

## A Review of Anti-corrosion and Erosion Protective Coatings in Offshore Wind Power Devices

Majid Mirzaee<sup>1</sup>, Tayyebah Mohebbi<sup>2</sup>

1- Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, P. O. Box: 14665517, Tehran, Iran.

2- Chemistry Department, Kashan University, P. O. Box: 8715998151, Kashan, Iran.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07- 12- 2023

Accepted: 05- 03-2024

Available online: --2024

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/JSCW.2024.82001

### Keywords:

Offshore wind power devices

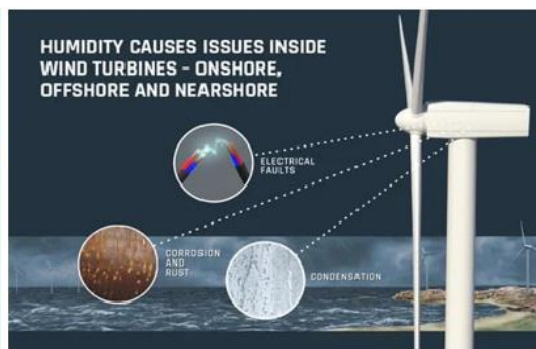
Corrosion

Erosion

Organic-inorganic hybrid coatings

### ABSTRACT

The recent development of offshore wind power devices (OWPDs) creates high requirements for protective coating materials against corrosion and erosion. Erosion of the leading edge (LE) of wind turbine blades is one of the common damages that reduces the annual energy production, especially in offshore wind turbine farms. This erosion can be caused by rain, sand, and solid particles. Also, the metal parts of offshore wind power devices suffer from pitting corrosion when exposed to an environment containing chloride ions. Organic-inorganic hybrid coatings (OIHCs) have attracted considerable attention due to their superior properties by combining both inorganic and organic components. The sol-gel technique is a suitable method for producing thin layer coatings that can protect offshore wind power plant components against erosion and corrosion while having a small effect on the power plant's component weight, especially the turbine blades. This review article summarizes the recent strategies for protective coatings of OWPDs and provides a perspective for developing OIHCs as coating materials for OWPDs.



### Wind Power Coatings Market Segmentation

#### Technology

- Water-based
- Solvent-based
- Powder
- UV-cured



#### Application

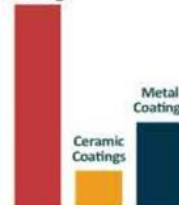
- Offshore
  - Blade
  - Tower
  - Interior
- Onshore
  - Blade
  - Tower
  - Interior

#### Region

- North America
- Latin America
- Asia Pacific
- Europe
- Middle East & Africa

#### Type

Polymer Coatings



Corresponding author: [mjmirzaei@nri.ac.ir](mailto:mjmirzaei@nri.ac.ir)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



## مروری بر پوشش‌های محافظ ضد خوردگی و فرسایش در نیروگاه‌های بادی دریایی

مجید میرزایی<sup>۱</sup>، طیبه محبی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مواد غیر فلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۶۶۵۵۱۷.

۲- دانشجوی دکتری، گروه شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، صندوق پستی: ۸۷۱۵۹۹۸۱۵۱.

### چکیده

توسعه اخیر نیروگاه بادی دریایی (OWPDs) الزامات بالایی را برای مواد پوشش محافظ در برابر خوردگی و فرسایش ایجاد می‌کند. فرسایش لبه پیشرو (LE) پره‌های توربین بادی یکی از آسیب‌های رایج است که باعث کاهش تولید سالانه انرژی به ویژه در مزارع توربین بادی می‌شود. این فرسایش می‌تواند ناشی از باران، شن و ذرات جامد باشد. همچنین قسمت‌های فلزی نیروگاه بادی دریایی در معرض محیط حاوی یون کلرید، دچار خوردگی حفره‌ای می‌شوند. پوشش‌های هیبریدی آلی- معدنی (OIHCs) به دلیل خواص برتر خود با ترکیب هر دو جزء معدنی و آلی مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته است. تکنیک سل-ژل روشی مناسب برای تولید پوشش‌های لایه نازک است که می‌تواند از اجزای نیروگاه بادی دریایی در برابر فرسایش و خوردگی محافظت کرده و در عین حال تأثیر ناچیزی بر وزن اجزای نیروگاه به خصوص پره‌های توربین داشته باشد. این مقاله مروری، استراتژی‌های اخیر برای پوشش‌های محافظ OWPDها را خلاصه می‌کند و چشم‌انداز توسعه OIHCها را به عنوان مواد پوششی برای OWPDها ارائه می‌دهد.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۲۲۳-۲۳۸۳

DOR: 10.30509/JSCW.2024.82001

### واژه‌های کلیدی:

نیروگاه بادی دریایی

خوردگی

فرسایش

پوشش‌های هیبریدی آلی- معدنی



## پوشش در نیروگاه بادی

### بخش بندی

#### تکنولوژی

- پایه آبی
- پایه حلال
- پودر
- پخت شده با UV



#### کاربرد

- دریایی
- پره
- برج
- قسمت های داخلی
- پودر
- خشکی
- پره
- برج
- قسمت های داخلی

#### منطقه

- آمریکای شمالی
- آمریکای لاتین
- آسیا و اقیانوسیه
- اروپا
- خاور میانه و
- آفریقا

### نوع

پوشش پلیمری



## ۱- مقدمه

منطقه اتمسفر جایی است که سطوح خارجی و داخلی سازه‌های فولادی بدون تماس مستقیم با آب دریا در معرض اتمسفر دریایی قرار می‌گیرند. این منطقه باید توسط یک پوشش محافظت شود. منطقه پاشش<sup>۱</sup> بخشی از سازه است که به طور متناوب در معرض آب دریا به دلیل اثر امواج جزر و مد یا هر دو قرار می‌گیرد. در نتیجه، محیط خورنده شدید است. منطقه غوطه‌ور<sup>۲</sup> از ناحیه زیر حد پایین ناحیه پاشش تشکیل شده است. سیستم پوشش اعمال شده برای این ناحیه باید با حفاظت کاتدی (CP) سازگاری داشته باشد (۵). استفاده از پوشش در مناطق اتمسفر و پاشش اجباری است در حالی که در منطقه غوطه‌ور به منظور کاهش جریان لازم برای حفاظت کاتدی مورد نیاز است (۸). پوشش محافظ اعمال شده بر روی بخش‌های مختلف سازه نیروی بادی دریایی برای شرایط محیطی خاص هر منطقه در معرض قرار گرفتن طراحی شده است. بنابراین برای ناحیه اتمسفر باید اثر پاشش نمک، خیس شدن، نوسان دما و اثر نور UV در نظر گرفته شود. در مقابل، منطقه غوطه‌ور همیشه به طور کامل در آب دریا با اثر محدود نور UV غوطه‌ور است، و حفاظت کاتدی باید در نظر گرفته شود. منطقه پاشش در معرض اثر ترکیبی نیروی خارجی، نوسانات دما، مرطوب شدن متناوب و غوطه‌وری در آب دریا قرار دارد (۹). برای اطمینان از اینکه پوشش محافظ می‌تواند حفاظت لازم را در طول عمر مورد انتظار سازه ارائه دهد، آزمایش‌های صلاحیت طراحی شده برای هر منطقه در ISO 12944-9 تعریف شده است (۶). استاندارد اخیر الزامات عملکرد سیستم‌های رنگ محافظ برای فراساحل و سازه‌های مرتبط را مشخص می‌کند. جدول ۲ آزمون‌های پیش صلاحیت مورد نیاز برای هر منطقه را که در ISO 12944-9 تعریف شده است نشان می‌دهد.

تقاضای جهانی انرژی به دلیل صنعتی شدن روزافزون جمعیت و افزایش وابستگی به وسایل الکتریکی به طور مداوم در حال افزایش است. بر اساس چشم‌انداز انرژی شرکت بریتیش پترولیوم (BP) در سال ۲۰۱۷، جمعیت جهان تا سال ۲۰۳۵ نزدیک به ۸/۸ میلیارد نفر خواهد بود. افزایش تقاضای جهانی انرژی، منابع محدود سوخت فسیلی و نگرانی‌های زیست محیطی، گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر را برای تامین تقاضا ضروری می‌کند (۱، ۲). نیروگاه‌های آبی، توربین‌های بادی و انرژی خورشیدی سه منبع اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. توربین بادی ماشینی است که انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند و سپس با کمک یک ژنراتور این انرژی مکانیکی را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. عملکرد توربین بادی به طراحی مناسب پره‌ها و استقامت شکل پره‌ها و ابعاد هندسی در طول عمر آن بستگی دارد؛ از این رو توجه به شرایط ساختاری پره‌ها در مرحله طراحی حائز اهمیت است. خوردگی یک پدیده حیاتی است که باید در طراحی، ساخت، راه‌اندازی و طول عمر عملیات سازه‌های دریایی مانند ژنراتورهای بادی دریایی مورد توجه قرار گیرد (۳، ۴). از آنجایی که این تاسیسات معمولاً در مکان‌های دور با دسترسی دشوار کار می‌کنند، نگهداری آن‌ها پیچیده است و تعمیر در صورت خرابی چالش برانگیز است. به همین دلیل، انتخاب یک سیستم حفاظت از خوردگی برای ژنراتورهای بادی فراساحلی یک فرآیند کلیدی است که می‌تواند تأثیر بسیار جدی بر طول عمر و نگهداری سازه در آینده داشته باشد (۵). استاندارد DNV-OS-J101 (۵) پایه‌های طراحی و حفاظت در برابر خوردگی ژنراتورهای بادی دریایی را توصیف می‌کند. یک عامل کلیدی که در طراحی حفاظت در برابر خوردگی باید در نظر گرفته شود، ویژگی‌های محیط است. ISO 12944:2 (۶) و ISO 12944:9 (۷) سه محیط خاص را که ساختار فلزی فراساحلی در معرض آن قرار می‌گیرد، تعریف می‌کند: منطقه جوی، منطقه پاشش، و منطقه غوطه‌ور (جدول ۱).

<sup>1</sup> Splash<sup>2</sup> Immersion

جدول ۱: مناطق خوردگی تعریف شده در ISO 12944 (۶).

Table 1: Corrosion zones defined in ISO 12944 [6].

ISO 12944-9:2018	Corrosivity Category	Durability	Environment
Atmospheric	CX		
Splash	CX / Im4	15–25 years	Marine offshore
Immersion	Im4		

جدول ۲: آزمایش‌های صلاحیت برای پوشش‌های دریایی برای دسته‌های مختلف خوردگی (۱۰).

Table 2: Qualification tests for offshore coatings for different corrosivity categories (10).

Test	CX (Atmospheric Offshore)	CX (Offshore) + Im4 (Splash and Tidal Zones)	Im4 (Submerged Zone)
Cyclic testannex B of ISO 12944-9	4200 h	4200 h	-
Cathodic disbonding ISO 15711, method A	-	4200 h	4200 h
Seawater immersion, ISO 2812-2	-	4200 h	4200 h

رزین‌هایی که معمولاً برای استفاده از به عنوان بستر آلی استفاده می‌شوند بر پایه پلی‌یورتان، اکریلیک و سیلیکون هستند. ویژگی این پوشش‌ها به صورت مختصر شامل موارد زیر است (۱۸):

(۱) پلی‌یورتان: از واحدهای آلی تشکیل شده است که با پیوند کاربامات به هم وصل شده‌اند. مزایای اصلی این رزین این است که دارای خاصیت جریان عالی، ظرفیت پر کردن خوب، مقاومت شیمیایی، چسبندگی قوی، الاستیسیته عالی، چقرمگی و مقاومت در برابر سایش، و امکان افزودن طیف گسترده‌ای از مواد افزودنی است. به طور کلی، پلی‌ایزوسیانات‌های آلیفاتیک و آلی سیکلیک برای ساخت پوشش‌های بادوام ترجیح داده می‌شوند. معایب آن این است که خاصیت چسبندگی کمتر از پوشش اپوکسی است و در هنگام پخت ممکن است باعث ایجاد بوی شدید شود.

(۲) اپوکسی: به رزین‌های اپوکسی پلی‌اپوکسید نیز می‌گویند. اینها دسته‌ای از پلیمرهای واکنش‌پذیر هستند که حاوی گروه‌های اپوکسی هستند. رزین‌ها با واکنش‌دهنده‌های مشترک، که اغلب سخت‌کننده نامیده می‌شوند، به هم متصل می‌شوند. پلی‌اپوکسیدهای ترموست دارای چسبندگی و خواص مکانیکی خوب، پایداری حرارتی بالا و مقاومت شیمیایی و رطوبتی عالی هستند. معایب آن این است که با قرار گرفتن در معرض نور خورشید زرد می‌شوند و مستعد به دام انداختن حباب‌های هوا و گرد و غبار هستند.

(۳) پلی‌اکریلات: این رزین‌ها از پلیمریزاسیون استرهای اکریلیک تهیه می‌شوند. وجود سدیم در این رزین‌ها باعث جذب آب می‌شود. به دلیل شفافیت و خاصیت ارتجاعی، این پوشش‌ها دارای مقاومت آب و هوایی خوب، مقاومت در برابر پرتو فرابنفش، مقاومت در برابر خوردگی و چسبندگی قوی هستند. با این حال، اشکالات اصلی مقاومت ضعیف در برابر آب و حلال و مقاومت در برابر سایش کم است.

(۴) سیلیکون: رزین‌های سیلیکونی نوعی ماده سیلیکونی هستند که از ساختار زنجیره‌ای سه بعدی از پیوندهای  $-Si-O-Si-$  تشکیل شده است. این رزین‌ها از تراکم هیدرولیتیکی پیش‌سازهای سیلیکونی مختلف تهیه می‌شوند. این مواد دارای ویژگی‌های دوگانه مواد آلی و معدنی هستند. خواص آنها مانند اتلاف سایش کم، مقاومت در برابر حرارت بالا، مقاومت شیمیایی و آب و هوایی خوب، طبیعت آب‌گریز و غیره بسیار مطلوب است. با این حال، این رزین‌ها دارای معایب کمی مانند چسبندگی ضعیف، آلودگی آسان و نسبتاً گران هستند.

در حال حاضر، سیستم پوششی که توسط سازندگان توربین بادی استفاده می‌شود، شامل رزین‌های پلیمری آلی سنتی است، که می‌توان آن را با پاشش روی سطح اعمال کرد (۱۹). رزین پلیمری

مقاومت ضعیف در برابر فرسایش و خوردگی مواد پره منجر به عملکرد نامناسب پره می‌شود و همچنین ممکن است یکپارچگی ساختاری پره را به خطر بیندازد (۱۱-۱۳). گزارش شده است که ۱۵٪ تا ۲۰٪ از کل هزینه توربین مربوط به ساخت و نصب پره‌ها می‌باشد (۱۳).

تعمیر پره‌ها پرهزینه‌ترین و زمان‌برترین فرآیند در تعمیر و نگهداری توربین‌های بادی است. انواع مختلفی از پوشش‌های محافظ برای کاهش خوردگی و فرسایش لبه پیشرو<sup>۱</sup> پیشنهاد شده است. مهم‌ترین انواع آن به شرح زیر است:

(۱) پوشش نانوکامپوزیت: ترکیبی هم‌افزایی از ترکیبات آلی و معدنی در پوشش<sup>۲</sup> (OHIC) است. حضور ترکیبات معدنی در مقیاس نانو موجب شده این پوشش‌ها خواص برتری را از خود نشان دهند. ساده‌ترین راه برای توسعه این پوشش‌ها، مخلوط کردن مستقیم نانوذرات معدنی با یک بستر بی‌شکل آلی است (۱۴، ۱۵). با پیشرفت‌های اخیر، اصلاح سطح و عامل‌سازی نانوذرات قبل از افزودن آنها به بستر آلی باعث شده تا پوشش نانوکامپوزیتی عملکرد مؤثر و مستمری را ارائه دهند. بخش آلی انعطاف‌پذیری پوشش می‌را بهبود داده، در حالی که بخش غیرآلی سختی و دوام را افزایش می‌دهد. پلیمرهای تقویت شده انرژی ضربه ناشی از ضربات مکرر ذرات را جذب و منتشر می‌کنند و در نتیجه مقاومت در برابر فرسایش قوی ایجاد می‌کنند. پرکننده‌های در مقیاس نانو از انواع مختلف فازها مانند اکسیدها، کاربیدها و نیتريد‌ها به عنوان مواد تقویت‌کننده در پوشش‌ها برای بهبود خواص مکانیکی و در نتیجه افزایش خواص مقاومت در برابر خوردگی و فرسایش عمل می‌کنند.

