

بررسی الگوی عمقی و مکانی کربن آلی، نیتروژن کل و نسبت کربن به نیتروژن در رسوبات و نقش آن ها در پشتیبانی از تولیدات ثانویه در اکوسیستم‌های مانگروی خلیج فارس

مهدی قدرتی شجاعی^{۱*}، فاطمه محمودی^۱، رضا ندرلو^۲، علی نصراللهی^۳، تیم ینریان^۴

۱- گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲- گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- گروه علوم جانوری و زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم و فناوری زیستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- مرکز تحقیقات مناطق دریایی گرمسیری لایبنتس، برمن، آلمان

چکیده

نوع مقاله

مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

تاریخ چاپ الکترونیکی:

۱۴۰۴/۰۳/۱۵

*نویسنده مسئول:

mshojaei@modares.ac.ir

این مطالعه با هدف بررسی میزان کربن آلی، نیتروژن کل و نسبت کربن به نیتروژن در رسوبات اکوسیستم‌های مانگروی خلیج فارس انجام شد. نمونه‌برداری از پنج منطقه شامل خور بیدخون، مل‌کنزه، خور هاله، بندرخمیر و قشم در سه عمق (۰-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۵۰ سانتی‌متر) صورت گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر کربن و نیتروژن به‌طور کلی از سطح به عمق روندی کاهشی داشتند که این امر ناشی از فرآیندهای طبیعی مانند تجزیه میکروبی، معدنی‌شدن و تراکم رسوبات است. کمترین مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل در خور هاله مشاهده شد که به‌واسطه دست‌کاشت بودن جنگل و عدم بلوغ ساختار زی‌توده قابل تفسیر است. در مقابل خور بیدخون در تمامی اعماق بیشترین مقدار کربن آلی را دارا بودند که با توجه به مجاورت با صنایع پتروشیمی احتمال ورود ترکیبات آلی خشکی‌زاد را تقویت می‌کند. خور بیدخون در تمامی اعماق دارای بیشترین نسبت کربن به نیتروژن با میانگین ۲۱/۸۸ بود. در مقابل بندرخمیر و قشم دارای کمترین نسبت کربن به نیتروژن با میانگین حدود ۱۲ بودند که نشان‌دهنده منبع ترکیبی و نسبتاً متعادلی از مواد آلی است. چنین نسبتی در منطقه قشم و خمیر حاکی از حضور همزمان مواد آلی با منشأ گیاهی (مانند برگ‌های حرا) و منابع غنی‌تر از نیتروژن (مانند فیتوپلانکتون‌ها) است. این توازن در کیفیت مواد آلی می‌تواند منجر به شرایطی شود که از تولید ثانویه بیشتر در جوامع بی‌مهرگان کفزی حمایت می‌کند، به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که اکوسیستم‌های مانگروی خلیج فارس تحت تأثیر عوامل محیطی، اقلیمی و انسانی، ظرفیت متفاوتی در ذخیره‌سازی و چرخه مواد آلی دارند که این تفاوت‌ها باید در مدیریت و حفاظت از این زیست‌بوم‌های ارزشمند مد نظر قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: حرا، خلیج فارس، چرخه کربن، تولیدات ثانویه

مقدمه

بوم‌سازگان‌های مانگرو از منظر بوم‌شناختی، اقتصادی و اجتماعی دارای اهمیت چشمگیری هستند. از دیدگاه بوم‌شناختی، این اکوسیستم‌ها زیستگاه‌های کلیدی برای تغذیه، تخم‌ریزی و رشد اولیه بسیاری از گونه‌های آبزی محسوب می‌شوند. مانگروها به عنوان پناهگاه‌هایی برای گونه‌های مهاجر عمل کرده و زیستگاه‌های نوزادگاهی مهمی برای گونه‌های تجاری مانند میگوها و ماهیان سطح‌زی فراهم می‌کنند (۱،۲). برای نمونه، جنگل‌های حرا در منطقه خورخوران در خلیج فارس، محل تخم‌ریزی گونه‌هایی مانند حلوا سفید (*Pampus argenteus*) و زیستگاه نوزادگاهی برای گونه‌هایی چون سنگسر معمولی (*Pomadourys kakan*) و شانک زردباله (*Acanthopagrus latus*) هستند (۳). از منظر حفاظت ساحلی، مانگروها در تثبیت رسوبات، جلوگیری از فرسایش، و کاهش آسیب‌های ناشی از امواج و طوفان‌ها نقش مؤثری ایفا می‌کنند (۴،۵).

اگر چه جنگل‌های مانگرو درصد کوچکی از نواحی ساحلی جهان را اشغال می‌کنند، اما نقشی بسیار مهم در چرخه جهانی کربن ایفا می‌نمایند. بیش از ۱۵ درصد از کل ذخیره کربن انباشته شده در رسوبات دریایی در همین جنگل‌ها ذخیره شده است (۶). این کربن به عنوان کربن آبی^۱ شناخته می‌شود. کربن آبی، کربنی است که در اکوسیستم‌های مانگرو، شوره‌زارهای ساحلی^۲ و علف‌زارهای دریایی^۳ و در رسوبات، زی‌توده زنده گیاه بالای خاک (برگ‌ها، شاخه‌ها و تنه اصلی)، زی‌توده زنده گیاه زیر خاک (ریشه‌ها) و نیز زی‌توده غیر زنده (باقی‌مانده برگ و چوب مرده) ذخیره می‌شود (۷). همانند کربن ذخیره شده در گیاهان خشکی‌زی، کربن آبی نیز در فواصل زمانی کوتاه (چند سال تا چند دهه) در زی‌توده زنده گیاهان وارد می‌شود. ولی بر خلاف اکوسیستم خشکی، کربن گرفته شده توسط اکوسیستم‌های ساحلی می‌تواند به مدت زمان بسیار طولانی (تا چندین قرن) در رسوبات باقی‌مانده و به یک ذخیره بسیار بزرگ تبدیل شود (۸). در اکوسیستم خشکی به علت در دسترس بودن بالای اکسیژن، فعالیت‌های اکسیداسیون میکروبی شدید است که باعث آزاد سازی دوباره دی‌اکسیدکربن ذخیره شده به جو می‌شود. این در حالی است که در اکوسیستم‌های کربن آبی، خاک توسط آب اشباع شده و میزان اکسیژن آن به شدت پایین است که باعث می‌شود کربن ذخیره شده مجدداً وارد اتمسفر نشده و به مرور زمان روی هم انباشته شود (۹). درختان مانگرو تا ۱۰ برابر بیش‌تر از گیاهان خشکی دی‌اکسیدکربن را از اتمسفر می‌گیرند و تا ۵ برابر بیش‌تر از درختان خشکی دی‌اکسیدکربن را در تنه و رسوبات خود ذخیره می‌کنند (۱۰). این ویژگی جنگل‌های مانگرو باعث شده است که نقش آن‌ها در مقابله با اثرات تغییرات اقلیم بسیار ارزشمند باشد (۱۲-۱۰).

مساحت زیر پوشش بوم سازگان مانگرو در جنوب ایران ۲۰۰ کیلومتر مربع است (۲). که در طول سواحل جنوبی ایران از خور موسی در استان خوزستان (دست کاشت) تا باهوکلالت در استان سیستان و بلوچستان پراکنش دارند. دو گونه گیاه مانگرو با نام حرأ (*Avicennia marina*) و چنل (*Rhizophora mucronata*) در سواحل ایران پراکنش دارند که بیش از ۹۷ درصد پوشش مربوط به گیاه حرأ است. گونه حرأ همچنین تنها گونه موجود در حاشیه جنوبی خلیج فارس است (۱۳).

