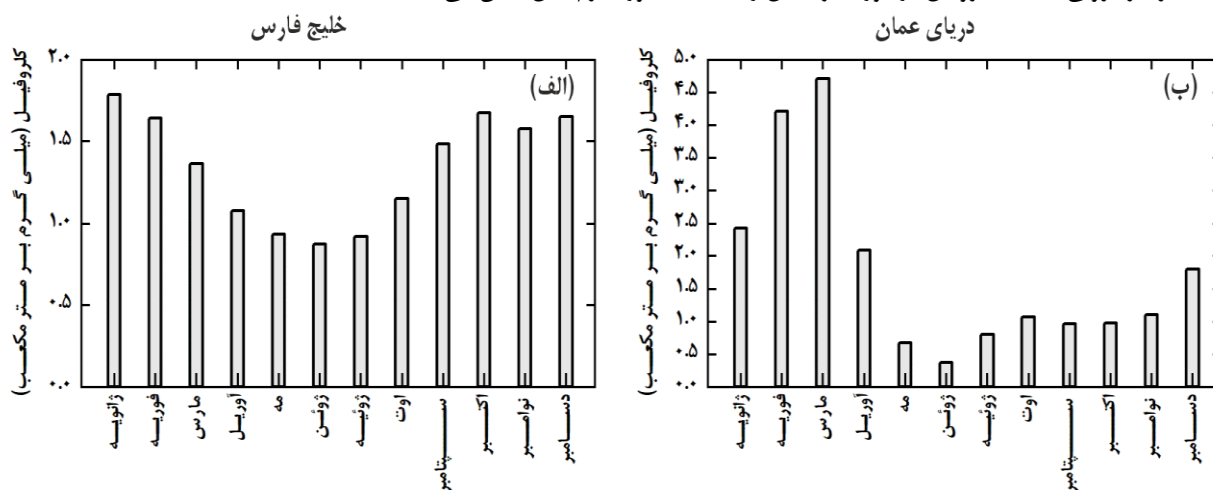
در ادامه تغییرات میانگین سالانه کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰ مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۳). بیشترین مقدار کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان در سال ۲۰۱۶ به ترتیب ۱/۵۸ و ۳/۳ میلی‌گرم بر مترمکعب بوده است. کمترین مقدار کلروفیل در خلیج فارس در سال ۲۰۱۲ با مقدار ۱/۲۳ و در دریای عمان در سال ۲۰۱۹ با مقدار ۱/۲۵ میلی‌گرم بر مترمکعب به دست آمد. اگرچه تغییرات سالانه کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ مشابه بوده و روند افزایش و کاهش آن دو نزدیک به هم است، اما در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ روند کلی تغییرات مشابه نیست. روند تغییرات غلظت کلروفیل از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در هیچ یک از دو پهنه آبی معنی‌دار نشد که نشان می‌دهد در طی بازه مورد مطالعه، افزایش یا کاهش مشخصی در غلظت کلروفیل رخ نداده است. تحقیق دادی‌زاده و ملکوتی (۱۳۹۳) بیان‌گر آن است که توزیع کلروفیل در خلیج فارس طی دوره ده سال ۲۰۰۷-۱۹۹۸ تقریباً در تمام نواحی به استثنای ناحیه‌ی جنوبی تغییرات خاصی نداشته است.



شکل ۳: تغییرات سالانه کلروفیل میلی گرم در مترمکعب (الف) خلیج فارس و (ب) دریای عمان، در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۲۰

تغییرات ماهانه کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۲۰ در شکل ۴ دیده می‌شود. غلظت کلروفیل در خلیج فارس از ژانویه تا ژوئن کاهش یافته و پس از آن روند افزایشی بوده و پس از آن روند افزایشی شده و بیشترین آن در ماه ژانویه (۱/۸ میلی گرم بر مترمکعب) است. توزیع ماهانه کلروفیل در دریای عمان تفاوت بارزی نسبت به خلیج فارس دارد، به طوری که از ژانویه تا مارس روند افزایشی، پس از آن روند کاهش یافته و در ماه‌های دیگر نوسان‌های مختلفی دارد. اگرچه کمترین مقدار کلروفیل در دریای عمان و خلیج فارس به ترتیب با ۰/۵ و ۱ میلی گرم در مترمکعب و در ماه ژوئن ثبت شده است، اما روند تغییرات ماهانه آن دو بسیار متفاوت بوده و این تفاوت در محدوده ماه‌های ژانویه تا مارس بارزتر است. در خلیج فارس میزان تغییرات کلروفیل در ماه‌های مختلف در بازه ۱ تا ۲ میلی گرم بر مترمکعب بوده و نشان می‌دهد اختلاف چندانی بین بیشترین و کمترین مقادیر نیست، اما مقادیر کلروفیل بین مقادیر ۰/۵ تا ۵ میلی گرم در مترمکعب در دریای عمان بیانگر گسترده‌تر بودن دامنه تغییرات غلظت کلروفیل است.

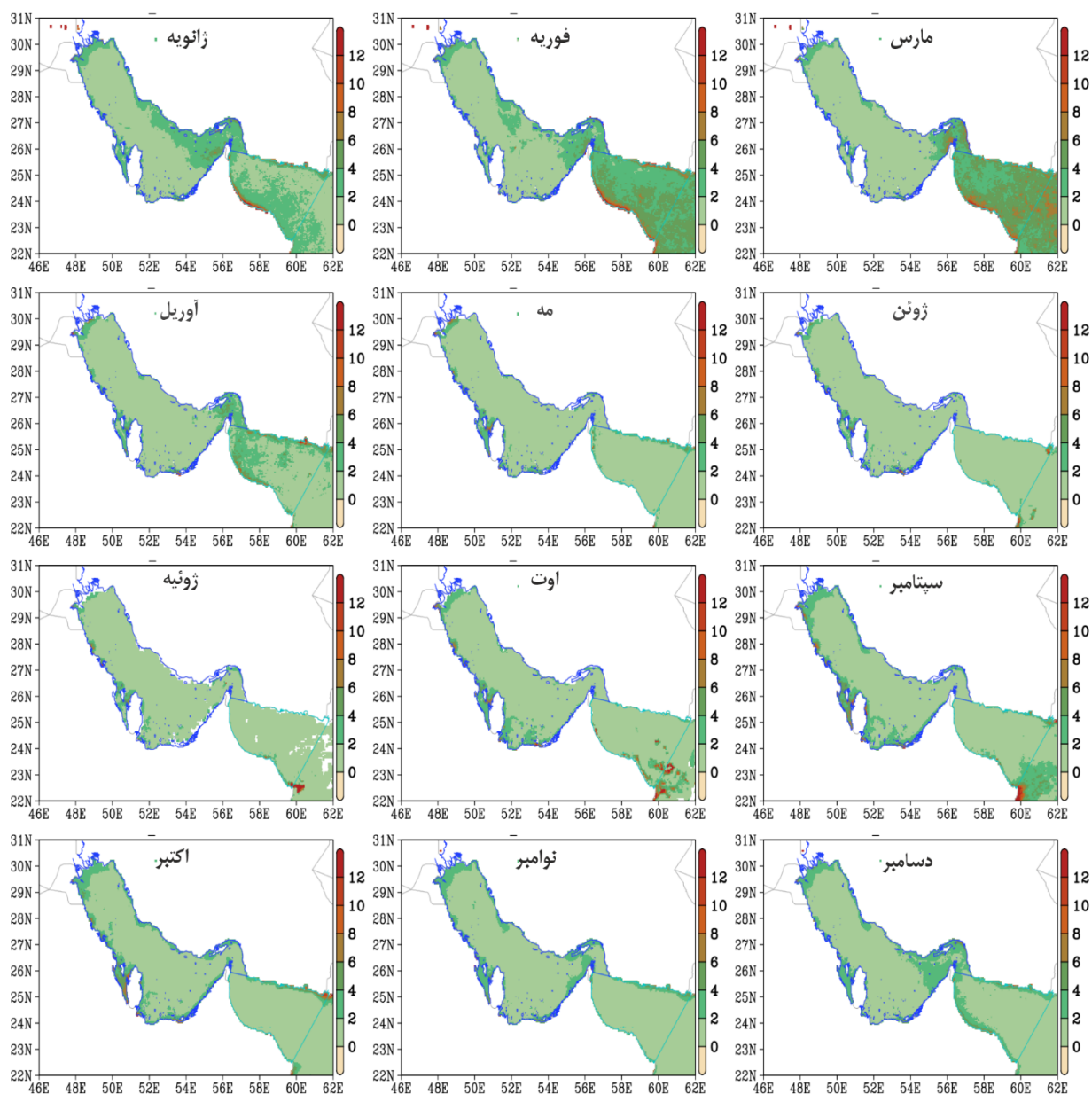
به این ترتیب توزیع ماهانه و دامنه تغییرات کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان تفاوت بارزی دارند. بررسی‌ها در سیستان و بلوچستان نشان داد که مقدار کربن آلی و کلروفیل در دو فصل پاییز و زمستان بیشتر از بهار و تابستان بوده است (شهری و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج تحقیق حاضر نیز فزونی غلظت کلروفیل در دوره سرد سال را نسبت به دوره گرم سال نشان می‌دهد.