(۲) پوشش ابر آب‌گریز: این پوشش‌ها از مواد دفع‌کننده آب تشکیل شده‌اند (۱۶). ابرآب‌گریزی در پوشش‌ها با افزودن انواع افزودنی و پرکننده‌ها با مواد با انرژی سطحی پایین مانند سیلوکسان‌ها، مواد فلوروشیمیایی و غیره به بستر پوشش حاصل شده است. ترکیب نانوذراتی مانند سیلیس ( $SiO_2$ ) یکی از متداول‌ترین روش‌هایی است که برای الگوبرداری از بافت سطح برای بهبود آب‌گریزی دنبال می‌شود. نانو ساختار پوشش همراه با بخش‌های کم انرژی سطحی، زاویه تماس آب (WCA) را به بیش از ۱۵۰ افزایش می‌دهد. چالش بزرگ این پوشش‌ها دوام و پایداری آنهاست. تلاش‌هایی در این راستا برای بهبود عمر این پوشش‌ها صورت گرفته که حتی پس از ریختن شدید آب و قرار گرفتن در معرض نور UV، سطح تیغه می‌تواند ویژگی ابر آب‌گریز خود را حفظ کند (۱۷).

<sup>۱</sup> Leading Edge

<sup>۲</sup> Organic-inorganic hybrid coatings

و غیره، که پتانسیل‌های زیادی را به عنوان مواد پوشش محافظ در برابر خوردگی با عملکرد بهتر در آینده نشان می‌دهند. در عین حال این پوشش‌ها، به عنوان یک جاذب انرژی در ضربه عمل می‌کنند، در نتیجه خاصیت ارتجاعی بالا آن‌ها، باعث می‌شود در برابر سایش نیز مقاوم باشند (۲۹).

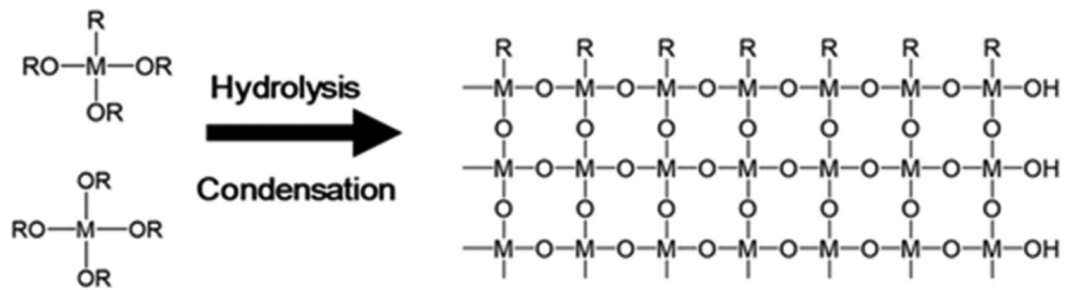
## ۲- توسعه توربین‌های بادی فراساحلی

با گرم شدن کره زمین، تخریب محیط‌زیست، کاهش روزافزون انرژی‌های فسیلی و افزایش آگاهی مردم از حفاظت از محیط‌زیست، کشورهای عمده مصرف‌کننده انرژی جهان به شدت در حال توسعه انرژی سبز و تجدیدپذیر هستند (۳۰). منابع بادی بسیار غنی هستند و برآورد شده است که منابع انرژی بادی قابل توسعه در جهان ۱۰ برابر بیشتر از انرژی آب قابل توسعه است. انرژی بادی به عنوان یک انرژی سبز و تجدیدپذیر که به سرعت در حال توسعه است، به تدریج به بخش مهمی از رویکرد توسعه پایدار در بسیاری از کشورها تبدیل شده است. مزارع بادی فراساحلی دارای مزایای ذخایر بزرگ انرژی بادی، بازده توسعه بالا، آلودگی محیطی کم و عدم اشغال زمین‌های زراعی هستند. از آنجایی که اولین مزرعه بادی فراساحلی جهان در سال ۱۹۹۱ در دانمارک ساخته شد؛ تولید برق بادی فراساحلی در حال تبدیل شدن به کانون توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان است (۳۱). چین از نظر منابع بادی غنی است و منابع بادی قابل توسعه و استفاده در چین حدود ۱۰۰۰ گیگاوات تخمین زده می‌شود که ۷۵۰ گیگاوات آن را می‌توان در دریا توسعه و استفاده کرد. ساخت نیروگاه بادی فراساحلی در چین در مقایسه با سایر کشورهای توسعه یافته دیر آغاز شد (۳۲). در سال ۲۰۰۸، اولین مزرعه نیروگاه بادی فراساحلی در مقیاس بزرگ در پروژه برق بادی دریایی پل شانگهای دونگ‌های چین<sup>۲</sup> آغاز شد و این پروژه در سال ۲۰۱۰ به شبکه متصل شد.

<sup>1</sup> Sol

<sup>2</sup> China-Shanghai Donghai Bridge offshore wind power

آلی سنتی برای پوشش‌های محافظ دارای مشکلات خواص مکانیکی ضعیف است و بنابراین تلاش‌های زیادی برای بهینه‌سازی آن انجام شده است (۲۰). مواد هیبریدی آلی- معدنی نوعی ساختار هیبریدی از صفر بعدی تا سه‌بعدی هستند که از ترکیب ماژول‌های معدنی و لیگاندهای آلی توسط پیوندهای شیمیایی تشکیل شده است (۲۱-۲۳). در این ساختارهای هیبریدی هم اجزای معدنی و هم اجزای آلی وجود دارد، بنابراین هم خواص نوری، الکتریکی و مغناطیسی مواد معدنی و هم انعطاف‌پذیری و تنظیم‌پذیری اجزای آلی را نشان می‌دهند (۲۱). ادغام این دو گونه در سطح مولکولی نیز ممکن است به خواص جدیدی منجر شود. به دلیل ترکیب اجزای آلی و معدنی در مقیاس نانو، محققان می‌توانند ساختار و ترکیب مواد هیبریدی را در سطح مولکولی تنظیم کرده و مکانیسمی را که بر خواص مواد تأثیر می‌گذارد مطالعه کنند (۲۴، ۲۵). انواع بسیاری از مواد هیبریدی آلی- معدنی با انواع ساختارها وجود دارد، و بیشتر مواد هیبریدی خواص اپتوالکترونیکی جالبی از خود نشان می‌دهند که کاربردهای بالقوه‌ای را در روشنایی حالت جامد و سلول‌های خورشیدی نشان می‌دهند (۲۶، ۲۷). نوع دیگری از مواد هیبریدی، پوشش‌های هیبریدی آلی- معدنی، که برای دهه‌ها توسعه یافته‌اند، یکی از مهم‌ترین دسته‌های مواد هیبریدی آلی- معدنی هستند (۲۸). OIHCSها عمدتاً با روش سل-ژل تهیه می‌شوند و ترکیبات آلکوکسی سیلیکون یا عناصر دیگر برای تولید نانوذرات معدنی کوچک با گروه‌های هیدروکسیل هیدرولیز می‌شوند (شکل ۱). اندازه این ذرات بین ۱-۱۰۰ نانومتر است و سوسپانسیون کلوتیدی آن سل نامیده می‌شود. گروه‌های هیدروکسیل ذرات و گروه‌های عاملی آلی در سل متراکم شده و تحت شرایط مناسب به هم متصل می‌شوند تا مواد پوشش هیبریدی آلی- معدنی را تشکیل دهند (۲۹). در چنین پوشش هیبریدی، اجزای معدنی می‌توانند سختی، مقاومت در برابر خراش و مقاومت در برابر آب و هوا را به دست آورند و اجزای آلی می‌توانند انعطاف‌پذیری، فشردگی و پردازش‌پذیری مواد پوشش را بهبود بخشند. OIHCSها دارای مزایای زیادی هستند، مانند ساختارها و خواص قابل تنظیم، سنتز آسان، سازگاری با محیط‌زیست



شکل ۱: طرحواره سنتز OIHCS (M=Si, Ti, Zr, etc., R=گروه‌های جایگزین آلی) (۲۹).

Figure 1. The scheme for the synthesis of OIHCS (M=Si, Ti, Zr, etc., R=organic substituted groups) [29].

کلیدی در سراسر جهان تبدیل خواهد شد و الزامات سیستم حفاظت در برابر خوردگی برای این دستگاه‌ها سخت‌گیرانه‌تر خواهد بود. توسعه سبز، چند منظوره، راندمان بالا، عمر طولانی و ساخت آسان پوشش‌های محافظ در برابر خوردگی از اهمیت علمی و ارزش اجتماعی بالایی برخوردار است.

### ۳- پوشش‌های محافظ در برابر خوردگی برای نیروگاه‌های بادی دریایی

محیط دریایی تجهیزات نیروی بادی دریایی به هر حالت فیزیکی از منطقه جوی دریایی گرفته تا ناحیه گل و لای دریا، از جمله نور، نوع یون و محتوای آن، رطوبت، دما، سرعت باد، محتوای اکسیژن، مقدار pH میزان جریان و غیره اشاره دارد. در امتداد جهت عمودی، محیط دریایی را می‌توان به پنج ناحیه خوردگی، یعنی ناحیه جوی، ناحیه پاشش، ناحیه دامنه جزر و مد، منطقه غوطه‌ور شدن کامل و ناحیه گل و لای دریا تقسیم کرد (شکل ۲). طبق طبقه‌بندی محیط خوردگی ISO 12944-2، منطقه اتمسفر محیط خوردگی C5-M، منطقه پاشش، محدوده جزر و مد و منطقه غوطه‌وری کامل محیط خوردگی آب دریا IM2 و منطقه گل دریا محیط خوردگی خاک IM3 است. در حال حاضر، دستگاه‌های متداول نیروی باد دریایی عمدتاً شامل پایه، بخش انتقال، برج، موتورخانه و اجزای پره می‌شوند (۳۸). این اجزا در پنج ناحیه خوردگی فوق توزیع شده‌اند و حفاظت در برابر خوردگی آنها بسیار پیچیده است. مونتاژ موتورخانه/پره و برج در ناحیه اتمسفر، بخش انتقال در ناحیه پاشش، ناحیه جزر و مد، و ناحیه غوطه‌وری کامل، و در نهایت فونداسیون در ناحیه غوطه‌وری کامل و ناحیه گل دریا کار می‌کنند (۳۷). عوامل محیط خوردگی که نواحی مختلف با آن مواجه هستند بسیار متفاوت است و اقدامات حفاظتی در برابر خوردگی باید در مناطق مختلف انجام شود. همچنین راه حل‌های حفاظتی دیگری برای OWPDsها که در مقالات مروری دیگر خلاصه شده است (۴۰، ۳۹). فرسایش نیز پس از ۲ سال عملیات در برخی از پره‌های توربین بادی گزارش شده است (۴۱). بازرسی ۲۰۱ پره در ۶۷ توربین بادی مورد بهره‌برداری شرکت EDP نشان داد که در حدود ۸۷ درصد پره‌های بازرسی شده، فرسایش رخ داده است (۴۲). علل اصلی آسیب به برج و پره‌ها، دانه‌های شن و قطرات باران شناسایی شد؛ سایر عوامل تاثیرگذار مانند حشرات و تگرگ‌ها تاثیر قابل توجهی بر فرسایش پره توربین بادی ندارند. فرسایش LE باعث افزایش زبری سطح پره و در نتیجه افزایش ضخامت لایه مرزی جریان هوا بر روی ایرفویل‌های پره در هنگام کار می‌شود. افزایش ضخامت لایه مرزی عملکرد آیرودینامیک پره به ویژه در زوایای حمله بالاتر را کاهش می‌دهد که پیامد آن تلفات شدید در تولید انرژی است.

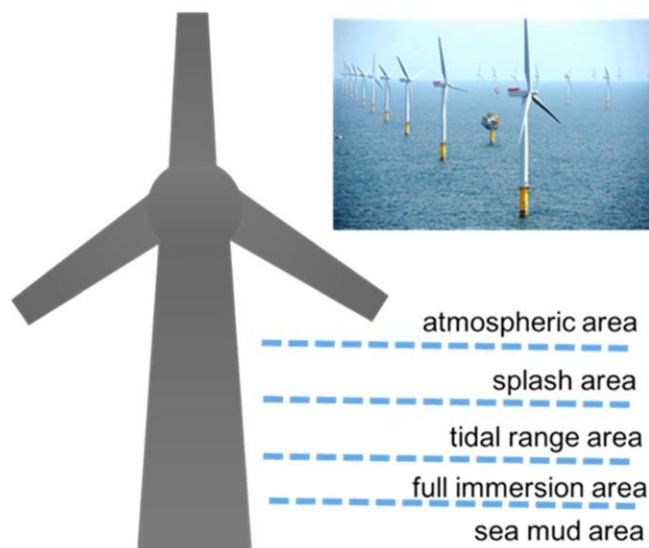
طبق برنامه پنج ساله سیزدهم برای توسعه نیروی بادی فراساحلی ملی اداره انرژی چین، هدف اتصال به شبکه برق بادی فراساحلی چین ۵ گیگاوات است و هدف راه اندازی تجمعی ۱۰/۵ گیگاوات تا سال ۲۰۲۰ است. بسیاری از شهرهای ساحلی تجهیزات نیروی باد دریایی ساخته‌اند. به عنوان مثال، در شهر ژوهای<sup>۱</sup>، اولین پروژه نیروی بادی فراساحلی در استان گوانگدونگ<sup>۲</sup>، "پروژه مزرعه بادی دریایی ژوهای گیشان"<sup>۳</sup> در جزیره گیشان، واقع شده است. ساخت و ساز در حال انجام همچنین شامل مزرعه بادی فراساحلی در منطقه جینوان<sup>۴</sup> است. شرایط توسعه نیروی بادی فراساحلی در ناحیه غربی گوانگدونگ خوب است که با چشم انداز بسیار گسترده به مهم‌ترین شاخص برای توسعه نیروی بادی دریایی در استان گوانگدونگ در آینده نزدیک تبدیل شده است (۳۳). محیط عملیاتی OWPDs بسیار پیچیده است: دمای بالا، رطوبت بالا، مه نمک زیاد و تابش آفتاب طولانی (۳۴). محیط خوردگی بسیار خشن است، که چالشی جدی برای حفاظت در برابر خوردگی OWPDsها ایجاد می‌کند (۳۵). جلوگیری از خوردگی به یک مشکل برجسته در هر مزرعه بادی تبدیل شده است و طراحی پیشگیری از خوردگی با عملکرد بهتر به یکی از ملاحظات مهم در طراحی مزارع بادی فراساحلی تبدیل شده است. رطوبت بالا، مه نمک زیاد، پرتوهای فرابنفش، غوطه‌وری در آب دریا، تناوب مرطوب خشک تشکیل شده در منطقه پاشش آب و سایر محیط‌های عملیاتی، الزامات عملکردی بالاتری را برای حفاظت در برابر خوردگی تجهیزات نیروی باد فراساحلی مطرح می‌کند (۳۶). روش‌های حفاظتی زیادی برای تجهیزات نیروی بادی دریایی وجود دارد که در میان آن‌ها پوشش‌های حفاظتی مستقیم‌ترین و مؤثرترین روش هستند. محیط خوردگی دستگاه‌های نیروی بادی دریایی پیچیده است. با توجه به ویژگی‌های خوردگی بخش‌های مختلف دستگاه، می‌توان یک سیستم پشتیبان پوشش معقول برای اطمینان از ایمنی عملیات و دستیابی به طول عمر بیش از ۲۰ سال طراحی کرد. در حال حاضر، استانداردهای حفاظت از خوردگی برای تجهیزات نیروی بادی دریایی عمدتاً از تجربه حفاظت در برابر خوردگی سکوه‌های نفتی دریایی، یخ شکن‌ها و خطوط لوله زیردریایی ناشی می‌شود (۳۷). اگرچه تجربه حفاظت در برابر خوردگی از سکوه‌های دریایی را می‌توان برای نیروگاه انرژی باد دریایی ارجاع داد، اما تفاوت‌هایی نیز بین این دو وجود دارد، بنابراین یادگیری مستقیم از تجربه حفاظت در برابر خوردگی سکوه‌های دریایی بسیار دشوار است. با توسعه و بهبود فناوری نیروی بادی فراساحلی، تحقیقات در مورد نیروی بادی دریایی به تدریج به یکی از جهت‌های تحقیقاتی

<sup>1</sup> Zhuhai

<sup>2</sup> Guangdong

<sup>3</sup> Zhuhai Guishan

<sup>4</sup> Jinwan



شکل ۲: ترسیم سازه دستگاه نیروی باد دریایی در محیط دریایی (۳۸).

Figure 2. Structural drawing of offshore wind powder device in the marine environment [38].