یکی از ابزارهای مهم و پرکاربرد در مطالعات بوم‌شناسی و کیفیت محیط زیست ساحلی، نسبت کربن به نیتروژن (C/N) است. نسبت کربن به نیتروژن در اکوسیستم‌های ساحلی شاخصی کلیدی برای شناسایی منشأ، کیفیت و سرنوشت ماده آلی است. این نسبت همچنین می‌تواند نشان دهد که ماده آلی موجود در رسوبات یا آب از منابع خشکی‌زاد مانند برگ‌های گیاهان یا منابع دریازی مانند پلانکتون‌ها سرچشمه گرفته است (۱۴). نسبت کربن به نیتروژن یکی از شاخص‌های مؤثر در پایش آلودگی در اکوسیستم‌های ساحلی نیز است که به‌ویژه برای تشخیص ورود مواد آلاینده نیتروژنی مانند پساب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی کاربرد دارد. در شرایط طبیعی، نسبت کربن به نیتروژن در رسوبات دریایی ترکیب متعادلی از منابع آلی خشکی‌زاد و دریازی است. اما ورود فزاینده نیتروژن معدنی به محیط باعث کاهش این نسبت می‌شود، زیرا غلظت نیتروژن نسبت به کربن افزایش می‌یابد. بنابراین، نسبت پایین کربن به نیتروژن می‌تواند نشانه‌ای از یوتروفیکاسیون، افزایش بار تغذیه‌ای و یا آلودگی نیتروژنی ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد. پایش تغییرات این نسبت در طول زمان یا در امتداد یک شیب آلودگی، ابزاری مؤثر برای شناسایی منابع آلاینده محسوب می‌شود (۱۵). نسبت کربن به نیتروژن نقش مهمی در ارزیابی قابلیت تجزیه‌پذیری ماده آلی و وضعیت حاصلخیزی رسوبات در اکوسیستم‌های ساحلی دارد. ماده آلی با نسبت کربن به نیتروژن پایین‌تر (معمولاً کمتر از ۱۰) معمولاً حاوی نیتروژن بیشتری است و توسط میکروارگانیسم‌ها سریع‌تر و آسان‌تر تجزیه می‌شود، زیرا نیتروژن برای رشد و متابولیسم آن‌ها ضروری است. در مقابل، ماده آلی با نسبت کربن به نیتروژن بیشتر (بیش از ۲۰)، نیتروژن کمی دارد و تجزیه آن کندتر انجام می‌شود، مگر آن‌که نیتروژن خارجی به سیستم اضافه شود. بنابراین، نسبت کربن به نیتروژن شاخصی مهم برای تعیین دسترس‌پذیری نیتروژن، توان تولید اولیه و وضعیت حاصلخیزی محیط است که در آن نسبت‌های پایین‌تر معمولاً بیانگر محیطی غنی‌تر از نظر تغذیه‌ای و حاصلخیزتر می‌باشند (۱۶).

¹ Blue Carbon

² Salt tidal marshes

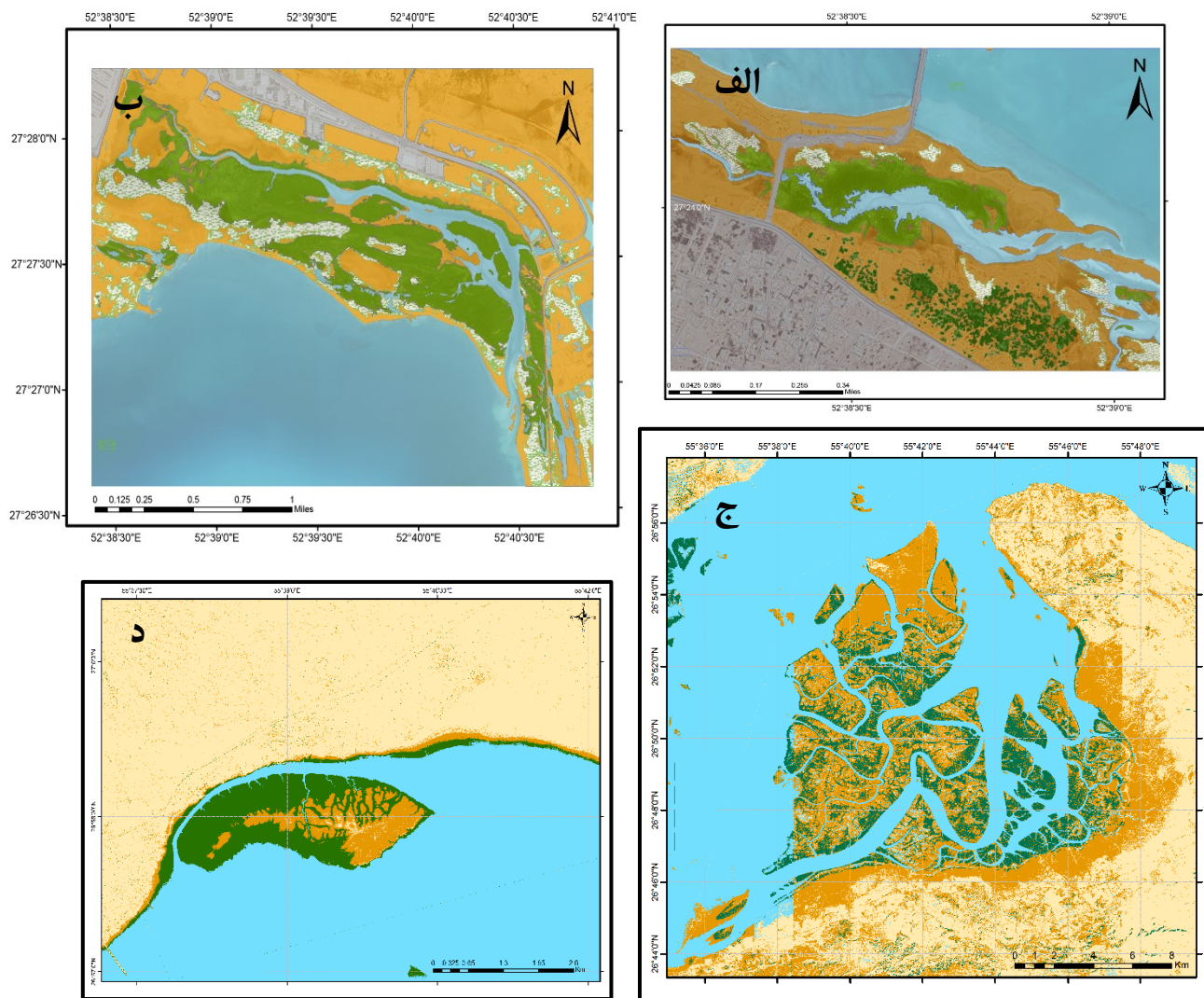
³ Seagrass meadows

در سیستم‌های رسوبی دریایی و ساحلی، به ویژه جنگل‌های حرا، غلظت کربن آلی و نیتروژن کل شاخص‌های مهمی از در دسترس بودن مواد آلی هستند که به طور مستقیم بر تولید ثانویه کفزیان تأثیر می‌گذارند غلظت کربن آلی و نیتروژن کل بالاتر معمولاً با فراهم کردن انرژی و مواد مغذی لازم برای رشد و تولید مثل، از فعالیت میکروبی و بی‌مهرگان بیشتری پشتیبانی می‌کنند. نسبت کربن به نیتروژن این تصویر را بیشتر اصلاح می‌کند و به عنوان ردیاب منشأ و کیفیت ورودی‌های آلی عمل می‌کند. نسبت‌های کربن به نیتروژن پایین (معمولاً کمتر از ۱۰) نشان دهنده منابع غنی از نیتروژن و ناپایدارتر مانند جلبک یا فیتوپلانکتون هستند، در حالی که نسبت‌های بالا (بیشتر از ۱۵) نشان دهنده بقایای گیاهی مقاوم‌تر و کربن‌دارتر مانند برگ‌های حرا هستند. سیستم‌هایی با غلظت کربن آلی و نیتروژن کل متعادل و نسبت‌های کربن به نیتروژن متوسط، تمایل به تولید ثانویه بالاتر دارند زیرا مواد آلی از نظر زیستی در دسترس‌تر هستند و از یک جامعه کفزی متنوع و مولد پشتیبانی می‌کنند. هدف از این مطالعه بررسی میزان غلظت کربن آلی و نیتروژن کل و نیز نسبت کربن به نیتروژن در رسوبات جنگل‌های مانگرو در سواحل ایران و تحلیل تأثیر آن بر تولیدات ثانویه در جوامع بی‌مهرگان کفزی است. با توجه به نقش کلیدی مانگروها در ذخیره‌سازی کربن، چرخه مواد مغذی، و پالایش طبیعی آلاینده‌ها، تعیین نسبت کربن به نیتروژن می‌تواند اطلاعات مهمی درباره منشأ و کیفیت ماده آلی موجود در رسوبات ارائه دهد. این نسبت، در کنار داده‌های مربوط به کربن و نیتروژن کل، شاخص مناسبی برای ارزیابی قابلیت تجزیه‌پذیری مواد آلی و میزان دسترسی زیستی آن‌ها برای موجودات کفزی فراهم می‌سازد. در نتیجه، ارزیابی این نسبت می‌تواند بینشی از توان بالقوه سیستم برای حمایت از تولیدات ثانویه فراهم نماید. از سوی دیگر، تعیین نسبت کربن به نیتروژن در مانگروهای ایران می‌تواند درک دقیق‌تری از ترکیب منابع ماده آلی (خشکی‌زاد یا دریازی)، فراهم سازد. این اطلاعات در مدیریت پایدار اکوسیستم‌های مانگرو، بازسازی زیستگاه‌ها، و طراحی برنامه‌های پایش بلندمدت محیط زیست ساحلی نقش حیاتی دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه نمونه‌برداری