شکل ۴: تغییرات ماهانه کلروفیل میلی گرم در مترمکعب (الف) خلیج فارس، (ب) دریای عمان، در طی دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۲۰

به منظور مقایسه توزیع ماهانه کلروفیل در منطقه مورد مطالعه (خلیج فارس و دریای عمان)، پهنه‌بندی مکانی ترسیم شده است (شکل ۵). در ماه ژانویه مقدار کلروفیل در خط ساحلی جنوبی و خط ساحلی شمالی دریای عمان بیشتر از سایر نقاط است و بیشترین مقدار کلروفیل در دریای عمان ۱۲ میلی‌گرم در مترمکعب است. در خلیج فارس نیز بیشترین میزان کلروفیل در شرق منطقه دیده می‌شود. در ماه فوریه در خلیج فارس میزان کلروفیل در شرق خلیج فارس (تنگه هرمز) اندکی بیشتر از سایر نقاط است. توزیع مکانی کلروفیل در دریای عمان دارای تغییرات قابل توجهی است، به طوری که بیشترین مقدار آن در محدوده ساحل شمالی (سیستان و بلوچستان) و بخش‌های از ساحل جنوبی دیده می‌شود. بیشینه مقدار کلروفیل در محدوده مورد مطالعه در دریای عمان تا مقدار ۱۲ میلی‌گرم بر مترمکعب رشد داشته است. در ماه مارس میزان کلروفیل موجود در دریای عمان به طور بارزی افزایش یافته و در نقاط ساحلی جنوبی بیشترین مقدار کلروفیل با ۱۴ میلی‌گرم در مترمکعب دیده می‌شود. در خلیج فارس تغییرات قابل توجهی در میزان کلروفیل قابل رؤیت نیست و بیشترین مقدار آن در تنگه هرمز با مقدار ۱۰ میلی‌گرم در مترمکعب است. در مقایسه مقدار کلروفیل در سه ماه ژانویه، فوریه و مارس در منطقه مورد مطالعه (خلیج فارس و دریای عمان) بیشترین میزان تغییرات در ماه مارس در دریای عمان مشاهده می‌شود و بیشترین مقدار کلروفیل به ترتیب در ماه‌های مارس، فوریه و ژانویه است.

در ماه آوریل میزان کلروفیل موجود در دریای عمان از خلیج فارس بیشتر است به طوری که در محدوده ساحل شمالی بیشترین مقدار کلروفیل (بیش از ۱۲ میلی‌گرم بر مترمکعب) مشاهده می‌شود (شکل ۵). در خلیج فارس مقدار کلروفیل در شمال غرب و غرب (بندر آبادان، بندر خرمشهر و کویت)، ساحل جنوبی (قطر و بحرین) و شرق (تنگه هرمز) افزایش داشته است. در ماه مه بیشترین میزان کلروفیل موجود در خلیج فارس در خط ساحلی قرار دارد به طوری که در نزدیکی خط ساحلی غربی (کویت) و جنوبی (قطر و بحرین) میزان کلروفیل افزایش داشته است. بیشترین مقدار کلروفیل موجود در خلیج فارس دارای مقدار ۱۲ میلی‌گرم بر مترمکعب است. در دریای عمان بیشترین میزان کلروفیل موجود در خط ساحل شمالی و جنوبی است. در ماه ژوئن میزان کلروفیل در خط ساحل شمال غربی، غربی و جنوبی تغییر داشته و بیشترین مقدار در خط ساحلی قطر و بحرین مشاهده می‌شود. در دریای عمان میزان کلروفیل در برخی از نقاط خط ساحل شمالی (سیستان و بلوچستان) رشد داشته است. در مجموع در فصل بهار بیشینه مقدار کلروفیل در دریای عمان بیشتر از خلیج فارس است.



شکل ۵: میانگین ماهانه کلروفیل (میلی گرم بر مترمکعب) در خلیج فارس و دریای عمان در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۲۰

در ماه ژوئیه میزان کلروفیل در خلیج فارس در ناحیه کوچکی در قسمت ساحل جنوبی رشد داشته و در دریای عمان در خط ساحلی جنوب و جنوب شرقی مقدار کلروفیل افزایش یافته است (شکل ۵). در ماه اوت میزان کلروفیل در خلیج فارس از شمال به جنوب افزایش داشته به طوری که بیشترین مقدار در خط ساحل جنوبی، جنوب غربی و جنوب شرقی قرار دارد. در نزدیکی خط ساحلی جنوب شرقی و خط ساحلی جنوبی در دریای عمان بیشترین مقدار کلروفیل مشاهده می‌شود. در ماه سپتامبر بیشترین میزان کلروفیل موجود در خلیج فارس در نواحی خط‌های ساحلی شمال غربی، جنوبی، جنوب غربی و جنوب شرقی است. در دریای عمان نیز بیشترین میزان کلروفیل در خط ساحلی شمال شرقی، جنوبی و جنوب شرقی قرار دارند.

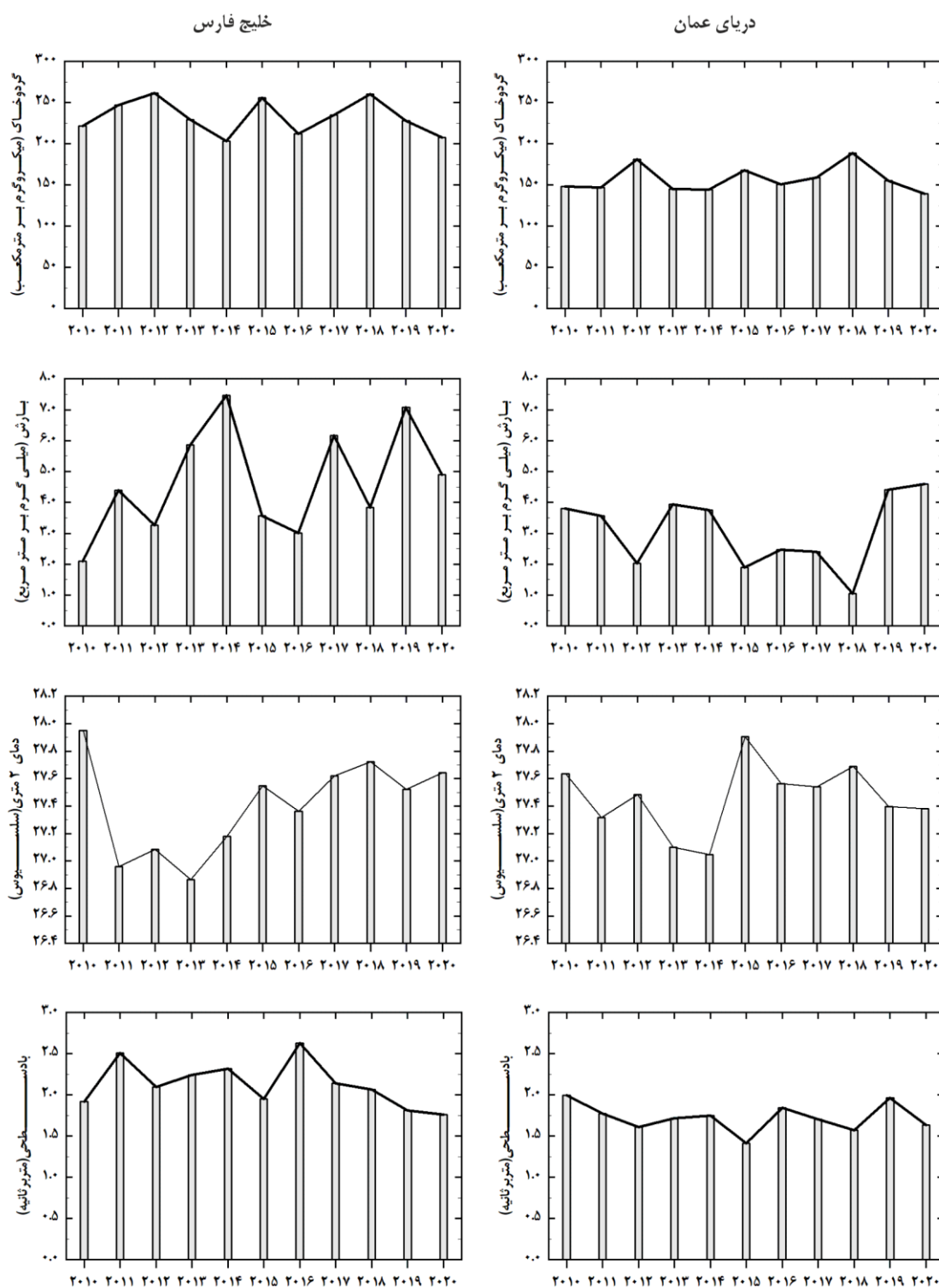
در ماه اکتبر میزان کلروفیل در خط ساحل شمالی دریای عمان (بخش ساحلی سیستان و بلوچستان) و در خط ساحل جنوبی (قطر و بحرین) خلیج فارس افزایش داشته است (شکل ۵). در ماه نوامبر در دریای عمان در خط ساحل شمالی و در خلیج فارس در خط ساحل شمالی، خط ساحلی جنوبی (قطر و بحرین) و تنگه هرمز بیشترین مقدار کلروفیل دیده می‌شود. در ماه دسامبر در خلیج فارس توزیع مکانی

کلروفیل تغییراتی را در ساحل شمال غربی (کویت)، جنوبی (قطر و بحرین) و شرقی (تنگه هرمز) نشان می‌دهد. در دریای عمان نیز تغییر مقدار کلروفیل در خط ساحلی جنوبی و شمالی مشاهده می‌شود. در خلیج فارس بیشترین تمرکز کلروفیل در مناطق ساحلی به‌ویژه در شمال غرب است. تحقیقات پیشین نیز به این موضوع تأکید می‌نمایند (ربانی‌ها و همکاران، ۱۴۰۱). علمی‌زاده و فاضل پور (۱۳۹۵) نیز به مستعد بودن بخش ساحل شمالی تنگه هرمز به شکوفایی جلبکی اشاره نموده‌اند.