(۴۷). منطقه جوی به ناحیه بالای خط جزر و مد بالا اشاره دارد که با رطوبت بالا، شوری زیاد و پرتوهای فرابنفش قوی مشخص می‌شود. فیلم مایع نازک به راحتی بر روی سطح سازه فولادی برج در منطقه جوی تولید می‌شود. سولفات، کلرید و  $CO_2$  در جو دریا تا حدی در فیلم مایع نازک حل می‌شوند تا یک محلول الکترولیت با رسانایی بالا تشکیل دهند. به دلیل میکرو ناهمگنی اجزای فلزی و تفاوت پتانسیل استاندارد الکترود مواد فلزی مختلف در یک الکترولیت، هنگام تماس فلز با الکترولیت، تعداد زیادی میکروسول اولیه تشکیل می‌شود که سرعت خوردگی فلز را به شدت افزایش می‌دهد. در عین حال، یون کلر دارای قابلیت نفوذ قوی است که می‌تواند فیلم پسیو را از بین ببرد و خوردگی زیرآیند فلزی را تسریع کند. برای ساختار فولادی برج در منطقه جوی دریایی، پوشش محافظ یا لایه فلزی پاششی به همراه پوشش آب‌بندی به طور کلی استفاده می‌شود (۴۸). متداول‌ترین سیستم پوشش، سیستم حفاظت در برابر خوردگی کامپوزیت سه لایه "پرایمر غنی از روی اپوکسی، پوشش میانی اپوکسی، پوشش بالایی پلی یورتان آلیفاتیک" است. NORSOK M501، یک استاندارد نروژی، سیستم پوشش را ملزم به مقاومت در برابر آزمون چرخه پیری ۴۲۰۰ ساعته می‌کند، به عنوان مثال در یک چرخه "آزمایش پیری ۷۲ ساعت (UVA-340) UV، آزمون مه‌نمکی ۷۲ ساعت، آزمون انجماد ۲۴ ساعته (۲۰- درجه سانتی‌گراد)" انجام شده که در مجموع ۲۵ چرخه مدت زمان ۴۲۰۰ ساعت برای پوشش دیده شده است.

در حال حاضر استاندارد NORSOK M501 معمولاً برای ارزیابی عملکرد پوشش سازه‌های فولادی در ناحیه جوی دریایی نیروگاه‌های بادی استفاده می‌شود (۴۸-۴۶). طراحی پوشش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

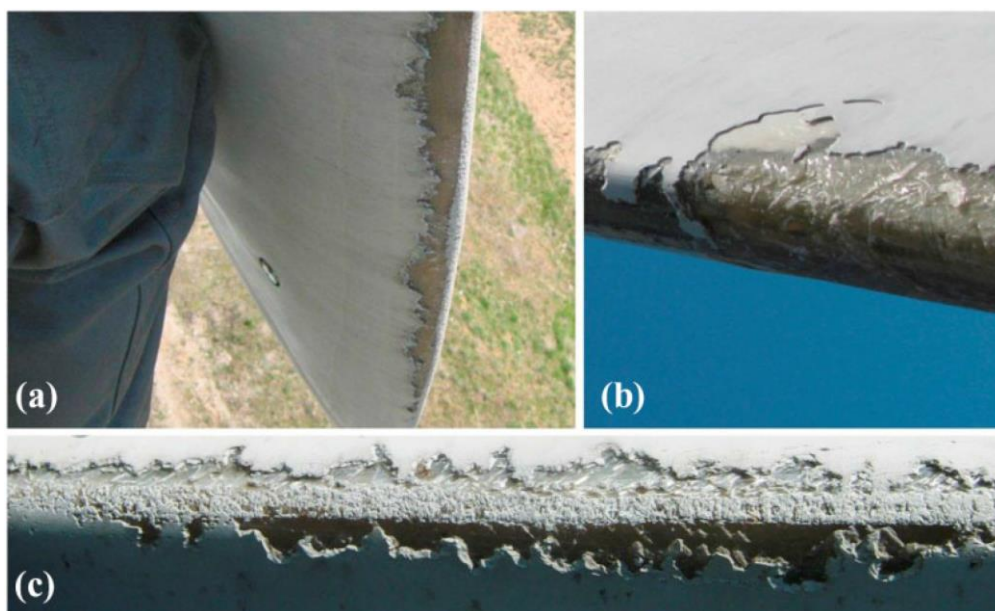
طی گزارش‌های صورت گرفته مشخص شده که پره‌های فرسایش یافته در توربین بادی می‌توانند تولید انرژی سالانه (AEP) را بین ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش دهند (۴۳). پوشش پره در برابر فرسایش با استفاده از مواد مناسب می‌تواند این تلفات را به شدت کاهش دهد و از این رو بسیار مورد توجه است. با توجه به تأثیر فرسایش بر عملکرد پره‌های توربین بادی، آنها باید در طول عمر خود نظارت شوند. با این حال، فرآیند نظارت بر سطح پره زمان‌بر و پرهزینه است. در طول فرآیند نظارت، مزرعه بادی باید خاموش شود و سپس از روی زمین عکس‌برداری شود (۴۴). به دلیل سرعت بالاتر پره‌ها در قسمت بیرونی پره‌ها، فرسایش بیشتر در LE در این ناحیه ظاهر می‌شود (۴۵) (شکل ۳). فرسایش LE پره‌های توربین بادی می‌تواند باعث ورود آب شود، به طوری که آب از طریق نقص‌های سطحی به دلیل فرسایش وارد پره‌ها می‌شود که منجر به تخریب اجزای سازنده پره‌ها می‌شود. جذب آب توسط رزین باعث افزایش وزن ساختار کامپوزیت شده و باعث عدم تعادل و افزایش ارتعاشات توربین بادی می‌شود. حال به جزئیات پوشش‌های ضد خوردگی و فرسایش برای اجزای مختلف نیروگاه بادی معرفی می‌شود (۳۸).

### ۳-۱- پوشش‌های محافظ برای برج

منطقه‌ای که برج در آن قرار دارد نسبتاً پیچیده است؛ از جمله منطقه جو دریا، منطقه پاشش، منطقه محدوده جزر و مد آب دریا، منطقه غوطه‌ور شدن کامل آب دریا و منطقه گل دریا (۴۶). بنابراین، برج مهم‌ترین و پیچیده‌ترین بخش حفاظت در برابر خوردگی نیروگاه بادی دریایی<sup>۱</sup> است

<sup>1</sup> Annual Energy Production

<sup>2</sup> Offshore wind power devices



شکل ۳: (الف) نوک پره توربین بادی فرسایش یافته، (ب) جزئیات LE فرسایش یافته و (ج) نمای نزدیک از LE فرسایش یافته (۴۵).

Figure 3: (a) Eroded wind turbine blade tip, (b) detail of eroded LE, and (c) close-up of eroded LE (45).

جدول ۳: سیستم پوشش محافظ برای OWPD (۶، ۷، ۱۰).

Table 3: Protective coating system for OWPDs (6, 7, 10).

Coatings	Types	Recommended dry film thickness /um			Main role
		C5-M	C4	C3	
<b>Protective coatings for tower in atmospheric area</b>					
Primer	Epoxy, zinc rich	60	50	50	Protect the base material and provide the adhesion basis for subsequent coatings
Intermediate coating	Epoxy	60	50	50	Increase coating thickness and reduce corrosion medium penetration
Top coating	Polyurethane	200	140	70	Improve weather resistance and resist the influence of ultraviolet and water
Total dry film thickness		320	240	170	-
<b>Protective coatings for tower in tidal splash area</b>					
One-coat paint	Epoxy	$\frac{300}{\text{layer} \times 2}$			To resist the corrosion caused by the alternation of dry and wet conditions and the scour of floating objects and sediment
Total dry film thickness		600			-
<b>Protective coatings for steel structure in full immersion zone</b>					
One-coat paint	Epoxy	$\frac{175}{\text{layer} \times 2}$			To resist chloride ion and other corrosion in seawater
Total dry film thickness		350			-
<b>Protective coatings for blades Coatings</b>					
Putty	Polyurea, epoxy and polyurethane	-			Repair the blade, fill the defects, and seal the pinhole and sand hole
Primer	Polyurea, epoxy and polyurethane	120			Increase the thickness of protective coating and extend the protective life
Top coat	Polyurea, epoxy and polyurethane	80			Protect the surface from highspeed running abrasion, UV, water, moisture and salt spray
Total dry film thickness		200			-



کاتدیک ۲۰ میلی‌متر و گسترش خوردگی خراش مصنوعی در ۴۲۰۰ ساعت غوطه‌وری در آب دریا ۸ میلی‌متر است.

کل منطقه غوطه‌وری در آب دریا به ناحیه بالای ناحیه گل و لای دریا و زیر خط متوسط جزر و مد اطلاق می‌شود. در فاصله ۲۰ تا ۳۰ متری زیر خط جزر و مد، به آن منطقه آب کم‌عمق می‌گویند. آب دریا در این منطقه دارای سرعت بالا، دمای بالا و حیات دریایی فراوان است. واکنش دپلاریزاسیون اکسیژن نقش اصلی را در خوردگی این ناحیه ایفا می‌کند.

منطقه ۳۰ تا ۲۰۰ متر زیر خط متوسط جزر و مد، منطقه غوطه‌وری کامل فلات قاره نامیده می‌شود. با عمیق شدن آب دریا، دما و سرعت آب دریا کاهش می‌یابد و گونه‌های موجودات دریایی کاهش می‌یابد. خوردگی الکتروشیمیایی اصلی‌ترین خوردگی در این ناحیه است (۴۶).

به منطقه‌ای با عمق بیش از ۲۰۰ متر، منطقه دریای عمیق می‌گویند. در این منطقه، فشار آب دریا زیاد است، محتوای اکسیژن، سرعت جریان آب و دمای آب دریا کم است، انحلال نمک معدنی کاهش می‌یابد و خوردگی سازه فولادی عمدتاً خوردگی الکتروشیمیایی و خوردگی تنشی است.

تحت غوطه‌وری کامل، منطقه را منطقه گل دریایی می‌نامند. خواص شیمیایی فیزیکی و خواص زیستی رسوبات در این منطقه با مساحت و عمق دریا تغییر می‌کند و بر نرخ خوردگی تأثیر می‌گذارد. گل دریا توسط آب دریا اشباع می‌شود که ویژگی‌های خوردگی خاک و آب دریا را دارد. فیلم غیرفعال فلزی در ناحیه گل دریا به دلیل محتوای نمک بالا، مقاومت کم و محتوای اکسیژن ناپایدار است. علاوه بر این، با توجه به نقش باکتری‌ها در ناحیه گل دریا،  $H_2S$  و  $NH_3$  تولید می‌شود که می‌تواند باعث خوردگی فلزات شود. اگر تعداد زیادی باکتری کاهنده سولفات در ناحیه گل و لای دریا وجود داشته باشد، تعداد زیادی سولفید خورنده تولید می‌شود که خوردگی فلزات را بسیار تسریع می‌کند و سرعت خوردگی را می‌توان ۶-۷ برابر یا حتی بیش از ۱۵ بار افزایش داد. به طور کلی پوشش‌های محافظ در برابر خوردگی به کار رفته در این قسمت ترکیبی از پوشش‌های محافظ در برابر خوردگی سنگین و حفاظت کاتدی بوده و یا می‌توان از حفاظت کاتدی به تنهایی استفاده کرد. سیستم پوشش کل منطقه غوطه‌وری می‌تواند با منطقه بازه جزر و مدی سازگار باشد و طرح در جدول ۳ نشان داده شده است. NORSOK M501 الزامات عملکرد پوشش محافظ در برابر خوردگی سنگین را در کل منطقه غوطه‌وری مشخص می‌کند. قطر سوراخ مصنوعی ۲۰ میلی‌متر در آزمایش کاتدی ۴۲۰۰ ساخته است و گسترش خوردگی خراش مصنوعی در آزمایش غوطه‌وری در آب دریا در ۴۲۰۰ ساعت، باید کمتر از ۸ میلی‌متر باشد. به طور کلی، پوشش‌های محافظ در برابر خوردگی برج‌های نیروی باد دریایی یک سیستم حفاظتی کامل متشکل از پوشش‌های متعددی هستند که عملکرد حفاظتی را ایفا می‌کنند. در حال حاضر، تحقیقات در

خوردگی در ناحیه پاشش و محدوده جزر و مد پیچیده است (۴۶). ناحیه پاشش<sup>۱</sup> ناحیه‌ای است که می‌تواند توسط موج بالاتر از خط جزر و مد خیس شود. آب دریا یک محلول الکتrolیتی قوی است و در فاصله ۲۰۰ متری از سطح با اکسیژن موجود در هوا اشباع شده است. منطقه پاشش به صورت دوره‌ای تحت تأثیر آب دریا قرار می‌گیرد و خیس می‌شود. در این ناحیه واکنش دپلاریزاسیون اکسیژن فعال است و نفوذ یون کلر خوردگی فلز را تسریع می‌کند. تحت تنش خوردگی و تنش مکانیکی ناشی از ضربه موج، ناحیه پاشش سریع‌ترین منطقه نرخ خوردگی در محیط دریایی است. نرخ خوردگی سازه فولادی در منطقه پاشش، ۳-۱۰ برابر بیشتر از منطقه غوطه‌وری در آب دریا است و میانگین نرخ خوردگی ۰/۵-۰/۳ میلی‌متر در سال است (۴۶).

محدوده جزر و مد به منطقه‌ای بین میانگین بیشترین سطح جزر و مد بالا و کمترین سطح جزر و مد پایین اشاره دارد. در هنگام جزر و مد، ساختار فولادی در آب دریای غنی از اکسیژن غوطه‌ور می‌شود که منجر به خوردگی آب دریا می‌شود. در جزر و مد، سازه فولادی برج در معرض جو دریا قرار می‌گیرد و در نتیجه خوردگی مشابه جو دریا ایجاد می‌شود. در فرآیند افزایش و کاهش جزر و مد، خوردگی فرسایش سازه فولادی ناشی از جریان جزر و مدی و خوردگی حفره‌ای ناشی از جریان آب با سرعت بالا، خوردگی سازه فولادی را تسریع می‌کند. موجودات دریایی نیز در محدوده جزر و مد به سطح سازه فولادی چسبیده‌اند. هنگامی که موجودات دریایی به طور یکنواخت به سطح ساختار فولادی متصل می‌شوند، فیلم محافظ تولید شده توسط موجودات دریایی باعث کاهش خوردگی ساختار فولادی می‌شود. هنگامی که موجودات دریایی به صورت جزئی به سطح متصل می‌شوند، در ساختار فولادی سل‌هایی با غلظت اکسیژن متفاوت در ناحیه نیمه‌متصل و غیرمتصل ایجاد شده و باعث خوردگی شدید فلز در زیر ناحیه متصل می‌شوند (۴۶).

پوشش‌های محافظ در برابر خوردگی ساختار برج در منطقه پاشش و محدوده جزر و مدی معمولاً پوشش‌های سنگین هستند و همچنین می‌توان ساختار را با پوشش پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه، ملات رزین و آلیاژ پوشش محافظت کرد. پوشش محافظ در برابر خوردگی سنگین معمولاً در ترکیب با حفاظت کاتدی استفاده می‌شود. جدول ۱ طرح پوشش‌های این ناحیه را فهرست می‌کند. NORSOK M501 الزامات عملکردی را برای پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی در ناحیه پاشش و محدوده جزر و مدی تنظیم می‌کند. گسترش خوردگی خراش مصنوعی در ۴۲۰۰ ساعت پیری چرخه‌ای ۸ میلی‌متر است، قطر سوراخ مصنوعی در ۴۲۰۰ ساعت آزمایش

<sup>1</sup> Splash

پلی ایزوسیانات آلیفاتیک یا آلی سیکلیک مناسب است. جدول ۳ سیستم‌های پوشش محافظ رایج برای پره‌ها را نشان می‌دهد. در بازار کنونی انرژی بادی، پوشش‌های پایه حلال آلی جایگاه غالب را اشغال می‌کنند؛ ولی پوشش‌های پلی‌یورتان پایه آبی سازگار با محیط‌زیست نیز تقاضای زیادی دارند؛ زیرا نیاز «انرژی سبز» برای نیروی باد را برآورده می‌کنند. نسل پوشش‌های پلی‌یورتان مقاوم به آب به نقطه عطف تحقیقاتی برای پوشش پره‌های توربین بادی تبدیل خواهند شد. از آنجایی که این قسمت از پره‌های توربین بادی، حساس‌ترین ناحیه نیروگاه بادی هستند، از پوشش‌های محافظ برای کاهش فرسایش LE پره‌ها استفاده می‌شود (۵۷). این لایه‌ها انرژی ضربه را بدون ایجاد ترک جذب می‌کنند. توانایی یک پوشش برای جذب و توزیع انرژی حاصل از ضربه می‌تواند متفاوت باشد. سیستم‌های پوشش پره فعلی معمولاً شامل یک لایه بتونه است که برای پر کردن منافذ در بستر کامپوزیت اعمال می‌شود، یک پرایمر برای ایجاد چسبندگی خوب لایه بعدی و یک پوشش رویی انعطاف‌پذیر پلی‌یورتان می‌باشد. اگر حفاظت LE در طول فرآیند تولید اعمال نشده باشد، فرسایش LE می‌تواند در عرض ۲ سال پس از بهره‌برداری رخ دهد (۴۴). توسعه پوشش‌های جدیدی که می‌توانند از LE پره‌ها در برابر فرسایش محافظت کنند، موضوع تحقیقات فعلی است. پوشش فوق‌آب‌گریز با استفاده از نانوذرات تعبیه شده در رزین، پوشش آب‌گریز با قابلیت ضد یخ زدگی و مواد پوشش‌های سرامیکی با مقاومت در برابر فرسایش بالا از جمله این پوشش‌ها هستند که در صنعت برای محافظت از LE پره‌های توربین بادی استفاده می‌شوند (۵۸، ۵۹).

