

Polymerization
Quarterly, 2024
Volume 13, Number 4
Pages 54-69
ISSN: 2252-0449

A Review on the Application of MXene-Polymer Nanocomposites in Solar Water Desalination

Fezzeh Aryanasab

Department of Chemistry, Chemistry and Petrochemistry Research Center,
Standard Research Institute (SRI), P.O. Box 31745-139, Karaj, Iran

Received: 7 February 2023, Accepted: 9 May 2023

Abstract

Solar radiation is a promising source for sustainable energy conversion and storage in many scientific and technological fields. Recently, the use of photothermal absorbers located at the water-air interface to generate steam has attracted a lot of attention, because the heat loss into the bulk water reduces by the localized heat, resulted in an improved solar steam efficiency. The structure of absorbers and salt resistance are two crucial parameters for water transport and desalination stability. As a new member of promising 2D materials, MXene has advantages including metallic conductivity, flexibility, diverse surface chemistry, and favorable optical and mechanical properties. These unique properties have attracted a lot of attention, and research on MXene has been intensively conducted and innovative applications have been reported in various fields. At the same time, various MXene/polymer nanocomposites have been developed and many wonderful results have been reported. In this article, the studies conducted in the field of MXene-polymer nanocomposite synthesis and their application in solar water desalination are reviewed. It should be noted that in recent years, limited studies have been done in this field, and there is a very high potential for further research.

Key Words

MXene,
MXene-polymer nanocomposite,
polymer-based membrane,
solar energy,
water desalination

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: f_aryanasab@standard.ac.ir

مروری بر کاربرد نانوکامپوزیت‌های مکسین-پلیمر در نمک‌زدایی آب خورشیدی

فضه آریاناسب

کرج، پژوهشگاه استاندارد، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، گروه پژوهشی شیمی،
صندوق پستی ۳۱۷۴۵-۱۳۹

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۱۹

تابش خورشیدی منبع امیدوارکننده‌ای برای تبدیل و ذخیره پایدار انرژی در بسیاری از زمینه‌های علمی و فناوری است. در سال‌های اخیر، استفاده از جاذب‌های نورگرمایی واقع در فصل مشترک آب و هوا برای تولید بخار، توجه زیادی را جلب کرده است، زیرا تمرکز گرما موجب کاهش اتلاف آن به توده آب و درنهایت بهبود بازده تولید بخار خورشیدی می‌شود. ساختار جاذب‌ها و مقاومت به نمک، دو پارامتر اساسی برای پایداری انتقال آب و نمک‌زدایی هستند. مکسین (MXene) به‌عنوان عضو جدیدی از مواد دوبعدی، مزایایی از جمله رسانندگی فلزی، انعطاف‌پذیری و شیمی سطح متنوع و خواص نوری و مکانیکی مطلوب دارد. این ویژگی‌های منحصر به فرد توجه زیادی را جلب کرده و پژوهش‌های زیادی درباره مکسین انجام شده است. همچنین، برنامه‌های کاربردی نوآورانه در زمینه‌های مختلف گزارش شده است. به‌طور هم‌زمان، نانوکامپوزیت‌های مکسین-پلیمر توسعه یافته و ویژگی‌های شگفت‌انگیز بسیاری برای آن‌ها گزارش شده است. در این مقاله، مطالعات انجام‌شده در زمینه تهیه نانوکامپوزیت‌های مکسین-پلیمر و استفاده از آن‌ها در نمک‌زدایی آب با استفاده از انرژی خورشیدی مرور می‌شود. یادآور می‌شود، سال‌های اخیر مطالعات محدودی در این زمینه انجام گرفته است و قابلیت بالقوه زیادی برای پژوهش‌های بیشتر در این باره وجود دارد.

بسیارش
فصلنامه علمی
سال سیزدهم، شماره ۴،
صفحه ۶۹-۵۴، ۱۴۰۲
ISSN: 2252-0449

چکیده



فضه آریاناسب

واژگان کلیدی

مکسین،
نانوکامپوزیت مکسین-پلیمر،
غشای برپایه پلیمر،
انرژی خورشیدی،
نمک‌زدایی آب

مقدمه

امروزه تأمین آب آشامیدنی پاک، از مهم‌ترین مسائل بهداشت بین‌المللی است. مناطقی که شدیدترین کمبود آب را دارند، کشورهای گرم و خشک در خاورمیانه و شمال آفریقا هستند. مشخصه این مناطق، افزایش شوری آب‌های زیرزمینی و بارندگی اندک است. رشد روزافزون جمعیت جهان همراه با افزایش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی به کاهش و آلودگی منابع آب شیرین منجر می‌شود. در آینده نزدیک، کمبود آب آشامیدنی در مناطق خشک جهان که آب شیرین بسیار کمیاب و هزینه تأمین آن زیاد است، مشکل بزرگی ایجاد خواهد کرد.

شیرین‌سازی یا نمک‌زدایی آب، یکی از اولین اشکال تصفیه آب توسط بشر بوده و امروزه هنوز هم تصفیه آب، راه‌حل قابل قبول در سراسر جهان است. در طبیعت، زمانی که تابش خورشید به‌وسیله دریا جذب شده و با تبخیر آب به تولید باران منجر می‌شود، درحقیقت نمک‌زدایی با استفاده از انرژی خورشید یا نمک‌زدایی خورشیدی رخ می‌دهد. در این فرایند، برای تهیه مقدار اندکی آب خالص از منبع آب شور، مقدار زیادی انرژی مصرف می‌شود. بنابر تخمین Kalogirou [۱]، تولید هزار متر مکعب آب شیرین در روز به ده‌هزار تن نفت در سال نیاز دارد. این موضوع بسیار درخور توجه است، زیرا هزینه‌های تأمین این انرژی بسیار زیاد است و تنها تعداد کمی از مناطق کم‌آب جهان، عمدتاً کشورهای دارای منابع فسیلی فراوان، می‌توانند از عهده آن برآیند. از طرفی، استفاده از این حجم زیاد منابع فسیلی مشکلات زیست‌محیطی متعددی را به‌دنبال دارد.

مشکلات مربوط به استفاده از سوخت‌های فسیلی را می‌توان تا حد زیادی با استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند خورشید، زیست‌توده، باد یا انرژی زمین‌گرمایی حل کرد. اغلب مناطق جغرافیایی که نیازمند آب است، به‌خوبی از منابع انرژی تجدیدپذیر برخوردارند. بنابراین، راه‌حل واضح این است که این منابع انرژی تجدیدپذیر با نیروگاه نمک‌زدایی ترکیب شوند تا منابع آب شیرین مورد نیاز جهان تأمین شوند. با این حال، بازده انرژی کم، هزینه‌بری و سامانه‌های پیچیده با اجزای متعدد فناوری‌های پیشرفته مانع استفاده‌های عملی از این انرژی‌ها می‌شود.

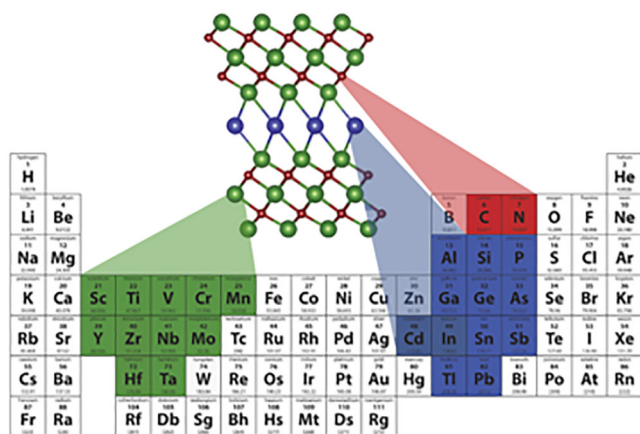
فناوری‌های عمده استفاده‌شده در سراسر جهان برای نمک‌زدایی را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته گرمایی (تقطیر) یا غشایی (اسمز معکوس) طبقه‌بندی کرد. اسمز معکوس در مقایسه با تقطیر به انرژی کمتری نیاز دارد. در طول فرایند نمک‌زدایی با اسمز معکوس، آب دریای پرفشار از طریق غشا پمپ شده که در نتیجه آب شیرین و

آب نمک تولید می‌شود. مصرف انرژی زیاد در فرایندهای نمک‌زدایی مزبور نیز لزوم توسعه فرایند نمک‌زدایی آسان با استفاده از منبع انرژی تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی) را مشخص می‌کند. باوجود قابلیت اطمینان فرایند اسمز معکوس، تلاش‌های درخور توجهی درباره فرایندهای نمک‌زدایی بدون فشار و مصرف انرژی کم متمرکز شده است. در این دسته، تولید بخار آب شیرین از آب دریا با استفاده از مواد جاذب نورگرمایی تحت نور فراوان خورشید به‌سرعت در حال پیشرفت است. در حال حاضر، تبخیرکننده‌های متنوعی برپایه مواد نورگرمایی ساخته شده‌اند، اما بیشتر آن‌ها هنوز با اشکالاتی از جمله ساختار پیچیده، آماده‌سازی مشکل و مقاومت ضعیف در برابر نمک مواجه‌اند که به‌شدت بر کاربردهای عملی گسترده آن‌ها اثر می‌گذارد.

مکسین‌ها از جمله مواد نورگرمایی دویعدی مهمی هستند که در سال ۲۰۱۱ معرفی شده‌اند [۲]. این ترکیبات به‌دلیل گروه‌های عاملی سطحی فراوان، آب‌دوستی، سنتز آسان در مقادیر زیاد و سازگاری با محیط زیست، به‌عنوان نامزد بالقوه جدیدی برای توسعه غشاهای گزینشی برای جداسازی هیدروژن [۳]، نمک‌زدایی آب [۴] و جداسازی مولکولی گزینشی [۵] به‌کار رفته‌اند. باوجود ویژگی‌های منحصربه‌فرد بسیار، پایداری شیمیایی مکسین بکر کم است و در صورت ترکیب با سایر مواد شیمیایی پایدار، به‌ویژه ماتریس‌های پلیمری، به‌منظور تشکیل کامپوزیت‌های مکسین-پلیمر می‌توان پایداری شیمیایی این ترکیبات را افزایش داد. به‌دلیل کارایی خوب تبدیل نورگرمایی، کامپوزیت‌های مکسین-پلیمر می‌توانند به‌طور گسترده در نمک‌زدایی آب با استفاده از نور خورشید، الکترودهای نورگرمایی خورشیدی، کاربردهای زیست‌پزشکی، هیدروژل‌های هوشمند و محرک‌های نوری استفاده شوند [۶]. در این مقاله، مطالعات انجام‌شده در زمینه سنتز کامپوزیت‌های مکسین-پلیمر و استفاده از آن‌ها در نمک‌زدایی آب با استفاده از انرژی خورشیدی، به‌منظور بهبود بازده این فرایندها مرور می‌شود. گفتنی است، مطالعات محدودی در این زمینه انجام گرفته که محدود به سال‌های اخیر است و قابلیت بالقوه بسیار زیادی برای پژوهش‌های بیشتر در این باره وجود دارد.