منطقه نمونه‌برداری شامل اکوسیستم مانگرو در محدوده آب‌های استان بوشهر و استان هرمزگان است. در استان بوشهر جنگل‌های مانگرو در خور خور بیدخون و مل گنزه و همچنین جنگل‌های دست کاشت خور هاله و در استان هرمزگان جنگل‌های مانگروی قشم و بندر خمیر مورد مطالعه قرار گرفتند (شکل ۱). جنگل‌های مانگرو استان بوشهر، قشم و بندر خمیر به طور طبیعی از گونه حرا *Avicennia marina* پوشیده شده است (۵). سطح پوشش جنگل‌های مانگرو خور بیدخون ۲۶۹ هکتار، خور بساتین ۳۲ هکتار و خور هاله ۱۶ هکتار است و مجموعاً از سال ۲۰۰۴ به عنوان اولین ذخیره‌گاه ملی دریایی ایران در نظر گرفته شده است. سطح پوشش جنگل‌های مانگرو مل گنزه هم حدود ۱۱ هکتار است. اکوسیستم مانگرو در استان بوشهر عمدتاً خشک است. میانگین بارش کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در سال است. میانگین دمای سالانه ۲۷/۲ درجه سلسیوس (۲۰۱۱-۲۰۲۰) است، کمترین و بیشترین دما به ترتیب ۱۱/۵ و ۴۲/۳ درجه سلسیوس در ماه‌های دی و تیر است (۱۷). جزر و مد نایبند از نوع نیم روزانه با حداکثر طول موج ۲ متر است. جنگل مانگرو جزیره قشم بزرگ‌ترین جنگل مانگرو منطقه قشم با وسعت ۶۰۹۱ هکتار است و حدود ۴۰ درصد از پوشش گیاهی جنگل‌های مانگرو در این منطقه قرار گرفته است. دمای سالانه ۲۷/۲ درجه سلسیوس (۲۰۱۱-۲۰۲۰) است، کمترین و بیشترین دما به ترتیب ۱۲/۱۶ و ۳۵/۸۶ درجه سلسیوس در ماه‌های دی و تیر است (۱۷). میانگین بارش سالانه حدود ۸۱ میلی‌متر در سال است. جزر و مد قشم از نوع نیم روزانه با حداکثر طول موج ۳ الی ۴ متر است (۱۸). جنگل مانگرو دارای وسعت ۱۷۱۶ هکتار است. میانگین دمای سالانه در بندر خمیر ۲۹/۱ درجه سلسیوس (۲۰۱۱-۲۰۲۰) است، حداقل و حداکثر دما به ترتیب ۱۳/۱ و ۳۷/۹ درجه سلسیوس در ماه‌های دی و تیر است (۱۹). میانگین بارش سالانه حدود ۹۰ میلی‌متر در سال است. جزر و مد بندرخمیر از نوع نیم روزانه با حداکثر طول موج ۳ الی ۵ متر است. جنگل‌های مانگرو قشم و بندرخمیر در لیست انجمن رامسر برای حفاظت ثبت شدند و تحت عنوان ذخایر زیست‌کره حرا در سال ۱۹۷۷ توسط سازمان یونسکو شناخته شدند (۲۰، ۲۱).



شکل ۱- نقشه مناطق نمونه‌برداری در آب های خلیج فارس (الف: خور هاله، ب: خور بیدخون، ج: قشم و د: بندر خمیر)

نمونه‌برداری از رسوبات

در این پژوهش برای نمونه برداری از رسوبات از مغزگیر روسی^۱ رسوب استفاده شد. مغزگیر روسی وسیله مناسبی برای نمونه‌برداری در اکوسیستم‌های ساحلی است. این وسیله که به صورت نیم‌دایره ساخته شده است، دارای باله چرخشی است که باید پس از فرو کردن در رسوبات چرخانده شود. چرخش این باله سبب جمع شده رسوبات در فضای نیم‌دایره‌ای آن می‌شود که هنگام بالا آمدن از رسوب دست نخورده باقی می‌ماند. در محل نمونه‌برداری، قبل از قرار دادن مغزگیر درون رسوب، مواد آلی زائد و برگ‌های زنده (در صورت وجود)، از روی سطح رسوب برداشته شدند و سپس مغزگیر به صورت عمود در رسوب وارد شد. برای جلوگیری از متراکم شدن رسوبات، سرعت وارد کردن مغزگیر در خاک کند و با ضربات ملایم بود. در مکان‌هایی که که مغزگیر تا عمق مشخص شده در رسوب فرو نمی‌رفت، مکان نمونه برداری تغییر پیدا می‌کرد. مغزگیر باید بعد از قرار گرفتن در رسوب، چرخانده و به آرامی از رسوب خارج گردید. چرخاندن مغزگیر به بازیابی یک نمونه رسوب کامل کمک می‌کند. نمونه‌های رسوب در مناطق نمونه برداری در محدوده عمق‌های ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر و ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر جمع‌آوری شدند. زیرنمونه‌ها

¹ Russian peat corer

از نقطه میانی بین محدوده عمق‌های مورد نظر جمع‌آوری شدند. برای نمونه اگر محدوده زیرنمونه‌گیری فاصله بین عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر باشد، زیرنمونه باید از عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر گرفته شد. زیرنمونه‌ها دارای ۵ سانتی‌متر عمق و وزنی بین ۵ تا ۵۰ گرم بودند. پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها به همراه نام منطقه نمونه‌برداری، شماره پلات، عمق رسوب و تاریخ نمونه‌برداری در ظروف مناسب قرار گرفتند. برای کم کردن سرعت تجزیه مواد آلی و جلوگیری از فعالیت‌های میکروبی، نمونه‌ها در محیط خنک (4°C) نگهداری شدند و سپس ظرف مدت ۲۴ ساعت منجمد شدند. قبل از محاسبه میزان کربن و نیتروژن، زیرنمونه‌ها همگن شدند. برای این منظور ابتدا باید در نمونه‌های خشک شده قطعات بزرگ مانند سنگ و شاخه درختان را حذف گردید. برای همگن‌سازی می‌توان از هاون دستی استفاده شد. برای به حداقل رساندن خطاها، هاون قبل از آغاز فرآیند برای هر نمونه رسوب، با استفاده از اتانول شستشو شد. در رسوبات ساحلی، کربن غیرآلی به شکل کربنات (مثل کلسیم کربنات^۱) در قالب پوسته صدف‌ها و یا قسمت‌هایی از صخره‌های مرجانی قابل مشاهده هستند. کربنات کلسیم حاوی کربن است، اما در ذخیره کربن آبی^۲ تاثیر گذار نیست. با این وجود مثلاً در هنگام سنجش کربن ممکن است به گاز دی‌اکسید کربن تبدیل شود و باعث تغییر نتایج شود (۲۲). کربن غیرآلی موجود در نمونه‌ها ممکن است سبب شود که نسبت کربن آلی نمونه‌ها با میزان واقعی آن تفاوت داشته باشد. از این رو برای آماده‌سازی نمونه‌هایی که احتمالاً حاوی مقداری کربن غیرآلی هستند، فرآیند کربنات‌زدایی صورت می‌گیرد. به منظور کربنات‌زدایی از دستورالعمل آزمایشگاه ایزوتوپ پایدار لیس (LIENS) استفاده شد (LIENSs SIF, 2012). به این ترتیب که ابتدا ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه پودر شده وزن شده و در یک ویال شیشه‌ای قرار می‌گیرد. در ادامه باید یک میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید ۰/۱ نرمال به آن اضافه شده و به منظور همگن شدن به مدت یک دقیقه در حمام فراصوتی قرار می‌گیرد. با مشاهده حباب‌های دی‌اکسید کربن ایجاد شده و پایان آن، دوباره ۰/۱ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید ۰/۱ نرمال به منظور اطمینان از تمام شدن کربنات به ترکیب اضافه گردید. نمونه‌ها سپس به مدت ۲۴ ساعت در زیر هود و داخل حمام خشک، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده تا کاملاً خشک شوند. نمونه‌ها پس از فریز شدن در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت درون فریز درایر شده و دوباره با هاون به پودری یکدست تبدیل شد (۲).

تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی

سنجش کربن آلی و نیتروژن کل به ترتیب از روش‌های Walkley و Black (۲۳) و micro-Kjeldahl (۲۴) انجام شده است. برای سنجش کربن آلی به روش Walkley و Black رسوبات با اسید دی‌کرومات^۳ اکسید شدند. برای اکسید شدن رسوب از تیترا اسید دی‌کرومات با سولفات آهن^۴ استفاده شد. کربن آلی از تفاوت بین میزان کل دی‌کرومات اضافه شده و میزان دی‌کرومات باقی‌مانده محاسبه شده است (۲۳). در نهایت، سنجش میزان درصد لای، شن و رس از روش هیدرومتری انجام شده است (۲۵).