توزیع زمانی پارامترهای جوی

در ادامه توزیع سالانه متغیرهای جوی انتخابی مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۶). توزیع گردوخاک در خلیج فارس، در طی سال‌های مختلف متفاوت است. در برخی سال‌ها مانند ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ افزایش و در برخی دیگر مانند ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ کاهش گردوخاک دیده می‌شود. تغییرات گردوخاک به جز سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳ در دیگر سال‌ها در خلیج فارس و دریای عمان مشابه است. مقدار متوسط گردوخاک در خلیج فارس ۲۳۲ و در دریای عمان ۱۵۷ میکروگرم بر مترمکعب است (جدول ۱) که مؤید تأثیر بیشتر گردوخاک بر خلیج فارس نسبت به دریای عمان است. علت آن نیز نزدیکی خلیج فارس به منابع گردوخاک خاورمیانه شامل بیابان‌های عراق، کویت، عربستان و سوریه است. همبستگی سری زمانی گردوخاک در خلیج فارس و دریای عمان $0/83$ درصد به دست آمد. گرچه مقدار همبستگی بین آن دو قوی است، اما توده‌های گردوخاک مؤثر بر این دو پهنه آبی متفاوت بوده و عمل کرد آنها بر تغییر غلظت کلروفیل مشابه نخواهد بود.

توزیع سالانه بارش در خلیج فارس و دریای عمان تفاوت‌های بارزی دارند. به طوری که ضریب همبستگی بین آن دو $0/43$ به دست آمد که بیان‌گر عدم مشابهت در توزیع بارش این دو پهنه آبی است. به‌طور مثال بیشینه بارش در خلیج فارس در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۹ رخ داده در حالی که در دریای عمان بیشینه بارش در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ ثبت شده است. متوسط بارش خلیج فارس ۷۴ و متوسط بارش دریای عمان ۴۵ میلی‌گرم بر مترمربع به دست آمده است (جدول ۱). متوسط بارش خلیج فارس به‌طور بارزی بیش از بارش دریای عمان است که دلیل آن سازوکار و تأثیر متفاوت سامانه‌های آب و هوایی در این دو منطقه است. تأثیر سامانه‌های بارشی عبوری از خلیج فارس و یا مقدار بارش رسیده به این حوضه آبی نسبت به دریای عمان فزونی دارد. گرچه توزیع سالانه دما در شکل ۶ در خلیج فارس و دریای عمان تفاوت‌های به‌ویژه در زمان وقوع بیشینه و کمینه دارد، اما همبستگی سری زمانی در این دو پهنه آبی $0/94$ تعیین شد. به این معنا که تغییرات دمای سالانه آنها هماهنگ است. همچنین متوسط دما در دریای عمان $27/46$ و در خلیج فارس $27/40$ سلسیوس به دست آمد که مؤید عدم تفاوت بارز دما در دو منطقه یاد شده است.



شکل ۶: توزیع سالانه گردوخاک سطحی (میکروگرم بر مترمکعب)، بارش (میلی گرم بر مترمربع)، دمای ۲ متری (سلسیوس)، سرعت باد ۱۰ متری (متر بر ثانیه، در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۲۰، در خلیج فارس (سمت چپ) و دریای عمان (سمت راست))

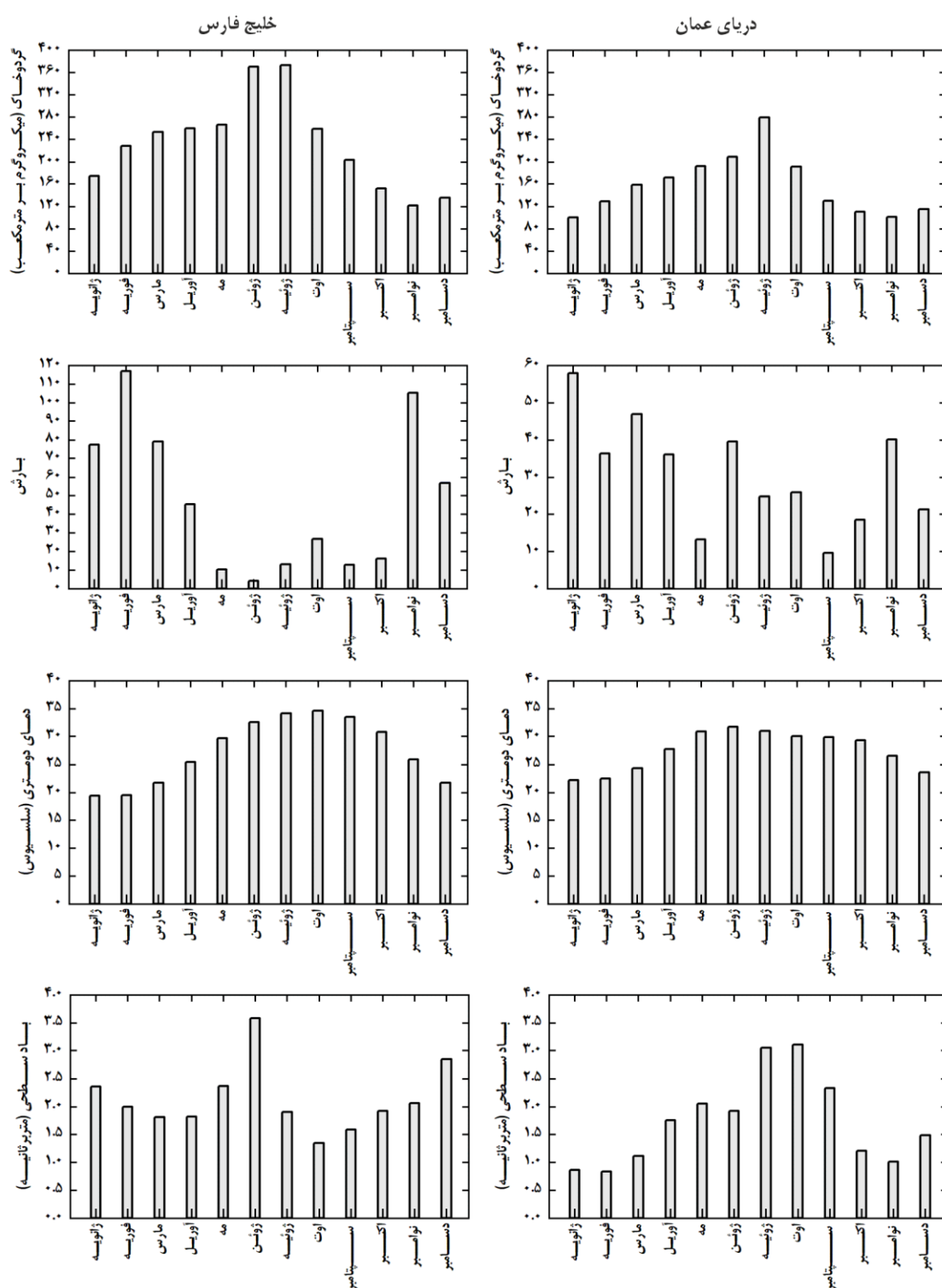
بیشترین سرعت باد در خلیج فارس و دریای عمان در سال‌های ۲۰۱۶ (۲/۶ متربرثانیه) و ۲۰۱۰ (۲ متربرثانیه) است (جدول ۱). کمترین میانگین سالانه سرعت باد در خلیج فارس و دریای عمان به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۵ با مقادیر ۱/۷۶ و ۱/۴۱ متر بر ثانیه رخ داده است. توزیع زمانی باد سطحی در خلیج فارس و دریای عمان هیچ شباهتی نداشته و ضریب همبستگی معنی‌داری بین آن دو به دست نیامد.

علت آن است که در مناطق ساحلی، شرایط وزش باد متأثر از ساختار سطحی بوده و شرایط در ساحل شمالی و جنوبی بسیار متفاوت است. علاوه بر آن گردش آب، عمق و دیگر ویژگی‌های این دو پهنه متفاوت هستند که می‌توانند توزیع باد سطحی را تحت تأثیر قرار دهند. به این ترتیب تغییرات سالانه متغیرهای جوی شامل گردوخاک سطحی، بارش و سرعت باد سطحی در خلیج فارس و دریای عمان متفاوت بوده در حالی که دما تقریباً مشابه است. بررسی روند سالانه تمامی متغیرها در بازه مورد مطالعه معنی‌دار شناسایی نشد. یعنی آن که در طی سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ هیچ‌یک از متغیرهای موردنظر روند افزایش یا کاهش بارزی نداشته‌اند.

جدول ۱: بیشینه، کمینه و متوسط سالانه کلروفیل و متغیرهای جوی شامل گردوخاک سطحی (میکروگرم بر مترمکعب)، بارش (میلی گرم بر مترمربع)، دمای ۲ متری (سلسیوس)، سرعت باد ۱۰ متری (متربر ثانیه)، در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰ در خلیج فارس و دریای عمان

	گردوخاک سطحی		بارش		دمای ۲ متری		باد سطحی	
	خلیج فارس	دریای عمان	خلیج فارس	دریای عمان	خلیج فارس	دریای عمان	خلیج فارس	دریای عمان
بیشینه	۲۶۱/۳۵	۱۸۸/۹۷	۷/۴۷	۴/۶۰	۲۷/۷۲	۲۷/۹۰	۲/۶۳	۱/۹۶
کمینه	۲۰۳/۳۵	۱۳۹/۵۲	۳/۰۰	۱/۰۵	۲۶/۸۶	۲۷/۰۵	۱/۷۶	۱/۴۱
متوسط	۲۳۴/۰۰	۱۵۷/۹۵	۴/۹۵	۳/۰۱	۲۷/۳۵	۲۷/۴۴	۲/۱۵	۱/۷۰

شکل ۷ تغییرات ماهانه گردوخاک سطحی در خلیج فارس و دریای عمان در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰ را نشان می‌دهد. اگرچه مقدار گردوخاک در خلیج فارس از دریای عمان بیشتر است، اما گردوخاک ماهانه در هر دو پهنه کم‌وبیش مشابه توزیع شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار گردوخاک سطحی در خلیج فارس و دریای عمان در ماه ژوئیه به ترتیب با مقادیر ۳۸۲ و ۲۸۶ میکروگرم بر مترمکعب به دست آمده است.