ویژگی‌های منحصربه‌فرد مکسین‌ها در طراحی غشاهای جاذب نور خورشید

در سال‌های اخیر، با کشف خواص فیزیکی منحصربه‌فرد گرافن تک‌لایه، مواد دویعدی (2D) به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاقه به پژوهش در این زمینه به پیشرفت پژوهش‌ها هم



شکل ۲- عناصر تشکیل دهنده فازهای MAX: (■) اتم های M، (●) اتم های A و (■) اتم های X [۲].

در سنتز مکسین ها استفاده شده است. C, N, X

گروه های انتهایی سطحی M تنها در مکسین های نظری

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H	He																
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

$M_2X_{T_x}$ $M_3X_2T_x$ $M_4X_3T_x$

شکل ۱- عناصر استفاده شده در ساخت مکسین ها و جایگاه آن ها در جدول تناوبی عناصر. عناصر به رنگ آبی روشن نشانگر مکسین هایی هستند که هنوز به طور تجربی ساخته نشده اند. نمایی از سه نوع ساختار معمول مکسین ها در پایین جدول نشان داده شده است [۱].

است. این فازها دارای خواص سرامیک ها از جمله چگالی کم، سختی زیاد و مقاومت در برابر خوردگی عالی هستند، درحالی که رسانندگی گرمایی و الکتریکی زیاد آن ها مشابه مواد فلزی است. این ویژگی های منحصر به فرد ناشی از پیوندهای بین اتم های موجود در فاز MAX است. درحالی که پیوندهای M-X ترکیبی از برهم کنش های یونی، فلزی و کووالانسی بوده و پیوندهای M-A کاملاً فلزی هستند. بنابراین، برخلاف سایر مواد لایه ای سه بعدی مانند گرافیت و دی کالکونیدهای فلزات واسطه، که از طریق برهم کنش های ضعیف و اندروالس به هم متصل می شوند، فازهای MAX دارای پیوندهای قوی هستند که از گسست آن ها از طریق برش یا سایر روش های مکانیکی جلوگیری می کنند.

با این حال پیوندهای M-A، در مقایسه با پیوندهای M-X ضعیف تر هستند و می توانند شکسته شوند. بنابراین، از طریق حذف لایه های با پیوند ضعیف اتم های A، کاربید، نیتريد یا هر دو سنتز می شوند که گام مهمی برای سنتز مکسین ها است. درواقع، به دلیل حذف لایه اتم A از فازهای MAX، این خانواده از کاربیدها و نیتريد های فلزی دو بعدی سنتز شده MXene نام گرفته اند. تولید مکسین با زدایش فاز MAX، عمدتاً با استفاده از محلول های زداینده قوی حاوی یون فلوئورید (F^-) مانند هیدروفلوئوریک اسید (HF)، بی فلوئورید آمونیوم (NH_4HF_2) و مخلوطی از کلریدریک اسید و لیتیم فلوئورید (LiF) انجام می شود. برای مثال، زدایش Ti_3AlC_2 در HF آبی در دمای محیط باعث می شود، اتم های A (یعنی Al) به طور انتخابی حذف شوند و سطح لایه های کاربید دارای اتم های انتهایی OH، O و/یا F شود. مکسین را می توان در نمک های مذاب اسید لوویس مانند $ZnCl_2$ تهیه کرد. در این صورت سطح شامل

زمینه مواد دو بعدی شناخته شده، مانند دی-کالکونیدهای فلزی و بورنیتريد ها و هم در زمینه کشف بسیاری از مواد دو بعدی جدید منجر شده است. کاربیدها و نیتريد های فلزات واسطه معروف به مکسین ها، به عنوان خانواده ای از مواد دو بعدی به سرعت در حال رشد هستند. در یک ورقه دو بعدی از مکسین، $n+1$ لایه ($n=1-3$) از فلزات واسطه اولیه (M) عناصر آبی رنگ شکل ۱ شامل V، Ti، Ta، Hf، Mo، Nb، Zr، Y، Cr و W) با n لایه از کربن یا نیتروژن (X) عناصر خاکستری رنگ شکل ۱)، با فرمول کلی $M_{n+1}X_nT_x$ ترکیب شده اند. در این فرمول T_x نشانگر گروه های انتهایی سطح مانند (عناصر نارنجی رنگ شکل ۱ شامل F، OH، O و/یا Cl) است که به لایه های M بیرونی متصل می شوند.

مکسین ها به طور معمول از لایه لایه شدن شیمیایی ترکیبات سه بعدی (یا چهارتایی) معروف به فازهای MAX یا فاز مادر مکسین ها به دست می آیند. فاز MAX، پیش ساز مکسین ها است که از نظر استوکیومتری به صورت $M_{n+1}AX_n$ (که در آن $n=1-3$) تعریف شده است. همان طور که در شکل ۲ دیده می شود، یک فلز واسطه بلوک d است، A نشانگر عناصر گروه ۱۳ و ۱۴، برای مثال Si، Al، Ge یا Sn و X کربن، نیتروژن یا هر دو است. این فازها ساختار شش ضلعی دارند که در آن لایه های M و A در هم درج شده اند. اتم های X در مکان های هشت وجهی تشکیل شده با عناصر M قرار می گیرند. تا پیش از سال ۲۰۲۰ بیش از ۷۰ فاز MAX (مانند Ti_3AlC_2 و Ti_2AlC) کشف شده و فازهای جدید دائماً در حال کشف شدن هستند [۷].

خواص متمایز فازهای MAX، که از ترکیب غیر معمول رفتارهای سرامیکی و فلزی ناشی شده، توجه زیادی را جلب کرده

گروه های انتهایی Cl خواهد بود. مکسین حاوی گروه های انتهایی کلر از نظر ساختاری تا 750°C پایدار است [۱].

اولین مکسین ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_3$) در سال ۲۰۱۱ و در دانشگاه Drexel کشف شد [۱]. در آن زمان پیش بینی نمی شد که چنین ترکیبات دوبعدی پایدار باشند. نمای اتمی سه نوع مکسین در پایین شکل ۱ نشان داده شده است. تنوع ترکیبات و ساختارهای مکسین ها به تشکیل یک خانواده بزرگ از مواد دوبعدی منجر شده که به سرعت در حال گسترش اند.

سطح لایه بیرونی بزرگ تر، پایداری و رسانندگی استثنایی گرما، تخلخل زیاد و سازگاری با محیط زیست همگی از ویژگی های مکسین ها و کامپوزیت های آن ها هستند. از لحاظ نظری پیش بینی شده است، بازده تبدیل نور به گرما در این ترکیبات تقریباً ۱۰۰٪ است [۸]. با توجه به ویژگی های ساختاری برجسته و سطح ویژه بسیار زیاد، این ترکیبات به طور گسترده به عنوان جاذب یا مواد غشایی برای نمک زدایی آب دریا استفاده می شوند [۹].

باوجود این ویژگی ها، پایداری کم غشاهای مکسین، به ویژه در برابر مواد اکسنده، تا حد زیادی مانع از کاربرد عملی آن ها در نمک زدایی نور گرمایی کارآمد می شود. این مسائل عمدتاً ناشی از تلفات بازتاب زیاد غشاهای دوبعدی و آب دوستی آن ها بوده که مستعد رسوب نمک هستند. تجمع مداوم نمک باعث کاهش بیشتر جذب نور یا مسدود شدن کانال های خروج بخار می شود. برای حل کردن این مشکلات، تلاش هایی برای به حداکثر رساندن استفاده از نور خورشید با ساخت مکسین با پیکربندی های مختلف یا افزایش پایداری با اصلاح مقاومت در برابر نمک با استفاده از معرف های آب گریز، انجام شده است. مکسین دارای شیمی سطح غنی است و به راحتی می توان با اصلاح سطح آن را عامل دار کرد. گروه های عاملی مختلف می توانند به طور درخور توجهی ویژگی های فیزیکی آن از جمله خواص نور گرمایی را تنظیم کنند.

عوامل مؤثر برای دستیابی به نمک زدایی خورشیدی پربازده

برای دستیابی به پربازدهی در فرایند نمک زدایی خورشیدی، ضروری است ماده نور گرمای استفاده شده افزون بر پایداری زیاد، قابلیت نمک زدایی در سراسر طیف انرژی خورشیدی را داشته باشد. افزون بر این، ساختار جاذب ها و مقاومت به نمک دو پارامتر حیاتی برای انتقال آب و پایداری نمک زدایی هستند. بدین منظور، افزون بر قابلیت تبدیل نور به گرما، باید به چند نکته کلیدی در طول فرایند نمک زدایی دست یافت [۱۰]. این ویژگی ها مسیر بالقوه ای برای تحقق فرایند تصفیه آب با استفاده از نور خورشید ایجاد

می کند. ویژگی های اساسی که اثر زیادی بر کارایی نمک زدایی خورشیدی دارند عبارتند از:

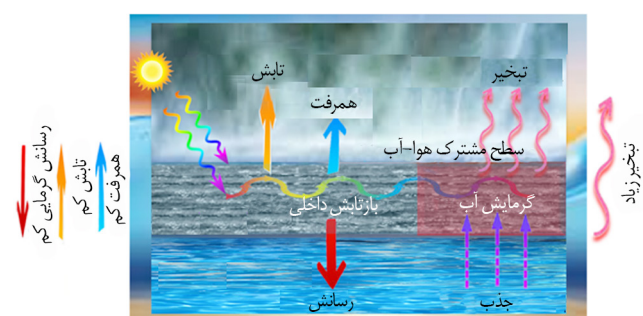
۱- رسانندگی گرمایی کم برای متمرکز کردن گرما در سطح مشترک آب و هوا: مواد نور گرمایی باید بتوانند بر سه نوع تلفات گرمایی، شامل تابش، همرفت و رسانش غلبه کنند. به طور ویژه، متمرکز کردن گرما پارامتر اساسی برای پیشبرد کارایی تبدیل انرژی خورشید به بخار در طول فرایند نمک زدایی است. بدین منظور، لازم است تا ماده ای با رسانندگی گرمایی کم توسعه یابد تا گرما را در فصل مشترک آب و هوا در طول فرایند نمک زدایی متمرکز کند.

شکل ۳، نمایی از اثر این عوامل گرمایی را نشان می دهد.

