مجله بوم شناسی آبزیان

Journal homepage: http://jae.hormozgan.ac.ir

دیاتوم‌ها به عنوان اجزای زیستی نانواپتیک

محمد داود طالب‌زاده[۱*]، مرضیه خادم‌الرسول[۲]

[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران.

[۲] دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، ایران.

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۹۸/۰۶/۱۴
اصلاح: ۹۹/۰۴/۱۸
پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۰

کلمات کلیدی:
حسگر نوری
دیاتوم
کریستال فوتونی
نانوفنآوری سبز

چکیده

با توجه به آن‌که فن‌آوری به کارگیری و طراحی میکرو و نانوساختارها با استفاده از سیلیکا پرهزینه و دارای پیچیدگی‌های فنی و عملی است، استفاده از نانوساختارهای طبیعی می‌تواند ارزان‌تر و در عین حال با محیط زیست سازگارتر باشد. لذا مرور و معرفی این ظرفیت سبز، نقطه آغازی برای توسعه بیشتر مطالعات مهندسین و نانوتکنولوژیست‌های علاقه‌مند است. گروهی از این ساختارها که در آب و خاک به فراوانی یافت می‌شوند، دیاتوم‌ها هستند. دیاتوم‌ها دسته‌ای از جلبک‌ها با پوسته‌ی سیلیکایی و ساختار متقارن و تناوبی می‌باشند. دیاتوم‌ها در سواحل مرجانی مانند خلیج فارس در تمامی فصول، فراوانی قابل قبولی دارند. بدین ترتیب جهت استفاده در حسگرهای شیمیایی و فیزیکی یا عناصر مدارهای نوری از پتانسیل بالایی برخوردارند. در این مقاله برخی از اقسام پرکاربرد دیاتوم‌ها در نانواپتیک را معرفی و خواص نوری برخی از آن‌ها مرور می‌کنیم. همچنین برخی از گونه‌های حاضر در آب‌های محلی رودخانه دز را شناسایی و قابلیت موجبری نوری آن‌ها را مورد آزمایش قرار می‌دهیم.

مقدمــه

دیاتوم‌ها از نظر طبقه‌بندی‌های زیست شناختی، Bacillariophyceae یا Diatomophyceae نامیده و دسته‌ای از جلبک‌های تک سلولی محسوب می‌شوند. دیاتوم‌ها، اتوتروف و دارای کلروپلاست می‌باشند. اتوتروف یا تولید کننده به جانداری گفته می‌شود که خوراک خود را بدون وابستگی به موجود دیگر تأمین می‌کند. آن‌ها به صورت پرگنه (کلونی) های نواری یا رشته‌ای (فراگیلاریا)، پروانه شکل (مریدیون)، زیگزاگی (تابلاریا) یا ستاره‌ای شکل (آستریونلا) دیده می‌شوند (Bogusz *et al.*, 2018).

از ویژگی‌های خاص دیاتوم‌ها این است که شامل سلولی درون یک پوسته سیلیکایی آمورف $-SiO_2-$ به نام فراستول[۱] (صدف) هستند که دارای تخلخل نانومتری است (Hasle *et al.*, 1996; Kale and Karthick, 2015). این پوسته صدفی دارای دو بخش کوچک و بزرگ است که یکی از دیگری شعاع بیشتری دارد و صدف کوچک‌تر در داخل صدف بزرگ‌تر قرار می‌گیرد. تولیدمثل آن‌ها با کمک همین پوسته‌ها و به این ترتیب است که دو پوسته از هم جدا می‌شوند و هر تکه به‌صورت دیاتومی مستقل درمی‌آید و سپس برای خود پوستهٔ مکملی می‌سازد. این ساختمان، دارای تنوع بی‌نظیری است که از نظر دقت و تکنولوژی ساخت، به مراتب فراتر و پیشرفته‌تر از امکانات فعلی فن‌آوری ساخت ابزارهای میکرو و نانومتری است و دارای ساختارهای

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: MD.Talebzadeh@jsu.ac.ir

[1] Frustule

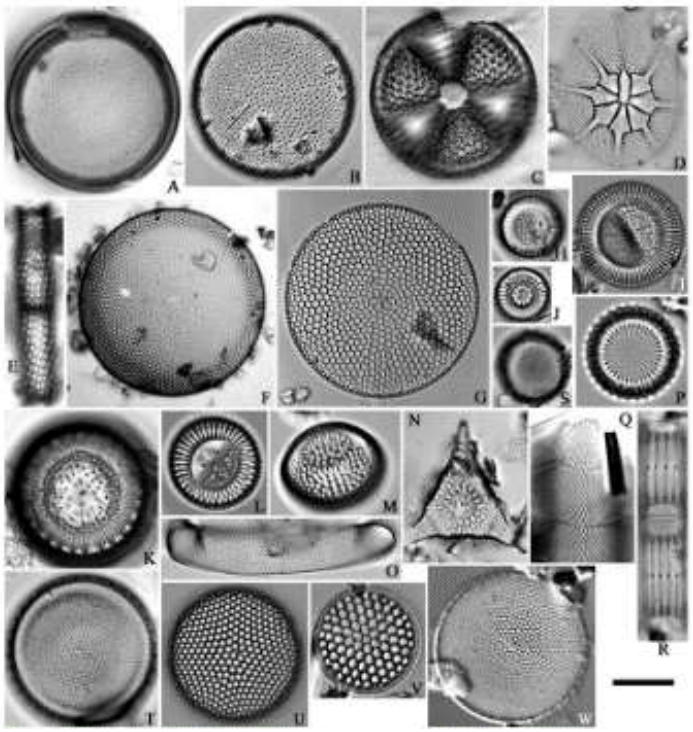
[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]

منظم با نظم تقارنی قابل توجهی است. این پوسته‌های صدفی، تنوع زیادی از نظر شکل دارند؛ ولی اغلب از دو سر متقارن و دارای دو دریچه یا شیر ورودی- خروجی تشکیل شده اند. هر چند این تقارن یک تقارن کامل نیست؛ به طوری‌که یکی از دریچه‌ها کمی بزرگ‌تر از دریچه دیگر است، بنابراین اجازه می‌دهد تا یک دریچه داخل لبه دیگری جای گیرد (Round *et al*., 1990). با این وجود شکل و ساختمان این دریچه‌ها، اغلب شبیه به چشم مگس یا بال پروانه است و با تقریب بسیار خوبی یک قطعهٔ کریستال فوتونی دو یا سه بعدی محسوب می‌شود. یک آرایه کریستال فوتونی، یک نانوساختار متناوب است که بر عبور فوتون‌ها تأثیری مشابه با اثر شبکه‌های یونی جامدات بر حرکت الکترون‌ها دارد (Biró *et al*., 2007). از آنجا که حسگرهای زیستی با ساختار کریستال فوتونی برای تشخیص و درمان برخی بیماری‌ها قابل استفاده هستند (Sharifi *et al*., 2016)، دیاتوم‌ها به عنوان ساختارهای کریستال فوتونی این قابلیت را دارند که به عنوان زیست حسگرهای نانوساختار به کار گرفته شوند (De Stefano *et al*., 2009). در شکل ۱ برخی انواع دیاتوم‌های دریای نانورای ژاپن ارائه شده است که اغلب، دارای ساختارهایی متخلخل و تناوبی هستند.