شکل ۷: تغییرات ماهانه گردوغ خاک سطحی (میکروگرم بر مترمکعب)، بارش (میلی گرم بر مترمربع)، دمای ۲ متری (سلسیوس)، سرعت باد ۱۰ متری (متر بر ثانیه)، در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰، در خلیج فارس (سمت چپ) و دریای عمان (سمت راست)

در خلیج فارس علاوه بر ماه ژوئیه در ژوئن نیز مقدار گردوغ خاک قابل توجه بوده و تقریباً مشابه با ماه ژوئیه است. کمترین مقدار گردوغ خاک در خلیج فارس و دریای عمان به ترتیب در ماه‌های نوامبر و ژانویه با مقادیر ۱۲۴ و ۱۰۰ میکروگرم بر مترمکعب رخ داده است. تغییرات ماهانه بارش در این دو پهنه آبی متفاوت است. دریای عمان به اقیانوس هند متصل بوده و در طول تابستان مانسون هند فعال می‌شود به

همین دلیل میزان بارندگی دریای عمان در تابستان و بهار تحت تأثیر مانسون هند است. در حالی که خلیج فارس تحت تأثیر سامانه آب و هوایی مدیترانه و دریای سرخ بوده و میزان بارش آن در ماه‌های پاییز و زمستان بیشتر است. بیشترین مقدار بارش در خلیج فارس در ماه فوریه با ۱۱ میکروگرم بر مترمربع و پس از آن در ماه نوامبر در حدود ۱۰ میکروگرم بر مترمربع ثبت شده است. در دریای عمان بیشینه بارش در ماه ژانویه با حدود ۵ میکروگرم بر مترمربع بوده است. به‌طور کلی مقدار بارش خلیج فارس بیش از ۲ برابر دریای عمان است. تغییرات ماهانه دمای دو متری در خلیج فارس و دریای عمان کم‌وبیش مشابه بوده و از توزیع سینوسی پیروی می‌نماید، اما تفاوت‌های نیز بین آن دو مشاهده می‌شود، به‌طوری که بیشترین دمای خلیج فارس در ماه اوت با ۳۵ درجه سلسیوس و بیشترین دمای دریای عمان در ماه ژوئن با ۳۲ درجه سلسیوس به دست آمد. به این ترتیب به‌نظر می‌رسد، خلیج فارس تابستان‌های گرم‌تری نسبت به دریای عمان تجربه می‌نماید. کمترین مقدار دمای دو متری در خلیج فارس و دریای عمان در ماه‌های ژانویه و فوریه به ترتیب با مقادیر حدود ۱۹ و ۲۲ درجه سلسیوس ثبت شده است. با مقایسه بیشینه و کمینه دما در دو پهنه آبی می‌توان دریافت، دامنه تغییرات دما در خلیج فارس بیش از دریای عمان است. تغییرات ماهانه سرعت باد ۱۰ متری در خلیج فارس و دریای عمان نیز تفاوت دارد. در دریای عمان با حرکت به سمت ماه‌های تابستانی سرعت باد افزایش می‌یابد که می‌تواند تحت تأثیر مانسون هند باشد، در حالی که در خلیج فارس توزیع سرعت باد سطحی ویژگی بارزی ندارد. تندی باد سطحی در خلیج فارس بیشتر از دریای عمان است. در خلیج فارس بیشترین میزان سرعت باد در ماه ژوئن با مقدار حدود ۳/۵ متر بر ثانیه رخ داده است و کمترین مقدار سرعت باد در خلیج فارس در ماه اوت با مقدار ۱/۵ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود. در دریای عمان سرعت باد در ماه‌های سرد کمترین مقدار را دارد به طوری که کمینه سرعت باد در ماه فوریه با مقدار ۰/۸ متر بر ثانیه اتفاق افتاده است.

بررسی تأثیر پارامترهای جوی بر کلروفیل خلیج فارس و دریای عمان

جدول ۲ ضریب همبستگی پیرسون و اسپیرمن را نشان می‌دهد که بین کمیت‌های گردو خاک سطحی، بارش، دمای ۲ متری و سرعت باد ۱۰ متری با کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰ محاسبه شده‌اند. ضریب همبستگی بین کلروفیل و گردو خاک در روش اسپیرمن ۰/۶۴- و در روش پیرسون ۰/۵۸- بوده و نشان دهنده ارتباط قوی منفی بین دو کمیت است. به‌طوری که با افزایش گردو خاک میزان کلروفیل کاهش می‌یابد. در تحقیق پیشین رابطه گردو خاک و AOD با کلروفیل در خلیج فارس با ضرایب ۰/۷۴- به دست آمده است (مبارک حسن و همکاران، ۱۴۰۰) که مشابه به نتیجه به دست آمده در تحقیق حاضر است. از طرفی عدد P-Value کوچک‌تر از ۰/۰۵ برای هر دو ضریب همبستگی، معنادار بودن ارتباط بین گردو خاک و کلروفیل در خلیج فارس را تأیید می‌نماید. بزرگ‌تر بودن عدد ضریب همبستگی اسپیرمن بیان‌گر ارتباط غیرخطی و نقش کمیت سوم در رابطه بین گردو خاک و کلروفیل است. اگرچه عدد P-Value کوچک‌تر از ۰/۰۵ مؤید معناداری ارتباط بین کلروفیل و بارش است، مقدار ضریب همبستگی ۰/۲۹ و ۰/۲۲ بیان‌گر ارتباط ضعیف بین این دو کمیت است (جدول ۲ و شکل ۸). بزرگ‌تر بودن ضریب همبستگی اسپیرمن نشان‌دهنده ارتباط غیرخطی بین کلروفیل و بارش است. علامت مثبت همبستگی نیز نشان می‌دهد که در خلیج فارس افزایش بارش با افزایش کلروفیل همراه است. ضریب همبستگی اسپیرمن و پیرسون بین دو کمیت کلروفیل و دما با مقدار ۰/۴۹- و ۰/۵۰-، رابطه متوسط اما منفی بین دو کمیت را نشان می‌دهد، به‌طوری که با افزایش دما میزان کلروفیل در خلیج فارس کاهش می‌یابد. عدد P-Value کوچک‌تر از ۰/۰۵ برای هر دو ضریب همبستگی بیان‌گر معنادار بودن ارتباط بین آن دو است. ضریب همبستگی بین کلروفیل و باد با استفاده از هر دو روش ۰/۰۴ بوده و نشان می‌دهد بین این دو کمیت رابطه‌ای وجود ندارد.

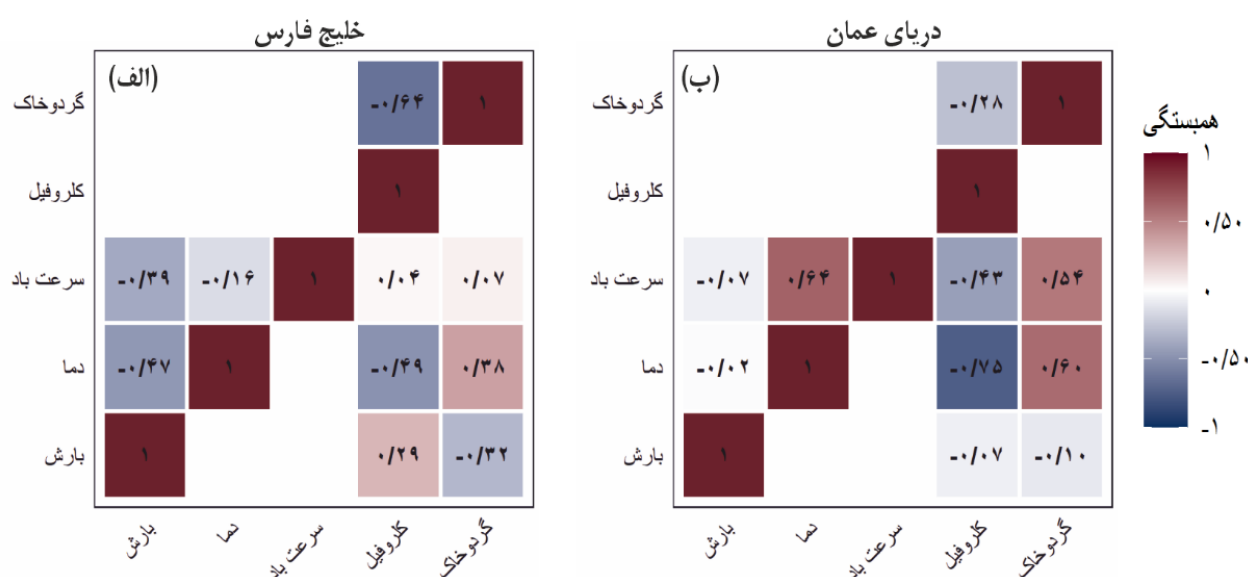
ضریب همبستگی پیرسون و اسپیرمن بین کمیت‌های جوی و کلروفیل در دریای عمان برای دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰ در جدول ۲ و شکل ۸ آمده است. ضریب همبستگی بین کلروفیل و گردو خاک در اسپیرمن ۰/۲۸- و در پیرسون ۰/۱۰ است که نشان دهنده ارتباط ضعیف بین دو کمیت است. از طرفی عدد P-Value ضریب همبستگی اسپیرمن را معنی‌دار و پیرسون را غیرمعنی‌دار نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ضریب همبستگی به نظر می‌رسد وقوع گردو خاک در دریای عمان بر تغییرات کلروفیل اثر شدیدی ندارد. در ادامه تحلیل‌های بیشتری ارائه خواهد شد. همبستگی بین کلروفیل و بارش با مقادیر ۰/۰۷- و ۰/۲۰+ با دو روش اسپیرمن و پیرسون، عدم ارتباط بین آن دو را نشان