۲- کاهش بازتاب و انتقال نور و قابلیت جذب پهنه گسترده ای از طیف نور خورشید: کاهش انعکاس نور و جذب بهبود یافته باعث می شود، ظرفیت تولید گرما از نور به کمک مواد نور گرمایی افزایش یابد. بدین منظور، به طرح های شکل شناسی و ریزساختاری مختلف نیاز است تا در نهایت ظرفیت جذب نور را تحت کاهش بازتاب بهبود بخشد. از سوی دیگر، باید انتقال گرما به سمت توده آب مهار شود. بنابراین، توسعه جاذب های خورشیدی با ساختار متخلخل برای کاهش بازتاب نور بسیار مفید است.

۳- رزونانس پلاسمون سطح موضعی (LSPR): مکسین فلزی دوبعدی ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) با جذب نور فرودی از ناحیه مرئی تا ناحیه زیرقرمز نزدیک دارای ویژگی LSPR است. در نتیجه، LSPR به طور درخور توجهی بر بازده تبدیل نور به گرما اثر می گذارد که برای فرایند نمک زدایی خورشیدی ایده آل است. به طور معمول، مواد پلاسمونی، نور خورشید را تا حد زیادی در حدود ۹۵٪ جذب کرده و آب را تا بیش از دمای جوش آن گرم می کنند.

۴- بازتابش نور داخلی چندگانه: برای اثرگذاری تبخیرکننده خورشیدی، ساختار مواد نور گرمایی باید به گونه ای باشد که امکان



نمک زدایی با استفاده از نور خورشید

شکل ۳- نمایی از اثر عوامل گرمایی مختلف بر بازده نمک زدایی خورشیدی [۱۰].

بازتاب‌های نوری متعدد در ریزساختار داخلی آن‌ها وجود داشته باشد. در این ساختارها، نور به‌طور مؤثر به‌وسیله محیط متراکم ریزساختار به دام می‌افتد که در نهایت بازتاب‌های داخلی متعددی را از طریق بازجذب ایجاد می‌کند. نور بازتابش داخلی در نهایت از طریق جاذب منتقل می‌شود.

۵- خصلت آب‌دوستی: جاذب خورشیدی توسعه‌یافته باید خاصیت ترشوندگی زیادی داشته باشد تا جاذب آب پایدار فراهم شود و کانال‌ها آب را از پایین به سمت سطح (بالای جاذب) در مدت کوتاهی انتقال دهند. افزون‌براین، ماهیت آب‌دوستی باعث افزایش انتقال گرما در سطح تبخیر می‌شود که تولید بخار را تقویت می‌کند. لایه مرطوب آب‌دوست در مقایسه با لایه‌های خشک، جاذب نور بیشتری را فراهم می‌کند.

۶- کاهش انسداد یا مقاومت به نمک: جاذب خورشیدی، بخار را در سطح مشترک آب تولید می‌کند. از سوی دیگر، یون‌های نمک از سطح جاذب به سمت توده آب مهاجرت می‌کنند. مسدود شدن یا گرفتگی نمک روی سطح جاذب خورشیدی به تدریج بازتابش نور فرودی را افزایش و کانال‌های تأمین آب را کاهش می‌دهد. همچنین، باید تماس سطحی طولانی مدت آب دریا با جاذب خورشیدی در طول فرایند نمک‌زدایی برقرار باشد که خاصیت مقاومت به نمک را تعریف می‌کند. توسعه مواد با ساختار لایه‌ای می‌تواند نمک انباشته‌شده در جاذب خورشیدی را حل کرده و آن را به سمت توده آب پخش کند.

افزون‌بر موارد یادشده، یک جاذب نورگرمایی ایده‌آل برای فرایند نمک‌زدایی خورشیدی باید قابلیت شناورماندن روی سطح آب را نیز داشته باشد. با این حال، اکثر مواد آب‌دوست نمی‌توانند روی سطح آب شناور شوند و به لایه‌های کمکی اضافی برای کاهش رسانش رو به پایین گرما به آب زیرین و رسیدن به شناوری نیاز دارند. این موضوع موجب طراحی ساختار و فرایند ساخت پیچیده می‌شود. اصلاح آب‌گریزی به‌عنوان روش جایگزین می‌تواند مواد نورگرمایی را شناور سازد. با این حال، ساختار آب‌گریز کامل اغلب به سرعت تبخیر آب کندتری در مقایسه با نمونه‌های آب‌دوست منجر می‌شود. این کاهش به دلیل این واقعیت است که بیشتر آب در چنین ساختاری مسدود می‌شود.

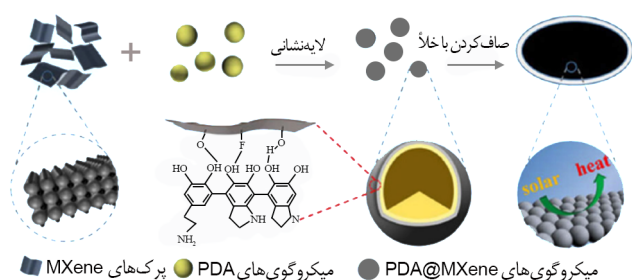
طراحی کامپوزیت‌های مکسین-پلیمر برای فرایندهای نمک‌زدایی خورشیدی کارا

در حال حاضر، غشاهای کامپوزیت پلیمری به‌طور گسترده برای نمک‌زدایی آب دریا استفاده می‌شوند که به دلیل ویژگی‌های

انعطاف‌پذیری، فرایند ساخت ساده و صرفه اقتصادی آن‌هاست. با این حال، مقاومت ضعیف در برابر حلال، خاصیت ضد رسوب کم و طول عمر کوتاه غشای پلیمری معمولاً به نمک‌زدایی و پایداری کم منجر می‌شود. برعکس، غشاهای سرامیکی معدنی دارای مزایایی از جمله پایداری شیمیایی برجسته، استحکام زیاد و طول عمر طولانی بوده، اما با معایب فرایند سنتز پیچیده، هزینه زیاد و شکنندگی مواجه هستند. از این رو، طراحی غشایی که به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های ظریف غشاهای پلیمری و سرامیکی را برای نمک‌زدایی مؤثر یکپارچه کند، بسیار ضروری است.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، مکسین‌های بکر دارای محدودیت‌هایی مانند انعطاف‌پذیری کم، تمایل به محرک‌های خاص و پایداری ضعیف در محیط دارای اکسیژن هستند که طول عمر آن‌ها را کاهش می‌دهد و توسعه تجاری فناوری‌های اصلاحی مبتنی بر مکسین بکر را محدود می‌کند. محدودیت‌های مرتبط با مکسین بکر از طریق درگیرکردن لایه‌های آن، مهندسی سطح یا طراحی کامپوزیت‌های آن با مواد خارجی مختلف برطرف شده است. هر راهبرد اصلاحی می‌تواند چالش‌های مرتبط خاصی را برطرف کند. به‌عنوان مثال، مسائل مربوط به اکسایش را می‌توان از طریق گروه‌های عاملی سطحی برطرف کرد. معماری هیبریدها-نانوکامپوزیت‌ها نشان داده است که تمام این محدودیت‌ها قابل برطرف شدن هستند. زیرا گنجاندن مواد ثانویه مانند درشت‌مولکول‌ها از جمع شدن مجدد لایه‌های مکسین جلوگیری می‌کند و انعطاف مکانیکی را در حالی افزایش می‌دهد که استحکام مکانیکی درخور توجهی را حفظ می‌کند. افزون‌براین، برهم‌کنش‌های چندگانه پیش‌سازهای کامپوزیت‌ها می‌تواند از تخریب مکسین در محیط دارای اکسیژن جلوگیری کرده و شکاف‌های باند الکتریکی و نوری را تنظیم کنند. همچنین، ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی مدنظر را نیز بهینه و تنظیم کنند. پیش‌بینی می‌شود، ترکیب شیمیایی میزبان-میهمان در میان مکسین و سایر پیش‌سازها در هیبریدها و نانوکامپوزیت‌ها به‌طور متقابل معایب آن‌ها را برطرف سازد و مزیت‌های منحصر به فردی را به دلیل آثار هم‌افزایی و شکل‌گیری ناهمواری‌های سطحی معرفی می‌کند که به راهبردهای اصلاح محیط کارا منجر می‌شود.

افزون‌براین، نظریه تابع چگالی (density functional theory, DFT) و مطالعات برپایه دینامیک مولکولی نشان داده‌اند، مکسین‌ها به دلیل گروه‌های عاملی سطحی فراوان مستعد پیوند با پلیمرها برای تشکیل هیبریدها و نانوکامپوزیت‌ها هستند. گروه‌های عاملی سطحی باعث برهم‌کنش‌های چندگانه از جمله پیوند کووالانسی، هیدروژنی و الکتروستاتیکی در میان پلیمر و مکسین شده که به



شکل ۴- نمایی از تشکیل لایه نور گرمایی PDA@MXene [۱۲].

(PDA@MXene) را تشکیل داد (شکل ۴).

میکروکره‌های PDA@MXene تهیه‌شده از طریق صاف کردن در خلأ روی غشای صافی پلی(وینیلیدن فلوئورید) آب‌دوست (PVDF) صاف شدند تا لایه نور گرمایی با انعطاف‌پذیری زیاد تشکیل شود.

این پژوهشگران نشان دادند، لایه PDA روی غشای PVDF، جذب نور ناچیزی را در مناطق زیرقرمز نزدیک (۸۰۰ nm تا ۱۵۰۰ nm) نشان می‌دهد، درحالی‌که غشای نور گرمایی PDA@MXene دارای بازده جذب نور تا حدود ۹۶٪ برای محدوده طیف ۲۵۰ nm تا ۱۵۰۰ nm است. جذب نور عالی غشای نور گرمایی PDA@MXene به دلیل سطح ناهموار ناشی از ذرات کروی PDA و همچنین جذب نور ذاتی مکسین در ناحیه زیرقرمز نزدیک است. در نتیجه، با یک تابش خورشید معادل 1 kW.m^{-2} در هوا، دمای سطح غشای PDA@MXene به سرعت به دمای حالت پایدار 80°C رسیده، درحالی‌که لایه PDA روی PVDF به دمای نسبتاً کم 70°C می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد، این ساختار منحصربه‌فرد می‌تواند به بهبود عملکرد تبدیل نور گرمایی غشای PDA@MXene منجر شود.