جوامع دیاتومی از گذشته تاکنون برای پایش شرایط محیطی در مطالعات کیفیت آب مورد استفاده قرار می‌گرفته اند. بیش از ۲۰۰ دسته مختلف دیاتوم زنده شناخته شده است که حدود ده الی دوازده هزار گونه شناخته شده را در بر می‌گیرند. این در حالی است که منابع مختلف وجود بین صد هزار تا ده میلیون گونه مختلف را پیش بینی می‌کنند. دیاتوم‌ها دارای تنوع زیستگاهی گسترده‌ای هستند و می‌توانند در اقیانوس‌ها، آب‌های شیرین، خاک و سطوح نمناک یافت شوند. آن‌ها یکی از گروه‌های غالب فیتوپلانکتونی در آب‌های ساحلی غنی از مواد مغذی هستند و در هنگام بهار اقیانوسی به شکوفایی می‌رسند زیرا می‌توانند سریع‌تر از دیگر گروه‌های فیتوپلانکتونی تقسیم شوند (Canter-Lund and Lund, 1995; Hasle *et al*., 1996; Round *et al*., 1990 ; Bogusz *et al*.,2018; Guiry 2012; Kale and Karthick, 2015).

صخره‌های مرجانی یکی از غنی‌ترین زیستگاه‌ها از نظر تنوع زیستی هستند و گروه‌های متنوعی از ارگانیزم‌ها را می‌توانند از طریق شبکه‌های پیچیدهٔ مواد غذایی نگهداری کنند. دیاتوم‌ها در این میان به نظر می‌رسد که دارای تنوع و تولید بیشتری



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ نوری دیاتوم‌های ساحل نانورا، ژاپن (Park *et al*., 2012).

A, Actinocyclus octonarius;
B, A. octonarius var. tenellus;
C, Actinoptychus senarius;
D, Asteromphalus flabellatus;
E, Aulacoseira granulata;
F, Coscinodiscus ocmlus-iridis;
G, C. radiatus;
H, Cyclotella choctawhatcheeana;
I, C. litoralis; J, C. radiosa;
K, C. stelligera; L, C. striata;
M, Cymatotheca weissflogii;
N, Ditylum brightwellii;
O, Eucampia zodiacus;
P, Paralia sulcata; Q, Rhizosolenia;
R, Skeletonema grethae;
S, Thalassiosira allenii;
T, T. bramaputrae;
U, T. eccentric;
V, T. eccentrica var. fasciculata;
W, T. ferelineata.

Scale bar =10 µm in C-E, H-N, P, R-W, 15 µm in A, B, F, G, O, Q

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]

هستند (Al-Handal *et al*., 2016). هر چند تا حدود دو دهه پیش، در مورد دیاتوم‌های ساکن یا ته نشین شده در این صخره‌ها اطلاعات کمی وجود داشت و بوم‌شناسی آن‌ها چندان شناخته نشده بود؛ با این حال امروزه صخره‌های مرجانی یکی از زیستگاه‌های اصلی دیاتوم‌ها به حساب می‌آیند (Lobban *et al*., 2012; Yamashiro *et al*., 2012).

بررسی تراکم و تنوع دیاتوم‌های خلیج فارس در سواحل بوشهر نشان می‌دهد که بیش از ۹۷ گونه دیاتوم با میانگین سالانه ۴۷۵۳۳۶ سلول در متر مکعب، حدود ۳۴ درصد کل فیتوپلانکتون‌ها را شامل می‌شوند (Fatemi *et al*., 2005).

دیاتوم‌ها با طبیعت سازگار هستند؛ طوری که برخی از گونه‌های باکتری در اقیانوس‌ها و دریاچه‌ها می‌توانند میزان انحلال سیلیس در دیاتوم‌های مرده و زنده را با استفاده از آنزیم‌های هیدرولیتی به منظور تجزیه مواد گیاهی آلی، به سرعت افزایش دهند (Bidle and Azam, 1999). با توجه به تنوع و گستردگی دیاتوم‌ها، آن‌ها در بوم‌های مختلف دسترس‌پذیر هستند، ضمن آن‌که از آن‌ها استفاده‌های مختلفی می‌شود مثلاً در پزشکی قانونی از میزان انحلال دیاتوم‌های موجود در ارگان‌های داخلی بدن برای بررسی سقط جنین، زمان و مکان مرگ استفاده می‌شود (Auer, 1991; Liu *et al*., 2020; Li *et al*., 2020).

دیاتوم‌ها می‌توانند اصلاح و تعدیل شده و نانو مواد و مولکول‌های زیستی با کاربردهای مختلف را به خدمت بگیرند. آن‌ها قدرت مکانیکی بالا، ناحیه سطحی گسترده و منافذ با تخلخل میکرو و نانویی دارند که این خواص می‌توانند در تشخیص فوتولومینسانس و سپس از بین بردن سلول‌های سرطانی به کار گرفته شوند (Bannon-Peppas and Blanchette, 2004; Gale *et al*., 2009). اخیراً انتقال داروهای شیمی‌درمانی برای مقابله با سلول‌های سرطانی با استفاده از سیلیکای زیستی نانومتخلخل یا همان دیاتوم‌ها توسط Delalat و همکاران (2015) گزارش شده است به طوری که ناقل‌های دارویی نانویی مطابق شکل ۲ می‌توانند ابتدا در سیلیکای زیستی، مستقر و خود را به سلول‌های سرطانی بچسبانند و به صورت هدفمند با سلول‌های ناسالم درگیر شوند (Chen *et al*., 2013).

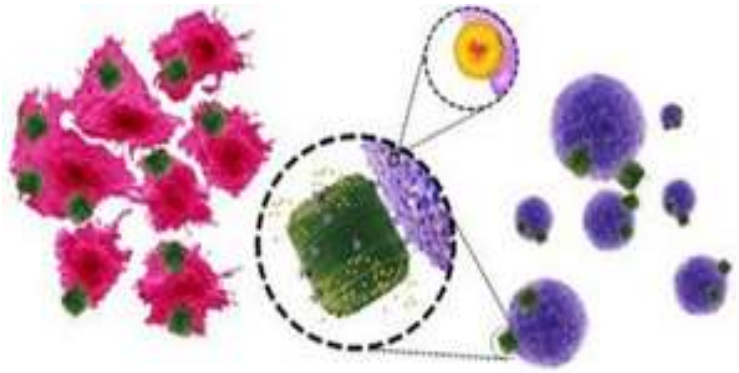
De Stefano و همکاران (2009) گزارش داده اند که اخیراً دسته‌ای از نانو و میکروذرات معدنی به دست آمده است که حاوی رشته‌های فلورسانس با پایداری قابل قبولی هستند. نانوذرات فوتولومینسانس مورد نظر که از ترکیبات فلوئوروفور هستند، از نظر نوری، شبیه به نقاط کوانتومی، نوارهای رسانایی کم عرضی بروز می‌دهند که به دلیل پهن بودن گسترهٔ طول موج تحریک، برای آزمایش‌های تسهیم نوری (multiplexing) مفید هستند و می‌توان این خواص را به عنوان یک فن‌آوری تصویربرداری به کار گرفت (Wang *et al*., 2005). از طرف دیگر سطح این ترکیبات می‌تواند از نظر شیمیایی با مولکول‌های زیستی هماهنگ شود. با این حال، علیرغم توانایی و موفقیت آن‌ها از نظر برخی جنبه‌های زیستی، دارای محدودیت‌های کاربردی نیز هستند: چشمک زدن نوری، زیست سازگاری ضعیف و مشکل سنتز جزو اشکالات اصلی چنین فن‌آوری‌های تصویربرداری است. سیلیکا جزو مواد جدیدتری است که برخی از این مشکلات را حل کرده است. از آنجا که دیاتوم‌ها از جنس سیلیکا هستند، پوسته سیلیکای دیاتوم‌ها می‌تواند در توسعه نانوفن‌آوری این صنعت تصویربرداری مورد استفاده قرار گیرد. در مقاله De Stefano و همکاران (2009) این موضوع به خوبی مرور و از دیاتوم‌ها به عنوان حسگر زیستی استفاده شده است. به این ترتیب که چگونگی تشخیص آنتی بادی-آنتی ژن به صورت تابعی از تغییرات در طیف PL دیاتوم‌ها بررسی شده است.