می‌دهد که می‌توان نتیجه گرفت در دریای عمان تغییر مقدار بارندگی در غلظت کلروفیل تأثیری بارزی ندارد. در بررسی ضریب همبستگی کلروفیل و دما همبستگی نسبتاً قوی منفی ($-0/45$ تا $-0/75$) به دست آمده است. به این معنی که دریای عمان با افزایش دما میزان کلروفیل کاهش می‌یابد و عدد P-Value کوچک‌تر از $0/05$ معنی‌دار بودن این ارتباط را تأیید می‌نماید. همچنین عدد بزرگ‌تر در ضریب همبستگی اسپیرمن نشان دهنده رابطه غیرخطی بین کلروفیل و دماست به گونه‌ای که ارتباط این دو کمیت به متغیرهای دیگری وابسته است. همبستگی کلروفیل و سرعت باد به‌طور معنی‌داری با مقادیر $-0/33$ و $-0/43$ به دست آمده و رابطه متوسط تا ضعیف بین آن دو را نشان می‌دهد. علامت منفی ضریب همبستگی نشان‌دهنده رابطه عکس بین آنها است. گرچه مقدار همبستگی کمتر از $0/5$ است، اما عدد P-Value کوچک‌تر از $0/05$ برای هر دو ضریب همبستگی بیان‌گر معنادار بودن ارتباط بین باد و کلروفیل است.

جدول ۲: ضریب همبستگی اسپیرمن و پیرسون بین کلروفیل (میلی‌گرم بر مترمکعب) با گردوخاک سطحی (میکروگرم بر مترمکعب)، بارش (میلی‌گرم بر مترمربع)، دمای ۲ متری (سلسیوس) و سرعت باد ۱۰ متری (متر بر ثانیه)، در خلیج فارس و دریای عمان در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰ (علامت صلیب عدم معنی‌داری را نشان می‌دهد).

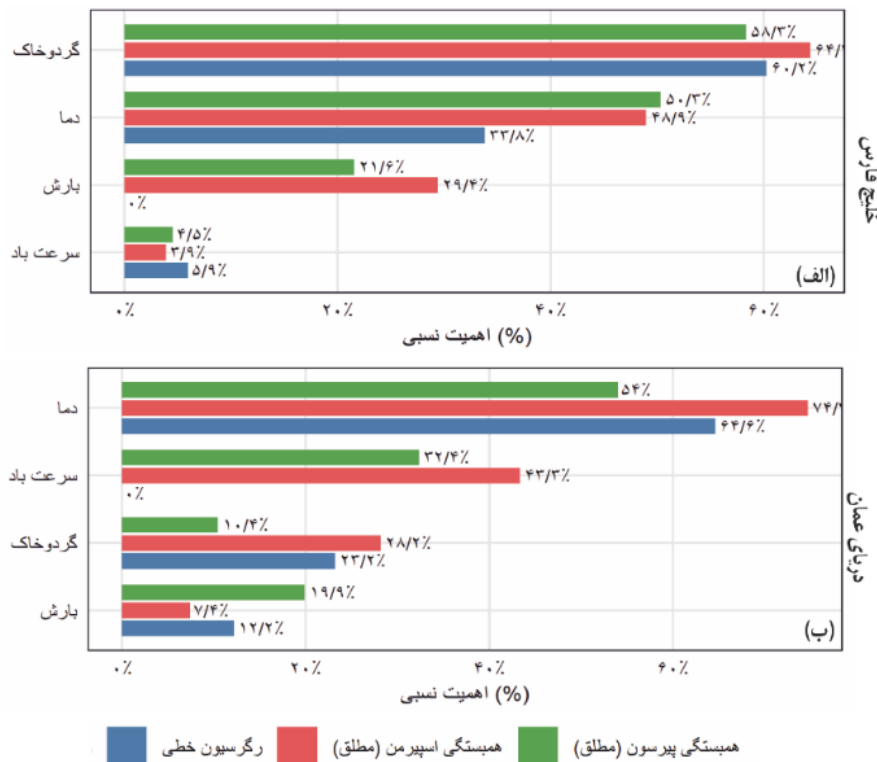
کمیت	منطقه	گردوخاک		بارش		دمای ۲ متری		باد ۱۰ متری	
		اسپیرمن	پیرسون	اسپیرمن	پیرسون	اسپیرمن	پیرسون	اسپیرمن	پیرسون
کلروفیل	خلیج فارس	-0/58	-0/64	0/29	0/22	-0/50	-0/49	0/43	0/43
	دریای عمان	0/10 [†]	-0/28	-0/07 [†]	0/20	-0/54	-0/75	-0/32	-0/43

با مقایسه نتایج به دست آمده از ضریب همبستگی، در هر دو پهنه آبی مشخص شد، دمای ۲ متری عامل مؤثری در تغییر غلظت کلروفیل بوده و رابطه عکس با آن دارد (شکل ۸). به این معنا که با افزایش دما، غلظت کلروفیل کاسته می‌شود. از همین رو در تابستان که دمای هوا افزایش می‌یابد، غلظت کلروفیل کمتر است (شکل ۴ شکل ۵ و شکل ۷). در خلیج فارس گردوخاک اولین عامل تأثیرگذار بر کلروفیل است. از جمله دلیل آن می‌توان به مجاورت با چشمه‌های گردوخاک اشاره نمود. در حالی که در دریای عمان پس از دمای ۲ متری، سرعت باد نقش ویژه‌ای در توزیع کلروفیل دارد. در بیشتر موارد مقدار ضریب همبستگی با روش اسپیرمن بیش از پیرسون به دست آمد، علت آن توزیع غیر نرمال داده‌ها و نقش عوامل دیگر در رابطه دو به دویی بین متغیرها است.



شکل ۸: همبستگی اسپیرمن بین کلروفیل و متغیرهای جوی موردنظر در (الف) خلیج فارس و (ب) دریای عمان، دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

به منظور بررسی بیشتر و تعیین رتبه متغیرهای جوی بر غلظت کلروفیل در دو پهنه آبی خلیج فارس و دریای عمان، سه شاخص همبستگی مطلق پیرسون و اسپیرمن و رگرسیون استفاده شد (شکل ۹). منظور از همبستگی مطلق نسبت ضریب هر متغیر به مجموع ضریبها بوده و برحسب درصد بیان می شود. در خلیج فارس در هر سه روش، بیشترین سهم مربوط به گردوخاک است و پس از آن دما در رتبه دوم قرار می گیرد. اگرچه سهم بارش در همبستگی مطلق نزدیک ۳۰ درصد است، اما در روش رگرسیون تأثیر آن معنی دار نشده است. در خلیج فارس میزان همکاری سرعت باد سطحی در تغییرات کلروفیل کمتر از ۶ درصد بوده و تأثیر ویژه ای بر آن ندارد. در دریای عمان در هر سه روش دما بیشترین تأثیر را داشته است. اما رتبه دیگر متغیرهای جوی در روش رگرسیون با همبستگی در دریای عمان تفاوت دارد. گرچه در روش همبستگی مطلق، عامل مؤثر دوم سرعت باد است، اما در روش رگرسیون تأثیر باد در کلروفیل دریای عمان معنی دار نشد. در دریای عمان در روش رگرسیون پس از دما گردوخاک و بارش در رتبه های بعدی قرار دارند.



شکل ۹: بررسی رتبه متغیرهای جوی بر تغییرات کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان با روش همبستگی مطلق و رگرسیون

تحلیل رگرسیونی نشان داد که در هر دو منطقه ی خلیج فارس و دریای عمان، تنها دو متغیر دما و گردوخاک تأثیر معنی داری بر تغییرات کلروفیل دارند. دما در هر دو منطقه باعث کاهش کلروفیل می شود. اثر گردوخاک در خلیج فارس نیز کاهشی است. نکته قابل توجه آن است که همبستگی گردوخاک و کلروفیل در دریای عمان ضعیف و منفی به دست آمده، در حالی که در رگرسیون تأثیر مثبت دیده می شود. باید توجه نمود، در همبستگی فقط اثر دو متغیر با همدیگر بررسی شده و در روش رگرسیون، اثر همه متغیرهای انتخابی در نظر گرفته می شود. به این معنی که اثر دما، بارش و باد کنترل شده و تأثیر گردوخاک مثبت مستقل است که به آن اثر پنهان سازی متغیر (Confounding Effect) گفته می شود. در دریای عمان دما رابطه همبستگی منفی قوی با کلروفیل داشت، اما در رگرسیون که نقش دما کنترل می شود، اثر مثبت گردوخاک نمایان می گردد. علاوه بر آن رابطه کلروفیل و بارش در خلیج فارس در روش همبستگی معنی دار بوده، در حالی که در روش رگرسیون غیرمعنی دار به دست آمد که بیان گر رابطه و نقش غیرخطی بارش بر کلروفیل است. پیش تر شرح داده شد که بارش از دو طریق می تواند بر کلروفیل مؤثر باشد. از آنجایی که در رگرسیون تأثیر آن غیرمعنی دار شد، به عنوان یک متغیر پیش بینی کننده کلروفیل شناخته