نتایج و بحث

پارامترهای محیطی و تعیین دانه بندی رسوبات

پارامترهای محیطی شامل شوری، هدایت الکتریکی، pH و دما در همه مناطق نمونه‌برداری شده ثبت گردید (جدول ۱). بررسی دانه‌بندی رسوبات در استان بوشهر در سه منطقه خور بیدخون، خور هاله و مل‌گزنه نشان داد که در خور بیدخون و خور هاله به ترتیب لای، رس و ماسه دارای بیشترین درصد فراوانی بودند (شکل ۲). به طوری که در منطقه خور نایبند لای، رس و ماسه به ترتیب با ۶۰/۸، ۲۲/۱ و ۱۷/۲ دارای بیشترین درصد فراوانی بودند. در خور هاله لای با ۴۳/۱ درصد، رس با ۳۲/۳ درصد و ماسه با ۲۴/۶ درصد دارای بیشترین فراوانی بودند. با این وجود در

^۱ CaCo_3

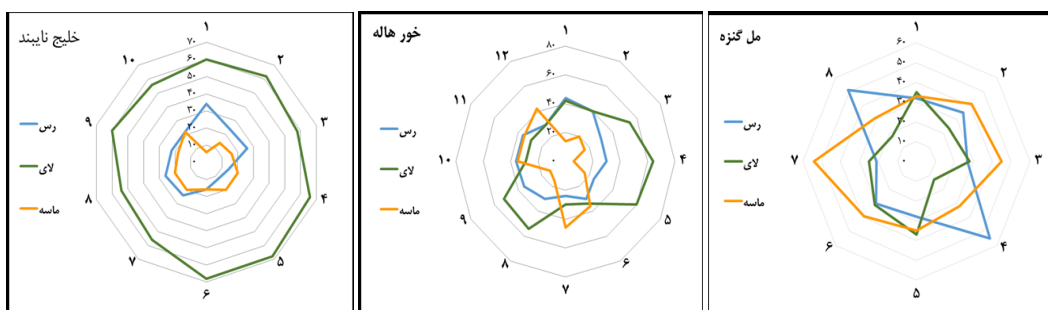
^۲ Blue carbon

^۳ Acidic dichromate

^۴ Ferrous sulfate

منطقه مل گنزه درصد فراوانی رس بیشتر از لای و درصد فراوانی ماسه بیشتر از لای و رس بود. به این ترتیب که در این منطقه ماسه با ۳۸/۷ درصد، رس با ۳۴/۳ درصد و لای با ۲۶/۴ درصد دارای بیشترین درصد فراوانی بودند (شکل ۲). آنچه که از این مقایسه بدست می‌آید این است که در منطقه خلیج نایبند (بیدخون و هاله) دانه‌بندی رسوب تا حدود زیادی شبیه به هم می‌باشد. با این وجود در منطقه مل گنزه این درصد فراوانی به طور معنی‌داری با منطقه خور بیدخون و هاله متفاوت است. رسوبات اکوسیستم های مانگرو در مناطق مختلف با هم تفاوت دارند. برای نمونه میزان لای در رسوبات تالاب حرا مصب ژانگ جیانگ^۱ چین غالب بوده و بین ۶۱ تا ۷۲ درصد محتوای رسوبات را تشکیل می‌دهند (۲۶). تفاوت در نوع رسوبات می‌تواند ناشی از تفاوت های منطقه‌ای در پراکنش رسوبات دریایی باشد. این تفاوت ممکن است در میزان مواد آلی، ساختار و تنوع بی مهرگان و نیز تولیدات ثانویه آنها تاثیر گذار باشد. به طور معمول رسوبات دانه ریز به جهت خاصیت کم نفوذ آب قادرند میزان زیادی از مواد آلی را در خود ذخیره کنند. با این وجود افزایش مواد آلی لزوماً به منزله افزایش تنوع زیستی نیست. عدم وجود عوامل استرس زای انسانی و هیدرولوژی مناسب نیز در این زمینه موثر است. میزان مواد مغذی رسوبات در رشد گیاهان حرا نیز دارای اهمیت زیادی است (۲۷). فراوانی بیشتری از ذرات ریز سیلت و رس می‌تواند مسئول غلظت بالای کربن و نیتروژن است، در حالی که ذرات شن و ماسه فقط محتوای کمتری از کربن و مواد مغذی را دارند (۲۸).

جدول ۱- پارامترهای محیطی اندازه گیری شده در اکوسیستم های مانگروی مورد مطالعه				
منطقه	شوری (واحد در هزار)	هدایت الکتریکی ^{**}	pH	دما
خور بیدخون	۳۲/۲	۵/۵	۷/۵۶	۳۲/۸
خور هاله	۳۴/۸	۵/۸	۷/۸۲	۳۰/۳
مل گنزه	۳۱/۲	۴/۹	۸/۰۱	۲۹/۸
قشم	۳۰/۴۱	۵/۵	۷/۶۸	۳۱/۴۶
خمیر	۳۲/۲۱	۵/۳	۷/۵۰	۳۱/۵۳
** Conductivity (ms)				



شکل ۲- درصد دانه بندی رسوبات در سه منطقه مورد مطالعه

میزان کربن و نیتروژن در رسوبات

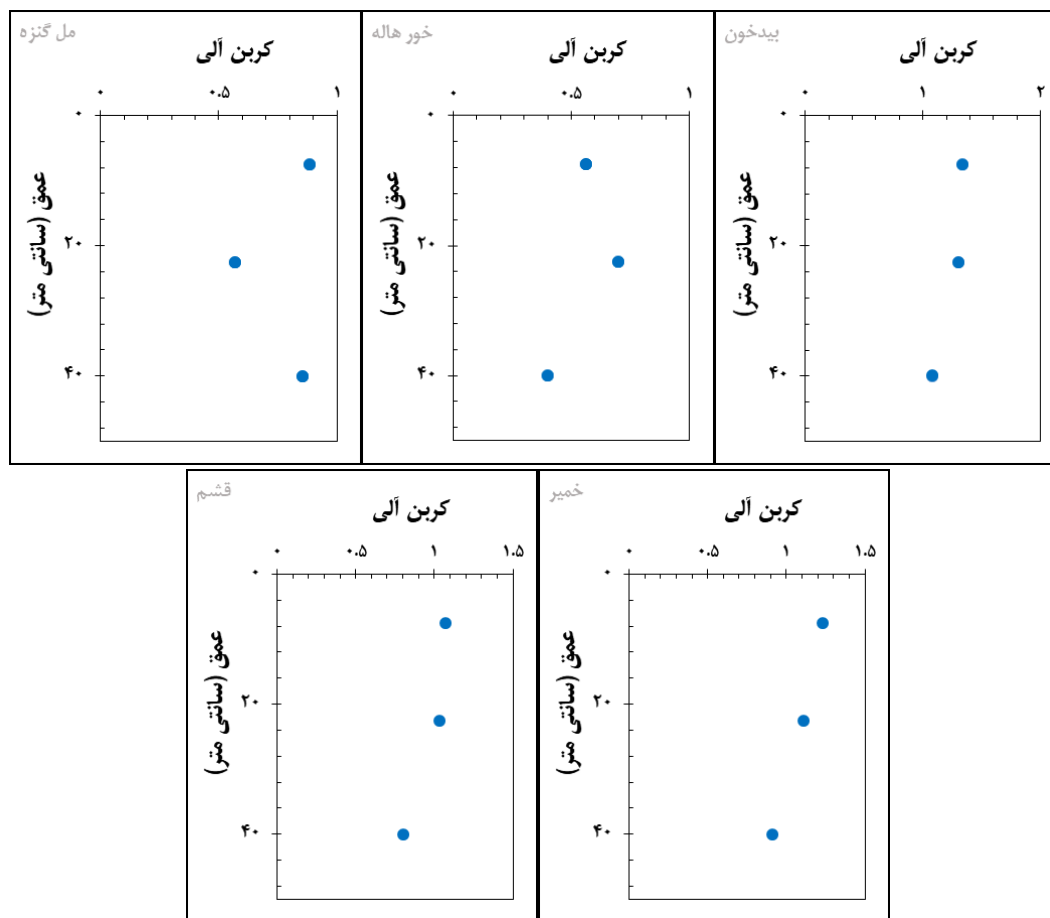
در این تحقیق نتایج نشان داد که درصد کربن آلی به سمت عمق روند کاهشی را نشان می‌دهد. به‌طور میانگین، مقدار کربن آلی در اکثر ایستگاه‌ها از سطح تا عمق ۵۰ سانتی‌متر کاهشی بین ۱۵ تا ۳۰ درصد نشان داده است (شکل ۳). در مناطق مورد بررسی، خور بیدخون بیشترین مقدار کربن آلی را در تمامی اعماق داشت و از سطح تا عمق با کاهش ملایم که نشان‌دهنده غنای بالای ماده آلی و پایداری اکولوژیکی منطقه است. بندر