#### ۴- مطالعه موردی برای پوشش‌های مقاوم به

##### خوردگی و فرسایش در یک نیروگاه توربین بادی

در یک کار تحقیقاتی چهار تولیدکننده پیشرو، راه‌حل‌های پوشش خود را برای یک مونوپیل دریایی ارائه دادند. چهار محلول پوششی که راه‌حل ۱، ۲، ۳ و ۴ از چهار تولیدکننده مختلف پوشش بوده، برای ناحیه‌های اتمسفر، پاشش، و غوطه‌ور به کار گرفته شد. سیستم‌های پوشش به عنوان A برای اتمسفر، S برای منطقه پاشش، و I برای منطقه غوطه‌ور، نام‌گذاری شدند. هر سیستم پوشش از دو یا سه لایه پوشش تشکیل شده بود. همه سیستم‌های پوشش حاوی یک پرایمر و پوشش بالایی بودند. برخی از آن‌ها همچنین حاوی یک لایه میانی بودند. لایه‌های پوشش در یک سیستم پوشش و ضخامت مورد نیاز هر لایه توسط سازنده پوشش تعریف شده است که مشخصات محیط میدانی و سازنده‌های پوشش در مناطق اتمسفری، پاشش و غوطه‌ور به ترتیب در جداول ۴ تا ۷ توضیح داده شده است.

مورد اصلاح پوشش‌ها بیشتر بر روی عملکرد یک پوشش خاص بر روی بسترها متمرکز است، با این حال، تحقیقات سامان‌یافته در مورد خوردگی و حفاظت از برج‌های نیروی باد دریایی نادر است. علاوه بر این، به دلیل محدودیت در فرآیند پوشش سنتی، ضایعات پوشش زیاد و آلودگی جدی است که با حفاظت از محیط‌زیست مغایرت دارد (۴۶).

#### ۳-۲- پوشش‌های محافظ برای پره‌های توربین بادی

به عنوان بخش مهمی از توربین بادی، پره‌های توربین بادی کلید تضمین عملکرد طولانی مدت و پایدار آن در محیط خشن هستند (۵۰، ۴۹). طول پره‌های توربین بادی می‌تواند به ۶۰ متر برسد. مواد تولیدی پره‌های توربین بادی، مانند پلاستیک تقویت شده با فیبر شیشه‌ای با رزین اپوکسی، پس از حمله گرد و غبار، UV و طوفان باران در تمام طول سال، به سختی دست نخورده باقی می‌ماند (۵۱). بنابراین، سطح پره باید با پوشش‌های محافظ پوشش داده شود تا عمر مفید پره‌ها بهبود یابد و تعمیر و نگهداری پره‌ها برای بیش از ۲۰ سال کاهش یابد (۵۲). پوشش پره‌های توربین بادی نیاز به مقاومت در برابر نور خورشید، تغییرات دمای بالا و پایین در زمستان و تابستان در شبانه روز دارد (۵۳). در عملیات با سرعت بالا، پره‌ها به شدت توسط باد، شن، باران و برف شسته می‌شوند. علاوه بر این، چسبندگی تعداد زیادی قطرات شن و آب بر عملکرد آیرودینامیکی آن تأثیر جدی گذاشته و توان خروجی مجموعه ژنراتور را کاهش می‌دهد. به منظور تحقق عملکرد پایدار طولانی مدت پره‌های توربین بادی، لازم است که پره‌ها با پوشش‌های محافظ پوشش داده شوند تا پره‌ها دارای مقاومت عالی در برابر آب و هوا، مقاومت در برابر سایش، ضد رسوب و سایر خواص باشند (۵۴). پوشش پره‌های توربین بادی، باید دارای ویژگی‌های زیر باشد: مقاومت در برابر آب و هوا، مقاومت در برابر سایش، چسبندگی عالی، مقاومت شیمیایی و غیره (۵۵). در حال حاضر، پوشش‌های متداول رزین پلیمری شامل پلی‌یورتان، فلورورزین، رزین اکریلیک و غیره است. برای عوامل فنی خاص، چسبندگی باید بیشتر از ۵ مگاپاسکال باشد، زمان خشک شدن سطح طبیعی باید کمتر از ۸ ساعت باشد و از دست دادن جرم باید کمتر از ۲۰ میلی‌گرم در ۵۰۰ گرم پس از آزمون مقاومت سایشی ۵۰۰ دور در دقیقه باشد. در حال حاضر، پلی‌یورتان ماده پوشش محافظ اصلی برای پره‌های توربین بادی در سراسر جهان است و پوشش‌ها عمدتاً پرایمر پلی‌یورتان مبتنی بر حلال آلی و پوشش بالایی پلی‌یورتان با عملکرد خوب و قیمت متوسط هستند (۵۶). در سال‌های اخیر، پلیمرهای فلونوردار و رزین‌های اکریلیک در پوشش‌های پره‌های توربین بادی استفاده شده‌اند. رزین‌های پلی‌یورتان دارای مقاومت عالی در برابر روغن، مقاومت شیمیایی و قابلیت چسبندگی قوی هستند؛ بنابراین پوشش‌های ساخته شده توسط رزین‌های پلی‌یورتان به طور گسترده‌ای در پره‌های توربین بادی استفاده می‌شود. مقاومت به هوازگی پوشش‌های پره‌های توربین بادی باید بسیار بالا باشد. هنگامی که از پلی‌یورتان برای تهیه پوشش استفاده می‌شود،

جدول ۴: شرایط محیطی در مرکز آزمایش Harsh Lab (۶۰).

Table 4: Environmental conditions at the Harsh Lab testing facility (60).

Parameter	Value
Annual precipitation	1500 mm/year
Mean interannual temperature	Min 13 °C, Max 16 °C
Average interannual temperature	Min 10 °C, Max 16 °C
Average insolation	1825 h/year
Average annual wetting time (RH > 80%, T > 0 °C)	5960 h
Water temperature	Min 11 °C (January), Max 22 °C (August)
Significant wave height	Min 1.15 m, Max 9.62 m, Average 1.67 m
Average salinity	35 USP
Average dissolved O <sub>2</sub>	6 mL/L
Average transmittance	88%

جدول ۵: سیستم‌های پوشش انتخابی برای منطقه اتمسفر (۶۰).

Table 5: Selected coating systems for the atmospheric zone (60).

Reference	Chemical Composition and Thickness	NDFT* (μm)	DFT Measured (μm)
A1-Zn **	Zinc rich epoxy 60 μm, Epoxy 160 μm, Polyurethane (yellow) 60 μm	280	281
A2-Epoxy ***	Epoxy 200 μm, Epoxy 200 μm, Polyurethane (white) 60 μm	460	485
A3-Zn	Zinc rich epoxy 60 μm, Epoxy 160 μm, Polyurethane (yellow) 60 μm	280	399
A4-Zn	Zinc rich epoxy 60 μm, Epoxy 170 μm, Polyurethane (grey) 50 μm	280	312

\* NDFT-net dry film thickness as provided by the manufacturer; \*\* Zn-zinc-rich; \*\*\* Epoxy-epoxy based composition.

جدول ۶: سیستم‌های پوشش انتخابی برای منطقه پاشش (۶۰).

Table 6: Selected coating systems for the splash zone (60).

Reference	Chemical Composition and Thickness	NDFT* (μm)	DFT Measured (μm)
S1	Epoxy 275 μm Epoxy 275 μm Polyurethane (yellow) 60 μm	610	691
S2-GF	Epoxy GF* 300 μm Epoxy (grey) GF 300 μm	600	728
S3-GF	Epoxy GF 300 μm Epoxy GF 300 μm Polyurethane (yellow) 60 μm	660	821
S4	Epoxy 300 μm Epoxy (grey) 300 μm	600	629

\* GF—glass flakes

جدول ۷: سیستم‌های پوشش انتخابی برای منطقه غوطه‌ور (۶۰).

Table 7: Selected coating systems for the submerged zone (60).

Reference	Chemical Composition and Thickness	NDFT* (μm)	DFT Measured (μm)
I1	Epoxy 50 μm Epoxy (yellow) 300 μm	350	440
I2-GF	Epoxy GF 200 μm Epoxy (grey) GF 200 μm	400	435
I3	Epoxy 200 μm Epoxy (grey) 150 μm	350	461
I4 *	Epoxy 300 μm Epoxy (grey) 300 μm	600	629

شروع جداسازی کاتدی، یک هالیدی دایره‌ای به قطر ۶ میلی‌متر در پوشش ایجاد می‌شود تا بستر فولادی را در معرض محیط قرار دهد. سپس پانل به مدار حفاظت کاتدی متصل شده و به مدت ۴۲۰۰ ساعت در آب دریا مصنوعی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲-۳- منطقه غوطه‌ور

۱. آزمون غوطه‌وری در آب دریا همانطور که در ISO 2812-2 تعریف شده است.

۲. جداسازی کاتدی بر اساس ISO 15711.

۳- شرایط قرار گرفتن در معرض میدان

به موازات آزمایش آزمایشگاهی، مقاومت به خوردگی پوشش در شرایط دریایی نیز با قرار دادن سیستم‌های پوشش در یک محیط واقعی دریایی در آزمایشگاه به شکل صفحه شناور Harsh Lab، واقع در خلیج بیسکای، ارزیابی شد. این سکو در دریای کانتابریا در منطقه BiMEP لنگر انداخته است و یک زیرساخت دریایی منحصر به فرد است که برای آزمایش مواد و راه حل‌های جدید در برابر خوردگی، پیری و رسوب در مناطق غوطه‌ور، پاشش و جو طراحی شده است (شکل ۴). شرایط محیطی محل آزمایش در جدول ۴ فهرست شده است. پانل‌های آزمایش در مرکز Harsh Lab به مدت یک سال در معرض دید قرار گرفتند. ضخامت پوشش و ترکیب شیمیایی پوشش‌های مورد مطالعه در جداول ۵ تا ۷ ذکر شده است. کل ضخامت لایه خشک (DFT اندازه‌گیری شده) با القای مغناطیسی مطابق با ISO 2178 (۶۳) با استفاده از ضخامت سنج FISCHER، اندازه‌گیری شد. آزمون چسبندگی کششی بر روی پانل‌های جدید و قدیمی طبق استاندارد ISO 4624 انجام شد (64). دالی‌های ۲۰ میلی‌متری با استفاده از چسب اپوکسی به پانل پوشش چسبانده شدند. قدرت چسبندگی با دستگاه چسبندگی DEFELSKO اندازه‌گیری شد. سه نمونه برای هر سیستم اندازه‌گیری شد و سه ناحیه مختلف در هر پانل مورد آزمایش قرار گرفت. حالت شکست طبق ISO 4624 به عنوان خرابی فصل مشترک (چسب) ارزیابی شد که به صورت A/B، B/C، D/Y، C/D، B/C، A/B، Y/E نشان داده شده است، که در آن A بستر فلزی است، B، C و D لایه‌های مختلف سیستم‌های پوشش هستند، Y چسبی است که برای چسباندن دالی استفاده می‌شود و Z دالی است (شکل ۵). خرابی‌های منسجم در یک لایه با نشانگر حروف لایه مربوطه نشان داده می‌شود. نفوذ خوردگی در اسکریب (خزش) بر اساس ISO 12944-6 ارزیابی شد (۷).

#### ۴-۳- نتایج مرتبط با نواحی مختلف

##### ۴-۳-۱- منطقه اتمسفر

قدرت چسبندگی یک سیستم پوشش، عامل مهمی است که نشان می‌دهد که پوشش چقدر به سطح زیرلایه چسبیده است.

#### ۴-۱- تهیه کوپن آزمون

اعمال پوشش توسط سازنده طبق پروتکل پوشش مربوطه انجام شد. پوشش‌ها بر روی کوپن‌های استاندارد فولاد کربن با ابعاد  $150 \times 75 \times 3-5$  میلی‌متر اعمال شد. سطح کوپن‌ها بر اساس استاندارد ISO 8503-1 درجه Sa 2 1/2، درجه زبری G آماده شد. پوشش‌های محلول‌های ۱، ۲ و ۳ با پاشش بدون هوا<sup>۱</sup> و پوشش ۴ توسط ایربراش<sup>۲</sup> اعمال شدند. برای هر آزمون، سه کوپن تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت و داده‌های ارائه شده در بخش نتایج، میانگین سه کوپن است.

#### ۴-۲- تسریع پیری آزمایشگاهی

جدول ۲ روش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای پیری سریع سیستم‌های پوشش را نشان می‌دهد.

##### ۴-۲-۱- منطقه اتمسفر

پوشش‌های ناحیه اتمسفر با آزمایش چرخه‌ای مطابق با ISO 12944:9 پیر شدند. آزمون چرخه‌ای شامل ۲۵ چرخه با مدت زمان کل ۴۲۰۰ ساعت است. چرخه پیری ۱۶۸ ساعت طول می‌کشد و شامل مراحل زیر است:

(۱) ۷۲ ساعت قرار گرفتن در معرض UV و چگالش؛ (۲) ۷۲ ساعت قرار گرفتن در معرض اسپری نمک خنثی؛ (۳) ۲۴ ساعت قرار گرفتن در معرض دمای پایین ( $20 \pm 2$  - درجه سانتی‌گراد).

##### ۴-۲-۲- منطقه پاشش

پوشش‌های ناحیه پاشش با استفاده از سه روش مختلف پیرسازی شدند:

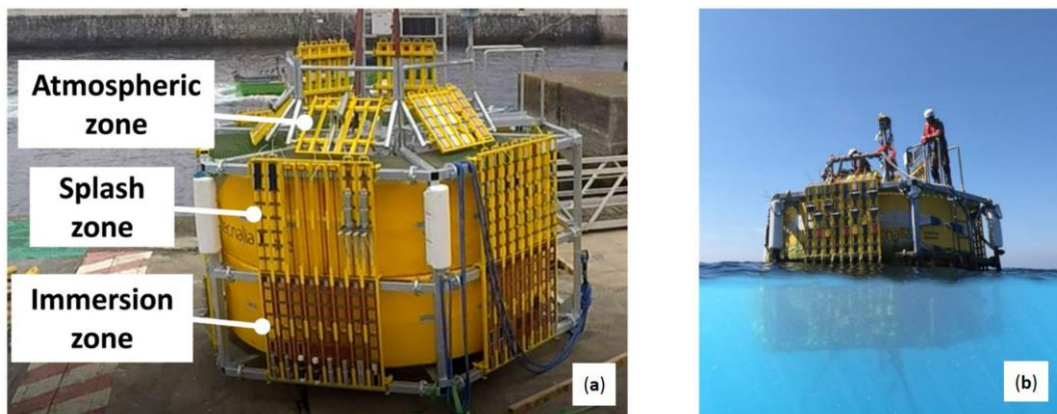
۱. آزمایش چرخه‌ای، که در روش چرخه‌ای پوشش منطقه اتمسفر نیز اعمال می‌شود.

۲. آزمایش غوطه‌وری در آب دریا همانطور که در ISO 2812-2 (۶۱) تعریف شده است، در این آزمایش، پانل‌های پوشش داده شده در آب دریا مصنوعی به مدت ۴۲۰۰ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور می‌شوند. پانل‌ها روی یک تکیه‌گاه قرار می‌گیرند که آنها را در زاویه ۱۵ تا ۲۰ درجه نسبت به عمود نگه می‌دارد. در طول پیری، هوادهی با گردش مداوم آب دریا تضمین می‌شود.