ساختار پوشش‌یافته منحصربه‌فرد، کانال‌های حمل و نقل آب زیادی را به وسیله شکاف‌های بین میکروکره‌ها فراهم می‌کند. غشای متخلخل PVDF، انتقال آب به سطح گرمایش را امکان‌پذیر کرده و در عین حال، آب‌دوستی ذاتی PDA و مکسین، ترشوندگی خوب غشای نور گرمایی را تضمین می‌کند. لایه نور گرمایی PDA@MXene به دلیل جذب نور زیاد (حدود ۹۶٪)، تبدیل نور گرمایی درخور توجه، متمرکز کردن گرما و انتقال آب کارآمد در هنگام شناوری روی سطح آب با کمک یک تکه چوب (شکل ۵)، عملکرد شایان ملاحظه‌ای در تولید بخار از انرژی خورشیدی را نشان می‌دهد (بازده ۸۵/۲٪ تحت یک تابش خورشید). افزون‌براین، لایه نور گرمایی PDA@MXene از نظر مکانیکی پایدار است و می‌تواند جذب نور و عملکرد تبخیر آب را در چرخه‌های روشنایی متعدد حفظ کند.

تشکیل هیبریدهای پایدار منجر می‌شود. این برهم‌کنش‌ها صرفاً به ماهیت درشت‌مولکول‌ها و عوامل سطحی مکسین بستگی دارند. گروه الکترون‌دهنده در درشت‌مولکول‌ها جایگزین گروه T از مکسین می‌شود و در نتیجه نوعی سامانه ترکیبی-کامپوزیتی تشکیل می‌دهد [۱۱].

به دلیل فراوانی پلیمرها و امکان استوکیومتری متفاوت مکسین‌ها، قابلیت بالقوه عظیمی در غشاهای مکسین-پلیمر برای برآورد نیازهای صنعتی در فناوری‌های اصلاح محیطی وجود دارد. در زیر، کاربرد چند پلیمر مختلف در تهیه کامپوزیت‌های مکسین-پلیمر به کاررفته در نمک‌زدایی با استفاده از نور خورشید آورده شده است.

استفاده از مکسین برای افزایش پهنای باند طیف جذب نور غشاهای پلی‌دوپامین

پلی‌دوپامین (PDA) به عنوان زیست‌پلیمری شبیه ملانین به دلیل جذب طیف گسترده‌ای از نور، بازده تبدیل نور گرمایی زیاد و زیست‌سازگاری خوب، قابلیت بالقوه زیادی در نمک‌زدایی آب دریا با استفاده از نور خورشید را دارد. با این حال، PDA در ناحیه زیرقرمز نزدیک (بیش از ۸۰۰ nm)، جذب تابش خورشیدی ضعیفی دارد (فقط ۶۰٪) که به شدت استفاده از نور را در کل طیف تابش خورشیدی کاهش می‌دهد. بنابراین با توجه به کاربردهای تبخیر سطحی با استفاده از نور خورشید، افزایش قابلیت جذب تابش PDA در محدوده طول موج وسیع‌تر، ضروری است.

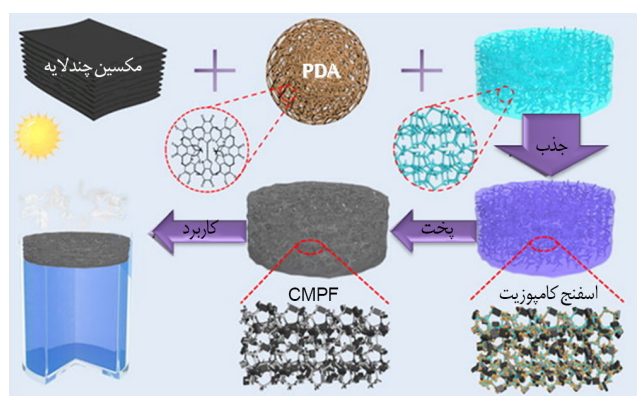
از طرفی، غشاهای آماده‌شده با مکسین با داشتن سطح صاف به دلیل انعکاس نور قوی، جذب نور ضعیفی دارند و در عین حال، حالت متراکم این غشاها به شدت جریان آب و خروج بخار را مسدود می‌کند. بنابراین، دستیابی به سطح ناهموار و ساختارهای متخلخل برای دستیابی به جذب طیف وسیع نور خورشید و تولید بخار کارآمد در سامانه مبتنی بر غشا کاملاً ضروری است.

Zhao و همکاران [۱۲] از میکروکره‌های PDA به عنوان الگو استفاده کردند و با نشان دادن نانوصفحات مکسین بر آن‌ها، کامپوزیت نور گرمایی PDA@MXene هسته-پوسته را طراحی کردند. به دلیل آب‌دوستی و دافعه الکتروستاتیکی، محلول کلونیدی مکسین و تعلیق PDA هر دو در آب بسیار پایدارند. همچنین، به دلیل وجود گروه‌های عاملی انتهایی فراوان در مکسین و گروه‌های هیدروکسیل در سطح PDA، پیوندهای هیدروژنی فراوانی بین نانوصفحات مکسین و میکروکره‌های PDA تشکیل می‌شود. در نتیجه، نانوصفحات مکسین را می‌توان به راحتی به سطح میکروکره‌های PDA متصل کرد و میکروکره‌های PDA پوشیده‌شده با مکسین

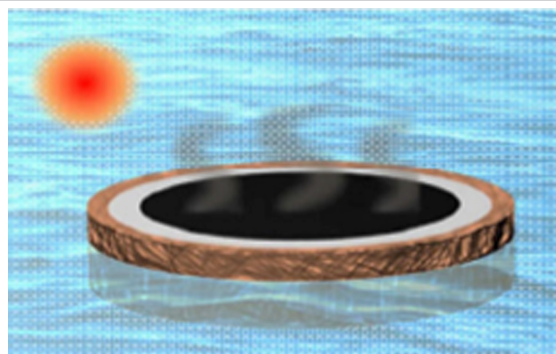
دست یافت (شکل ۶ب).

مولد بخار خورشیدی هیدروژل هسته-پوسته این پژوهشگران از خواص مکانیکی عالی برخوردار است. استحکام فشاری آن می تواند تحت کرنش فشاری ۷۰٪ به ۰/۴ MPa برسد و سرعت تبخیر $3/02 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ با بازده انرژی ۹۴/۷٪ تحت یک تابش خورشید به دست می دهد. این مولد بخار می تواند با انواع شرایط سخت، مانند اسید قوی و محلول قلیایی غلیظ سازگار شود و همچنان سرعت تبخیر پایدار را حفظ کند. همچنین می تواند سرعت تبخیر پایدار و بسیار کارآمدی را در محلول شبیه سازی شده آب دریا برای ۷ روز تبخیر مداوم حفظ کند که نشانگر کاربرد طولانی مدت آن است. مولد بخار خورشیدی طراحی شده به دلیل وجود گروه های آمینی و حلقه های آروماتیک در PDA، عملکردهای مختلفی مانند نمک زدایی آب دریا و مقاومت در برابر نمک، رنگ و یون فلزات سنگین را نشان داده است.

در جدیدترین مطالعه ای که در این زمینه انجام شده، Jin و همکاران [۱۴]، مکسین و PDA را با نسبت جرمی بهینه شده در اسفنج ملامین عایق گرمایی و ارزان قیمت بارگذاری کرده و به دنبال آن با عملیات تنش زدایی ساده برای تهیه مولد بخار سه بعدی و خودشناور اسفنج مکسین-PDA کربنی شده (CMPF) استفاده کردند (شکل ۷). اسفنج های تهیه شده خواصی مانند آب دوستی زیاد، رسانندگی گرمایی ناچیز و جذب نور درخورد توجه دارند که استفاده از آن ها را به عنوان مولد بخار خورشیدی مطلوب می سازد. در نتیجه این ویژگی ها، سرعت تبخیر CMPF می تواند به $1/598 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ تحت یک تابش خورشید برسد. در حالی که بازده تبدیل نور گرمایی این اسفنج ۸۹/۸٪ محاسبه شده است. همچنین نشان داده شد، این اسفنج مقاومت خوبی در برابر باکتری ها دارد و می تواند کاربردهای



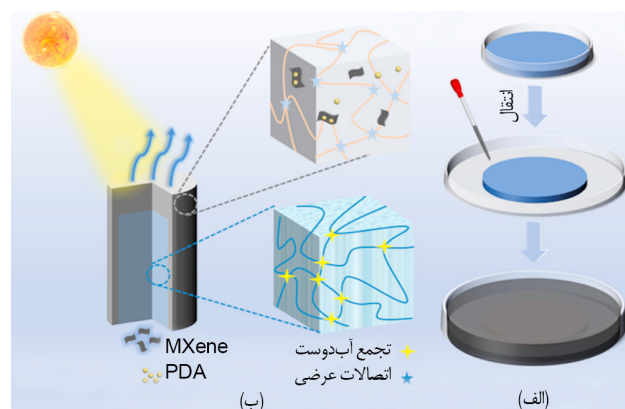
شکل ۷- مراحل تهیه اسفنج خودشناور CMPF [۱۴].



شکل ۵- نمایی از ساختار نهایی غشای PDA@MXene و تولید بخار به وسیله آن [۱۲].

در سال ۲۰۲۱، Pi و همکاران [۱۳] نوعی مولد بخار خورشیدی هیدروژل مکسین-PDA با ساختار هسته-پوسته طراحی کردند. مراحل تهیه این هیدروژل در شکل ۶الف نشان داده شده که شامل دو مرحله قالب گیری مجزاست. ابتدا هیدروژل پلی (آکریل آمید) (HAPAM) تهیه و به عنوان هسته به کار گرفته شد. سپس HAPAM به قالب بزرگ تر دیگری منتقل شده و محلول پلی (وینیل الکل) (PVA) حاوی PDA و مکسین در این قالب بزرگ تر ریخته شد. در نهایت، هیدروژل هسته-پوسته به نام هیدروژل PHMP پس از سه بار چرخه یخ زدن-یخ زدایی به دست آمد.

بخش هیدروژل هسته خاصیت تورم عالی دارد و می تواند توده آب را به سرعت و در مقادیر زیاد جذب و سپس آب را از طریق ساختار متخلخل داخلی آن به لایه پوسته منتقل کند. افزون بر این، لایه پوسته ماده نور گرمای مکسین-PDA می تواند انرژی نور را به طور مؤثر به انرژی گرمایی تبدیل کند. بنابراین، می توان با مولد بخار خورشیدی بر پایه این هیدروژل هسته-پوسته به تبخیر سریع



شکل ۶- نمایی از: (الف) مراحل تهیه و (ب) سازوکار تولید بخار خورشیدی با هیدروژل هسته-پوسته PHMP [۱۳].

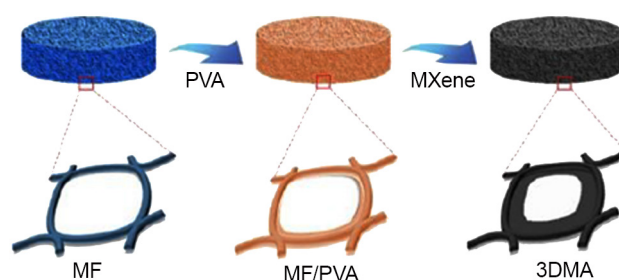
ساخت مواد نورگرمایی برپایه مکسین سه‌بعدی چندمنظوره برای تولید بخار خورشیدی کارآمد فراهم آورده است.