برخی کاربردهای دیگر دیاتوم‌ها را می‌توان در پژوهش Mishra و همکاران مرور کرد. از جدولی که در همان مرجع به مرور مختصر کاربردهای دیاتوم‌ها می‌پردازد می‌توان به خوبی دریافت که یکی از مهم‌ترین کاربردهای حسگری دیاتوم‌ها مربوط به خواص نوری آن‌هاست (Ferrara *et al*., 2014).

در این پژوهش سعی داریم ابتدا مروری بر خواص نوری دیاتوم‌ها به ویژه گونه Coscinodiscus داشته باشیم و توضیح دهیم که چگونه می‌توانند یکی از بهترین ظرفیت‌های نانوحسگری باشند. سپس برخی از اقسام دیاتوم‌های محلی را شناسایی و جداسازی کنیم و مشاهدات خود را جهت امکان‌پذیری استفاده از دیاتوم‌های محلی در کاربردهای نانواپتیک ثبت کنیم.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]



شکل ۲. دیاتوم دستورزی شده (سبز رنگ) که دارای نانولیپوزوم‌های حامل دارو (زرد رنگ) است. با استفاده از گیرنده‌های اتصالی، سلول‌های سرطانی (سلول‌های سرطانی بنفش و قرمز) به آن‌ها متصل و دارو به صورت هدفمند آزاد و موجب تخریب سلول‌های سرطانی می‌شود. (Delalat *et al.*, 2015).

مواد و روش‌ها

مقالات متعددی وجود دارند که خواص نوری دیاتوم‌ها را از نظر جذب و عبور نور مرئی، مادون قرمز و فرابنفش مورد مطالعه قرار داده‌اند. جنبه مشترک این مقالات آن است که عمدتاً دیاتوم‌های Thalassiosira و Coscinodiscus مورد توجه قرار گرفته‌اند. محققان و نویسندگان این مقالات، اغلب با کمک تابش رنگ‌های طیف نور سفید، مادون قرمز و فرابنفش به صورت تجربی یا با کمک شبیه‌سازی تئوری، ساختارهای مورد نظر را بررسی کرده‌اند. در بسیاری از این مقالات، دیاتوم‌ها مانند یک تار نوری متخلخل یا یک کریستال فوتونی دو یا سه بعدی در نظر گرفته شده‌اند. انواع کریستال‌های فوتونی و تارهای متخلخل تاکنون به روش‌های مختلفی مطالعه شده‌اند و خواص خطی و غیرخطی آن‌ها مورد ملاحظه قرار گرفته‌اند (Garmi and Barvestani, 2019; Hosseini Farzad and Yazdanpanah, 2010; Johnson and Joannopoulos, 2001; Mokari *et al.*, 2018; Rahmatnezamabad *et al.*, 2014; Sakoda, 2004). در اینجا برخی از مقالاتی را مرور می‌کنیم که به روش‌های مشابهی، دیاتوم‌های دسته Coscinodiscus را بررسی کرده‌اند.

Chen و همکاران (2015)، با روش "تجزیه و تحلیل موج‌های متحرک منظم" (RCWA) و روش‌های زمان سنجی (FDTD)، خصوصیات به‌دام‌اندازی نور[2] توسط صدف دیاتوم را شبیه‌سازی کرده‌اند و دریافتند که جذب نوری در سطح دیاتوم به شدت با نزدیک شدن به ناحیه مرئی افزایش می‌یابد و ادعا می‌کنند که این نتیجه در توافق خوبی با تجربه است.

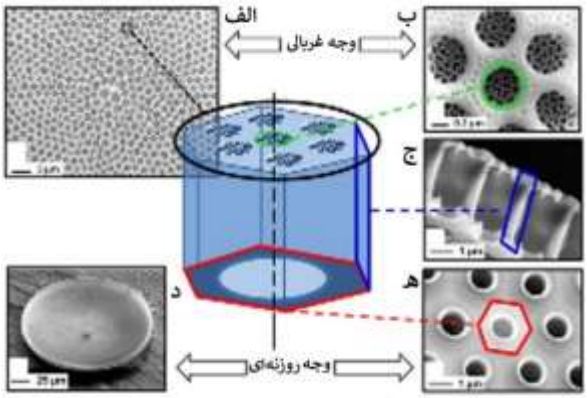
Romann و همکاران (2015)، نیز خواص نوری یک دریچه دیاتومی، یعنی نیمی از دیاتوم Coscinodiscus را با استفاده از میکروسکوپ طیفی کانونی شده مورد بررسی قرار دادند و یک کریستال فوتونی دوبعدی در صدف دیاتوم مشاهده کردند. شکل ۳ شمای کلی دیاتوم مورد نظر و جزئیات مربوطه را نشان می‌دهد. این تصویر بسیار شبیه به فرضی است که Chen و همکاران (2015) برای شبیه‌سازی شکل ظاهری صدف دیاتوم اعمال کرده‌اند.

تجزیه و تحلیل نگاشت طیفی توسط Romann و همکاران (2015)، تقویت نور عبوری در حدود ۶۳۶ تا ۶۶۳ نانومتر را تأیید می‌کند. تقریباً نتایج مشابهی را با تحلیل نمودارهای مربوط به جذب نور در صدف دیاتوم، توسط Chen و همکاران (2015) نیز می‌توان مشاهده کرد. این طول موج‌ها با طول موج جذب حداکثری در کلروفیل مطابقت دارند. به این ترتیب، وجود یک مکانیزم مهار نوری بسیار قوی تأیید شد که ناشی از عدم تقارن قوی میان ساختارهای شبه تناوبی مربوطه است. این ساختارها که مانع عبور نور و افزایش جذب می‌شوند، دو نوع هستند: وجه کریبروم یا غربالی[3] و وجه فورامن یا روزنه‌ای[4] که برای یک نوع دیاتوم Coscinodiscus در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج این فرضیه، ساختار لایه‌ای چند بعدی صدف دیاتوم، باعث افزایش فتوسنتز می‌شود.