۳. جدایش کاتدی بر اساس ISO 15711 (۶۲) در این آزمایش، حفاظت کاتدی سازه فراساحلی در آب دریا مصنوعی شبیه‌سازی شده و مقاومت پوشش در برابر جدا شدن ارزیابی می‌شود. برای

<sup>1</sup> Airless

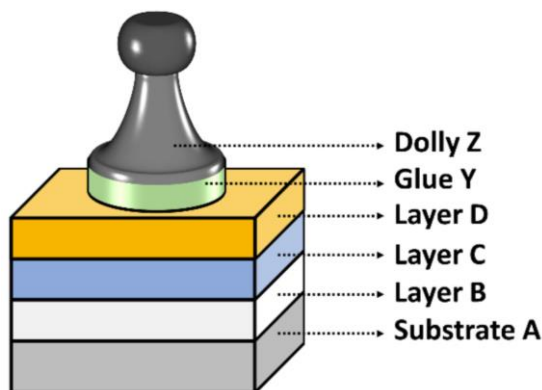
<sup>2</sup> Airbrush



شکل ۴: (الف) تسهیلات Harsh Lab 1.0 قبل از راه اندازی، برای قرار دادن پانل‌های آزمایشی برای قرار گرفتن در معرض میدان در مناطق جوی، پاشش، و غوطه‌وری آماده شده است. (ب) Harsh Lab در دریای Cantabrian پهلو گرفته است (۶۰).

Figure 4: (a) The Harsh Lab 1.0 facility prior to commissioning, prepared to accommodate test panels for field exposure in the atmospheric, splash, and immersion zones. (b) The Harsh Lab moored in the Cantabrian Sea (60).

احتمالی در حفاظت در برابر خوردگی سیستم است؛ با این حال، قدرت چسبندگی بسیار بالاتر از مقدار محدود ۵ مگاپاسکال باقی ماند. در مورد سیستم‌های A3-Zn و A4-Zn، قدرت چسبندگی در هر دو پیری آزمایشگاهی و قرار گرفتن در معرض شرایط میدانی افزایش یافت. این پدیده ممکن است به دلیل عمل‌آوری پس از پخت پوشش‌های پلی اورتان در طول پیری باشد که عمدتاً توسط نور UV ایجاد می‌شود. این اثر پس از قرار چسبندگی مشاهده نشد (شکل ۶ ب). برای سیستم‌های A2-Zn و A2-Epoxy، پیری تسریع شده باعث کاهش شدید قدرت چسبندگی نسبت به قرار گرفتن در معرض شرایط میدانی شد. یکی دیگر از عوامل بسیار مهم، نفوذ خوردگی در زیر خط مصنوعی ایجاد شده است. خراش به طور مصنوعی نقص‌هایی را در پوشش ایجاد می‌کند که با قرار دادن بستر فلزی بدون پوشش و تمام اجزای سیستم پوشش در معرض محیط خورنده، خوردگی را تسریع می‌کند. ارزیابی نفوذ خوردگی زیر خراش مصنوعی از دستورالعمل‌های ISO 12944-6 پیروی می‌کند. شکل ۷ الف میزان نفوذ خوردگی در زیر اسکرپ را بر حسب میلی‌متر نشان می‌دهد. در سه سیستم، نفوذ خوردگی پس از پیری تسریع شده به طور قابل توجهی بیشتر از قرار گرفتن در معرض محیط میدانی بود. این نتیجه را می‌توان انتظار داشت زیرا آزمایش‌های صلاحیت با هدف اطمینان از حفاظت در برابر خوردگی برای حداقل ۱۵ سال در شرایط واقعی فراساحل بوده، در حالی که قرار گرفتن در معرض میدانی در این مطالعه یک سال بود. دو تا از سیستم‌ها (A1-Zn و A2-Epoxy) نفوذ خوردگی بالاتر از ۳/۰ میلی‌متر را در آزمون نشان دادند، که مقدار محدودکننده برای دسته CX دریایی است. که این نشان می‌دهد که فقط سیستم‌های A3-Zn و A4-Zn با استاندارد مطابقت دارند (۶۰).



شکل ۵: طرح‌واره زیرلایه پوشش داده شده و تعیین آنها در تجزیه و تحلیل حالت شکست (۶۰).

Fig.5: Schematics of the coated substrate and their designation in the analysis of the fracture mode (60)

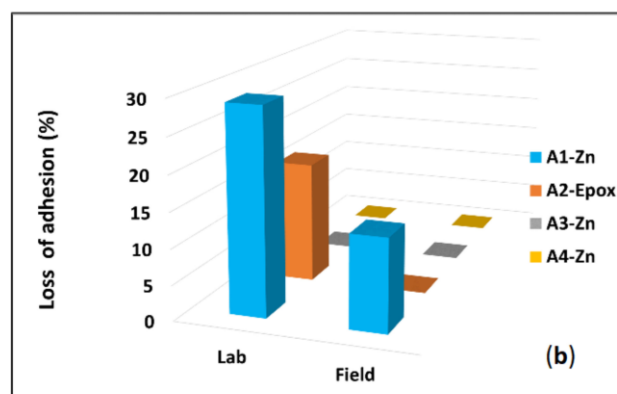
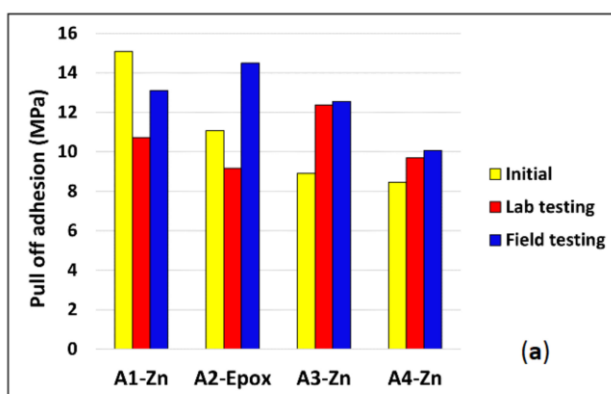
قدرت چسبندگی سیستم‌های پوشش جوی در جدول ۸ و شکل ۶ الف نشان داده شده است.

میانگین قدرت چسبندگی اولیه در محدوده ۸/۴۵-۱۵/۰۹ مگاپاسکال بود که بسیار بالاتر از حداقل مقدار مقاومت چسبندگی ۵ MPa است که در ISO 12944-9 بیان شده است. هیچ یک از سیستم‌ها حالت شکست چسب نوع A/B را نشان ندادند. نوع خرابی A/B مشکلات چسبندگی در فصل مشترک پوشش زیرلایه فلزی/پرایمر نشان می‌دهد. A4-Zn شکستگی عمدتاً منسجم لایه زیرین B را نشان داد، اما زیرلایه، محافظت‌شده باقی ماند. تمامی سیستم‌ها با معیارهای پذیرش تعریف شده در ۹-۱۲۹۴۴ مطابقت داشتند. پس از پیری سریع، در برخی موارد، قدرت چسبندگی اندکی کاهش یافت اما همچنان بالاتر از مقدار محدود بود. حالت شکست سیستم A1-Zn به A/B تغییر کرد، که نشانه‌ای جدی از ضعف

جدول ۸: قدرت چسبندگی (متوسط) سیستم‌های پوشش برای منطقه جوی قبل و بعد از پیری و قرار گرفتن در معرض محیط دریایی (۶۰).

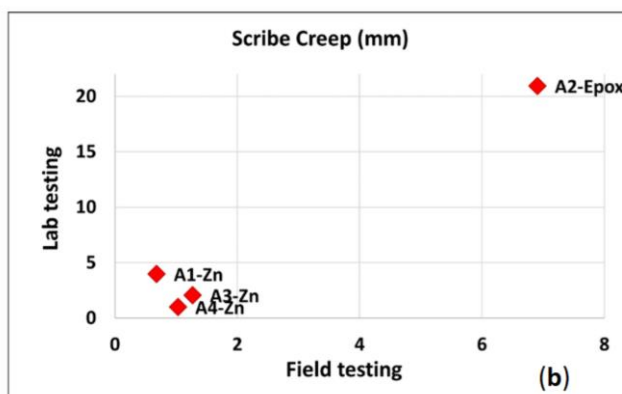
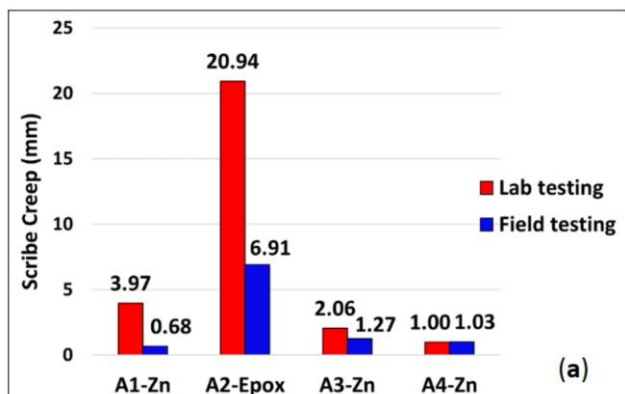
Table 8: Adhesion strength (average) of coating systems for atmospheric zone before and after aging and field exposure (60).

Ref.	Initial		Cycling Aging (4200 h)		Field Exposure (1 Year)	
	Fracture Mode	Adhesion (MPa)	Fracture Mode	Adhesion (MPa)	Fracture Mode	Adhesion (MPa)
A1-Zn	100% D	15.09	70% A/B, 30% D	10.72	100% D	13.12
A2-Epoxy	55% C/D 45% C	11.06	100% C	9.17	85% C, 15% C/D	14.50
A3-Zn	80% D, 20% C	8.90	70% D, 20% C, 10% C/D	12.38	70% D, 20% C, 10% B	12.54
A4-Zn	95% B, 10% B/C	8.45	100% C	9.70	50% C, 50% B	10.07



شکل ۶: (الف) قدرت چسبندگی پوشش‌ها برای ناحیه اتمسفر قبل و بعد از پیری و قرار گرفتن در معرض شرایط میدانی. (ب) از دست دادن چسبندگی سیستم‌های پوشش پس از پیری و قرار گرفتن در معرض شرایط میدانی (۶۰).

Figure 6: (a) Pull-off adhesion strength of the coatings for the atmospheric zone before and after aging and field exposure. (b) Loss of adhesion of the coating systems after aging and field exposure (60).



شکل ۷: (الف) میزان نفوذ به زیر خط سیستم‌های پوششی در منطقه جوی پس از پیری تسریع شده و آزمایش میدانی. (ب) میزان نفوذ پس از پیری تسریع شده به عنوان تابعی از خزش میزان نفوذ پس از قرار گرفتن در معرض محیط میدانی (۶۰).

Figure 7: (a) Scribe creep of the atmospheric zone coating systems after accelerated aging and field testing. (b) Scribe creep after accelerated aging plotted as a function of scribe creep after field exposure (60).

رفتار A2-Epoxy سازگار بود و این سیستم پوشش بدترین پوشش را هم در پیری تسریع شده و هم در آزمایش میدانی داشت. این نتیجه قابل انتظار بود و به دلیل ماهیت آلی A2-Epoxy و فقدان پرایمر غنی

همانطور که در شکل ۷ ب مشاهده می‌شود، همبستگی بین نتایج نفوذ به دست آمده از پیری آزمایشگاهی و قرار گرفتن در معرض محیط میدانی، همبستگی نسبتاً ضعیفی را نشان داد. با این حال،

پس از پیری تسریع شده، تمام سیستم‌های پوشش قدرت چسبندگی کششی بالاتر از ۵ مگاپاسکال مورد نیاز را نشان دادند و حالت شکست بحرانی A/B در هیچ یک از موارد مشاهده نشد. سیستم S2 نزدیک به ۳۰٪ از دست دادن چسبندگی را پس از پیرسازی چرخه‌ای نشان داد. از سوی دیگر، S4 کاهش قابل توجهی از چسبندگی را پس از قرار گرفتن در معرض محیط میدانی نشان داد، که نسبتاً غیرمنتظره بود. این نتیجه نشان می‌دهد که شرایط واقعی فراساحل برای این سیستم پوشش آسیب‌رسان‌تر از آزمایش تسریع شده چرخه‌ای است و این نوع پیری ممکن است نماینده این سیستم پوشش خاص نباشد. شکل ۹ و جدول ۱۰ خوردگی زیر خط را برای پوشش ناحیه پاشش نشان می‌دهد. ظاهراً تفاوت زیادی در حالت تهاجمی چرخه‌ای و پیری غوطه‌وری وجود داشت. نفوذ خوردگی در زیر خط پس از پیری چرخه‌ای در محدوده ۱۲/۷۹-۱۶/۹۰ میلی متر بود که بسیار بالاتر از نفوذ قابل قبول ۸ میلی متر است که در ISO 12944-9 تعریف شده است.

از روی است که برای محافظت در برابر خوردگی پوشش ضروری است (۶۰).

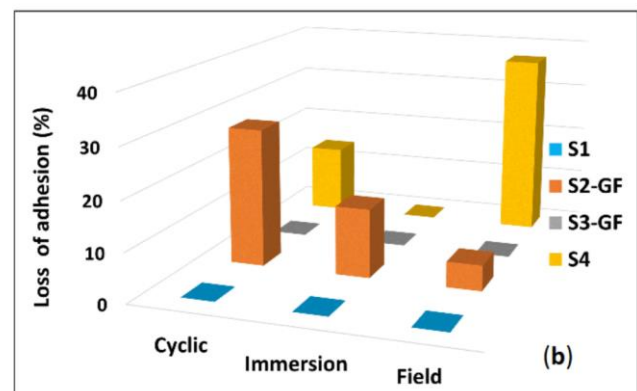
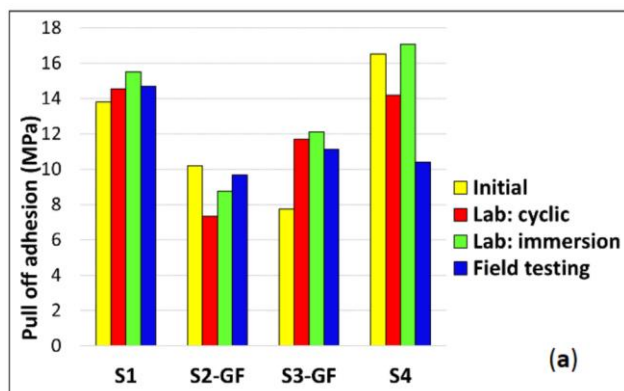
#### ۴-۳-۲- منطقه پاشش

پیش‌صلاحیت سیستم‌های پوشش برای ناحیه اسپلش شامل سه نوع پیری آزمایشگاهی است: پیری چرخه‌ای، پیری غوطه‌وری و جدایش کاتدی. جدول ۹ و شکل ۸ قدرت چسبندگی پوشش‌ها را قبل و بعد از پیری آزمایشگاهی (چرخه‌ای و غوطه‌وری) و پس از یک سال قرار گرفتن در میدان نشان می‌دهد. قدرت چسبندگی اولیه در محدوده ISO 12944-9 مگاپاسکال بود که با الزامات ذکر شده در ISO 12944-9 مطابقت دارد. سیستم‌های بدتر S2-GF و S3-GF بودند. این سیستم‌ها حاوی GF در ترکیب خود هستند، که جای تعجب دارد زیرا پوشش‌های حاوی GF معمولاً مقاومت بهتری دارند (۶۰).

جدول ۹: قدرت چسبندگی (متوسط) سیستم‌های پوشش برای ناحیه پاشش قبل و بعد از پیری و قرار گرفتن در معرض محیط میدانی (۶۰).

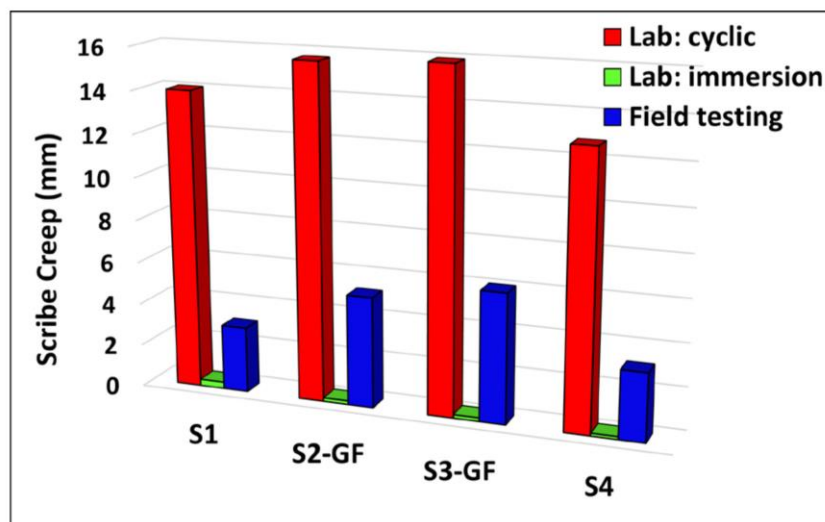
Table 9: Adhesion strength (average) of the coating systems for the splash zone before and after aging and field exposure (60).