اسفنج ملامین بکر جذب نور ناچیز (کمتر از ۴۰٪) در نواحی فرابنفش، مرئی و زیرقرمز نزدیک (۳۰۰ nm تا ۱۵۰۰ nm) دارد. در مقابل، 3DMA قابلیت درخور توجهی برای جذب نور در محدوده ۳۰۰ nm تا ۱۵۰۰ nm نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد، 3DMA می‌تواند تقریباً تمام نور خورشید را در محدوده ۳۵۰ nm تا ۱۵۰۰ nm (حدود ۹۵٪) جذب کند که از MF بکر و فیلم دوبعدی مکسین خالص بیشتر است (شکل ۹الف). همچنین همان‌طور که در شکل ۸الف مشخص است، 3DMA مرطوب دارای عملکرد جذب خورشیدی برتر است (حدود ۹۸٪). این برتری به دلیل اثر تاریکی مشاهده‌شده در حالت مرطوب است که به کاهش درخور توجه پراکندگی نور سطحی از سطح مشترک مایع به ماده (یعنی مرطوب) در مقایسه با رابط هوا به ماده (یعنی خشک) منجر می‌شود. قابلیت زیاد جذب نور خورشید 3DMA به دلیل جذب نور ذاتی فوق‌العاده مکسین است. افزون‌براین، ساختار شبکه سه‌بعدی منحصربه‌فرد MF جذب نور را با طولانی‌کردن مسیر نور برای پراکندگی چندگانه افزایش می‌دهد.

مقایسه دقیق نشان می‌دهد، با 3DMA می‌توان به دمای تعادل حدود ۸۰ °C دست یافت. درحالی‌که دمای MF بکر در حالت تعادل تنها ۳۸ °C است. با تابش نور، دمای 3DMA به‌طور درخور توجه و سریع افزایش می‌یابد و در عرض ۱ min تا ۳ min به بیشترین دما می‌رسد.

همان‌طور که در شکل ۹ب نشان داده شده است، به دلیل آب‌دوستی ذاتی مکسین و ساختار متخلخل MF، آب بلافاصله به سطح 3DMA می‌رسد و پس از تماس 3DMA با آب به‌سرعت پخش می‌شود. این پدیده تأمین آب کافی برای سطح تبخیر در تولید بخار خورشیدی کارآمد را تضمین می‌کند. شایان ذکر است، MF خالص در آب غوطه‌ور می‌شود، اما پس از پوشش‌دهی غرقه‌ای PVA و بررسی غلظت‌های مختلف مکسین، این پژوهشگران نشان دادند، زمانی که غلظت مکسین به ۱ mg/mL برسد، 3DMA می‌تواند روی سطح آب شناور شود. دلیل شناور شدن 3DMA روی آب ممکن است به دلیل برخی شکاف‌ها در ساختار شبکه سه‌بعدی باشد که به‌طور کامل با آب پر نشده است و در نتیجه به عملکرد خودشناوری منجر می‌شود.

Yu و Wu [۱۶] با الهام از انتقال آب از طریق میکروکانال‌های داخلی درختان، نوعی هیدروژل نورگرمایی بسیار کارآمد برپایه PVA و الهام‌گرفته از درخت (tree-inspired hydrogel, TIH) با



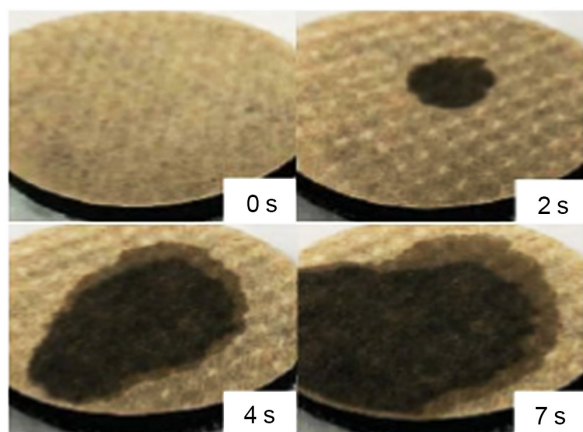
شکل ۸- نمایش سنتز ساختار 3DMA [۱۵].

عملی خاصی در نمک‌زدایی آب دریا داشته باشد.

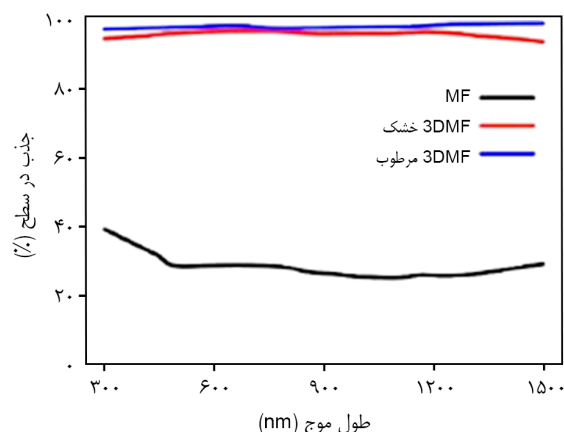
استفاده از پلی (وینیل الکل) برای استحکام بخشی ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی مکسین

در سال ۲۰۱۹، Zhao و همکاران [۱۵] اولین نمونه از مولدهای بخار خورشیدی برپایه ساختارهای سه‌بعدی مکسین (3DMAs) را از طریق فرایند پوشش‌دهی دومرحله‌ای آسان بدون هیچ‌گونه عملیات پخت یا کربنی‌شدن در دمای زیاد گزارش کردند. این ساختارهای سه‌بعدی با سوارکردن نانوصفات مکسین روی اسکلت اسفنج ملامین (MF) از طریق نیروی چسبندگی PVA به‌دست آمده‌اند (شکل ۸). در نبود PVA، ساختار کامپوزیتی سه‌بعدی به‌طور مستقیم به‌وسیله نانوصفات مکسین و اسفنج ملامین تشکیل شده که به دلیل برهم‌کنش ضعیف بین مکسین و اسکلت، مقاومت ضعیفی در برابر آب نشان داده است. در مقابل با کمک PVA ساختار DMAs مقاومت بهتری در برابر آب نشان داده که با عدم مشاهده جداشدن مکسین از اسکلت پس از ۵ min فراصوت‌دهی مشخص شده است.

اسفنج ملامین متخلخل نه تنها کانال‌هایی را برای انتقال آب فراهم می‌کند، بلکه به دلیل سطح بزرگی که دارد، قابلیت جذب نور را نیز افزایش می‌دهد. با توجه به ویژگی آب‌دوستی مکسین، خیس شدن کافی اسکلت داخلی امکان‌پذیر می‌شود. درحالی‌که به دلیل امکان‌ناپذیری پرشدن منافذ کوچک درون 3DMA با آب، کل آن می‌تواند خودشناور باشد. تبدیل شکل‌شناختی دوبعدی به سه‌بعدی مکسین به‌طور چشمگیری قابلیت جذب نور آن را در مناطق فرابنفش، مرئی و زیرقرمز نزدیک افزایش می‌دهد. 3DMA تهیه‌شده با لایه عایق گرمایی، بازده بخار خورشیدی زیادی را تا ۸۸٪ تحت یک تابش خورشید و ۹۴٪ تحت ۵ تابش خورشید نشان داده است. این نتایج با سایر سامانه‌های مولد بخار خورشیدی دارای قابلیت بالقوه برای کاربردهای نمک‌زدایی و تصفیه فاضلاب خورشیدی قابل مقایسه است. این مطالعه امکان جدیدی را برای



(ب)



(الف)

شکل ۹- (الف) مقایسه جذب نور MF با 3DMA خشک و مرطوب و (ب) سرعت پخش آب بر غشای تهیه شده [۱۵].

تبخیر آب را کاهش دهند.

۳- بازده تبدیل نور گرمایی داخلی عالی (۱۰۰٪) و خاصیت آب دوست مکسین نیز به افزایش سرعت تبخیر و افزایش بازده منجر می شود.

براساس این مزایا، TIH سرعت تبخیر بسیار زیاد ($2/71 \text{ kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$) و کارایی انرژی زیاد (۴۵۶٪ - ۹۰٪) را تحت یک تابش خورشید نشان داده است. با استفاده از TIH به عنوان مولد بخار خورشیدی، دمای توده آب با قرار گرفتن در معرض تابش خورشید به مدت ۶۰ min کمی از $24/1^\circ\text{C}$ به $27/8^\circ\text{C}$ افزایش یافته است. دمای سطح TIH_3 به سرعت از $23/6^\circ\text{C}$ به $34/7^\circ\text{C}$ در ۱۰ min افزایش یافته و در ۱ h به دمای تعادلی $35/9^\circ\text{C}$ رسیده است. TIH قابلیت تولید $7/80 \text{ L/m}^3$ آب شیرین در روز در نور طبیعی خورشید را دارد. پایداری طولانی مدت، روش ساخت آسان و برخورداری از خواص بالقوه برای تولید انبوه امکان کاربرد بسیار خوبی را برای نمک زدایی خورشیدی ابر سریع TIH در زیر نور طبیعی خورشید فراهم کرده است.

استفاده از شبکه پلیمری سلولوز استات به عنوان بستر مکسین

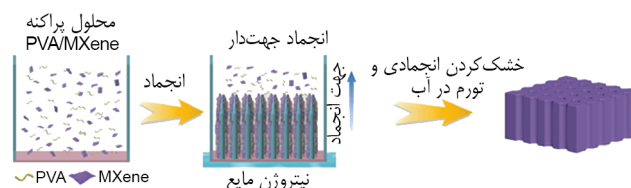
در سال ۲۰۲۰، Fei و همکاران [۱۷] غشای سلولوز استات-مکسین (CAM) را به عنوان مولد بخار خورشیدی بین سطحی با بازده تبدیل زیاد معرفی کردند. غشای CAM به راحتی با پراکندگی تکه های مکسین عامل دار در شبکه پلیمری سلولوز استات ساخته شده است. در شبکه های پلیمری سه بعدی، تکه های مکسین که به طور همگن پراکنده شده اند، در ساختار ادغام شده تا ضمن بهبود استحکام مکانیکی، تبدیل کارآمد نور به گرما امکان پذیر شود.

کانال های تراز عمودی ساختند که در آن از مکسین به عنوان جاذب نور استفاده شده است.