[2] Light Trapping
[3] Cribrum side
[4] Foramen side

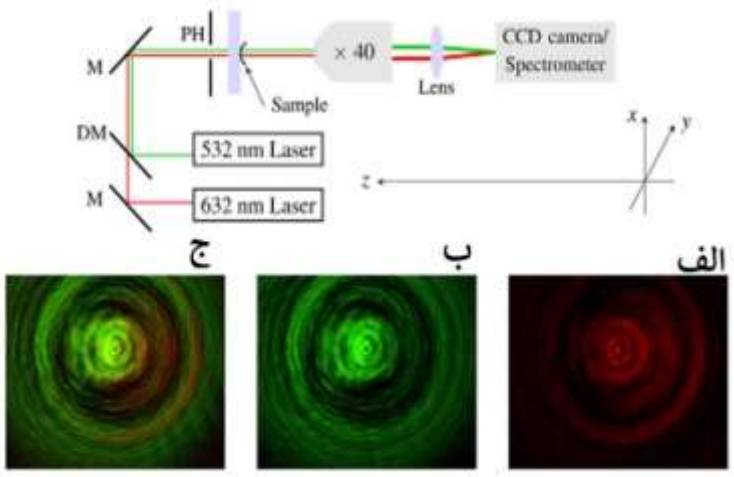
[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]



شکل ۳. شمای کلی دریچهٔ سیلیکای زیستی Coscinodiscus centralis (الف) تصویر SEM وجه غربالی (ب) جزئیات وجه غربالی (ج) تصویر SEM دیواره‌ها و (د) وجه روزنه‌ای (ه) جزئیات وجه روزنه‌ای (Romann *et al*., 2015).

در پژوهش دیگری توسط Maibohm و همکاران (2015)، تداخل نور عبوری از دریچه‌های صدفی دیاتوم در توافق با گزارش‌های ارائه شده در سایر منابع (Romann *et al*., 2015; Chen *et al*., 2011) به دست آمد. علاوه بر آن با کمک یک دوربین CCD و اعمال دو طول موج تجربی ۶۳۲ nm و ۵۳۲ nm، می‌توان مشاهده کرد که نقش تداخلی به دست آمده به ازای هر یک از طول‌موج‌ها متفاوت است؛ لذا نویسندگان با شبیه‌سازی چنین آزمایشی نشان دادندکه پیش‌بینی موقعیت نقاط تداخل ممکن است و به خوبی با یافته‌های تجربی در توافق است. در نهایت، نسبت شدت نور در نقاط تداخل سازنده به نقاط تداخل ویرانگر حدود ۲۰ دسی بل به دست آمده است. این پژوهش از این منظر مورد توجه نویسندگان مقاله حاضر واقع شده که در آن ادعا شده است در طرح‌های کاربردی می‌توان به صورت بالقوه‌ای از دیاتوم‌ها مثلاً به عنوان کلیدهای نوری استفاده کرد. در شکل ۴ چینش مربوط به این آزمایش و گرته تداخلی[5] مشاهده شده، ارائه شده است.



شکل۴. در قسمت بالای شکل، چینش تجربی آزمایش عبور و تداخل آمده است: نمونه‌ها توسط دو منبع لیزر با طول موج‌های ۶۳۲ nm (قرمز) و ۵۳۲ nm (سبز) روشن می‌شود؛ در دیاگرام تجربی بالا، Mها نماد آینه‌های هدایت نور، DM نماد آینه دو رنگ نما، PH علامت یک روزنه با عرض ۱۰۰ µm و عنصر با علامت (بزرگنمایی ۴۰ ×) نشان‌دهنده یک چشمی تعدیل شده با گشودگی عددی NA=۰٫۷۵ است که تصویر را به دوربین CCD هدایت می‌کند. وقتی صدف دیاتوم در محل نمونه که در شکل با (sample) مشخص شده است، قرار می‌گیرد، می‌توان نقش حاصل از تداخل را برای (الف) نور قرمز، (ب) نور سبز و (ج) ترکیب هر دو نور سبز و قرمز مشاهده کرد (Maibohm *et al*., 2015).

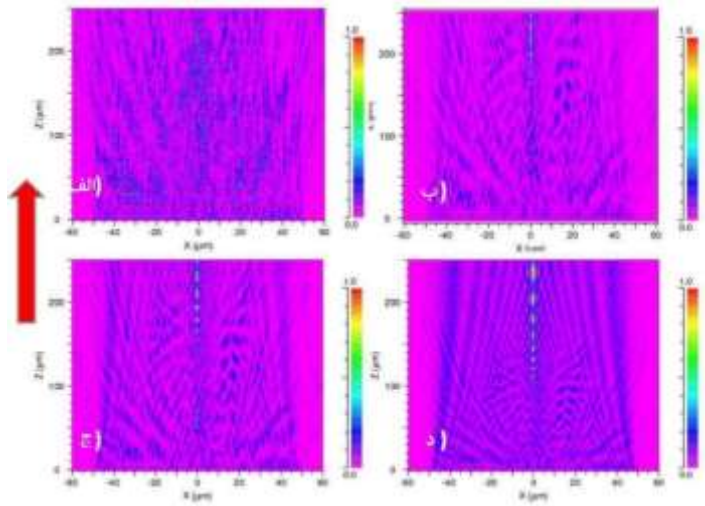
همچنین انتشار نور در طول یک دیاتوم Coscinodiscus wailesii توسط Tommasi و همکاران (2010) مطالعه شده است. از نتایج مربوط به این مقاله استنباط می‌شود که نور ورودی توسط الگوی متخلل پوسته دیاتوم به لکه‌ای (به اندازه قطر پرتو خروجی) در حدود چند میکرون محدود می‌شود که ابعاد آن به طول موج بستگی دارد. این اثر به برهم نهی جبهه‌های موج پراکنده توسط لبه حفره‌ها مربوط است. از آنجا که شبیه سازی عددی نشان داده است که این اثر در ناحیه ماورای بنفش طیف نور وجود ندارد، این یکی از مزایای الگوی حفره‌ای مربوط به دریچه‌ها به حساب می‌آید. در شکل ۵ می‌توان چگونگی

[5] Interference fringe

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]

انتشار نور در طول چنین دیاتومی را مشاهده کرد. همچنین استنباط می‌شود که این دیاتوم می‌تواند مانند موجبر نوری عمل کند و وظیفه یک قطعه تار نوری کریستال فوتونی را بر عهده بگیرد. منابع (Russell, 2003; Seraji and Talebzadeh, 2008) مشاهده شود.



شکل ۵. توزیع فضایی توان عبوری برای طول موج‌های (الف) λ = ۲۸۰ nm ، (ب) λ = ۵۳۲ nm ، (ج) λ = ۶۳۳ nm ، (د) λ = ۱ µm دریچه از µm ۰٫۶ - = z تا µm ۰٫۴ = z کشیده شده است. فلش قرمز رنگ در جهت انتشار نور ورودی است و توان مربوط به زمینه ورودی (a.u.) ۰٫۰۸ در نظر گرفته شده است (De Tommasi *et al.*, 2010).