Ref.	Initial		Cycling Aging (4200 h)		Immersion Aging (4200 h)		Field Exposure (1 Year)	
	Fracture Mode	Adhesion (MPa)	Fracture Mode	Adhesion (MPa)	Fracture Mode	Adhesion (MPa)	Fracture Mode	Adhesion (MPa)
S1	100% D	13.81	100% D	14.56	55% D/Y, 45% D	15.51	100% D	14.69
S2-GF	100% C	10.20	81% C, 19% B	7.34	100% B	8.77	50% B, 50% C	9.67
S3-GF	90% D, 10% C/DC	7.75	90% D, 10% C/D	11.71	47% C/D, 46% D, 7% D/Y	12.11	60% D, 40% C/D	11.13
S4	45% B, 40% C, 5% C/Y	16.52	90% C, 10% B/C	14.20	91% C, 9% B/C	17.08	90% C, 10% B/C	10.41



شکل ۸: (الف) قدرت چسبندگی پوشش‌ها برای ناحیه پاشش قبل و بعد از پیری آزمایشگاهی و قرار گرفتن در معرض آزمون میدانی. (ب) از دست دادن چسبندگی سیستم‌های پوشش پس از پیری و قرار گرفتن در معرض آزمون میدانی (۶۰)

Figure 8: (a) Pull-off adhesion strength of the coatings for splash zone before and after laboratory aging and field exposure. (b) Loss of adhesion of the coating systems after aging and field exposure (60)



شکل ۹: نفوذ سیستم‌های پوشش منطقه پاشش پس از پیری تسریع شده و آزمایش میدانی (۶۰).

Figure 9: Scribe creep of the splash zone coating systems after accelerated aging and field testing (60).

جدول ۱۰: نفوذ خوردگی برحسب میلی‌متر برای سیستم پوشش ناحیه پاشش قبل و بعد از پیری آزمایشگاهی و قرار گرفتن در معرض محیط میدانی (۶۰)

Table 10: Scribe creep in mm for the splash zone coating system before and after laboratory aging and field exposure (60).

Ref.	Cyclic Aging (mm)	Immersion Aging (mm)	Field Exposure (mm)
S1	14.01	0.30	3.09
S2-GF	15.67	0.17	5.20
S3-GF	15.90	0.17	6.06
S4	12.79	0.13	3.19

نسبتاً سازگار بود و عملکرد نسبی پوشش مشابه بود. شکل ۱۰ اب داده‌های نفوذ خوردگی پس از پیری غوطه‌وری در مقابل داده‌های قرار گرفتن در معرض میدانی است.

### ۳-۳-۳- منطقه غوطه‌وری

قدرت چسبندگی سیستم‌های پوشش برای منطقه غوطه‌ور در جدول ۱۱ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. سیستم‌های I1 و I2-GF کاهش قدرت چسبندگی را پس از ۴۲۰۰ ساعت غوطه‌وری نشان دادند، در حالی که I3 و I4 بهبود را در سطح چسبندگی نشان دادند. نتایج میدانی کاهش اندکی در استحکام چسبندگی در سیستم I3 و I4 و کاهش بسیار قابل توجهی در سیستم I1 (بیش از ۵۵٪، شکل ۱۱ ب) نشان داد در حالی که I2-GF بهبود جزئی را نشان داد. جالب توجه است، در چندین سیستم، تغییر در حالت شکست به نوع نامطلوب A/B مشاهده شد. با این حال، علی‌رغم حالت شکست A/B، قدرت چسبندگی اولیه و مقادیر پس از پیری سریع در مورد I1 با استاندارد مطابقت دارد.

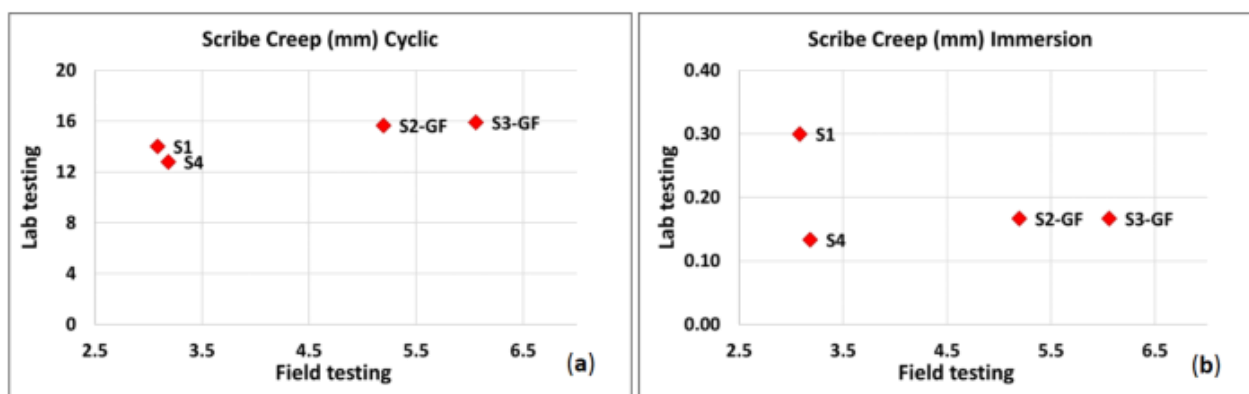
این نتیجه به این معنی است که هیچ یک از پوشش‌ها نمی‌توانند برای این کاربرد مناسب باشند. از سوی دیگر، نفوذ خوردگی پس از آزمایش غوطه‌وری حدود ۰/۳ میلی‌متر بود که در مقایسه با داده‌های پیری چرخه‌ای عملاً ناچیز است. نتایج پس از قرار گرفتن در معرض محیط میدانی بین مقادیر دو نوع پیری آزمایشگاهی بود، اما تفاوت بین آزمون غوطه‌وری و قرار گرفتن در معرض میدان بسیار قابل توجه بود و برای مورد S3-GF به ۳۵ رسید. علاوه بر این، بیشترین نفوذ خوردگی برای سیستم‌های S2-GF و S3-GF ثبت شد که همچنین سیستم‌هایی با بالاترین DFT اندازه‌گیری شده بودند. بر اساس تجربه قبلی با پوشش‌های حاوی GF، دلیل نفوذ خوردگی بیشتر ممکن به این خاطر است که افزودنی GF در پوشش دارای حالت شکستگی خاصی است که کانال‌های باز را در لایه پوشش می‌گذارد که سیستم را در برابر نفوذ خوردگی آسیب‌پذیرتر می‌کند، زیرا کانال‌ها به محیط اجازه می‌دهند تا به راحتی به لایه پوشش زیر خط نفوذ کند (۶۰). همبستگی مقادیر به‌دست‌آمده پس از پیری چرخه‌ای و قرار گرفتن در معرض میدان (شکل ۱۰ الف) نشان داد که رفتار پوشش‌ها در هر دو آزمایش آزمایشگاهی و قرار گرفتن در معرض آزمون میدانی



جدول ۱۱: قدرت چسبندگی (متوسط) سیستم‌های پوشش برای منطقه غوطه‌ور قبل و بعد از پیری و قرار گرفتن در میدان (۶۰).

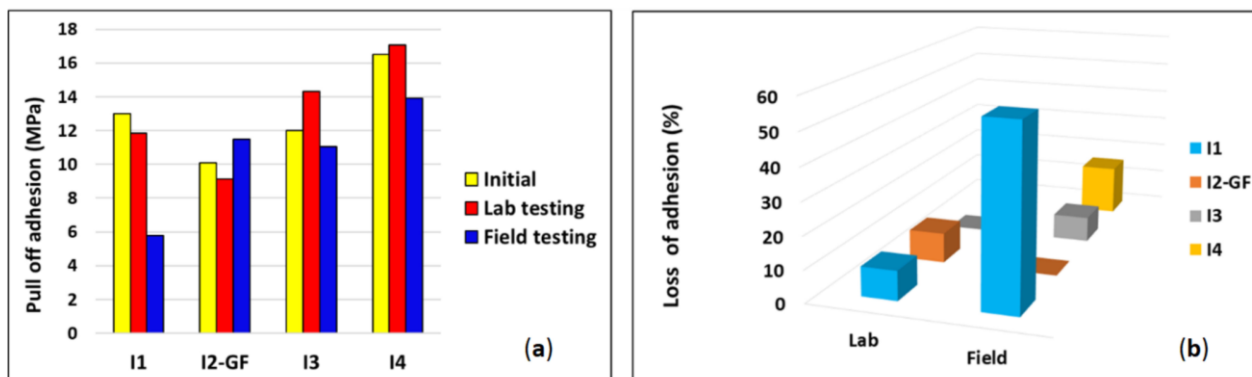
Table 11. Adhesion strength (average) of the coating systems for the submerged zone before and after aging and field exposure (60).

Ref.	Initial		Immersion Aging (4200 h)		Field Exposure (1 Year)	
	Fracture Mode	Adhesion (MPa)	Fracture Mode	Adhesion (MPa)	Fracture Mode	Adhesion (MPa)
I1	65% C, 35% C/Y	13.02	45% A/B, 35% C/Y, 20% C	11.83	65% A/B, 35 C	5.77
I2-GF	100% C	10.09	85% C, 15% C/Y	9.15	50% B, 25% C, 25% B/C	11.50
I3	86% B, 14% C	12.01	73% B, 27% C	14.30	50% B, 50% C	11.07
I4	45% B, 40% C, 5% C/Y	16.52	38% B, 35% C/Y, 7% B/C, 7% Y/Z, 7% Y	17.08	55% B, 35% C, 10% B/C	13.94



شکل ۱۰: نفوذ خوردگی پس از پیری تسریع شده، (الف) چرخه ای، (ب) غوطه‌وری، که به عنوان تابعی از نفوذ خوردگی پس از قرار گرفتن در معرض شرایط میدانی ترسیم شده است (۶۰).

Figure 10. Scribe creep after accelerated aging, (a) cyclic, (b) immersion, plotted as a function of scribe creep after field exposure (60)



شکل ۱۱: (الف) قدرت چسبندگی پوشش‌ها برای ناحیه غوطه‌ور قبل و بعد از پیری آزمایشگاهی و قرار گرفتن در معرض آزمون میدانی. (ب) از دست دادن چسبندگی سیستم‌های پوشش پس از پیری و قرار گرفتن در معرض آزمون میدانی (۶۰)

Figure 11: (a) Pull-off adhesion strength of the coatings for the submerged zone before and after laboratory aging and field exposure. (b) Loss of adhesion of the coating systems after aging and field exposure (60)

مشاهده می‌شود، پیری غوطه‌وری تسریع شده نفوذ خوردگی بسیار محدودی ایجاد می‌کند. با این حال، هنگام تجزیه و تحلیل نتایج ثبت

نفوذ خوردگی پس از پیری غوطه‌وری و قرار گرفتن در معرض شرایط میدانی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که

پذیرش صنعتی پوشش‌های ضد رسوب معمولی را محدود می‌کند و چالش اصلی را برای تازه واردان به این بازار ایجاد می‌کند. استفاده صنعتی از پوشش‌های نانو ساختار ممکن است راهی برای حل مشکلات موجود باشد. به طور کلی تصور می‌شود که پوشش‌های جدید و پیشرفته نانو ساختار بر برخی از موانع پیش روی پوشش‌های سنتی غلبه می‌کنند (۶۹). ویژگی قابل توجه نانو ساختارها این است که ممکن است عملکرد پوشش را با پیوند دادن چیزها به یکدیگر، مانند استحکام مکانیکی و خواص ضد رسوب، بهبود بخشند و پتانسیل را برای کاربردهای مختلف باز کنند. برخی از مواد جدید در مرحله آزمایشگاهی باقی می‌مانند، زیرا درک درستی از رفتار آنها وجود ندارد. بنابراین، توصیف سیستم‌های پوشش جدید برای ارزیابی خطرات بالقوه آنها ضروری است. به طور کلی، سه دسته اصلی از پوشش‌های ضد رسوب در بازار وجود دارد که سیستم‌های انرژی سطح پایین را ارائه می‌کنند: فلوروپلیمرها، پلی سیلوکسیلان‌ها و مواد هیبریدی معدنی-آلی (۶۹).

#### ۵-۱- فلوروپلیمرها

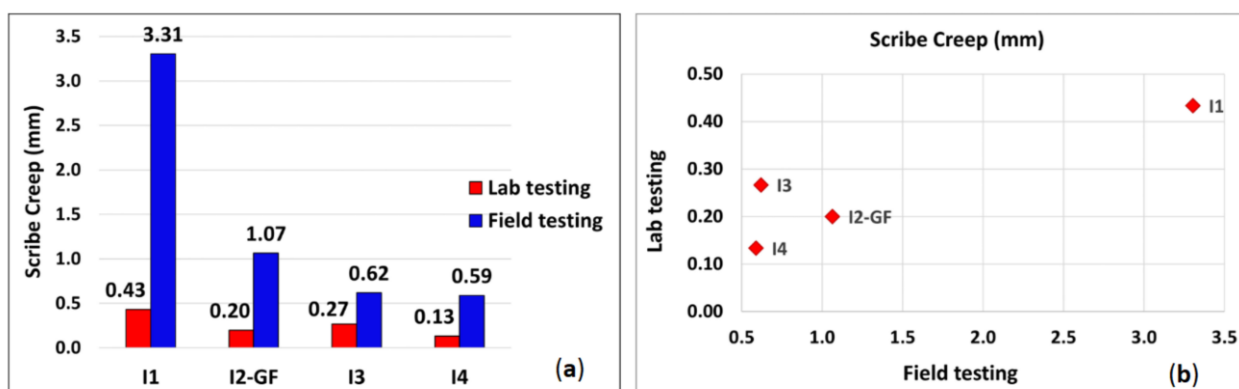
فناوری غالب پوشش‌های کم انرژی بر پایه فلوروپلیمرها است. با این حال، به دلیل نگرانی در مورد ایمنی آنها، احتمالاً در آینده محدود خواهد شد. نگرانی در مورد تأثیر زیست‌محیطی و سلامت انسان بلوک‌های ساختمانی اساسی فلوروپلیمرها با زنجیره بلند، مانند سولفونات پرفلوروکتان و اسید پرفلوروکتانویک، تولیدکنندگان را مجبور کرده است که به دنبال جایگزینی برای این خانواده از مواد باشند. فلوروپلیمرها پوشش‌های شیمیایی پایداری ارائه می‌دهند اما، متأسفانه، دوام آنها اغلب ضعیف است.

شده پس از قرار گرفتن در معرض میدان، نفوذ بالاتر و، در برخی موارد، مانند مورد سیستم I1، بیش از هفت برابر بیشتر مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که پیری غوطه‌وری تسریع شده به نظر نمی‌رسد نماینده سیستم‌های پوشش در این مطالعه باشد. همبستگی بین عملکرد آزمایشگاهی و میدانی (شکل ۱۲ ب) ساده نیست، اما سیستم با بدترین عملکرد در آزمایشگاه نیز بدترین نتایج را در شرایط میدانی نشان داد.

#### ۵- به کارگیری نسل نوین پوشش‌ها برای نیروگاه‌های بادی دریایی

اعتقاد بر این است که توسعه پوشش‌های جدید، بادوام، با انرژی سطح پایین با خواص ضد رسوب و اصطکاک کم، جهت امیدوارکننده‌ای برای تحقیقات در زمینه حمل‌ونقل، ساخت و ساز و تولید برق است. رسوب‌گیری یک مشکل رایج در بسیاری از بخش‌های صنعتی است. این تجمع مواد ناخواسته (یخ، حشرات، جلبک‌ها و غیره) روی سطح جامد است که باعث اختلال در کارایی عملیاتی می‌شود. به عنوان مثال، ادعا شده است که فرسایش سطح هواپیما در طول پروازهای معمول باعث افزایش مصرف سوخت و انتشار CO<sub>2</sub> تا ۵٪ می‌شود (۶۵). رسوب در بدنه کشتی‌ها منجر به مصرف ۴۰ درصد سوخت بیشتر می‌شود (۶۶). تجمع یخ می‌تواند بر عملکرد توربین بادی تأثیر بگذارد، تولید برق را کاهش دهد و در شرایط شدید باعث خرابی‌های ساختاری شود. به طور کلی، توقف توربین‌های بادی به دلیل رسوب پره‌ها باعث از دست رفتن درآمد سالانه ۷۲ میلیون یورو در سراسر اتحادیه اروپا می‌شود (۶۸، ۶۷).