¹ Zhangjiang

خمیر نیز روندی مشابه با مقادیر نسبتاً بالا نشان داد. در مقابل، خور هاله کمترین مقدار کربن آلی را داشت که می‌تواند نشانه‌ای از کاهش تولید زی‌توده یا محدودیت ورودی ماده آلی باشد. قشم و مل گنزه در میانه طیف قرار گرفتند، با این تفاوت که در قشم کاهش یکنواخت‌تری از سطح به عمق مشاهده شد، در حالی که در مل گنزه مقدار کربن آلی در عمق ۵۰ سانتی‌متر مجدداً افزایش یافت. این مقایسه نشان می‌دهد که شرایط تولید اولیه، ورودی آلی، و پویایی رسوب‌گذاری در اکوسیستم‌های مانگرو کاملاً متفاوت است. به طور طبیعی در لایه‌های سطحی به دلیل ریزش مواد آلی گیاه مانند ورود کربن ناشی از تجزیه ریشه‌های مرده و یا لاشبرگ‌ها انتظار حضور کربن بیشتری وجود دارد. این مواد آلی سطحی، که اغلب تجزیه‌نشده و غنی از عناصر غذایی است، با گذر زمان و افزایش عمق، تحت تأثیر فرایندهایی نظیر تجزیه میکروبی و فشردگی رسوبات کاهش می‌یابد. یکی دیگر از علت‌های این پدیده معدنی شدن کربن آلی است که در ستون رسوبات رخ می‌دهد و باعث کاهش کربن آلی رسوبات اعماق می‌شود (۲۹). مقدار کربن آلی در رسوبات اکوسیستم‌های مانگروی مختلف بسته به شرایط محیطی مانند هیدرولوژی، بارش، ورودی آب از خشکی و نیز نوع گونه مانگرو متفاوت است (۳۰). مقدار کربن ذخیره شده در رسوبات از حدود نیم درصد تا بیش از ۴۰ درصد در نوسان است که متوسط جهانی آن ۲/۲ درصد است (۳۱). محتوای کربن اکوسیستم‌های مانگرو وابسته به مواد آلی وارد شده از محیط (دریا یا خشکی) می‌باشند. بنابراین رسوبات آنها هستند می‌تواند مقادیر زیادی کربن آلی را ذخیره کند (۳۲). برخی از اکوسیستم‌های مانگرو غنی از مواد آلی هستند که می‌توانند آن را در رسوبات خود عمق چند متری ذخیره کنند (۳۳). با این حال، اگرچه مقادیر کل کربن آلی در این پژوهش از میانگین جهانی کم بود. ولی با میزان کربن آلی گزارش شده در چین (۰/۶ تا ۱/۵ درصد) (۲۶) و مانگروی دهانه رود ولار کولرون هند^۱ (کمتر از یک درصد) قابل مقایسه است (۳۴). کم بودن کربن آلی در رسوبات مانگروهای خلیج فارس می‌تواند به مجموعه‌ای از عوامل محیطی نسبت داده شود. شوری بالا و دمای زیاد در این منطقه، شرایطی فراهم می‌کند که میزان تولیدات اولیه را به شدت کاهش می‌دهد. در این میان، محدودیت منابع آب شیرین و استرس‌های اقلیمی نیز موجب کاهش تولید زی‌توده مانگروها می‌شود. این عوامل در مجموع موجب کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی کربن آلی در رسوبات مانگروهای خلیج فارس نسبت به سایر مناطق شده‌اند (۳۵).

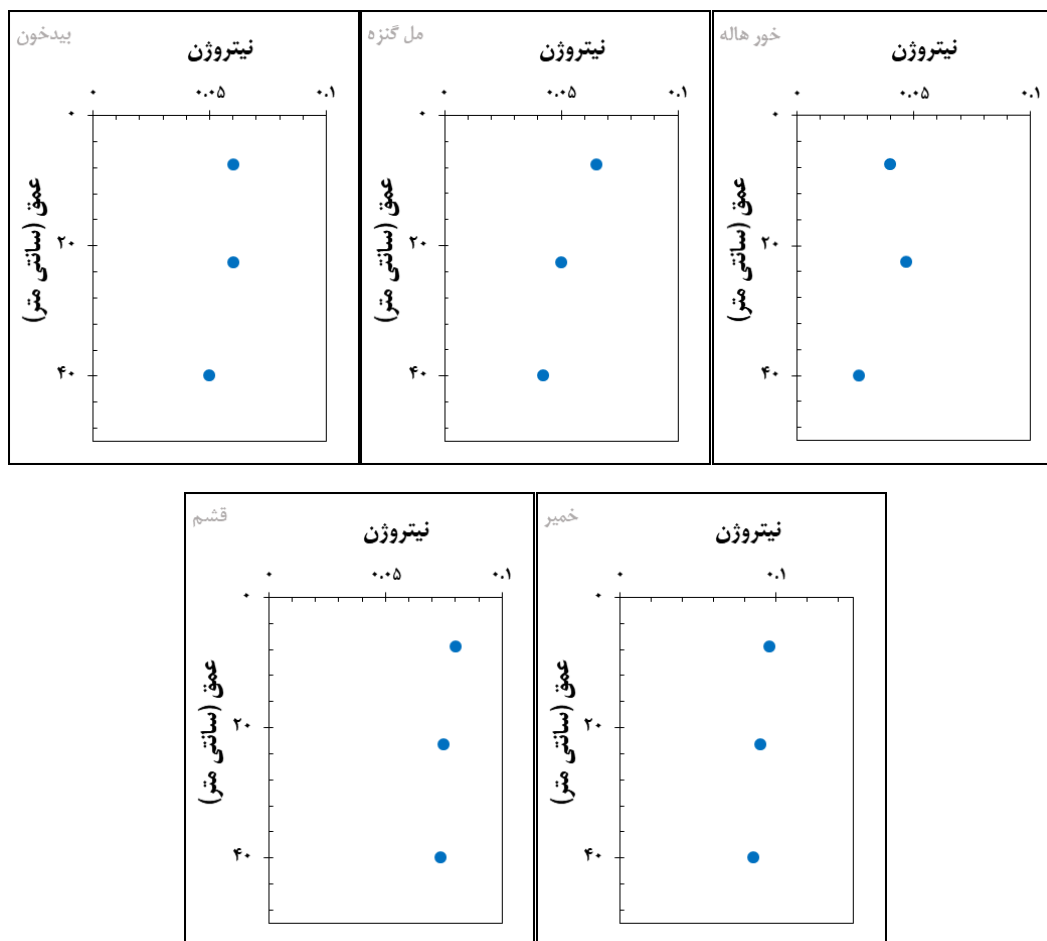
در اکوسیستم‌های کربن آبی سالم، خاک هرگز از نظر میزان کربن به حد اشباع نمی‌رسد. زیرا در این اکوسیستم‌ها، در اثر افزایش سطح آب دریا و رسوب‌گذاری، رسوبات بر روی هم انباشته می‌شوند و کربن دائماً در رسوبات دفن می‌شود (۱۲). این حالت باعث می‌شود که مدت زمان ذخیره کربن در اکوسیستم‌های آبی به چند هزار سال هم برسد. در مقابل، در اکوسیستم‌های خشکی، ممکن است خاک از کربن اشباع شود (۳۶). از این رو در بهترین حالت مدت زمان ذخیره کربن در جنگل‌های استوایی فقط چند دهه تا چند صد سال است (۳۷). ساختار پیچیده اکوسیستم‌های کربن آبی (شکل ریشه‌ها، تراکم بالای گیاهان و برگ‌ها)، باعث می‌شود که آنها بتوانند در به دام انداختن رسوبات و در نتیجه کربن موجود در آنها که از منابع درون‌زا و برون‌زا است، بسیار مستعد باشند (۷). از سویی، چون بخشی از کربن گرفته شده در اکوسیستم‌های کربن آبی به خارج منتقل می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که توان ذخیره کربن این اکوسیستم‌ها معمولاً بیشتر از مقدار اندازه‌گیری و یا گزارش شده در تحقیقات است (۳۸). توجه به این نکته بسیار مهم است که نرخ ذخیره کربن در رسوبات توسط عوامل مختلفی مانند شوری، وضعیت مواد آلی، رژیم جزرومدی، دما، بارش و نرخ رسوب‌گذاری کنترل می‌شود. تفاوت این ویژگی‌ها می‌تواند نسبت اختصاص کربن به ریشه‌ها و برگ‌ها، سرعت تجزیه و میزان تولیدات اولیه را تغییر داده و در نتیجه سرعت ذخیره کربن را تنظیم نماید (۷).