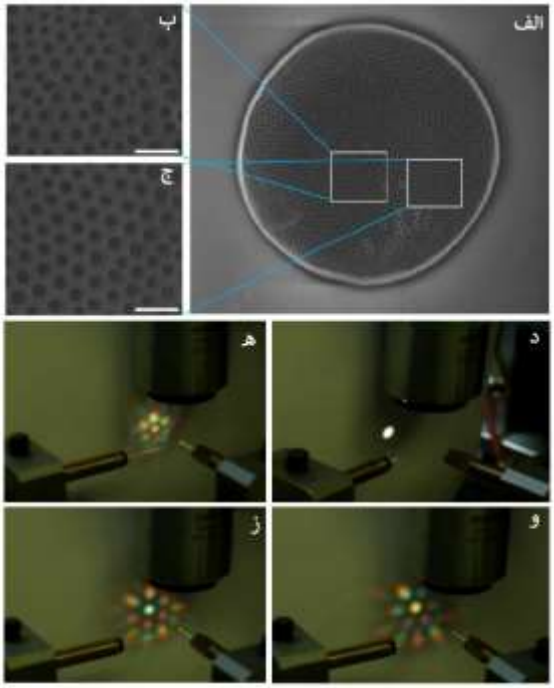
Kieu و همکاران (2014) نیز به تناوبی بودن ساختار صدف دیاتوم Coscinodiscus wailesii با الگوی شش وجهی (هگزاگونال) اشاره کرده‌اند. سپس به بررسی خواص فیلترگونهٔ چنین ساختاری با استفاده از یک لیزر فوق پیوستهٔ پهن‌باند همدوس (با پهنای باند ۴۰۰ الی ۱۷۰۰ نانومتر) که تا حد خوبی متمرکز شده (اندازه لکه با قطر حدود ۲۰ میکرومتر)، پرداخته‌اند. فیلتر کردن رنگ‌های مختلف طیف سفید به ازای تابش نور به نواحی مختلف سطح صدف دیاتوم مطابق شکل ۶، حاکی از شبه تقارنی بودن ساختار پوسته (و نه کاملاً تناوبی بودن آن) است.

در مجموع می‌توان گفت که در اغلب آزمایش‌های مربوط به بررسی اپتیکی دیاتوم‌ها، مواد و ادوات بررسی، عمدتاً سانتریفیوژها، آنزیم‌های رنگی مانند آئوزین، میکروسکوپ معمولی، میکروسکوپ الکترونی و منابع نوری از قبیل انواع لیزرها هستند. شبیه‌سازی‌ها نیز عمدتاً با یک کامپیوتر مناسب (دارای پردازنده مرکزی مناسب برای کارهای محاسباتی متوسط مانند core i3 یا بالاتر و رم ۴ گیگابایت یا بیشتر) و با کمک نرم افزارهایی مثل Lumerical یا COMSOL ممکن است.

همان‌طور که ملاحظه شد، نتایج بررسی‌های مذکور تا حد زیادی خواص نوری دیاتوم‌ها را مشخص می‌کند. با این حال در ادامه این پژوهش امکان انجام برخی از این پژوهش‌ها با کمک دیاتوم‌های محلی مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور جداسازی دیاتوم‌ها از نمونه آب مربوط به صخره‌های مرجانی خلیج فارس و سپس رود دز، در مرحله اول مطابق شکل ۷-الف، یک سنگ صاف نزدیک سطح رودخانه انتخاب و با کمک برس و مسواک سطح آن شستشو داده شد. آب حاصل از شستشو در بشر جمع‌آوری شد (شکل ۷- ب). سپس کمی از قسمت ته‌نشین شده مطابق شکل ۷-ج در فالکون ریخته و با آب مقطر مخلوط شد و در چند مرحله با محلول حاوی هیپوکلرید سدیم (با نام تجاری وایتکس)، شستشو داده شد. پس از هر بار شستشو به مدت ۳ دقیقه با آهنگ ۳۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ انجام گرفت تا مخلوطی شبیه به شکل ۷-ه به دست آید. سپس کمی از رسوب سفیدرنگ ته‌نشین شده با مقداری آب مخلوط شد تا رقیق شود (شکل ۷- و). سفیدی این مخلوط به دلیل آن است که حاوی پوسته‌های سیلیکای دیاتوم‌هاست و لذا وقتی ته‌نشین می‌شود، شبیه به شیشه آسیاب شده به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است در هر مرحله به جز قسمت ته‌نشین شده و روشن‌تر، بقیه قسمت‌ها شامل گل و لای و تیرگی دور ریخته شد. در مرحله آخرِ آماده‌سازی نمونه‌ها، مقداری از محتویات بشر حاوی مخلوط روشن بر روی لام میکروسکوپ، پهن و سپس با کمک هیتر یا آون مطابق شکل ۷-ز خشک شد. برای دیدن نمونه‌ها از میکروسکوپ Nikon-YS100 با بزرگنمایی‌های ۱۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ برابر استفاده شد (شکل ۷-ح). بخشی از آنچه که در زیر میکروسکوپ دیده شد، در شکل ۷-ط نشان داده شده است.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]



شکل ۶. (الف) تصویر SEM از دریچه یک صدف دیاتوم از نوع Coscinodiscus wailesii (مقیاس ۱۰ µm). فاصله متوسط تخلخل در تصویر (ب) یعنی در نقاط نزدیک به مرکز دریچه،µm ۰/۰۶ ±۴/۲۶ است، در حالی که در نقاط مجاور آن یعنی در مکانی نزدیک به لبه‌های دریچه در تصویر (ج)، به طور متوسط حدود µm ۰/۰۴ ±۴/۶۶ است. همین موضوع باعث شده است که وقتی دریچه دیاتوم را در مقابل لکه کوچک تار نوری حامل نور سفید جابه‌جا می‌کنیم، الگوی پراکندگی، متناسب با شکل شش ضلعی ساختار ظاهر شود، به طوری که در محل‌های مختلف از سطح دریچه، رنگ لکه مرکزی متناسب با فاصله و شعاع حفره‌ها تغییر می‌کند: (د) دیاتومی در مسیر پرتو وجود ندارد و لکه نور سفید خارج شده از تار به وضوح دیده می‌شود. (ه-ز) جابجایی محل لکه نور تابیده شده به نواحی مختلف سطح ساختار، مشابه دو ناحیه‌ای است که در تصویر بالا نشان داده شده است (Kieu *et al.*, 2014) در واقع این تصاویر بیانگر عدم وجود تقارن کامل در سطح دیاتوم هاست.