پوشش‌های ضد رسوب معمولی مانند فلوروپلیمرها، پلی سیلوکسان‌ها نیازهای بازار را برآورده نمی‌کنند. دوام مکانیکی کم،



شکل ۱۲: (الف) نفوذ خوردگی سیستم‌های پوشش منطقه غوطه‌ور پس از پیری تسریع شده و آزمایش میدانی. (ب) نفوذ خوردگی پس از پیری تسریع شده به عنوان نفوذ خوردگی پس از قرار گرفتن در معرض شرایط میدانی (۶۰)

Figure 12: (a) Scribe creep of the submerged zone coating systems after accelerated aging and field testing. (b) Scribe creep after accelerated aging plotted as a function of scribe creep after field exposure. (60)

اشعه ماوراء بنفش و چسبندگی ضعیف با زیرآیندهای فلزی (۷۳، ۷۴). استفاده از نانو اکسیدها و سایر ترکیبات با ساختار نانو برای اصلاح رزین اپوکسی، پلی یورتان و سایر پلیمرهای آلی بسیار موثر است (۷۵، ۷۶). در میان بسیاری از نانو اکسیدها، اکسید تیتانیم با اندازه نانو برای پوشش‌های محافظ در برابر خوردگی بسیار مناسب است (۷۷-۷۹). اول از همه، اوربیتال نیمه‌پر تیتانیم می‌تواند پیوند کووالانسی قوی با لیگاندهای آلی ایجاد کند و مواد هیبریدی آلی-معدنی بسیار پایدار را در شرایط ملایم تشکیل دهد که عملکرد و پایداری برتر آن در بسیاری از انواع دیگر سیستم‌های مواد هیبریدی مانند MOF (۸۱، ۸۰) و غیره تأیید شده است (۸۲). تیتانیم اکسید دارای سختی بالا، مقاومت در برابر آب و هوای خوب، ضریب شکست بالا، مقاومت در برابر پرتو فرابنفش قوی، فتوکاتالیزور، خواص ضد باکتریایی و غیره است که این خواص در اثر هیبرید شدن با ترکیبات آلی حفظ خواهد شد (۸۳، ۸۴). انرژی پیوند پیوند Ti-O برابر ۶۶۲ کیلوژول بر مول است که از انرژی پیوند Si-O ۴۴۳/۷ کیلوژول بر مول بیشتر است. همچنین این ترکیب می‌تواند پیوند کووالانسی پایدارتری با اجزای آلی ایجاد کند و انرژی‌های پیوند بالاتر می‌تواند پوشش هیبریدی مبتنی بر تیتانیم را پایدارتر کند (۸۵). در همین حال، تعداد زیادی از مکان‌های فعال گروه‌های هیدروکسیل تیتانیم در پوشش هیبریدی می‌توانند با گروه‌های هیدروژن بستر فلزی مترکم شوند و پیوندهای کووالانسی تشکیل دهند که می‌تواند به طور قابل توجهی چسبندگی پوشش را بر روی سطح بستر بهبود بخشد (۸۶). علاوه بر این، گروه‌های عاملی مختلف با جهت‌گیری قوی را می‌توان به جز آلی معرفی کرد. این گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل، مرکاپتو، کربوکسیل، فسفونو و غیره می‌توانند با زیرآیندهای فلزی پیوند برقرار کنند تا چسبندگی بین پوشش‌ها و بسترها را بهبود بخشند. مواد پوشش هیبریدی اصلاح شده توسط نانو اکسید تیتانیم برای محیط با دمای بالا، نمک زیاد و محیط‌های فرابنفش قوی مناسب‌تر است. نانوذرات تیتانیم اکسید همچنین می‌توانند خواص رئولوژیکی، استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر ضربه پوشش‌ها را بهبود بخشند، که باعث می‌شود از مواد پوششی در حفاظت در برابر خوردگی که به طور متناوب تحت وضعیت مرطوب و خشک هستند، استفاده شود. علاوه بر این، نانو اکسید تیتانیم عملکرد حفاظت فوتوکاتدی<sup>۱</sup> را نیز دارد که می‌تواند برای پوشش محافظ برج بادی ساحلی استفاده شود. در مقایسه با فناوری حفاظت از آند فداشونده، فیلم نیمه‌هادی می‌تواند بدون آسیب به یک پوشش محافظ دائمی تبدیل شود (۸۷). در مقایسه با فناوری حفاظت کاتدی فعلی، انرژی مصرف شده در این روش نور خورشید است. مجموعه‌ای

علاوه بر این، تجاری‌سازی پوشش‌های فلوروپلیمری به دلیل قیمت بالای آنها محدود شده است. شناخته‌شده‌ترین پوشش‌های فلئوئوردار با کارایی بالا بیش از ۱۰۰۰ یورو در لیتر قیمت دارند (۶۹).

#### ۵-۲- پلی سیلوکسان‌ها

در سال‌های اخیر، توسعه و موفقیت پلی سیلوکسان‌ها از نیاز بازار به پوشش‌های ترکیبات آلی کم فرار (VOC) نشأت گرفته است. به دلیل پیوند قوی سیلیکون-اکسیژن، پوشش‌های مبتنی بر سیلوکسان به طور قابل توجهی مقاومت در برابر پرتو فرابنفش، گرما، مواد شیمیایی و اکسیداسیون را بهبود می‌بخشند. این پوشش‌ها در بسیاری از کاربردها، مانند ساخت و ساز و زمینه‌های دریایی استفاده می‌شوند. با این وجود، محدودیت‌های آن‌ها را می‌توان به‌عنوان ویژگی‌های ضدرسوب ضعیف خلاصه کرد (۷۰).

#### ۵-۳- پوشش‌های هیبریدهای معدنی-آلی (OHIC)

علاقه به این پوشش‌ها به رشد خود ادامه داده است و تولیدکنندگان پوشش و دانشگاه‌ها در دهه گذشته تأکید بیشتری بر تحقیقات هیبریدهای معدنی-آلی داشته‌اند. امکان ترکیب ویژگی‌های غیرآلی و آلی مسیرهای جدیدی را در فناوری گشوده است. به طور کلی، از این مواد برای بهبود خواص انرژی سطح و همچنین پایداری دما، مقاومت شیمیایی و مکانیکی استفاده شده است (۷۱). افزودن نانوذرات معدنی مختلف به یک پوشش موجود، یکی از امکان‌های مناسب برای طراحی پوشش و دستیابی به برخی از خواص مطلوب است. در حال حاضر، اقدامات حفاظتی در برابر خوردگی OWPDها عمدتاً از تجربه حفاظت در برابر خوردگی سکوه‌های نفتی دریایی، یخ شکن‌ها و خطوط لوله زیردریایی ناشی می‌شود؛ در حالی که تحقیقات در مورد خوردگی و حفاظت از نیروی باد دریایی بسیار کم است (۷۲). تحقیقات در مورد خوردگی و حفاظت از نیروگاه بادی دریایی در ترکیب با تحقیقات نظری و پیشینه مهندسی تولید برق بادی، به یک موضوع تحقیقاتی مهم تبدیل شده است. کار آینده OHICها ممکن است بر روی طراحی مواد پوشش هیبریدی جدید در سطح مولکولی از طریق مطالعه عمیق رابطه ساختار-ویژگی مواد متمرکز شود، که می‌تواند اساساً اشکالات باقی مانده را برطرف کند. در اینجا به نمونه‌ای از کاربردهای پوشش‌های هیبریدی آلی معدنی پرداخته می‌شود (۷۳-۸۷).

#### ۵-۳-۱- پوشش‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی آلی-معدنی

اصلاح شده در برابر خوردگی و فرسایش اصلاح شده مشکلات زیادی در پوشش‌های فعلی محافظ در برابر خوردگی شدید وجود دارد، مانند خواص مکانیکی ضعیف، مقاومت ضعیف در برابر

<sup>۱</sup> حفاظت فوتوکاتدی (PCP) نوعی CP است که از انرژی خورشیدی به عنوان تامین‌کننده انرژی به جای جریان مستقیم یا مواد آند قربانی استفاده می‌کند.

می‌دهند. اثر بخشی افزودن پرکننده به شدت تحت تأثیر جنبه‌های متعدد پرکننده‌ها مانند اندازه و شکل ذرات، پراکندگی پرکننده، سطح، ساختار ذرات و پیوند اجزا است.

اخیراً، پتاک<sup>۲</sup> و همکارانش، در دو مطالعه جداگانه، پوشش‌های پلی یورتان پایه آبی مبتنی بر سلولز و اکسید سرامیک را برای محافظت از پره‌های توربین بادی در برابر فرسایش ذرات جامد با استفاده از روش پوشش‌دهی پاششی توسعه دادند (۹۴). در یک مطالعه مهم، نانوذرات  $Al_2O_3$ ،  $ZrO_2$  و  $CeO_2$  سنتز شده با روش سنتز احتراق محلول به عنوان پرکننده در سه غلظت وزنی مختلف (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی) استفاده شدند (۹۵). در مطالعه دیگری، میکروذرات سلولز (CMP) و میکروالیاف سلولز (CMF) در سه غلظت مختلف (۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) برای تقویت پلی یورتان مبتنی بر آب استفاده شدند. در آزمایش‌های فرسایش ذرات جامد، همه پوشش‌ها سازوکار انعطاف‌پذیری با بیشینه تلفات مواد در زاویه برخورد ۳۰ را نشان دادند. شکل ۱۴ عملکرد فرسایش ذرات جامد پوشش‌های پلی یورتان تقویت شده با اکسید سربا را برای ۳۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. مطالعات فرسایش ذرات جامد پوشش‌های اکسید سرامیک- پلی یورتان نشان داد که پوشش‌های تقویت شده با اکسید سرامیکی بهتر از زیرآیندهای پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه‌ای (GFRP) و پلی یورتان اصلاح‌نشده عمل می‌کنند (۹۵).

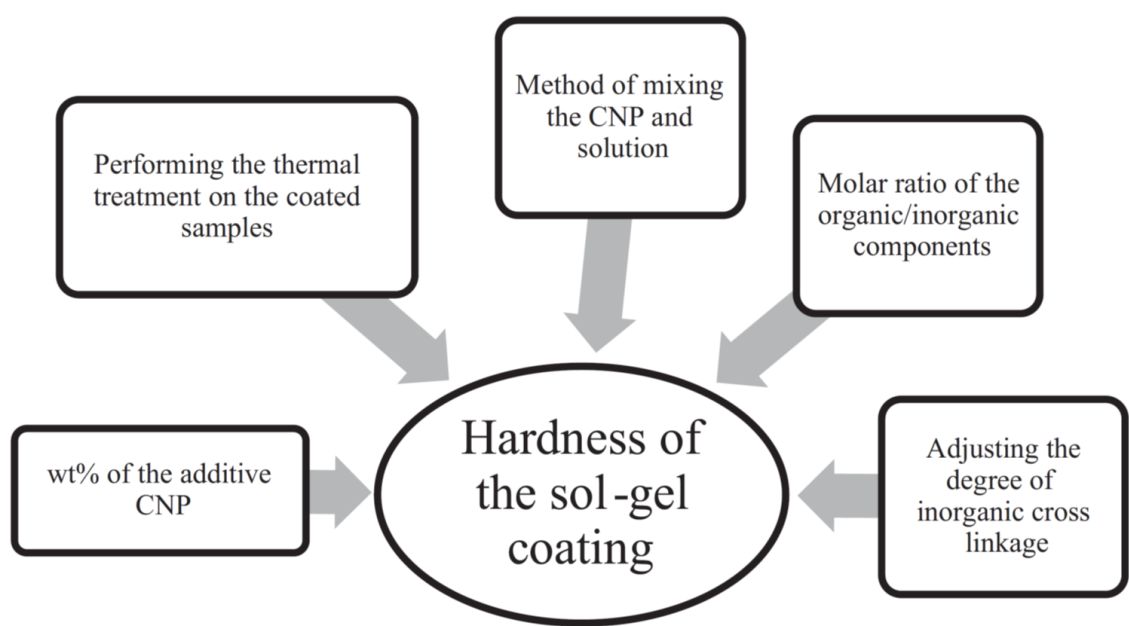
<sup>1</sup> nanoindentation

<sup>2</sup> Pathak

از خواص عالی، مواد هیبریدی مبتنی بر تیتانیم را کاندیدای ایده‌آل برای مواد پوشش محافظ خوردگی دریایی می‌کند، که برای محیط‌های خشن در دریا مناسب‌تر هستند. انتظار می‌رود که آنها جایگزین مواد هیبریدی مبتنی بر سیلیکون فعلی شوند و به نسل بعدی مواد محافظ خوردگی هیبریدی با کارایی بالا برای OWPD تبدیل شوند. افزایش سختی پوشش باعث دوام بیشتر آن تحت بارگذاری ضربه توسط قطرات باران و ذرات شن و ریزگردها می‌شود (۸۸، ۸۹). شکل ۱۳ عوامل اصلی را نشان می‌دهد که بر سختی پوشش مشتق شده از سل-ژل تأثیر می‌گذارد (۹۰).

مطالعات مختلف نشان داد که افزودن CNPها، به ویژه CNTها و گرافن‌ها در ساختار پوشش، مقاومت در برابر فرسایش پوشش را تا حد زیادی افزایش می‌دهد (۹۱، ۹۲). با این حال، عملکرد مناسب CNPها به پراکندگی موثر آنها در زمینه بستگی که به طور مثبت بر خواص پوشش تأثیر می‌گذارد (۹۳). آزمایش مکانیکی مربوط به ایجاد یک پوشش مناسب شامل آزمون‌های کشش، چسبندگی و نانو دندانه‌گذاری<sup>۱</sup> پوشش است.

به طور کلی، نانوکامپوزیت‌های هیبریدی آلی و معدنی استحکام، دوام، سهولت ساخت و هزینه کم را ارائه می‌دهند. در این نانوکامپوزیت‌ها، پرکننده‌ها به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها برای تغییر و بهبود ویژگی‌های مکانیکی آنها استفاده می‌شوند. برای تقویت کامپوزیت از ذرات پرکننده در اندازه میکرو و نانو استفاده می‌شود. همچنین قرار دادن الیاف به بستر پلیمری خواص مکانیکی را افزایش می‌دهد، در حالی که ذرات پرکننده مدول را افزایش

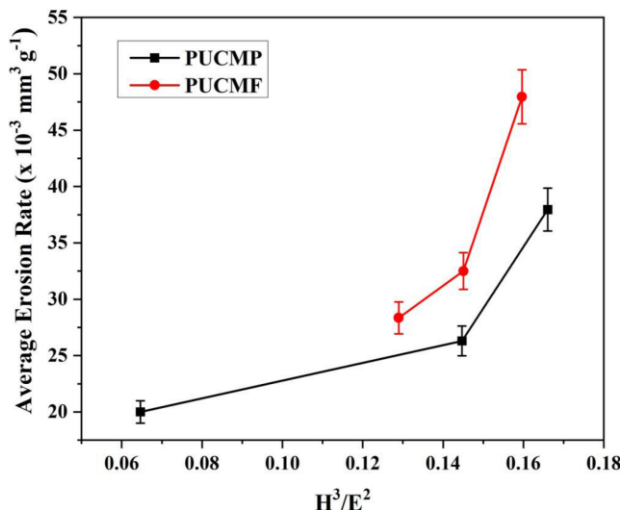


شکل ۱۳: عوامل اصلی که بر سختی پوشش مشتق شده از سل-ژل تأثیر دارند (۹۰).

Figure 13: Main parameters that affect the hardness of the sol-gel-derived coating (90).

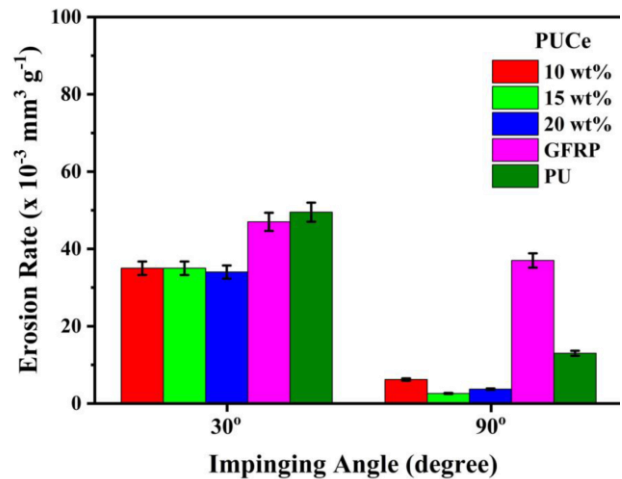
بیشینه عمق را ۸ درصد کاهش داد. برای پوشش‌های چندلایه، پوشش گرافن IA-700 با روکش PU کمترین تلفات مواد را در زاویه ضربه معمولی، با کاهش ۱۵ درصدی، ایجاد کرد. با این حال، پوشش دولایه PU، ۳۸ درصد کمتر از PU تک‌لایه از دست دادن مواد را نشان داد (۹۴).