این پژوهشگران از روش انجماد جهت دار برای ساخت میکروکانال ها در TIH استفاده کردند. همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، محلول کاملاً مخلوط که از غلظت معینی از PVA و مکسین تشکیل شده است در قالبی از جنس پلی تترافلوئورواتیلن (تفلون) ریخته می شود. سپس قالب روی یک استوانه مسی غوطه ور در نیتروژن مایع برای ریخته گری انجمادی (freeze casting) قرار داده می شود. با توجه به گرادیان دمای زیاد، بلورهای یخ ناهمسان گرد از پایین به بالا در امتداد گرادیان دما رشد می کنند و ستون های یخی هم تراز عمودی تشکیل می شوند. پس از خشک کردن انجمادی و متورم شدن در آب یون زدوده، TIH با کانال های هم تراز عمودی پیوسته به دست می آید.

ویژگی ها و مزایای غشای هیدروژل نور گرمایی TIH شامل موارد زیر است:

- ۱- انتقال سریع آب و انتشار بخار می تواند به وسیله کانال های باز ایجاد شده به وسیله کانال های هم تراز عمودی در TIH انجام شود.
- ۲- مواد بر پایه هیدروژل می توانند با تنظیم برهم کنش بین مولکول های آب و شبکه های پلیمری آب دوست، نیاز انرژی برای



شکل ۱۰- نمای فرایند تهیه TIH [۱۶].

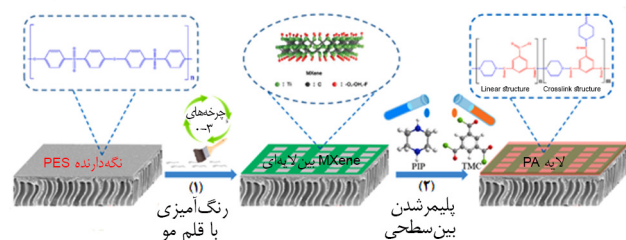
سامانه طراحی شده این گروه پژوهشی، سرعت تولید بخار بی سابقه را $1/47 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ با بازده بسیار زیاد $92/1\%$ تحت یک تابش خورشیدی مداوم، امکان پذیر ساخته است. بنابراین، برای کاربرد در زیر نور طبیعی خورشید مناسب است. افزون بر این، مقرون به صرفه بودن قابلیت ساخت در مقادیر و استحکام زیاد، نوید بزرگی را برای کاربرد عملی این غشا نشان داده است. این ویژگی ها، همراه با سرعت دفع نمک زیاد، غشای CAM را به عنوان نامزدی امیدوارکننده برای نمک زدایی آب دریا ارائه کرده است. گفتنی است، طبق اظهارات این پژوهشگران جاذب نورگرمای تهیه شده، کاربردهایی فراتر از تولید بخار خورشیدی مانند ضد عفونی کردن با استفاده از نور خورشید و کاربرد در واکنش های نور گرمایی را دارد.

ساخت غشاهای نانوصاف کردن پلی آمید با مکسین

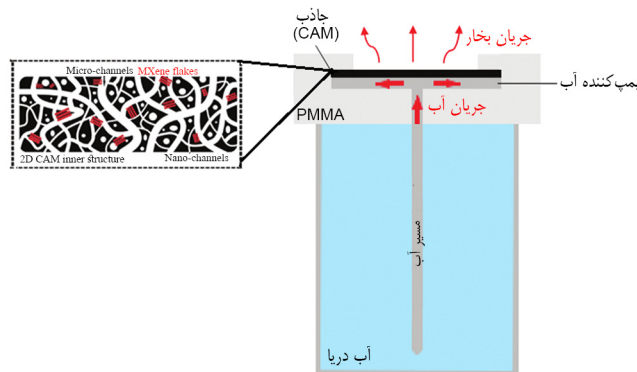
غشاهای نانوصاف کردن (NF) برپایه پلی آمیدها (PA) به طور گسترده در نمک زدایی آب شور و تصفیه پیشرفته آب آشامیدنی استفاده شده اند. ایجاد یک لایه میانی از نانومواد میان بستر و فیلم PA به عنوان یک راهبرد امیدوارکننده برای بهبود عملکرد صاف کردن غشاهای نانوصاف کردن PA سنتی شناخته شده است. در این راستا Cheng و همکاران [۱۸]، ساخت یک فیلم PA بسیار نازک با بافت چروک (crumple-textured) با ضخامت حدود 15 nm روی بستر پلی (اترسولفون) با مکسین رنگ شده را گزارش کردند. غشای نانوصاف کردن تهیه شده توسط این پژوهشگران دارای کارایی زیاد بوده و به طور همزمان نفوذ پذیری آب و رد نمک را افزایش یافته است. شکل شناسی سطح و رفتارهای جداسازی غشای نانوصاف کردن دارای لایه میانی مکسین با کنترل چرخه های رنگ آمیزی نانوصفحات مکسین تنظیم پذیر بوده است. نمای تهیه این غشا در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

غشاهای نانوصاف کردن دارای لایه میانی مکسین گزارش شده، چهار ویژگی مشخص دارند:

۱- لایه میانی مکسین به تشکیل لایه PA ساختاریافته کمک



شکل ۱۲- ساخت غشای نانوصاف کردن پلی آمید با بافت چروک با لایه میانی مکسین روی بستر پلی (اترسولفون) [۱۸].



شکل ۱۱- مولد بخار خورشیدی طراحی شده به همراه نمای درون شبکه پلیمری متخلخل غشای CAM [۱۷].

ساختار متخلخل پلیمر به عنوان عایق گرمایی عمل می کند و گرما را متمرکز نگه می دارد. همچنین با ایجاد اتصالات عرضی در ساختار شبکه ای پلیمر، انتقال مویریگی آب برقرار می شود که تأمین آب به سطح را حفظ می کند. یک عایق پلی (متیل متاکریلات) (PMMA) به عنوان بستری برای غشای طراحی شده در نظر گرفته شده است. در طراحی نهایی غشا، شبکه های مولکولی اتصال عرضی یافته غشای CAM و عایق PMMA مسیریایی را تشکیل داده اند که انتشار یون پویا را تقویت و عملکرد تبخیر پایدار مولد را برای استفاده طولانی مدت فراهم کرده است. منطقه تبخیر یک صفحه PMMA با سوراخ دایره ای در مرکز آن است (شکل ۱۱). این منطقه با یک لایه مسدود کننده نور احاطه شده تا از تابش نور به توده آب جلوگیری کند که ممکن است دمای آن را افزایش دهد. نانوصفحات مکسین به طور کامل در ساختار شبکه ای پلیمر پخش شده و به وسیله آن پوشیده شده اند (ساختار سمت چپ شکل ۱۱). چنین پوشش کاملی به طور درخور توجهی باعث کاهش قرارگیری تکه های مکسین در معرض مولکول های آب و اکسیژن می شود. این کار به طور مؤثر از تخریب مکسین جلوگیری می کند و در نتیجه پایداری آن را به بیش از ۶ ماه افزایش می دهد. آزمون زاویه تماس نشان می دهد، غشای CAM کاملاً آب دوست بوده و با افزایش نسبت مکسین به سلولوز استات، میزان آب دوستی نیز بیشتر شده است.

این پژوهشگران نشان دادند، تحت یک تابش خورشیدی مداوم توده آب کمی گرم می شود. در حالی که دمای سلولوز استات خالص پس از 12 min به تدریج به 38°C افزایش می یابد. غشای CAM، به دلیل قابلیت برتر تبدیل انرژی نور به گرما در عرض 5 min به دمای 43°C رسیده که نشانگر عملکرد سریع فعال سازی غشاست. افزون بر این، دمای غشای CAM در ساعت اول افزایش یافته و در 50°C به اوج رسیده است.

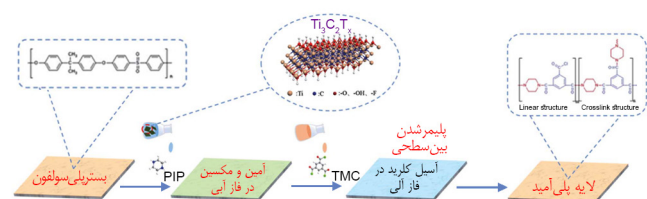
می‌کند که می‌تواند منطقه تصفیه غشاهای کامپوزیت را تا حد زیادی افزایش دهد. در همان فشار، غشاهای NF با لایه میانی مکسین دارای سرعت جریان آبی بسیار بیش از غشای کنترل NF با ویژگی‌های گره‌مانند هستند.

۲- غشای کنترل NF دارای یک لایه PA ضخیم است که ضخامت آن ده برابر غشاهای NF با لایه میانی مکسین است. لایه نازک‌تر فعال PA برای کاهش مقاومت در برابر جریان آب در غشا مفید است و به شار آب بیشتر منجر می‌شود.

۳- وجود لایه مکسین واکنش پلیمرشدن بین‌سطحی را تغییر می‌دهد که به یک سطح حاوی گروه‌های COOH منجر می‌شود. بنابراین، سطح آب‌گریز باعث بهبود برهم‌کنش مولکول‌های سطح با مولکول‌های آب می‌شود و جریان مولکول‌های آب از طریق پیوندهای هیدروژنی افزایش‌یافته را سرعت می‌بخشد.

۴- مکسین دارای بار منفی و آب‌دوست، مولکول‌های آب و پی‌پیرازین (استفاده‌شده در سنتز پلی‌آمید) بسیاری جذب می‌کند و آب‌کافت آسیل کلرید (استفاده‌شده در سنتز پلی‌آمید) را در طول پلیمرشدن بین‌سطحی آسان می‌کند. در نتیجه، نانوکانال‌های بیشتر در نزدیکی منطقه نانوذرات مکسین شکل می‌گیرد که باعث افزایش نفوذ آب می‌شود. بنابراین، تقویت نفوذ آب برای غشاهای NF با لایه میانی مکسین با افزایش سطح تصفیه، کاهش ضخامت PA، افزایش آب‌گریزی و افزایش نانوکانال‌ها برای جریان آب، حاصل شده است. از این رو با کمک مکسین، غشاهای تهیه‌شده عملکرد عالی با نفوذ آب $27/8 \text{ L.m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$ و $99/9\%$ در Na_2SO_4 به‌دست آمده است. مهم‌تر از آن، غشای NF به‌کمک مکسین جداسازی زیادی برای نمک‌های تک‌ظرفیتی-دو ظرفیتی نشان داده و به مقدار $\alpha(\text{NaCl}/\text{Na}_2\text{SO}_4)$ حدود 480 رسیده که از اکثر غشاهای NF تجاری و گزارش‌شده بهتر عمل کرده است.