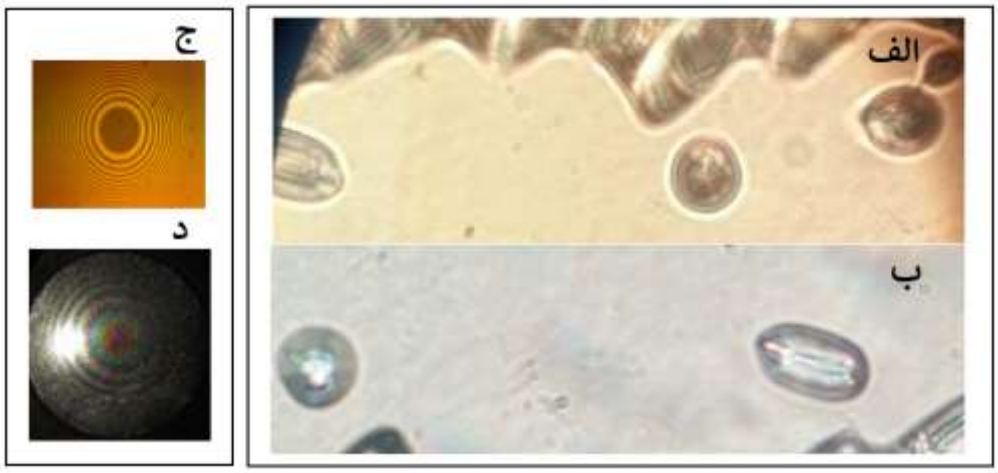


شکل ۷. مراحل آماده‌سازی نمونه حاوی دیاتوم‌ها (الف) سنگ حامل جلبک‌های رود دز (ب) نمونه جدا شده از سطح سنگ (ج) مرحله شستشوی نمونه (د) سانتریفیوژ مورد استفاده (ه) مخلوط شسته شده (و) مخلوط نهایی رقیق‌شده (ز) اسلاید حاوی دیاتوم‌ها (ح) میکروسکوپ مورد استفاده (ط) برخی از اقسام دیاتوم‌های مشاهده شده زیر میکروسکوپ.

نتایــج

شکل ۸- الف و ۸- ب نتیجه مشاهدات مربوط به نمونه آب به دست آمده از سواحل خلیج فارس را نشان می‌دهد که به ترتیب با کمک نور زرد و سفید مشاهده شده‌اند. در مقایسه با شکل ۴ (Maibohm *et al.*, 2015)، به نظر می‌رسد با دیاتومی از نوع Coscinodiscus سر و کار داریم چرا که شکل هندسی و توزیع خطوط میدان نوری زمینه، حکایت از تقارن کروی یا استوانه‌ای ساختار دارد. از مقایسه آن‌ها با شکل ۸-ج و ۸-د که مربوط به نقش پراش ناشی از کره شیشه‌ای در آزمایش حلقه‌های نیوتن برای منابع نوری لامپ سدیم زرد و سفید است می‌توان به این دقت نظر رسید که دیاتوم‌ها به دلیل ساختار سیلیکایی به عنوان منابع پراکننده نور می‌توانند خواص تداخل و پراش نور موجی را به نمایش بگذارند. دلیل وجود خطوط رنگی در تابش نور سفید مربوط به رنگ‌های مختلف طیف آن است که هر کدام نقش‌های پراش انتقال‌یافته‌ای را به وجود می‌آورند، لذا در استفاده از منابع غیر تکفام، باید دقت کرد که ممکن است بخشی از طرح ظاهر شده مربوط به پدیده‌های موجی یاد شده در

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]



شکل ۸. تصویر زیر میکروسکوپ با استفاده از منابع نوری (الف) زرد و (ب) سفید (ج) نقش پراش ناشی از کره شیشه‌ای در آزمایش حلقه‌های نیوتن برای منابع نوری زرد و (د) سفید.

برخورد با ساختار سیلیکایی باشد. به عبارت دیگر برای تشخیص هندسه ساختار، استفاده از نور تک‌رنگ مناسب‌تر است. در نمونه آب رود دز نیز این دسته دیاتوم‌ها مشاهده شدند.

با مشاهده دقیق‌تر اسلایدهای تهیه شده در زیر میکروسکوپ، به نظر می‌رسد که اقسام مختلفی از فیتوپلانکتون‌ها و دیاتوم‌ها را می‌توان در نمونه آب رودخانه دز یافت. شکل ۹ برخی از این موجودات مشاهده شده را نشان می‌دهد. دیاتوم‌های دارای ساختار میله‌ای یا استوانه‌ای گزینه‌های مناسبی برای موجبری نوری هستند و می‌توانند نقش تارهای نوری در نانواپتیک را برعهده بگیرند.

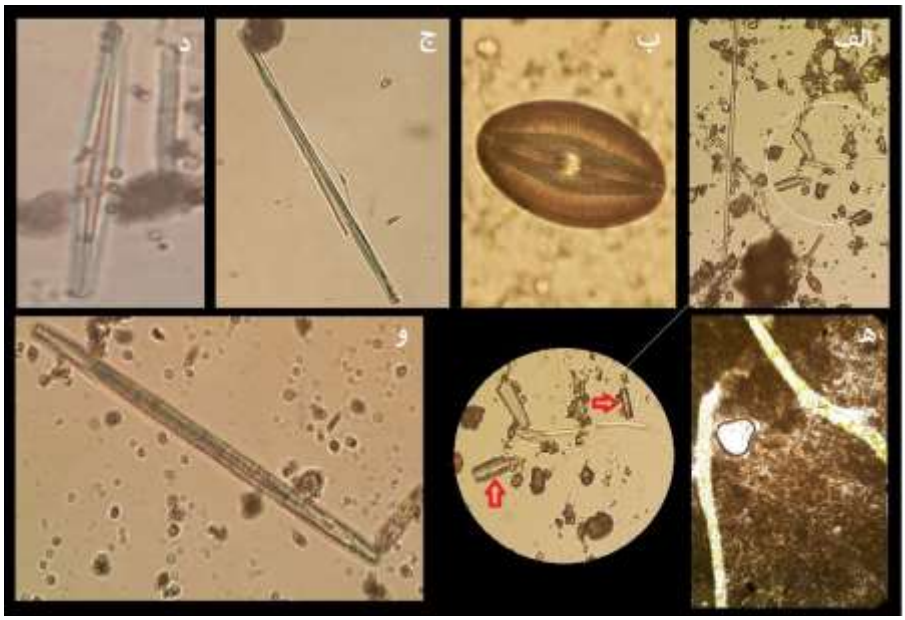
به منظور بررسی موجبری نوری دیاتوم‌ها به اسلاید حاوی دیاتوم میله‌ای نشان داده شده در شکل ۱۰-الف، نور لیزرهای نقطه‌ای سبز (طول موج ۵۳۲±۱۰nm و ۱۰۰mW < توان خروجی) و قرمز (طول موج ۶۵۰±۱۰nm و ۵mW > توان خروجی) را تاباندیم. مشاهدات مربوط به تابش نور لیزر سبز رنگ در شکل ۱۰- ب گویای ورود نور از یک سر موجبر دیاتومی و هدایت آن توسط ساختار مزبور است. پیکان قرمز در شکل ۱۰-ب، جهت تابش و ورود نور به دیاتوم را نشان می‌دهد. پراکندگی (درخشش) نور در انتهای دیگر موجبر، محل خروج نور را نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر موجبری دیاتوم با موجبری تار نوری، همان منبع را به انتهای قطعه تار نوری مطابق شکل ۱۰- ج تاباندیم. پراکندگی نور در دو انتهای تار نوری را به خوبی می‌توان با موجبری مربوط به دیاتوم میله‌ای مورد آزمایش مقایسه کرد. در شکل ۱۰-د می‌توان چینش آزمایش تابش لیزر سبز به تار نوری را مشاهده کرد. برای لیزر قرمز رنگ نیز، هر چند شدتی حدود ۲۰ برابر کوچک‌تر داشت، نتایج مشابهی به دست آمد که به خوبی مؤید ظرفیت استفاده از دیاتوم‌ها به عنوان جایگزین تار نوری و امکان به کارگیری آن‌ها در حسگرهای نوری نانومقیاس است. لازم به یادآوری است که تار نوری از جنس سیلیکا و دارای قطری به اندازه موی انسان است در حالی که ابعاد یک دیاتوم نوعی مورد آزمایش چند ده برابر کوچک‌تر است.