¹ Vellar-Coleroon estuary, India



شکل ۳- میانگین تغییرات میزان کربن آلی در رسوبات سطحی تا عمقی در اکوسیستم‌های مانگرویی خلیج فارس

مقادیر نیتروژن کل در رسوبات مانگروهای مورد بررسی از سطح به عمق، در اغلب ایستگاه‌ها روندی کاهشی نشان داد که این کاهش می‌تواند ناشی از تجزیه تدریجی ماده آلی غنی از نیتروژن در لایه‌های زیرین باشد (شکل ۴). بیشترین مقدار نیتروژن در تمامی اعماق به ایستگاه خمیر تعلق داشت. قشم نیز با مقادیر بالا در رتبه دوم قرار گرفت، در حالی که خور هاله کمترین مقدار نیتروژن را در تمام سطوح نشان داد که حاکی از فقر نسبی تغذیه‌ای و احتمال محدودیت تولید زی‌توده در این منطقه است. سایر مناطق مانند خور بیدخون و مل گنزه مقادیر میانی داشتند. این تفاوت‌های مکانی در غلظت نیتروژن رسوبات نشان‌دهنده اختلاف در شدت تولید اولیه، ترکیب ماده آلی، نرخ تجزیه و شرایط اکولوژیک حاکم بر هر اکوسیستم‌های مانگرو است. بررسی مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل در رسوبات نشان داد که خور هاله به‌طور قابل توجهی دارای پایین‌ترین مقدار در تمامی عمق‌ها بود. یکی از عوامل کلیدی در این تفاوت، دست‌کاشت بودن مانگروهای خور هاله است. در جنگل‌های دست‌کاشت، به‌ویژه در سال‌های اولیه پس از استقرار، پوشش گیاهی هنوز به پایداری کامل نرسیده و تولید زی‌توده و گردش مواد مغذی در مقایسه با جنگل‌های طبیعی محدودتر است. این امر منجر به ورود کمتر ماده آلی غنی از کربن و نیتروژن به رسوبات می‌شود. همچنین، درختان کاشته‌شده معمولاً در تراکم پایین‌تر و شرایط فیزیکی-شیمیایی کنترل‌نشده‌تری نسبت به جنگل‌های بالغ و طبیعی رشد می‌کنند که می‌تواند ظرفیت ذخیره‌سازی کربن و نیتروژن را کاهش دهد (۳۹).



شکل ۴- میانگین تغییرات میزان نیتروژن کل در رسوبات سطحی تا عمقی در اکوسیستم‌های مانگروی خلیج فارس

نسبت کربن به نیتروژن

بررسی نسبت کربن به نیتروژن در رسوبات مانگروهای مختلف خلیج فارس نشان داد که خور بیدخون در تمامی عمق‌ها دارای بالاترین نسبت بود، که نشان‌دهنده غالب بودن ماده آلی خشکی‌زاد در این منطقه است. در مقابل، خمیر و قشم پایین‌ترین نسبت‌ها را داشتند که می‌تواند نشانه‌ای از ورود منظم‌تر منابع دریازی یا تجزیه‌پذیرتر و نیز پویایی بیشتر در چرخه نیتروژن باشد. نسبت پایین کربن به نیتروژن معمولاً با ماده آلی تازه‌تر و حاصلخیزی بیشتر مرتبط است. در خور هاله نسبت کربن به نیتروژن نسبتاً بالا و تقریباً ثابت در عمق‌ها (۱۴ تا ۱۵) مشاهده شد که با توجه به نیتروژن پایین و کربن متوسط، می‌تواند ناشی از وضعیت ناپایدار زی‌توده در جنگل دست‌کاشت باشد. به‌طور کلی، نوسانات نسبت کربن به نیتروژن در مناطق مختلف نشان‌دهنده تفاوت در منبع، کیفیت و سرنوشت ماده آلی رسوبات بوده است (شکل ۵).

با در نظر گرفتن میانگین اعماق مختلف بیشترین و کمترین نسبت کربن به نیتروژن در خور بیدخون و بندرخمیر به ترتیب با ۲۱/۸۸ و ۱۱/۹۰ به دست آمد (شکل ۶). این نسبت در اکوسیستم‌های مانگروی استان بوشهر به طور معنی داری بیشتر از اکوسیستم‌های مانگروی استان هرمزگان بود ($p < 0.05$). نسبت کربن به نیتروژن بهینه رسوبات در سیستم‌های دریایی بسته به نوع اکوسیستم و شرایط محیطی می‌تواند متفاوت باشد. به طور کلی، نسبت کربن به نیتروژن متعادل در رسوبات دریایی حدود شش تا ده در نظر گرفته می‌شود (۴۰). این محدوده نشان‌دهنده نسبت نسبتاً مساوی کربن و نیتروژن در مواد آلی است که منبع سالم و متنوعی از مواد آلی برای حمایت از تنوع زیستی دریایی را فراهم می‌کند (۴۱، ۴۲).

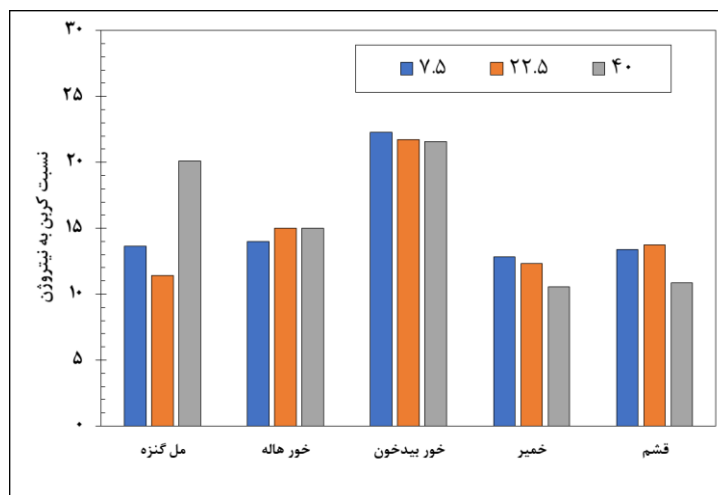
با این حال، توجه به این نکته مهم است که محیط های دریایی مختلف ممکن است بر اساس عواملی مانند بهره وری اولیه، در دسترس بودن مواد مغذی و انواع ورودی های مواد آلی، نسبت های کربن به نیتروژن متفاوتی داشته باشند. انحراف از محدوده معمول نسبت کربن به نیتروژن همچنین می تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییرات در چرخه مواد مغذی، منابع ماده آلی و پویایی اکوسیستم ارائه دهد. نسبت کربن به نیتروژن پهنه رسوبات در حرا بسته به هیدرولوژی منطقه و ورودی مواد آلی موجود می تواند متفاوت باشد. در مقایسه با سایر پژوهش ها، نسبت کربن به نیتروژن در منطقه مورد مطالعه ما عدد بیشتری بود. برای نمونه در پژوهشی در مانگروهای مصب ژانگ جینگ

^۱ چین این نسبت برابر با ۸ (۲۶) و در مانگروی دهانه مصب ولار کولرون هند ^۲ برابر با ۶ گزارش شده است (۳۴). نسبت کربن به نیتروژن معیاری برای شناسایی منبع مواد آلی است. نسبت کربن به نیتروژن رسوب کمتر از ۸ نشان دهنده زیاد بودن منشأ دریایی مواد آلی و نسبت بیش از ۱۲ نشان دهنده منبع منابع زمینی مواد آلی است (۳۲، ۴۳).

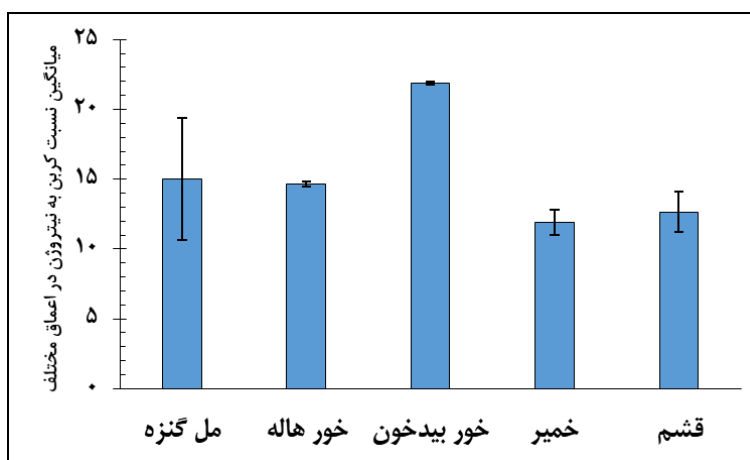
مطالعات مختلف نسبت کربن به نیتروژن در رسوبات مانگرو را از ۷ تا ۴۱ یا بیشتر گزارش کرده اند. به عنوان مثال، در رسوبات مانگروی هند و سریلانکا، نسبت کربن به نیتروژن از ۷ تا ۲۷/۳ متغیر بود که مقادیر بالاتر اغلب با ذخایر کربن آلی بالاتر و مواد آلی مشتق شده از مانگرو مرتبط است (۴۴). در هسته های رسوب مانگرو گائوچیانو در چین، نسبت کربن به نیتروژن در حدود ۳۳ تا ۴۱ گزارش شده که نشان دهنده ورود مواد آلی مشتق شده از مواد گیاهی ۱۳ زمینی است (۴۵). در پژوهش حاضر، این نسبت از ۱۱/۹ تا ۲۱/۸۸ متغیر بود که نشان می دهد مواد آلی عمدتاً از منابع زمینی مشتق شده است. رسوبات مانگرو تمایل به نسبتی از کربن به نیتروژن دارند که در محدوده ۱۰ تا ۲۰ قرار گیرند. این محدوده نشان دهنده مخلوط متعادلی از مواد آلی غنی از کربن و نیتروژن است که برای حمایت از جوامع مختلف گیاهی و جانوری موجود ایده آل است. به عبارتی در اکوسیستم های مانگرو این نسبت نشان می دهد که منبع کافی کربن برای تولید و رشد انرژی و همچنین مقدار کافی نیتروژن برای سنتز پروتئین و سایر فرایندهای زیستی ضروری وجود دارد (۳۱). در حراهای خشک، که در دسترس بودن آب و مواد آلی ممکن است محدود باشد و فرایندهای چرخه مواد مغذی تحت تأثیر قرار گیرد، حفظ نسبت کربن به نیتروژن مناسب در رسوبات برای سلامت کلی و بهره وری اکوسیستم بسیار مهم است.