در کاری مشابه که توسط Wang و همکاران گزارش شده است [۱۹]، غشای نانوصاف کردن PA با نوعی نانوساختار پیشرفته از طریق پلیمرشدن بین‌سطحی (IP) در مجاورت مکسین و روی بستر پلی‌سولفون تهیه شده است (شکل ۱۳). وجود نانوصفات مکسین به میزان درخور توجهی جذب پی‌پیرازین و سرعت واکنش IP را



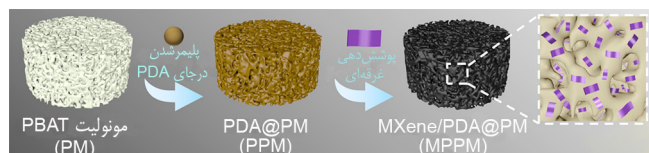
شکل ۱۳- فرایند سنتز غشای صاف کردن-مکسین [۱۹].

افزایش می‌دهد. همچنین، جریان‌های حلال باقی‌مانده از لایه‌های لایه PA تازه تهیه‌شده به بیرون ریخته شده که به تشکیل گره‌های حباب‌مانند روی سطح غشا منجر شده است. این ساختار نانوی ویژه، سطح نفوذپذیری مؤثر لایه PA را افزایش می‌دهد، درحالی‌که واردشدن نانوصفات مکسین تشکیل منافذ غیرگزینشی را کاهش داده است. بنابراین غشای نانوصاف کردن، نفوذپذیری آب بیشتر و گزینش‌پذیری رنگ-نمک تک‌ظرفیتی فوق‌العاده‌ای را نشان داده است. افزون‌براین، واردکردن مکسین ترکیب با مولکول‌های آب را از طریق پیوند هیدروژنی آسان کرده و به آن خاصیت ضد رسوب نیز داده است.

غشای تهیه‌شده با این روش، نفوذپذیری آب را از $28/55 \text{ L.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ به $45/12 \text{ L.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ بهبود می‌دهد. درحالی‌که سرعت بازدارندگی نمک اساساً بدون تغییر باقی مانده است. همچنین، کارایی بسیار عالی در جداسازی رنگ‌ها نیز نشان داده است.

ساخت غشاهای آب‌گریز-آب‌دوست با استفاده از پورفیرین و مکسین

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، سطح مکسین به دلیل وجود گروه‌های عاملی فراوان، به شدت آب‌دوست است. این خصلت آب‌دوستی به رسوب نمک روی سطح مکسین منجر می‌شود. در نهایت، تجمع نمک باعث کاهش جذب نور خورشید و همچنین انسداد کانال‌های انتقال آب به سطح غشا می‌شود. دستیابی به نوعی هم‌افزایی متعادل بین سرعت تبخیر زیاد و مقاومت خوب در برابر نمک، چالش بزرگی است که پژوهشگران در تلاش برای رفع آن هستند. گزارش‌های اندکی مبنی بر استفاده از ترکیبات فلئوئوردار، به منظور آب‌گریز کردن سطح مکسین انجام شده است [۲۰، ۲۱]. در این باره Zhang و همکاران [۲۲] با استفاده از پورفیرین فلئوئوردار شده و مکسین، غشایی با ساختار دوخاصیتی (Janus PMX) برای نمک‌زدایی نورگرمایی پیشرفته گزارش کرده‌اند. پوشش یکنواخت پورفیرین روی مکسین نوعی ساختار دوخاصیتی آب‌گریز-آب‌دوست مطلوب را به‌طور مؤثر برای نمک‌زدایی پایدار آب دریا ایجاد کرده و به‌طور هم‌زمان استفاده کارآمد از انرژی خورشید را امکان‌پذیر ساخته است. افزون‌براین با بهره‌مندی از برهم‌کنش درخور توجه و توزیع مجدد بار میان پورفیرین و مکسین، غشای Janus PMX اثر نورگرمایی افزایش‌یافته را به‌صورت هم‌افزا نشان داده است. دمای سطح غشای Janus PMX با تابش خورشیدی از $25/5^\circ\text{C}$ به $72/1^\circ\text{C}$ در عرض 3 min افزایش یافته که دو برابر افزایش غشای مکسین خالص است. در نتیجه، غشای Janus PMX عملکرد نمک‌زدایی نورگرمایی را به شکل سرعت تبخیر نورگرمایی زیاد



شکل ۱۵- تهیه ژنراتور تولید بخار برپایه پلیمر تخریب پذیر PBAT [۲۳].

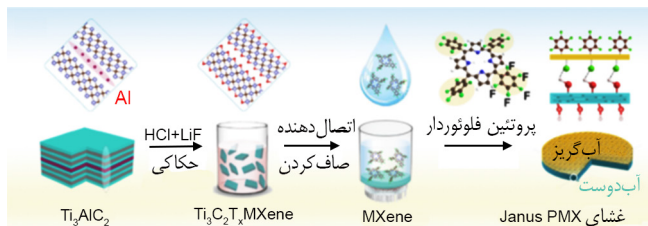
مکسین به چارچوب PM استفاده کرده‌اند. نانوصفحات مکسین و PDA، به‌طور هم‌افزا به غشای PM برای جذب خورشیدی قوی و آب‌دوستی زیاد کمک می‌کنند. مولد بخار تهیه‌شده، سرعت تبخیر فوق‌العاده $1/87 \text{ kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ و بازده بخار خورشیدی زیاد (تا ۸۶/۱۹٪) تحت یک تابش خورشید نشان داده است و می‌تواند بیش از ۹۹٪ نمک و رنگ‌های موجود در آب را ازبین ببرد. در همین حال، مقاومت در برابر نمک، پایداری و دوام آن را تضمین می‌کند.

مقایسه کارایی تولید بخار خورشیدی نانوکامپوزیت‌های مکسین-پلیمر با جاذب‌های دارای ساختار مشابه

همان‌طور که بیان شد، در سال‌های اخیر کاربرد جاذب‌های نورگرمایی دوبعدی در تهیه آب شیرین از آب شور مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این راستا، گزارش‌های متعددی درباره ساخت جاذب برپایه این مواد به‌منظور نمک‌زدایی آب با استفاده از انرژی خورشیدی وجود دارد. در جدول ۱ به‌اختصار برخی از این جاذب‌ها آورده شده و عملکرد آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. مقایسه این اطلاعات با کامپوزیت‌های مکسین-پلیمر نشان می‌دهد، سرعت تبخیر و کارایی انرژی این کامپوزیت‌ها در مقایسه با بسیاری از جاذب‌های نورگرمایی با ساختار مشابه بسیار درخور توجه است. از سویی همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، با استفاده از پلیمرها در ساختار این جاذب‌ها، می‌توان خواص ویژه‌ای از جمله افزایش پهنای باند طیف جذبی نور، استحکام ساختار، بهبود خواص آب‌دوستی، تنظیم شکل‌شناسی ساختار به‌منظور تنظیم سرعت جریان آب، بهبود خواص ضد رسوب و نیز تجزیه‌پذیری غشا را در این جاذب‌ها بهبود بخشید.

نتیجه‌گیری

مکسین‌ها نانوساختارهای دوبعدی جدیدی هستند که در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری در زمینه کاربرد آن‌ها در حوزه‌های



شکل ۱۴- نمایی از تهیه غشای دوخاصیتی PMX [۲۲].

($1/41 \pm 0/04 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$)، بازده تبدیل نورخورشید به بخار درخور توجه (۸۶/۴٪) و پایداری خوب در طول نمک‌زدایی آب دریا ارائه کرده است. نمای ساخت این غشا در شکل ۱۴ نشان داده شده است. از پلی‌(بوتیل متاکریلات) به‌عنوان اتصال‌دهنده پلیمری و از مشتق ۵،۱۰،۱۵،۲۰-تتراکس(پنتافلوئوروفنیل)پورفیرین که به‌دلیل برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ بسیار مزدوج جذب نور بیشتری در ناحیه زیرقرمز نزدیک دارد و سطح آب‌گریز فراهم می‌کند، استفاده شده است. نانوصفحات پورفیرین به‌طور یکنواخت روی غشای مکسین آب‌دوست از طریق برهم‌کنش‌های $\pi-\pi$ پیوندهای هیدروژنی فراوان و برهم‌کنش‌های واندروالس پوشیده می‌شود و سطح آب‌گریز را افزایش می‌دهد. غشای Janus PMX پمپاژ آب بسیار کارآمد، متمرکز کردن بیشتر گرما، تولید بخار و مقاومت نمک عالی را در طول نمک‌زدایی نورگرمایی نشان داده است.

تهیه ژنراتور بخار خورشیدی تجزیه‌پذیر با استفاده از PBAT و مکسین

امروزه به‌دلایل مسائل و مشکلات زیست‌محیطی، استفاده از مواد تجزیه‌پذیر به‌شدت مورد استقبال واقع شده است. در این راستا، Zhang و همکاران [۲۳] نوعی مولد بخار را با استفاده از انرژی خورشید طراحی کردند. در این مولد از پلیمر تجزیه‌پذیر پلی‌(بوتیلن آدیپات-کو-بوتیلن ترفتالات) (PBAT) با شکل‌شناسی متخلخل سلسله‌مراتبی (hierarchical porous morphology, PM) استفاده شده است. غشای سازگار با محیط زیست و زیست‌تخریب‌پذیر تهیه‌شده توسط این پژوهشگران با بهره‌مندی از ساختار متخلخل سلسله‌مراتبی، دارای سطح ویژه بزرگی است و مکان‌های اتصال متعددی را برای مواد جذب‌شونده فراهم می‌کند. افزون‌براین، ساختار مزبور مسیرهای انتقال آب را فراهم کرده و نور می‌تواند چند بار در منافذ بازتابش یابد تا با جلوگیری از از دست دادن بازتابش، جذب نور را بیشتر کند. در ساخت این غشا (شکل ۱۵)، این پژوهشگران با استفاده از چسبندگی الهام‌گرفته از صدف، از پلی‌دوپامین (PDA) برای چسباندن نانوصفحات

جدول ۱- مقایسه عملکرد غشاهای دارای ساختار مشابه، ساخته شده با مواد و روش‌های مختلف تحت یک تابش خورشید.