بحث

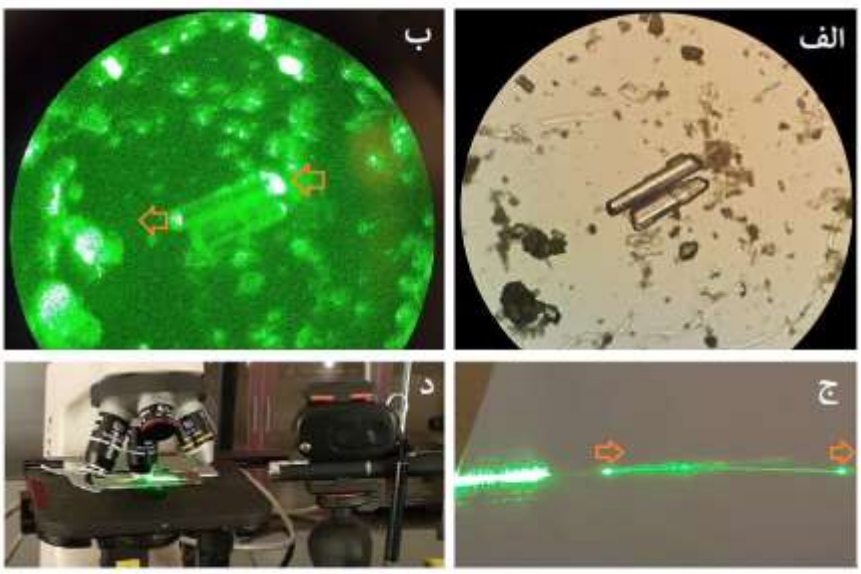
وجود دیاتوم‌ها در هر جایی و تقریباً در تمام اقلیم‌ها باعث می‌شود که بتوان بدون صرف هزینه زیادی از این ظرفیت سبز و طبیعی در جهت رفع موانع فن‌آورانهٔ مربوط به ساخت چنین ساختارهای پیچیده‌ای بهره برد. برای شناخت هندسه دیاتوم‌ها، با توجه به آن‌که به دلیل شکل ساختار خود می‌توانند خواص مختلفی مانند تداخل و پراش را بروز دهند، استفاده از نور تک‌رنگ یا رنگ‌آمیزی آن‌ها توسط آنزیم‌ها توصیه می‌شود.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]



شکل ۹. تصویرهای مختلف مربوط به انواع دیاتوم‌ها و ساختارهای سیلیکایی رودخانه دز. (الف) مجموعه‌ای از دیاتوم‌های مختلف: برخی دیاتوم‌های *Coscinodiscus* با پیکان قرمز مشخص شده‌اند. (ب-و) برخی دیاتوم‌های نواری و پروانه‌ای را می‌توان مشاهده کرد. شکل (ه) نمونه شسته نشده حاوی رشته‌های منظم و متناوب سیلیکایی است.



شکل ۱۰. (الف) دو دیاتوم استوانه‌ای (ب) تابش لیزر سبز به دیاتوم‌های استوانه‌ای (ج) تابش لیزر سبز به تار نوری (د) چینش آزمایش تابش لیزر به اسلاید حاوی دیاتوم. پیکان‌های قرمز جهت ورود و خروج نور به موجبر را نشان می‌دهد.

دیاتوم‌های نواری و میله‌ای بر اساس مطالعه حاضر به خوبی خاصیت موجبری نوری را از خود بروز می‌دهند و می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای لایه نشانی به منظور ساخت نانو حسگرها یا به عنوان کانال انتقال در نانو اپتیک، همچنین به عنوان اجزای یک مدار مجتمع فوتونی به کار گرفته شوند. ساختار لایه‌ای و تناوبی اغلب دیاتوم‌ها و مطالعه گاف نواری نوری آن‌ها به صورت تئوری و تجربی نشان می‌دهد که حتی می‌توانند جایگزین مناسبی برای کریستال‌های فوتونی مرسوم به حساب بیایند.

هر چند برای دسترسی به انواع دیاتوم‌ها و حتی گونه‌های خاص آن‌ها، این امکان فراهم است که در پایگاه‌های اینترنتی مشخصی آن‌ها را یافت و سپس خریداری کرد، با این حال نتایج این بررسی نشان می‌دهد که اغلب دیاتوم‌های مورد نیاز در صنایع اپتیکی به راحتی و فراوانی در آب‌های محلی مانند سواحل خلیج فارس و رودخانه دز وجود دارند.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]

شاید روزی در کامپیوترهای نوری بتوان از این جلبک‌ها استفاده کرد، هرچند فعلاً ساخت قطعات فوتونی و نانوحسگرها بیشتر جنبه تحقیقاتی دارد. با این وجود، استفاده از این ساختارهای سازگار با محیط زیست دو جنبه مهم دارد: از یک سو هزینه‌های سنگین ساخت و تولید را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر به نظر می‌رسد که فعلاً طبیعت در خلق چنین ساختمان‌های پیچیده‌ای آن هم در ابعاد نانومتری از فن‌آوری موفق‌تر بوده است.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر محمد دیده‌بان عضو هیأت علمی گروه معماری و شهرسازی قدردانی می‌کنیم که دعوت ایشان در جلسه دفاعیه مربوط به معماری طبیعت، زمینه آشنایی با این نوع آبزیان را فراهم آورد. همچنین از خانم سملی‌نژاد دانشجوی فیزیک مهندسی که در تهیه آب از صخره‌های مرجانی خلیج فارس همکاری کردند، تشکر می‌کنیم.

منابـع

Al-Handal, A.Y., Compère, P., Riaux-Gobin, C. 2016. Marine benthic diatoms in the coral reefs of Reunion and Rodrigues Islands, West Indian Ocean1. Micronesica. 3: 1-77.

Auer, A. 1991. Qualitative diatom analysis as a tool to diagnose drowning. The American Journal of Forensic Medicine and Pathology. 12(3): 213-218.

Bannon-Peppas, L., Blanchette, J. 2004. Nanoparticle and targeted system for cancer therapy. Advanced Drug Delivery Reviews, 56: 1649-1659.

Bidle, K.D., Azam, F. 1999. Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages. Nature. 397(6719): 508-512.

Biró, L., Kertész, K., Vértesy, Z., Márk, G., Bálint, Z., Lousse, V., Vigneron, J.-P. 2007. Living photonic crystals: butterfly scales—nanostructure and optical properties. Materials Science and Engineering: C. 27(5-8): 941-946.

Bogusz, M., Bogusz, I. and Siwińska, A. 2018. Does occurrence of diatoms in internal organs always prove a case of drowning? Issues of Forensic Science. 302(4): 38-43.

Canter-Lund, H., Lund, J. 1995. Freshwater algae: their microscopic world explored.