نسبت کربن به نیتروژن به طور مستقیم تحت تأثیر نوع و بافت رسوبات قرار دارد، چراکه ترکیب فیزیکی رسوب نقش مهمی در منبع، پایداری و نرخ تجزیه ماده آلی ایفا می کند. برای نمونه افزایش درصد سیلت در رسوبات معمولاً با افزایش تجمع ماده آلی غنی از کربن مانند بقایای گیاهی و فیتوپلانکتون همراه است که می تواند منجر به کاهش نسبت کربن به نیتروژن شود (۴۶). از سوی دیگر، سیلت با ایجاد ساختار متراکم، تجزیه ماده آلی را محدود کرده و به حفظ بیشتر ترکیبات آلی پایدار کمک می کند. در مقابل، محتوای بالای رس در رسوبات می تواند شرایط کم اکسیژن یا بی هوازی ایجاد کند که باعث کاهش فعالیت تجزیه ای میکروارگانیسم ها و در نتیجه تجمع مواد آلی غنی از نیتروژن می شود، پدیده ای که می تواند به افزایش نسبت کربن به نیتروژن منجر گردد. در شرایطی که درصد رس پایین باشد، تهویه بهتر رسوبات، فعالیت بیشتر میکروبی و تجزیه مؤثرتر مواد آلی، نسبت کربن به نیتروژن را کاهش می دهد (۴۷).

¹ Zhangjiang Estuary² Vellar-Coleroon estuary



شکل ۵- تغییرات نسبت کربن آلی و نیتروژن به تفکیک اعماق مختلف رسوبات جنگل های مانگرویی مورد مطالعه



شکل ۶- میانگین تغییرات نسبت کربن آلی و نیتروژن در اعماق مختلف رسوبات جنگل های مانگرویی مورد مطالعه

نتیجه گیری نهایی

یافته‌های این مطالعه نشان داد که ویژگی‌های رسوبات اکوسیستم‌های مانگرویی خلیج فارس از نظر میزان کربن آلی، نیتروژن کل و نسبت کربن به نیتروژن از تنوع قابل توجهی برخوردارند که بازتابی از تفاوت‌های اکولوژیکی، هیدرولوژیکی و انسانی در مناطق مورد بررسی است. کاهش تدریجی مقدار کربن و نیتروژن از سطح به عمق در اغلب ایستگاه‌ها، الگوی معمول در سیستم‌های رسوبی مانگرویی را تأیید کرد، که تحت تأثیر تجزیه، معدنی‌شدن و فشردگی تدریجی رسوبات قرار دارد. بالاتر بودن مقادیر این عناصر در ایستگاه‌هایی مانند خور بیدخون و خمیر، بیانگر تولید اولیه بالاتر و کارایی بیشتر در ذخیره‌سازی ماده آلی است، در حالی که ایستگاه‌هایی مانند خور هاله با مقادیر پایین‌تر، به‌ویژه به‌دلیل ماهیت دست‌کاشت بودن، از کارایی کمتری در این زمینه برخوردارند. بررسی نسبت کربن به نیتروژن نیز اطلاعات مفیدی در مورد منبع ماده آلی ارائه کرد. به‌طوری‌که نسبت‌های بالاتر (بیش از ۲۰) در خور بیدخون به ورودی غالب مواد خشکی‌زاد نسبت داده شد و نسبت‌های پایین‌تر در مناطقی مانند خمیر و قشم، گویای غلبه ورودی‌های دریازی بودند. با توجه به مجاورت خور بیدخون با صنایع پتروشیمی در منطقه عسلویه، احتمال ورود

ترکیبات آلی و نیتروژنی از طریق هوا یا رواناب‌های سطحی نیز مطرح است که می‌تواند به افزایش غلظت و نسبت کربن به نیتروژن در رسوبات منجر شود. در منطقه قشم و خمیر، نسبت کربن به نیتروژن در رسوبات حدود ۱۲ به دست آمد. این نسبت نشان‌دهنده منبع ترکیبی و نسبتاً متعادلی از مواد آلی است. چنین نسبتی حاکی از حضور همزمان مواد آلی با منشاء گیاهی (مانند برگ‌های حرا) و منابع غنی‌تر از نیتروژن (مانند فیتوپلانکتون‌ها) است. این توازن در کیفیت مواد آلی می‌تواند منجر به شرایطی شود که از تولید ثانویه بیشتر در جوامع بی‌مهرگان کفزی حمایت می‌کند، چرا که موجودات کفزی می‌توانند از منابع قابل دسترس و قابل تجزیه‌ی بهتری تغذیه کنند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که درک صحیح از ویژگی‌های رسوبی و پویایی ماده آلی در این مناطق برای مدیریت بهتر منابع کربن آبی، احیای مانگروها و پایش تغییرات اقلیمی ضروری است.

تشکر و قدردانی: از همکاری دانشجویان و کارشناسان محترم دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس در نمونه‌برداری، آماده‌سازی نمونه‌ها و سنجش عناصر تشکر و قدردانی می‌شود. این پژوهش با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (۱۴۰۳/۴۹۸۶ الف) انجام شده است که بدینوسیله از حمایت آن مرکز تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مالی: این پژوهش با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (۱۴۰۳/۴۹۸۶ الف) انجام شده است.

منابع

1. Donato DC, Kauffman JB, Murdiyarso D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature geoscience*. 2011;4(5):293–7.
2. Shojaei MG, Farahani MM, Abtahi B, Delfan N, Naderloo R, Kourandeh MB. Sources partitioning in the diet of the mudskipper *Periophthalmus waltoni* in an arid mangrove system: Evidence from stable isotope analysis. *Food Webs*. 2022;31:e00234.
3. Hemmati MR, Shojaei MG, Taheri Mirghaied A, Mashhadi Farahani M, Weigt M. Food sources for camptandriid crabs in an arid mangrove ecosystem of the Persian Gulf: a stable isotope approach. *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 2021;1–13.
4. Srikanth S, Lum SKY, Chen Z. Mangrove root: adaptations and ecological importance. *Trees*. 2016;30(2):451–65.
5. Akbari N, Shojaei MG, Farahani MM, Weigt M. Stable isotopes reveal the food sources of benthic macroinvertebrates in the arid mangrove ecosystem of the Persian Gulf. *Estuaries and coasts*. 2022;1–13.
6. Jennerjahn TC, Ittekkot V. Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins. *Naturwissenschaften*. 2002;89(1):23–30.
7. Mcleod E, Chmura GL, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte CM, et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2011;9(10):552–60.
8. Duarte CM, Middelburg JJ, Caraco N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. 2004;
9. Radabaugh KR, Moyer RP, Chappel AR, Powell CE, Bociu I, Clark BC, et al. Coastal blue carbon assessment of mangroves, salt marshes, and salt barrens in Tampa Bay, Florida, USA. *Estuaries and coasts*. 2018;41(5):1496–510.
10. Alongi DM. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon management*. 2012;3(3):313–22.
11. Schile LM, Kauffman JB, Crooks S, Fourqurean JW, Glavan J, Megonigal JP. Limits on carbon sequestration in arid blue carbon ecosystems. *Ecological Applications*. 2017;27(3):859–74.
12. Taillardat P, Friess DA, Lupascu M. Mangrove blue carbon strategies for climate change mitigation are most effective at the national scale. *Biology letters*. 2018;14(10):20180251.