نمی‌شود. در مورد سرعت باد در دریای عمان نیز تحلیل مشلیبه‌ای وجود دارد. به طوری که در همبستگی معنی‌دار و در رگرسیون غیرمعنی‌داری بود، یعنی آن که رابطه بین آن دو تحت تأثیر دیگر عوامل است. افزایش باد در دریای عمان می‌تواند منجر به افزایش اختلاط عمودی در آب‌شده و فیتوپلانکتون‌ها را پخش نموده و غلظت آن‌ها را کاهش دهد. همچنین ممکن است باعث شود که نور کمتری به لایه‌های عمیق‌تر برسد که نتیجه آن کاهش کلروفیل سطحی است. دما می‌تواند به‌عنوان عاملی مؤثر بر کلروفیل و باد باشد. در ادامه معادله رگرسیون برای محاسبه کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان بر اساس ضرایب رگرسیونی دو متغیر دما و گردوخاک ارائه شده است. از آنجا که باد سطحی و بارش رابطه معنی‌داری با کلروفیل نداشتند، در معادله رگرسیون در نظر گرفته نشده‌اند.

$$\text{Chlorophyll}_{\text{persian}} = -0.02269 \times \text{Temperature} - 0.00206 \times \text{Dust} \quad (۴)$$

$$\text{Chlorophyll}_{\text{oman}} = -0.33335 \times \text{Temperature} + 0.00737 \times \text{Dust} \quad (۵)$$

بحث و نتیجه‌گیری

مقایسه کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان نشان می‌دهد که مقدار آن در خلیج فارس کمتر بوده و دریای عمان علاوه بر مقادیر بیشتر، پراکندگی داده نیز بیشتر است. توزیع کلروفیل در خلیج فارس دو نمایی است، اما در دریای عمان به سمت مقادیر حدی چوله است. تغییر غلظت کلروفیل دریای عمان بین ۰/۵ تا ۱۲ میلی‌گرم بر مترمکعب تغییر می‌کند. غلظت گردوخاک در خلیج فارس بسیار بیشتر از دریای عمان بوده اما بیشینه گردوخاک در هر دو منطقه در ماه ژوئیه به‌دست آمده است. میزان سرعت باد در خلیج فارس بیشتر از دریای عمان است. از میان متغیرهای مورد بررسی در خلیج فارس بیشترین ضریب همبستگی کلروفیل به ترتیب با گردوخاک سطحی، دمای ۲ متری و بارش به دست آمد. به این معنا که با کاهش گردوخاک، کاهش دما و افزایش بارش، مقدار کلروفیل در خلیج فارس افزایش می‌یابد. باد نقش مؤثری در توزیع کلروفیل در این پهنه آبی ندارد. گرچه انتظار می‌رود افزایش گردوخاک نتیجه مثبتی بر افزایش کلروفیل داشته باشد، اما رابطه عکس آن دو نشان می‌دهد که مقدار گردوخاک بیش از آستانه مشخصی می‌تواند مانع افزایش کلروفیل شود. افزایش دما نیز منجر به کاهش اختلاط در آب شده و مواد مغذی برای رشد فیتوپلانکتون را کاهش می‌دهد. عواملی مانند ساختار همدیدی، جهت میدان باد و ویژگی سطحی کانون‌های گردوخاک در نوع عنصر (فلز)، ترابرد و نهشت گردوخاک در منابع آبی و غلظت کلروفیل تأثیر گزار هستند. وزش بادهای شمال غرب بر روی عراق تا جنوب غرب ایران، گردوخاک را از مناطق شمال غرب و غرب عراق و شرق سوریه به سوی خلیج فارس انتقال داده و در آن پهنه آبی نهشت می‌شود (مبارک حسن و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج رگرسیون در خلیج فارس نشان داد که رتبه گردوخاک و دما در کلروفیل بیش از دو متغیر دیگر است که با نتایج همبستگی هم‌خوانی دارد. رابطه مثبت (ضریب همبستگی) بارش و کلروفیل در خلیج فارس نشان می‌دهد که با وقوع بارش و ورود روان‌آب به خلیج فارس از طریق رودهای منطقه به‌ویژه در شمال غرب منطقه، مواد مغذی برای تغذیه فیتوپلانکتون‌ها تهیه می‌شود. اما نتایج رگرسیون تأثیر بارش در کلروفیل را در خلیج فارس تأیید نمی‌نماید.

علت آن نیز می‌تواند برهم‌کنش عوامل مختلف با همدیگر بوده و نقش بارش خنثی شود. گرچه (ربانی‌ها و همکاران، ۱۴۰۱) به نقش بارش‌های سیل‌آسا در هدایت مواد مغذی برای کلروفیل تا اشاره می‌نمایند، اما در تحقیق حاضر نقش مؤثری برای بارش به دست نیامد. حتی در صورت وقوع بارش‌های سنگین، ممکن است تغییر قابل‌توجهی در غلظت کلروفیل مشاهده نشود. از جمله دلایل آن می‌توان به رقیق شدن فیتوپلانکتون‌ها به دلیل افزایش حجم آب، عدم تأمین مواد مغذی کافی برای رشد، جابه‌جایی یا ته‌نشینی فیتوپلانکتون‌ها به عمق آب و کوتاه‌مدت بودن دوره بارش اشاره نمود. علاوه بر این، عوامل محیطی دیگر مانند دمای آب، شوری و شدت نور نیز می‌توانند اثرات بارش را تعدیل کنند، به‌گونه‌ای که حتی بارش شدید نیز تغییر محسوس در غلظت کلروفیل ایجاد نکند. ارتباط بین باد و غلظت کلروفیل یک ارتباط غیرمستقیم است، بدین معنی که افزایش سرعت باد می‌تواند منجر به افزایش غلظت گردوخاک و در نتیجه کاهش غلظت کلروفیل شود. با توجه به بررسی میانگین ماهانه سرعت باد در خلیج فارس، بیشینه مقدار در تابستان ثبت شده که با کمینه غلظت کلروفیل همراه است که با نتیجه به دست آمده متناسب است.

در محدوده دریای عمان، بیشترین ضریب همبستگی به ترتیب متعلق به دمای ۲ متری و باد ۱۰ متری و گردوخاک است. به طوری که با کاهش دما، کاهش سرعت باد سطحی و کاهش گردوخاک، مقدار کلروفیل افزایش می‌یابد. بارش نقش مؤثری در کلروفیل دریای عمان ندارد. رابطه عکس دما و کلروفیل در دریای عمان نشان می‌دهد که افزایش دما در منطقه منجر به عدم اختلاط لایه‌های آب شده و مواد مغذی فیتوپلانکتون‌ها کاهش می‌یابد. اما رابطه عکس باد بیان‌گر آن است که با افزایش سرعت باد اختلاط و تلاطم در لایه‌های آب افزایش داشته و منجر به کاهش تابش خورشیدی دریافتی می‌شود. علاوه بر آن اختلاط بیشتر، می‌تواند مواد مغذی در دسترس را کاهش دهد. گرچه در تحقیق (Kitsiou and Kotta, 2019)، باد را عاملی در جهت پراکنده شدن مواد معدنی و آمیختگی آن در لایه‌های عمیق‌تر آب دانسته و نتیجه گرفته که اثر باد سطحی منجر به کاهش کلروفیل می‌شود.

با مقایسه مقدار ضریب همبستگی کلروفیل و گردوخاک در دو حوضه خلیج فارس (۰/۵۸-) و دریای عمان (۰/۱۰-)، تأثیر بارزتر گردوخاک بر کلروفیل خلیج فارس مشهود است. در حالی که در دریای عرب رابطه AOD و کلروفیل با ضریب همبستگی ۰/۴۳ تا ۰/۵۴ به دست آمده است (Singh et al., 2008). همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید، تأثیر گردوخاک در کلروفیل به‌طور مستقیم نبوده و به‌واسطه وجود فلزاتی همچون آهن نقش متفاوتی ایفا می‌نماید. علاوه بر آن که گردوخاک و AOD گرچه به همدیگر مرتبط هستند، اما AOD معرف تمامی هواویزهای موجود در جو بوده و گردوخاک را نیز شامل می‌شود. از این رو گردوخاک و AOD می‌توانند تأثیر متفاوتی بر کلروفیل داشته باشند. در هنگام وقوع گردوخاک کاهش تابش خورشیدی و در نتیجه کاهش فعالیت فتوسنتزی و تولید اولیه رخ داده و کلروفیل کاهش می‌یابد. اما اگر افزایش هواویزها با افزایش مواد مغذی همراه بوده و شدت تابش کاهش چندانی نداشته باشد، منجر به افزایش کلروفیل a و تولید اولیه می‌شود (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۵). علاوه بر آن دیگر تأثیر گردوخاک کاهش دامنه یونش نوری فیتوپلانکتون‌ها و افزایش تولید اولیه است. در تحقیق‌های پیشین در حوضه خلیج فارس و دریای عمان در دوره گرم سال بین کلروفیل و هواویزها رابطه مستقیمی به دست آمده است (دادی‌زاده و ملکوتی، ۱۳۹۳؛ سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۵) اما با افزایش میزان هواویزها به مرز ۰/۲۶ میزان کلروفیل a کاهش یافت (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۵). نتیجه حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهد رابطه سالانه کلروفیل و گردوخاک عکس بوده و افزایش گردوخاک منجر به کاهش کلروفیل می‌شود. از جمله دلایل عدم همبستگی مثبت گردوخاک و کلروفیل می‌توان به افزایش سرعت باد اشاره نمود که منجر به پراکنده شدن مواد معدنی و آمیختگی آن در لایه‌های عمیق‌تر آب شده، بنابراین اثر سطحی آن‌ها در افزایش کلروفیل کاهش می‌یابد. همچنین مواد مغذی که از گردوخاک تأمین می‌شود در مقایسه با مواد مغذی موجود در لایه‌های عمیق‌تر، اهمیت کمتری در افزایش کلروفیل دارند (Kitsiou and Kotta, 2019). همچنین در (Santos, 2010) به تأخیر زمانی یک ماه بین غلظت کلروفیل و عمق نوری هواویزها اشاره شده است. از این رو آستانه مشخصی در میزان یا نحوه اثرگذاری (افزایش یا کاهش) گردوخاک بر کلروفیل نمی‌توان تعیین نمود (Kitsiou and Kotta, 2019).