Chen, F., Hong, H., Zhang, Y., Valdovinos, H.F., Shi, S., Kwon, G.S., Theuer, C.P., Barnhart, T.E., Cai, W. 2013. In vivo tumor targeting and image-guided drug delivery with antibody-conjugated, radiolabeled mesoporous silica nanoparticles. ACS nano. 7(10): 9027-9039.

Chen, X., Wang, C., Baker, E., Sun, C. 2015. Numerical and experimental investigation of light trapping effect of nanostructured diatom frustules. Scientific reports. 5(1): 1-9.

De Stefano, L., Rotiroti, L., De Stefano, M., Lamberti, A., Lettieri, S., Setaro, A., Maddalena, P. 2009. Marine diatoms as optical biosensors. Biosensors and Bioelectronics. 24(6): 1580-1584.

De Tommasi, E., Rea, I., Mocella, V., Moretti, L., De Stefano, M., Rendina, I., De Stefano, L. 2010. Multi-wavelength study of light transmitted through a single marine centric diatom. Optics Express. 18(12): 12203-12212.

Delalat, B., Sheppard, V.C., Ghaemi, S.R., Rao, S., Prestidge, C.A., McPhee, G., Rogers, M.-L., Donoghue, J.F., Pillay, V., Johns, T.G. 2015. Targeted drug delivery using genetically engineered diatom biosilica. Nature Communications. 6(1): 1-11.

Fatemi, A.R., Vosughi, G.H., Nikouyan, A.R., Fallahi, M. 2005. Diatoms diversity and abundance in Iranian waters of the Persian Gulf, Bushehr area. Iranian Scientific Fisheries Journal. 13(4): 111-124.

Ferrara, M.A., Dardano, P., De Stefano, L., Rea, I., Coppola, G., Rendina, I., Congestri, R., Antonucci, A., De Stefano, M., De Tommasi, E. 2014. Optical properties of diatom nanostructured biosilica in Arachnoidiscus sp: micro-optics from mother nature. PloS one. 9(7): 1-8.

Gale, D.K., Gutu, T., Jiao, J., Chang, C.H., Rorrer, G.L. 2009. Photoluminescence detection of biomolecules by antibody-functionalized diatom biosilica. Advanced Functional Materials. 19(6): 926-933.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]

Garmi, F.B., Barvestani, J. 2019. The focusing effect of electromagnetic waves in two-dimensional photonic crystals with gradually varying lattice constant. Iranian Journal of Physics Research. 15(4): 401-404.

Guiry, M.D. 2012. How many species of algae are there?. Journal of Phycology. 48(5):1057-1063.

Kale, A., Karthick, B. 2015. The diatoms. Resonance. 20(10): 919-30.

Hasle, G.R., Syvertsen, E.E., Steidinger, K.A., Tangen, K., Tomas, C.R. 1996. Identifying marine diatoms and dinoflagellates. Elsevier.

Hosseini Farzad, M., Yazdanpanah, N. 2010. Field analysis of TE and TM modes in photonic crystal Bragg fibers by transmission matrix method. Iranian Journal of Physics Research. 9(4): 349-355.

Johnson, S.G., Joannopoulos, J.D. 2001. Photonic crystals: the road from theory to practice. Springer Science & Business Media.

Kieu, K., Li, C., Fang, Y., Cohoon, G., Herrera, O., Hildebrand, M., Sandhage, K., Norwood, R. 2014. Structure-based optical filtering by the silica microshell of the centric marine diatom Coscinodiscus wailesii. Optics Express. 22(13): 15992-15999.

Li, H., Kang, X., Zheng, D., Zhang, P., Xiao, C., Yu, Z., Shi, H., Xu, Q., Zhao, J., Liu, C., Wan, L. 2020. Are diatom types or patterns in the organs and water samples of drowning cases always consistent?. Australian Journal of Forensic Sciences, Oct 8: 1-10.

Liu, M., Zhao, Y., Sun, Y., Wu, P., Zhou, S., Ren, L. 2020. Diatom DNA barcodes for forensic discrimination of drowning incidents. FEMS Microbiology Letters. 367(17): 1-8.

Lobban, C.S., Schefter, M., Jordan, R.W., Arai, Y., Sasaki, A., Theriot, E.C., Ashworth, M., Ruck, E.C., Pennesi, C. 2012. Coral-reef diatoms (Bacillariophyta) from Guam: new records and preliminary checklist, with emphasis on epiphytic species from farmer-fish territories. Micronesica. 43(2): 237-479.

Maibohm, C., Friis, S.M.M., Ellegaard, M., Rottwitt, K. 2015. Interference patterns and extinction ratio of the diatom *Coscinodiscus granii*. Optics Express. 23(7): 9543-9548.

Mishra, M., Arukha, A.P., Bashir, T., Yadav, D., Prasad, G. 2017. All new faces of diatoms: potential source of nanomaterials and beyond. Frontiers in Microbiology. 8(1239): 1-8.

Mokari, M., Shahamat, Y., Alamatsaz, M., Babaei-Brojeny, A., Moeini, H. 2018. The effect of material nonlinearity on the band gap for TE and TM modes in square and triangular lattices. Iranian Journal of Physics Research. 18(3): 495-495.

Park, J., Khim, J.S., Ohtsuka, T., Araki, H., Witkowski, A., Koh, C.-H. 2012. Diatom assemblages on Nanaura mudflat, Ariake Sea, Japan: with reference to the biogeography of marine benthic diatoms in Northeast Asia. Botanical Studies. 53(1): 105-124.

Rahmatnezamabad, A., Roshanentezar, S., Afkhami, H., Rahmatnezamabad, B. 2014. Engineering photonic band gap in 1D phonic crystals using fresnel coefficients and comparing with the results of transfer matrix meghod. Iranian Journal of Physics Research. 14(2): 139-146.

Romann, J., Valmalette, J.-C., Chauton, M.S., Tranell, G., Einarsrud, M.-A., Vadstein, O. 2015. Wavelength and orientation dependent capture of light by diatom frustule nanostructures. Scientific Reports. 5(1): 1-6.

Round, F.E., Crawford, R.M., Mann, D.G. 1990. Diatoms: biology and morphology of the genera. Cambridge University Press.

Russell, P. 2003. Photonic crystal fibers. Science. 299(5605): 358-362.

Sakoda, K. 2004. Optical properties of photonic crystals. Springer Science & Business Media.

Seraji, F.E., Talebzadeh, M.D. 2008. Analysis of erbium doped holey fiber using fundamental space filling mode. Chinese Optics Letters. 6(9): 644-647.

Sharifi, M., Pashaei, A.H., Tajalli, H., Bahrampour, A. 2019. Design of Surface Plasmon Resonance Biosensor With one Dimensional Photonic Crystal For Detection of Cancer. Iranian Journal of Physics Research. 16(2): 133-138.

Wang, F., Tan, W.B., Zhang, Y., Fan, X., Wang, M. 2005. Luminescent nanomaterials for biological labelling. Nanotechnology. 17(1): R1-R13.

Yamashiro, H., Mikame, Y., Suzuki, H. 2012. Localized outbreak of attached diatoms on the coral Montipora due to low-temperature stress. Scientific Reports. 2(1): 1-4.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1399.10.2.10.8]