13. Ebadzadeh H, Shojaei MG, Seyfabadi J. The effect of habitat structural complexity on gastropods in an arid mangrove wetland. *Wetlands Ecology and Management*. 2024;32(1):139–51.
14. Perdue EM, Koprivnjak J-F. Using the C/N ratio to estimate terrigenous inputs of organic matter to aquatic environments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2007;73(1–2):65–72.
15. Xu H, Deng Y, Li X, Liu Y, Huang S, Yang Y, et al. Effect of increasing C/N ratio on performance and microbial community structure in a membrane bioreactor with a high ammonia load. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(15):8070.
16. Sterner RW, Andersen T, Elser JJ, Hessen DO, Hood JM, McCauley E, et al. Scale-dependent carbon: nitrogen: phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters. *Limnology and Oceanography*. 2008;53(3):1169–80.
17. IRIMO. The average 10-years climatic parameters. Retrieved 19 October 2021, from Iran Meteorological Organization (IRIMO). <https://www.irimo.ir/eng/index.php>. Annual Data Center Tehran, Iran; 2021.
18. Reynolds RM. *Oceanography. The Gulf ecosystem: health and sustainability* Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands. 2002;55–64.
19. Delfan N, Shojaei MG, Naderloo R. Patterns of structural and functional diversity of macrofaunal communities in a subtropical mangrove ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021;107288.
20. Mahdavi A. Investigation on quantitative and qualitative alterations of mangrove forests in Gheshm area by using of 1967 and 1994 aerial photos. University of Tehran. 2001;
21. Scott DA. A directory of wetlands in the Middle East. IUCN; 1995.
22. Howard J, Hoyt S, Isensee K, Telszewski M, Pidgeon E. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. 2014.
23. Walkley A, Black IA. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*. 1934;37(1):29–38.
24. Bremner JM. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *The Journal of Agricultural Science*. 1960;55(1):11–33.
25. Bouyoucos GJ. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*. 1962;54(5):464–5.
26. Xue B, Yan C, Lu H, Bai Y. Mangrove-derived organic carbon in sediment from Zhangjiang Estuary (China) mangrove wetland. *Journal of Coastal Research*. 2009;25(4):949–56.
27. Dithugoe CD, Bezuidt OKI, Cavan EL, Froneman WP, Thomalla SJ, Makhallanyane TP. Bacteria and archaea regulate particulate organic matter export in suspended and sinking marine particle fractions. *Msphere*. 2023;8(3):e00420-22.
28. Liu J, Wang Z, Hu F, Xu C, Ma R, Zhao S. Soil organic matter and silt contents determine soil particle surface electrochemical properties across a long-term natural restoration grassland. *Catena*. 2020;190:104526.
29. Pendleton L, Donato DC, Murray BC, Crooks S, Jenkins WA, Sifleet S, et al. Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PloS one*. 2012;7(9).
30. Jennerjahn TC, Gilman E, Krauss KW, Lacerda LD, Nordhaus I, Wolanski E. Mangrove ecosystems under climate change. In: *Mangrove ecosystems: a global biogeographic perspective*. Springer; 2017. p. 211–44.
31. Kristensen E, Andersen FØ, Holmboe N, Holmer M, Thongtham N. Carbon and nitrogen mineralization in sediments of the Bangrong mangrove area, Phuket, Thailand. *Aquatic Microbial Ecology*. 2000;22(2):199–213.
32. Alongi DM. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual review of marine science*. 2014;6:195–219.
33. Nelleman C, Corcoran E, Duarte CM, Valdes L, DeYoung C, Fonseca L, et al. Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon. In: *A Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRIDArenda; 2009. 78 p.
34. Kathiresan K, Gomathi V, Anburaj R, Saravanakumar K. Impact of mangrove vegetation on seasonal carbon burial and other sediment characteristics in the Vellar-Coleroon estuary, India. *Journal of forestry research*. 2014;25:787–94.
35. Shojaei MG. Blue carbon storage and sequestration rates in mangroves along the Northern coasts of Persian Gulf and Oman Sea. Department of Environment, Iran; 2019. 197 p.
36. Schlesinger WH, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*. 2001;411(6836):466–9.

37. Chambers JQ, Higuchi N, Tribuzy ES, Trumbore SE. Carbon sink for a century. *Nature*. 2001;410(6827):429.
38. Kennedy H, Beggins J, Duarte CM, Fourqurean JW, Holmer M, Marbà N, et al. Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints. *Global Biogeochemical Cycles*. 2010;24(4).
39. Shojaei MG. Biodiversity and carbon circulation produced by mangroves using ecological models in Bushehr and Khuzestan provinces. Department of Environment, Iran; 2021. 283 p.
40. Rumolo P, Barra M, Gherardi S, Marsella E, Sprovieri M. Stable isotopes and C/N ratios in marine sediments as a tool for discriminating anthropogenic impact. *Journal of Environmental Monitoring*. 2011;13(12):3399–408.
41. Li Y, Zhang H, Tu C, Fu C, Xue Y, Luo Y. Sources and fate of organic carbon and nitrogen from land to ocean: Identified by coupling stable isotopes with C/N ratio. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2016;181:114–22.
42. Sampei Y, Matsumoto E. C/N ratios in a sediment core from Nakaumi Lagoon, southwest Japan—usefulness as an organic source indicator—. *Geochemical Journal*. 2001;35(3):189–205.
43. Dsikowitzky L, Nordhaus I, Jennerjahn TC, Khrycheva P, Sivatharshan Y, Yuwono E, et al. Anthropogenic organic contaminants in water, sediments and benthic organisms of the mangrove-fringed Segara Anakan Lagoon, Java, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*. 2011;62(4):851–62.
44. Bouillon S, Dahdouh-Guebas F, Rao A, Koedam N, Dehairs F. Sources of organic carbon in mangrove sediments: variability and possible ecological implications. *Hydrobiologia*. 2003;495(1–3):33–9.
45. Liu T, Bao K, Chen M, Neupane B, Gao C, Zacccone C. Human activity has increasingly affected recent carbon accumulation in Zhanjiang mangrove wetland, South China. *Iscience*. 2024;27(3).
46. Kristensen E, Bouillon S, Dittmar T, Marchand C. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: a review. *Aquatic botany*. 2008;89(2):201–19.
47. Bianchi TS, Canuel EA. Chemical biomarkers in aquatic ecosystems. Princeton University Press; 2011.

Vertical and spatial variability of organic carbon, total nitrogen, and C/N ratio in sediments and their role in supporting secondary production in the mangrove ecosystems of the Persian Gulf

Mehdi Ghodrati Shojaei^{1*}, Fateme Mahmoudi¹, Reza Naderloo², Ali Nasrollahi³, Tim Jennerjahn⁴

1- Department of Marine Biology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 4641776489, Noor, Iran

2- School of Biology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Department of Animal Sciences and Marine Biology, Faculty of Life Sciences and Biotechnology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4- Leibniz Centre for Tropical Marine Research (ZMT), Bremen, Germany

ABSTRACT

This study investigated the vertical and spatial distribution of organic carbon (OC), total nitrogen (TN), and the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio in sediments of mangrove ecosystems along the Persian Gulf. Sediment samples were collected from five sites, *i.e.*, Bidkhun, Malganzeh, Haleh, Bandar Khamir, and Qeshm, at three depth intervals (0–15, 15–30, and 30–50 cm). The results revealed a general decline in OC and TN concentrations with increasing depth, likely driven by microbial decomposition, mineralization, and sediment compaction. The lowest OC and TN levels were recorded at Haleh, a planted and structurally immature forest, while Bidkhun exhibited the highest OC content across all depths, potentially due to inputs of terrestrial organic matter from nearby petrochemical activities. Bidkhun also exhibited the highest C/N ratio (average 21.88), suggesting a dominance of terrestrial or refractory organic matter. In contrast, Khamir and Qeshm exhibited the lowest carbon-to-nitrogen (C/N) ratios, with an average of approximately 12, indicating a mixed and relatively balanced origin of organic matter. This ratio suggests the concurrent presence of organic materials derived from both plant sources (such as mangrove leaves) and nitrogen-rich sources (such as phytoplankton). Such a balance can create favorable conditions that support higher secondary production in benthic invertebrate communities. Overall, the results indicate that the mangrove ecosystems of the Persian Gulf, influenced by environmental, climatic, and anthropogenic factors, possess varying capacities for organic matter storage and cycling. These differences underscore the importance of site-specific strategies in the conservation and management of these critical coastal habitats.

KEYWORDS: Mangrove, Persian Gulf, Carbon cycle, Secondary production

ARTICLE TYPE

Original Research

ARTICLE HISTORY

Received: 29 February
2025

Accepted: 26 May 2025

ePublished: 05 June
2025

* Corresponding Author:

Email address: mshojaei@modares.ac.ir

Tel: 01144998000

© Published by Tarbiat Modares University

ISSN: 2322-5513