نتایج رگرسیون بیان‌گر آن است که رابطه دوبه‌دویی بین کلروفیل و متغیرهای جوی برقرار نبوده و تأثیر هم‌زمان چند عامل با همدیگر تغییرات کلروفیل را در هر دو پهلو آبی را ایجاد می‌نمایند. از این رو نتایج حاصل از روش رگرسیون نسبت به ضریب همبستگی در تعیین رتبه عوامل مؤثر بر کلروفیل قابل اعتمادتر است. پژوهش حاضر به‌منظور بررسی و ارتباط بین غلظت کلروفیل با کمیت‌های جوی در دوره آماري ۲۰۲۰-۲۰۱۰ در خلیج فارس و دریای عمان انجام شده است. در ادامه نتایج به‌دست‌آمده ارائه می‌شود.

توزیع مکانی کلروفیل در خلیج فارس در ساحل شمالی به‌ویژه در نزدیکی شمال غرب و تنگه هرمز بوده و در بخش‌های نیز در ساحل جنوبی است. با دور شدن از مناطق ساحلی از مقدار کلروفیل کاسته می‌شود. در حالی که در دریای عمان علاوه بر مناطق ساحلی در بخش‌های گسترده‌ای از پهلو آبی افزایش کلروفیل دیده می‌شود. ارتباط دریای عمان با اقیانوس هند و همچنین عوامل دیگر بر افزایش کلروفیل در این ناحیه مؤثر بوده و نسبت به خلیج فارس مقادیر بیشتری ثبت شده است. غلظت کلروفیل در خلیج فارس و دریای عمان با ضریب همبستگی ۰/۴ به همدیگر مرتبط شده‌اند که نشان می‌دهد، تغییرات کلروفیل در این دو پهلو آبی ارتباط معنی‌داری با همدیگر نداشته و تحت تأثیر عوامل و متغیرهای دیگری قرار دارند. توزیع چوله متغیرها و برهم‌کنش بین آنها و همچنین موقعیت جغرافیایی متفاوت بین دریای عمان و خلیج فارس از جمله عامل‌های کلیدی در عمل کرد متفاوت کلروفیل می‌باشند. در توزیع سالانه کلروفیل در هر دو پهلو

آبی روند تغییرات معنی داری به دست نیامد. علاوه بر کلروفیل، دیگر متغیرهای جوی مانند گردوخاک سطحی، دمای ۲ متری، بارش و باد ۱۰ متری نیز روند معنی داری نشان ندادند. به این معنا که در طی بازه مورد مطالعه از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ هیچ یک از متغیرها در خلیج فارس و دریای عمان روند افزایشی یا کاهش‌ی بارزی نداشته‌اند.

بیشترین مقدار کلروفیل مربوط به پائیز و زمستان و کمترین غلظت کلروفیل مربوط به بهار و تابستان است. نتیجه حاصل با (شهری و همکاران، ۱۴۰۰) هم‌خوانی کامل دارد. توزیع ماهانه بارش، گردوخاک سطحی و باد ۱۰ متری در دو پهنه آبی مورد مطالعه تفاوت‌های بارزی دارد. گرچه خلیج فارس و دریای عمان در یک محدوده عرض جغرافیایی قرار دارند اما روند تغییرات ماهانه بین آن دو مشابه نبوده و تفاوت‌هایی دیده می‌شود، زیرا عملکرد و تأثیر سامانه‌های همدیدی بر آنها مشابه نیست. دریای عمان در شش ماه گرم تحت تأثیر مانسون هند بوده و خلیج فارس به دلیل نزدیکی دریای مدیترانه و دریای سرخ تأثیر بیشتری از سامانه‌های آب و هوایی عرض‌های میانی می‌گیرد. تأثیرپذیری متفاوت خلیج فارس و دریای عمان از سامانه‌های آب و هوایی بر توزیع بارش و گردوخاک ماهانه آنها بسیار مشهود است. در طول تابستان مانسون هند فعال شده و در دریای عمان بارش‌های همرفتی و سنگین را تجربه می‌نماید. در حالی که تأثیر سامانه‌های مدیترانه و دریای سرخ بارش‌های بیشتری را در پاییز و زمستان در خلیج فارس به همراه دارد.

در تعیین رابطه بین کلروفیل و عوامل جوی، ضریب همبستگی اسپیرمن نتایج بهتری نسبت به همبستگی پیرسون داشت. با توجه به آنکه توزیع کلروفیل به‌ویژه در دریای عمان نرمال نیست، کاربست ضریب همبستگی اسپیرمن که تأثیر غیرخطی متغیرها را بررسی می‌نماید، عملکرد بهتری را نشان داد. بر همین اساس کلروفیل در خلیج فارس به ترتیب با گردوخاک $-۰/۶۵$ ، دما $-۰/۴۸$ و بارش $۰/۲۹$ رابطه معنی داری داشت. در حالی که در دریای عمان دما با $-۰/۷۵$ ، باد با $-۰/۴۳$ و گردوخاک با $-۰/۲۸$ بیشترین همبستگی را با کلروفیل داشتند. در روش رگرسیون که رابطه هر متغیر با کلروفیل را با ثابت نگه داشتن دیگر متغیرها بررسی می‌نماید، برای عوامل جوی مؤثر رتبه‌های مختلفی به دست آمد. به‌طوری که در خلیج فارس ابتدا گردوخاک و سپس دما، در دریای عمان ابتدا دما و سپس گردوخاک مهم‌ترین عوامل در تغییر غلظت کلروفیل شناسایی شدند. برای بارش و سرعت باد نقش کلیدی به دست نیامد.

در نتیجه‌گیری کلی در خصوص ارتباط غلظت کلروفیل با کمیت‌های جوی در خلیج فارس و دریای عمان می‌توان بیان کرد که افزایش دما منجر به کاهش غلظت کلروفیل خواهد شد، به‌طوری که یکی از دلایل افزایش غلظت کلروفیل در زمستان و پائیز و کاهش آن در بهار و تابستان به دمای هوا مرتبط است. افزایش دمای هوا در تابستان منجر به افزایش دمای سطح آب‌شده و فعالیت فتوسنتز در کلروفیل محدود و مواد مغذی کمتری ذخیره می‌کند، بنابراین غلظت آن در تابستان کاهش می‌یابد. نتیجه به دست آمده با ضرایب همبستگی بین غلظت کلروفیل و دما متناسب است. نتایج حاصل با تحقیقات پیشین هم‌خوانی دارد (بیات و همکاران، ۱۳۹۵؛ دادی‌زاده و ملکوتی، ۱۳۹۳؛ مبارک حسن، ۱۴۰۰). یکی دیگر از دلایل افزایش غلظت کلروفیل در خلیج فارس با توجه به ضرایب همبستگی، کاهش گردوخاک است. گردوخاک‌هایی که به خلیج فارس وارد می‌شوند، از کانون‌های عراق، سوریه و عربستان هستند که این گردوخاک‌ها مواد معدنی کافی برای رشد کلروفیل را به همراه نداشته و منجر به کاهش غلظت آن می‌شوند. با آن که مقدار گردوخاک از حد مشخصی بالاتر بوده و منجر به تضعیف کلروفیل می‌شود، نتیجه به دست آمده با پژوهش (مبارک حسن و همکاران، ۱۳۹۸) هماهنگ است. در دریای عمان عامل نفوذ گردوخاک متفاوت از خلیج فارس است، اما تأثیر آن بر کلروفیل قابل توجه است.