مرجع	بازده (%)	سرعت تبخیر ($\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	غشای به کاررفته
۲۴	۴۸	۰/۶۹۱	GO
۲۵	۴۵/۱	۰/۹	rGO
۲۵	۸۵/۶	۱/۳۷	کامپوزیت rGO
۲۶	۸۷/۹	۱/۴	GFs-کاغذ صافی
۲۶	۷۴	۱/۳۰	GO/CNT-سیلیکا
۲۶	-	۱/۱۵	CNTs-کاغذ زیراکس
۲۶	۷۲	۱/۳۰	نانوذرات دوده-PMMA/PAN
۲۶	۸۲	۱/۲۰	SWCNTs- نانومیله‌های Au
۲۶	۸۳/۵	۱/۳۳	NiO-هیدروکسی آپاتیت
۲۷	۸۹/۵	۱/۳۶	CNF
۲۴	۲۸	۰/۴۰	$\text{AgNPs}@C_3N_4$
۲۴	۷۷/۳	۱/۱۳	$\text{AgNPs}@C_3N_4/\text{GO}$
۸	۸۴	۱/۳۷۳	Ti_3C_2
۸	۸۷	۱/۴۶	VA-MXA
۹	۹۰/۷	۱/۲۷	$\text{GO}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ (MXene به ۱:۳ GO)
۹	۸۵/۰	۱/۳۳۷	$(\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x ۹۰\%) \text{GO}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

GO گرافن اکسید، rGO گرافن اکسید کاهش یافته، GFs الیاف گرافن نانولوله کربن، CNT، PMMA پلی متیل متاکریلات، PAN پلی آکریلونیتریل، SWCNT نانولوله کربن تک دیواره، CNF نانوالیاف کربن و VA-MXA ابروزل برپایه MXene دوخاصیتی هم راستا شده عمودی.

پلی دوپامین، استحکام پلی آمیدها، چسبندگی پلی (وینیل الکل) و زیست تخریب پذیری برخی پلیمرهای زیستی برای تهیه غشاهای کارآمد در نمک زدایی با استفاده از انرژی خورشید بهره برده اند. غشاهای هیبریدی پلیمر-مکسین به دلیل برهم کنش های چندگانه پلیمرها با گروه های عاملی سطحی مکسین از ویژگی های فیزیکی-شیمیایی درخور توجهی از جمله استحکام مکانیکی و انعطاف پذیری مکانیکی زیاد، رفتار جذبی برتر و نفوذپذیری گزینشی برخوردارند. ساخت غشا بر مبنای نانوکامپوزیت های مکسین-پلیمر، زمینه پژوهشی بسیار جدیدی است و قابلیت بالقوه بسیار زیادی برای فعالیت در این باره وجود دارد. با پیشرفت های حاصل شده در این زمینه، امید بسیاری برای ساخت غشاهای کارآمد تجاری در تهیه آب شیرین از آب دریا و حل مشکل دسترسی به آب شرب مناسب برای مناطق محروم از این نعمت در آینده وجود خواهد داشت.

مختلف از جمله ساخت غشا برای کاربردهای جداسازی رنگ و آلاینده ها و همچنین نمک زدایی از آب دریا انجام شده است. با وجود ویژگی های منحصر به فرد این ترکیبات، برخی معایب آنها مانند سهولت اکسایش و شکنندگی باعث ایجاد محدودیت هایی در کاربرد عملی آنها به عنوان غشا شده است. از سویی، غشاهای پلیمری نیز کاربردهای گسترده ای دارند که با توجه به برخی ویژگی های آنها از جمله مقاومت ضعیف در برابر حلال، خاصیت ضد رسوب کم و طول عمر کوتاه، کاربردهای آنها را با مشکل مواجه کرده است. ساخت نانوکامپوزیت های مکسین-پلیمر با برطرف کردن معایب هر یک از این غشاها به تنهایی و تقویت برخی ویژگی های مثبت هر کدام می تواند به ساخت غشاهای با کارایی بسیار عالی منجر شود. پژوهشگران از ویژگی های منحصر به فرد پلیمرهای مختلف به عنوان مثال قابلیت جذب نور خورشید به وسیله

مراجع

- Kalogirou S., Seawater Desalination Using Renewable Energy Sources, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **31**, 242-281, 2005.
- Naguib M., Kurtoglu M., Presser V., Lu J., Niu J., Heon M., Hultman L., Gogotsi Y., and Barsoum M.W., Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti_3AlC_2 , *Adv. Mater.*, **23**, 4248-4253, 2011.
- Ding L., Wei Y., Li L., Zhang T., Wang H., Xue J., Ding L., Wang S., Caro J., and Gogotsi Y., MXene Molecular Sieving Membranes for Highly Efficient Gas Separation, *Nat. Commun.*, **9**, 3634-3643, 2018.
- Liu G., Shen J., Liu Q., Liu G., Xiong J., Yang J., and Jin W., Ultrathin Two-Dimensional MXene Membrane for Pervaporation Desalination, *J. Membr. Sci.*, **548**, 548-558, 2018.
- Ren C.E., Hatzell K.B., Alhabeb M., Ling Z., Mahmoud K.A., and Gogotsi Y., Charge- and Size-Selective Ion Sieving Through Ti_3C_2Tx MXene Membranes, *J. Phys. Chem. Lett.*, **6**, 4026-4031, 2015.
- He S., Sun X., Zhang H., Yuan C., Wei Y., and Li J., Preparation Strategies and Applications of MXene-Polymer Composites: A Review, *Macromol. Rapid Commun.*, **42**, 2100324, 2021.
- Ronchi R.M., Arantes J.T., and Santos S.F., Synthesis, Structure, Properties and Applications of Mxenes: Current Status and Perspectives, *Ceram. Int.*, **45**, 18167-18188, 2019.
- Li R., Zhang L., Shi L., and Wang P., MXene Ti_3C_2 : An Effective 2D Light-to-Heat Conversion Material, *ACS Nano*, **11**, 3752-3759, 2017.
- Ihsanullah I., Potential of MXenes in Water Desalination: Current Status and Perspectives, *Nano-Micro Lett.*, **12**, 72, 2020.
- Sreedhar A. and Noh J.S., Advancements in Solar Desalination of Seawater by Various Ti_3C_2 MXene Based Morphologies for Freshwater Generation: A Review, *Catalysis*, **11**, 1435-1458, 2021.
- Khosla A., Awan H.T.A., Singh K., Walvekar R., Zhao Z., Kaushik A., Khalid M., and Chaudhary V., Emergence of MXene and MXene-Polymer Hybrid Membranes as Future Environmental Remediation Strategies, *Adv. Sci.*, **9**, 2203527, 2022.
- Zhao X., Zha X.J., Tang L.S., Pu J.H., Ke K., Bao R.Y., Liu J.Y. et al., Self-assembled Core-Shell Polydopamine@MXene with Synergistic Solar Absorption Capability for Highly Efficient Solar-to-Vapor Generation, *Nano Res.*, **13**, 255-264, 2020.
- Pi M., Wang X., Wang Z., and Ran R., Sustainable MXene/PDA Hydrogel with Core-Shell Structure Tailored for Highly Efficient Solar Evaporation and Long-Term Desalination, *Polymer*, **230**, 124075, 2021.
- Jin Y., Wang K., Li S., and Liu J., Encapsulation of MXene/Polydopamine in Nitrogen-Doped 3D Carbon Networks with High Photothermal Conversion Efficiency for Seawater Desalination, *J. Colloid Interface Sci.*, **614**, 345-354, 2022.
- Zhao X., Zha X.J., Pu J.H., Bai L., Bao R.Y., Liu Z.Y., Yang M.B., and Yang W., Macroporous Three-Dimensional Mxene Architectures for Highly Efficient Solar Steam Generation, *J. Mater. Chem.*, **7**, 10446-10455, 2019.
- Yu Z. and Wu P., Biomimetic MXene-Polyvinyl Alcohol Composite Hydrogel with Vertically Aligned Channels for Highly Efficient Solar Steam Generation, *Adv. Mater. Technol.*, **5**, 2000065, 2020.
- Fei J., Koh S.W., Tu W., Ge J., Rezaeyan H., Hou S., Duan H., Lam Y.C., and Li H., Functionalized MXene Enabled Sustainable Water Harvesting and Desalination, *Adv. Sustain. Syst.*, **4**, 2000102, 2020.
- Zhu X., Zhang X., Li J., Luo X., Xu D., Wu D., Wang W., Cheng X., Li G., and Liang H., Crumple-Textured Polyamide Membranes via MXene Nanosheet-Regulated Interfacial Polymerization for Enhanced Nanofiltration Performance, *J. Membr. Sci.*, **635**, 119536, 2021.
- Wang Y., Xu H., Ding M., Zhang L., Chen G., Fu J., Wang A., Chen J., Liu B., and Yang W., MXene-Regulation Polyamide Membrane Featuring with Bubble-Like Nodule for Efficient Dye/Salt Separation and Antifouling Performance, *RSC Adv.*, **12**, 10267-10279, 2022.
- Zhao J., Yang Y., Yang C., Tian Y., Han Y., Liu J., Yin X., and Que W., A Hydrophobic Surface Enabled Salt-Blocking 2D Ti_3C_2 MXene Membrane for Efficient and Stable Solar Desalination, *J. Mater. Chem.*, **6**, 16196-16204, 2018.
- Zhang Q., Yi G., Fu Z., Yu H., Chen S., and Quan X., Vertically Aligned Janus Mxene-Based Aerogels for Solar Desalination with High Efficiency and Salt Resistance, *ACS Nano*, **13**, 13196-13207, 2019.
- Zhang B., Gu Q., Wang C., Gao Q., Guo J., Wong P.W., Liu C.T., and An A.K., Self-Assembled Hydrophobic/Hydrophilic Porphyrin- Ti_3C_2Tx MXene Janus Membrane for Dual-Functional Enabled Photothermal Desalination, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 3762-3770, 2021.
- Zhang R., Han W., Jiang H., Wang X., Wang B., Liu C., and Shen C., PBAT/MXene Monolithic Solar Vapor Generator with High Efficiency on Seawater Evaporation and Swage Purification, *Desalination*, **541**, 116015, 2022.
- Zhao L., Du C., Zhou C., Sun S., Jia Y., Yuan J., Song G., Zhou X., Zhao Q., and Yang S., Structurally Ordered AgNPs@ C_3N_4 /GO Membranes toward Solar-Driven Freshwater Generation,

ACS Sustain. Chem. Eng., **8**, 4362-4370, 2020.

25. Chenga G., Wanga X., Liua X., Hea Y., and Balakin B.V., Enhanced Interfacial Solar Steam Generation with Composite Reduced Graphene Oxide Membrane, *Sol. Energy*, **194**, 415-430, 2019.
26. Zhou Q., Li H., Li D., Wang B., Wang H., Bai J., Ma S., and Wang G., A Graphene Assembled Porous Fiber-Based Janus Membrane for Highly Effective Solar Steam Generation, *J. Colloid Interface Sci.*, **592**, 77-86, 2021.
27. Yan J., Xiao W., Chen L., Wu Z., Gao J., and Xue H., Superhydrophilic Carbon Nanofiber Membrane with a Hierarchically Macro/Meso Porous Structure for High Performance Solar Steam Generators, *Desalination*, **516**, 115224, 2021.