منابع

- بیات، ف.، مرادی، ن. و حسنلو، م. ۱۳۹۵. بررسی و مقایسه دمای سطح و کلروفیل آب‌ها با استفاده از تصاویر لندست ۸- (مطالعه موردی خلیج فارس) دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی
- دادی‌زاده، م. و ملکوتی، ح. ۱۳۹۳. توفان‌های گردوغبار و تأثیرات اکولوژیکی آن‌ها بر توزیع کلروفیل در خلیج فارس. نشریه علمی بوم‌شناسی آذربایجان، دوره ۳(۴)، صفحات ۷۳-۸۲
- ربانی‌ها، م.، آیین جمشید، خ. و نیامیندی، ن. ۱۴۰۱. مطالعه تغییرات کلروفیل a در آب‌های خلیج فارس و خلیج عمان. مجله علمی شیلات ایران، دوره ۳۱ (۲)، صفحات ۱۳-۲۵

- سلیمانی، آ.، ع. سگری، م. ح.، ع. لی داد الهی، س.، علمی زاده، س. و س. ح.، خ. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر ریزگردها بر تولید اولیه در خلیج فارس با استفاده از داده‌های سنجش از دور. محیط زیست طبیعی ایران، دوره ۶۹، صفحات ۲۲۸-۲۱۵
- سواری، ا.، قناعتیان، ح.، شیرین منش، س. وق اسمی، م. ۱۳۹۴. بررسی تغییرات زمانی دما و کلروفیل در بازه مکانی عسلویه و بندر دیر (پارس جنوبی تا پارس شمالی) در استان بوشهر با استفاده از تکنیک های سنجش از دور سومین کنفرانس بین المللی اقیانوس شناسی خلیج فارس
- شاپوری، م. و جوانشیر، آ. ۱۳۸۸. بررسی میزان توده زنده کلروفیل a در دهانه رودخانه تجن. زیست شناسی دریا، دوره ۱(۱)، صفحات ۷۸-۸۸
- شهری، ا.، صیادی، م. ح. وی وسفی، ا. ۱۴۰۰. پایش میزان کلروفیل-آ، کربن آلی، شوری و دمای سطح آب در سواحل سیستان و بلوچستان با استفاده از داده‌های سنجش از دور. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۱۲(۴)، صفحات ۱۳۴-۱۱۹
- علمی زاده، ه. و فاضل پور، خ. ۱۳۹۵. برآورد تغییرات پارامترهای زیست محیطی در تنگه هرمز با استفاده از تصاویر ماهواره‌های مودیس [برآورد تغییرات پارامترهای زیست محیطی در تنگه هرمز با استفاده از تصاویر ماهواره‌های مودیس]. نشریه اقیانوس شناسی، دوره ۷(۲۷)، صفحات ۳۹-۲۹
- مبارک حسن، ا. ۱۴۰۰. بررسی تأثیر عوامل جوی با تاکید بر گردوخاک بر تغییرات کلروفیل در جنوب شرق دریای خزر (۲۰۱۷-۲۰۰۷). نشریه اقیانوس شناسی، دوره ۱۲(۴۶)، صفحات ۸۵-۷۴
- مبارک حسن، ا.، تاج بخش، س.، غفاریان، پ.، پگاه فر، ن. و کریم خانی، م. ۱۳۹۸. مطالعه ساختارهای همدیدی موثر در گرد و خاک منطقه خلیج فارس. نشریه اقیانوس شناسی، دوره ۱۰(۳۷)، صفحات ۶۴-۵۳
- مبارک حسن، ا.، رهنما، م. و نوری، ف. ۱۴۰۰. بررسی تأثیر احتمالی گردوخاک بر غلظت کلروفیل در منابع آبی شمال و جنوب ایران (۲۰۱۷-۲۰۰۰)، دوره ۲(۱)، صفحات

Barale, V., Gower, J. and Alberotanza, L. 2010. Oceanography from space: Revisited. Springer Science & Business Media.

Bishop, J. K., Davis, R. E. and Sherman, J. T. 2002. Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific. *Science*, 298 (5594): 817-821

Boyd, P. W., Watson, A. J., Law, C. S., Abraham, E. R., Trull, T., Murdoch, R., Bakker, D. C., Bowie, A. R., Buesseler, K. and Chang, H. 2000. A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature*, 407 (6805): 695-702

Buchard, V., Randles, C., Da Silva, A., Darmenov, A., Colarco, P., Govindaraju, R., Ferrare, R., Hair, J., Beyersdorf, A. and Ziemba, L. 2017. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies. *Journal of climate*, 30 (17): 6851-6872

Dacey, J. W. and Wakeham, S. G. 1986. Oceanic dimethylsulfide: production during zooplankton grazing on phytoplankton. *Science*, 233 (4770): 1314-1316

Gelaro, R., Mccarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G. and Reichle, R. 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of climate*, 30 (14): 5419-5454

Guieu, C., Loÿe-Pilot, M. D., Ridame, C. and Thomas, C. 2002. Chemical characterization of the Saharan dust end-member: Some biogeochemical implications for the western Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107 (D15), ACH 5-1-ACH 5-11

Kaufman, Y., Koren, I., Remer, L., Tanré, D., Ginoux, P. and Fan, S. 2005. Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110 (D10)

Kavak, M. T. and Karadogan, S. 2012. The relationship between sea surface temperature and chlorophyll concentration of phytoplanktons in the Black Sea using remote sensing techniques. *Journal of environmental biology*, 33 (2): 493-8

Kotta, D. and Kitsiou, D. 2019. Exploring possible influence of dust episodes on surface marine chlorophyll concentrations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(2): 50

Kumar, S. P., Roshin, R. P., Narvekar, J., Kumar, P. D. and Vivekanandan, E. 2010. What drives the increased phytoplankton biomass in the Arabian Sea? *Current Science*, 99 (1): 101-106

Laosuwan, T., Uttarak, Y. and Rotjanakusol, T. 2022. Analysis of Content and Distribution of Chlorophyll-a on the Sea Surface through Data from Aqua/MODIS Satellite. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31 (5) : 4711-4719

- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M. and Bacmeister, J. 2015.** Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geoscientific Model Development*, 8 (5): 1339-1356
- Nausch, M., Nausch, G., Wasmund, N. and Nagel, K. 2008.** Phosphorus pool variations and their relation to cyanobacteria development in the Baltic Sea: A three-year study. *Journal of Marine Systems*, 71 (1-2): 99-111
- Nezlin, N. P., Polikarpov, I. G., Al-Yamani, F. Y., Rao, D. S. and Ignatov, A. M. 2010.** Satellite monitoring of climatic factors regulating phytoplankton variability in the Arabian (Persian) Gulf. *Journal of Marine Systems*, 82 (1-2): 47-60.
- Nuridin, S., Mustapha, M. and Lihan, T. 2013.** The relationship between sea surface temperature and chlorophyll-a concentration in fisheries aggregation area in the archipelagic waters of Spermonde using satellite images. *AIP Conference Proceedings*,
- Patra, P. K., Kumar, M. D., Mahowald, N. and Sarma, V. 2007.** Atmospheric deposition and surface stratification as controls of contrasting chlorophyll abundance in the North Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112 (C5)
- Prospero, J., Glaccum, R. and Nees, R. 1981.** Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America. *Nature*, 289: 570-572
- Santos, A. M. J. 2010.** *Influence of Saharan aerosols on phytoplankton biomass in the tropical north Atlantic Ocean* University of Puerto Rico, Mayagüez Campus Mayagüez, Puerto Rico.
- Schollaert, S. E., Yoder, J. A., O'reilly, J. E. and Westphal, D. L. 2003.** Influence of dust and sulfate aerosols on ocean color spectra and chlorophyll a concentration derived from SeaWiFS off the US east coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108 (C6)
- Shuchman, R. A., Sayers, M., Fahnenstiel, G. L. and Leshkevich, G. 2013.** A model for determining satellite-derived primary productivity estimates for Lake Michigan. *Journal of Great Lakes Research*, 39: 46-54
- Singh, R. P., Prasad, A. K., Kayetha, V. K. and Kafatos, M. 2008.** Enhancement of oceanic parameters associated with dust storms using satellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113 (C11)
- Tchernia, P. 1980.** *Descriptive regional oceanography*. Pergamon Press. 253 pages

Investigation of Chlorophyll and the Impact of Atmospheric Variables on its Variations in the Persian Gulf and the Gulf of Oman during 2010–2020 Period

Elham Mobarak Hassan^{1*}

1. Department of Environment, Ahv. C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

***Corresponding author:**
el.mobarakhassan@iau.ac.ir

Received date: **September/28/2023**
Accepted date: **February/03/2024**

Abstract

Chlorophyll-a waters, as an indicator of biological status, plays a crucial role in monitoring the health of marine ecosystems and assessing primary productivity; its variations can reflect environmental conditions and water quality. Understanding the relationship between biological characteristic, such as chlorophyll, in water bodies and atmospheric quantities — particularly dust—is highly importance. The present study aims to investigate the temporal variations in chlorophyll concentration and its interaction with atmospheric quantities in the Persian Gulf and the Sea of Oman. For this purpose, monthly mean data of chlorophyll concentration, surface dust, 2-meter air temperature, 10-meter wind speed, and precipitation were obtained from the MERRA-2 reanalysis data series with a spatial resolution of $0.625^\circ \times 0.5^\circ$ for the 2010–2020. The monthly and temporal distribution of each variable was analyzed separately for both regions. To analyze how atmospheric factors, influence chlorophyll, Spearman and Pearson correlation coefficients, as well as multiple regression method, were employed. The results indicated that chlorophyll concentrations in the Sea of Oman are higher than in the Persian Gulf, and the data exhibit greater dispersion. Furthermore, the maximum and minimum chlorophyll values were obtained during the cold and warm periods of the year, respectively. The monthly distribution of chlorophyll and other atmospheric factors, except for temperature, differs between the Persian Gulf and the Sea of Oman. According to Spearman correlation results, in the Persian Gulf, increased dust (−0.64), increased temperature (−0.48), and decreased precipitation (+0.29) led to a decrease in chlorophyll concentration. In the Sea of Oman, increased temperature (−0.75), increased wind speed (−0.43), and increased dust (−0.28) resulted in a decrease in chlorophyll. By applying the multiple regression method, the most significant factors affecting changes in chlorophyll concentration were identified as dust and temperature in the Persian Gulf, and temperature and dust in the Sea of Oman, respectively. The impacts of precipitation and wind on chlorophyll concentrations in the two water bodies of southern Iran was not precisely determined, as these factors may have an indirect effect on chlorophyll or their influence may be linked to others factors such as temperature.

Keywords: Chlorophyll-a, Atmospheric variables, Dust mass, MERRA-2 data, Persian Gulf, Sea of Oman.