به طور خلاصه پوشش‌های پایه پلی یورتان به دلیل استحکام مکانیکی، میرایی طولانی‌مدت، خاصیت ارتجاعی، پایداری حرارتی، مقاومت شیمیایی و ماهیت سمی کم، از جمله پوشش‌هایی هستند که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند. موادی مانند  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{TiO}_2$  و مواد کربنی در مقیاس نانو مانند CNT، CNF و گرافن به عنوان مواد پرکننده استفاده شده‌اند. با این حال، کارهای تحقیق و توسعه برای توسعه پوشش‌های مقاوم در برابر فرسایش باران ادامه دارد که طول عمر بیشتری را برای پره توربین فراهم می‌کند و سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه است و به راحتی قابل استفاده است. اخیراً، پوشش‌های توسعه‌یافته با نانوذرات  $\text{ZrO}_2$  و  $\text{CeO}_2$  در زمینه پلی یورتان پایه آب، خواص مقاومت در برابر فرسایش ذرات جامد بسیار خوبی را برای فرسایش پره‌های توربین بادی نشان می‌دهند. عملکرد فرسایش ذرات جامد کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، اکسیدها و کاربیدهای مختلف نیز در این بررسی برجسته شده است. اگرچه برای پوشش‌های پره‌های توربین بادی استفاده نمی‌شوند، با این حال این کامپوزیت‌ها می‌توانند نامزدهای بالقوه‌ای برای پوشش‌های محافظ فرسایش ذرات جامد برای پره‌های توربین بادی باشند. کار انجام شده بر روی فرسایش ذرات جامد کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با پرکننده به طور خلاصه در جدول ۱۲ فهرست شده است (۹۷-۱۰۵).



شکل ۱۵: نمودار  $H^3/E^2$  در مقابل میانگین نرخ فرسایش پوشش‌های PU-سلولزی (۹۴).

Figure 15:  $H^3/E^2$  vs. average erosion rate plots of PU-cellulose coatings (94).



شکل ۱۴: عملکرد فرسایش ذرات جامد پوشش‌های PU-Ceria برای غلظت‌های مختلف پرکننده در زوایای برخورد ۳۰ و ۹۰ (۹۵).

Figure 14: Solid particle erosion performances of PU-ceria coatings for different filler concentrations at 30 and 90° impinging angles (95)

مقاومت در برابر فرسایش ذرات جامد بهتر در PU-Zr به میزان ۲۰ درصد وزنی و PU-Ce به میزان ۱۵ درصد وزنی مشاهده شد. میانگین نرخ فرسایش پوشش‌های پلی یورتان-اکسید سرامیک ۲۰ تا ۴۰ درصد کمتر از پوشش PU و ۴۰ تا ۵۵ درصد کمتر از GFRP بود. مطالعات فرسایش ذرات جامد پوشش‌های سلولز-PU نشان داد که پوشش‌هایی با غلظت ۵ درصد وزنی CMP و غلظت ۲ درصد وزنی CMF بهترین عملکرد را در بین همه پوشش‌های دیگر داشتند. همه پوشش‌ها ۲۰ تا ۴۰ درصد نرخ فرسایش کمتر نسبت به PU و ۳۰ تا ۵۰ درصد کمتر در مقایسه با GFRP نشان دادند. مطالعات فیزیکوشیمیایی و فرسایش ذرات جامد تأیید کرد که ریخت‌شناسی پرکننده‌ها بر غلظت‌های بحرانی پرکننده تأثیر می‌گذارد. از آزمایش‌های نانو دنداندار شدن، مشاهده شد که مقادیر سختی پوشش‌ها در محدوده ۱۹ تا ۴۳ مگاپاسکال بود، در حالی که مقادیر مدول الاستیک بین ۳۴۰ و ۷۵۰ مگاپاسکال بود. شکل ۱۵ نرخ فرسایش  $H^3/E^2$  را در مقابل میانگین نرخ فرسایش پوشش‌های تقویت شده با سلولز نشان می‌دهد، که در آن H و E به ترتیب سختی و مدول الاستیک هستند. همبستگی بین  $H^3/E^2$  و نرخ فرسایش متوسط منجر به این نتیجه شد که پوشش‌هایی با مقادیر  $H^3/E^2$  پایین‌تر، میانگین نرخ فرسایش کمتری را نشان می‌دهند (۹۴). الجمی<sup>۱</sup> رفتار فرسایش ذرات جامد پوشش‌های تک لایه و چندلایه مبتنی بر گرافن را بر روی بستر GFRP مطالعه کردند (۹۶). در مورد پوشش‌های تک لایه، بهترین عملکرد مقاومت در برابر فرسایش با پوشش گرافن H-146 به دست آمد که حذف مواد را ۱۹ درصد و

<sup>1</sup> Alajmi

جدول ۱۲: فهرست کامپوزیت‌ها و عملکرد آنها در برابر فرسایش ذرات جامد.

Table 12: List of composites and their performances against solid particle erosion.

Composite	Erodent	Impinging angle (°)	Impinging velocity (m s <sup>-1</sup> )	Outcome of the study	Reference
Epoxy resin reinforced with bagasse fiber in 3 different concentrations Filler concentration: 10, 15, and 20wt.%	Silica sand	30, 45, 60, 90	48, 70, 82, 109	Maximum erosion occurred at 90° impinging angle which exhibited brittle behavior	(97)
Epoxy resin reinforced with jute fiber and filled with silicon carbide (SiC) particulates Fiber concentration: 20, 30, and 40wt.% Filler concentration: 10 and 20wt.%	Silica sand	30, 45, 60, 75, 90	32	Presence of particulate fillers improved erosion wear resistance	(98)
Epoxy resin reinforced with bi-directional glass fiber and blast furnace slag particulates Filler concentration: 10, 20, and 30wt.%	Alumina	30, 45, 60, 90	32, 40, 48, 56	10wt.% filler content was found to be optimum for erosion resistance	(99)
Coir fiber-reinforced epoxy composites filled with Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> filler Fiber concentration: 5, 10, 15, and 20wt.% Filler concentration: 10wt.%	Silica sand	30, 45, 60, 75, 90	48, 70, 82, 109	Semi-brittle behavior of solid particle impact was observed by Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -filled composite with impinging angle of 75°	(100)
Bamboo mat-glass-epoxy hybrid composites filled with TiO <sub>2</sub> and ZrO <sub>2</sub> Filler concentration: 3, 6, and 9wt.%	Silica sand	30, 45, 60, 90	48, 82	GBBG laminate composite with 6wt.% ZrO <sub>2</sub> showed improved erosion resistance	(101)
Sugarcane bagasse fiber-reinforced epoxy composites Filler concentration: 10, 20, and 30wt.%	Silica sand	30, 60, 90	30, 50, 70	Erosive wear rate was observed to be proportional to fiber loading and impinging velocity	(102)
Carbon black-reinforced epoxy Filler concentration: 1, 3, and 5wt.%	Silica sand	30, 45, 60	109	With increasing filler content erosion behavior changed from ductile to semi ductile	(103)
Glass fiber epoxy filled with silica fume and zinc oxide Filler concentration: 8 and 16wt.%	Silica sand	20, 30, 45, 60, 90	70, 100, 150, 200	Silica fumes improved solid particle erosion performance, whereas zinc oxide adversely affected the erosion wear resistance of the composites	(104)
Nanoclay-reinforced glass fiber epoxy composite Filler concentration: 1 and 3wt.%	Alumina	30, 60, 90	23, 34	Nanoclay addition decreased the erosion resistance properties of composites	(105)

چالش‌های دیگری که در راه توسعه نیروگاه‌های بادی در ایران وجود دارد، عدم وجود زیرساخت‌های لازم برای انتقال برق تولیدی به شبکه برق است. در بسیاری از مناطق کشور، شبکه برق قدیمی و ضعیف است و نمی‌تواند برق تولیدی از نیروگاه‌های بادی را به صورت کامل دریافت کند. به همین دلیل، برای توسعه نیروگاه‌های بادی، باید به بهبود زیرساخت‌های شبکه برق نیز توجه شود. یکی از چالش‌های دیگری که در راه توسعه نیروگاه‌های بادی در ایران وجود دارد، عدم توجه به مسائل زیست‌محیطی است. در بسیاری از نیروگاه‌های بادی در ایران، تأمین انرژی برق از این نیروگاه‌ها به مسائل محیطی نظیر اختلاط با زمین‌های کشاورزی، تغییرات در زیستگاه‌های جانوری و تأثیر بر روی مناظر طبیعی مناطق اطراف، منجر می‌شود. به همین دلیل، باید بهترین روش‌های ممکن برای

## ۶- چشم انداز نیروگاه‌های بادی در ایران

نیروگاه‌های بادی در ایران، به دلیل وجود مناطقی با باد قوی و نیز توسعه منابع انرژی پاک، در سال‌های اخیر به طور قابل توجهی گسترش یافته‌اند. با توجه به وجود مناطقی با باد قوی در ایران، نیروگاه‌های بادی در کشور به دلیل هزینه تولیدی پایین، به عنوان یکی از منابع انرژی پاک و اقتصادی شناخته می‌شوند. برای نمونه، در استان سیستان و بلوچستان، استان خراسان رضوی و استان فارس، نیروگاه‌های بادی به تعداد زیادی وجود دارند. یکی از چالش‌هایی که در راه توسعه نیروگاه‌های بادی در ایران وجود دارد، عدم توانایی در تولید تجهیزات مورد نیاز برای این نیروگاه‌ها است. در حال حاضر، بیشتر تجهیزات مورد نیاز برای نیروگاه‌های بادی به صورت وارداتی تأمین می‌شوند که باعث افزایش هزینه تولید برق می‌شود. یکی از

فرسایش برای محافظت از پره‌های توربین بادی در برابر اثرات محیطی استفاده می‌شود. مطلوب است که نسل جدیدی از پوشش‌های مقرون به صرفه، بادوام و آسان برای اعمال ایجاد شود. در نهایت پوشش جدید برای OWPD ها باید مزایای بیشتری نسبت به پوشش‌های موجود داشته باشد، مانند:

- پوشش لایه نازک: اثرات ناچیز بر وزن پره‌ها دارد.
- خواص چند منظوره: مقاوم در برابر فرسایش، خوردگی، سایش، یخ‌زدایی و انعطاف‌پذیری هم‌زمان.
- دمای کمتر مورد نیاز برای فرآیند پخت: پوشش باید بتواند در دمای اتاق یا دمای پایین پخت شود تا مصرف انرژی فرآیند پخت کاهش یابد.
- سازگار با محیط‌زیست: با استفاده از ترکیبات آلی در ساختار پوشش قابل دستیابی است.
- خواص مکانیکی مطلوب: استحکام کششی و انعطاف‌پذیری بالا، چسبندگی خوب به زیرلایه و خواص شیمیایی پایدار که با استفاده از نانوذرات پرکننده در ساختار پوشش قابل دستیابی است.

#### تشکر و قدردانی

از راهنمایی و مشاوره‌های دکتر علیمراد رشیدی، عضو هیات علمی گروه کربن و فناوری نانو پژوهشگاه صنعت نفت قدردانی می‌شود.

#### تعارض منافع

در این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

ساخت، نصب و بهره‌برداری از نیروگاه‌های بادی را در نظر گرفت تا به بهترین شکل ممکن از این منابع انرژی استفاده شود. مطالعات نشان می‌دهد که نزدیک به ۱۵۰۰۰ مگاوات، ظرفیت تولید برق از نیروگاه بادی در ایران تخمین زده می‌شود. با توجه به وضعیت تولید برق بادی در ایران به طور میانگین ضریب تولید نیروگاه‌های بادی کشور حدود ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است. توسعه ۱۰۰۰ نیروگاه‌های بادی در منطقه شرق کشور علاوه بر جبران ناترازی برق بدون اتکا به منابع گازی می‌تواند زمینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور را ۲ برابر کرده و سهم این انرژی در سبد سوخت نیروگاهی را از ۱ درصد به ۲ درصد ارتقا دهد. طبیعتاً چنین تقاضایی علاوه بر نکات مثبت موجود در حوزه صنعت برق می‌تواند به ارتقای فناوری ساخت نیروگاه‌های بادی در کشور منجر شود و شرکت‌های پیشرو در این حوزه با پیشرفت قابل ملاحظه‌ای به رقابت بپردازند. از سوی دیگر ساخت نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی برق در هر سال از مصرف انرژی فسیلی معادل ۷/۸ میلیون بشکه نفت در سال جلوگیری کرده و با در نظر گرفتن قیمت نفت کنونی معادل هر بشکه ۷۵ دلار، ظرف کمتر از ۲ سال هزینه سرمایه‌ای ساخت این نیروگاه از محل سوخت صادراتی صرفه‌جویی شده جبران خواهد شد (۱۰۶).

#### ۷- نتیجه‌گیری

با توسعه فناوری نیروگاه بادی دریایی، مواد پوشش هیبریدی با کارایی بالا و چند منظوره تقاضای زیادی خواهند داشت. مواد پوشش هیبریدی آلی- معدنی را می‌توان از نظر شیمیایی اصلاح کرد تا عملکرد آنها را برای ویژگی‌های خوردگی OWPD ها بهبود بخشد. در حال حاضر انواع مختلفی از سیستم‌های حفاظتی در برابر خوردگی و

#### ۸- مراجع

1. Kurbatova T, Perederii T. Global trends in renewable energy development. IEEE. 2020; 1:260-263. <https://doi.org/10.1109/KHPIWEEK51551.2020.9250098>.
2. Mirzaee M, Mohebbi T, Rezakhani D. A Comprehensive review of the corrosion and erosion resistant coating on the fireside in power plant boilers. J. Fara.no. 2023;18(82):73-93. [https://doi.org/10.22034/FARAYAND\\_NO.2023.2001252.1920](https://doi.org/10.22034/FARAYAND_NO.2023.2001252.1920).
3. Ghaiem Hasankhani T, Gharagozlou, M, Allahkaram SR. a review on providing nanocoating based on nanoparticles of zinc oxide on magnesium alloy az31b by plasma electrolytic oxidation method and its corrosion and antibacterial properties. J. Stud. Color world, 2023; 13(4):421-436 (In Persian) <https://doi.org/20.1001.1.22517278.1402.13.4.6.4>
4. Mohammadsadegh A, Gharagozlou M, Allahkaram SRA. Review on improving the corrosion resistance of 316L stainless steel by coating with nanoparticles of chitosan/gelatin using electrophoretic deposition method. J. Stud. Color world, 2023;12(4):327-341. <https://doi.org/20.1001.1.22517278.1401.12.4.3.4>
5. DNV G. DNV-OS-J101—Design of offshore wind turbine structures. DNV GL: Oslo, Norway. 2014.
6. 1-8 I. Paints and Varnishes—Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems. International Organization for Standardization Geneva, Switzerland; 2018.
7. Ivetić Salopek R. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. zbornik radova (gradevinski fakultet sveučilišta u rijeci). 2019;22(1):75-90. <https://doi.org/10.32762/ZR.22.1.5>
8. Black AR, Mathiesen T, Hilbert LR, Corrosion protection of offshore wind foundations. Nace Corr. 2015: Nace.

9. Eom SH, Kim SS, Lee JB. Assessment of anti-corrosion performances of coating systems for corrosion prevention of offshore wind power steel structures. *Coat.* 2020;10(10):970. <https://doi.org/10.3390/COATINGS10100970>.
10. Pélissier K, Le Bozec N, Thierry D, Larché N. Evaluation of the long-term performance of marine and offshore coatings system exposed on a traditional stationary site and an operating ship and its correlation to accelerated test. *Coat.* 2022;12(11):1758. <https://doi.org/10.3390/COATINGS12111758>.
11. Li D, Ho SCM, Song G, Ren L, Li H. A review of damage detection methods for wind turbine blades. *Smart Mater Struct.* 2015;24(3):033001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/3/033001>.
12. Fiore G, Selig MS. Simulation of damage progression on wind turbine blades subject to particle erosion. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting; 2016. <https://doi.org/10.2514/6.2016-0813>.
13. Ciang CC, Lee JR, Bang HJ. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. *Meas Sci Technol.* 2008;19(12):122001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/12/122001>.
14. Mirzaee M, Rezaei Abadchi M, Rashidi A. A review of the application of two-dimensional nanosheets as a reinforcement to increase the corrosion resistance of polymer coatings. *J. Stud. Color world*, 2023;13(2):95-132 (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.22517278.1402.13.2.1.5>.
15. Kardar P, Amini R. Studying the active corrosion inhibition effect of the  $ce^{3+}/2$ -mercaptobenzothiazole loaded nay zeolite/zn-al ldh based containers in a silane coating. *Prog Color Color Coat.* 2022;15(1):1-9. <https://doi.org/10.30509/PCCC.2022.81675>.
16. Evren G, Koşak Söz Ç, Özomay Z, Uzun M, Sönmez S. Effect of the Coating formulation on the barrier properties and final appearance of non-wettable hybrid paper sheets. *Prog Color Color Coat.* 2024;17(3):239-62. <https://doi.org/10.30509/PCCC.2024.167221.1257>
17. Karmouch R, Ross GG. Superhydrophobic wind turbine blade surfaces obtained by a simple deposition of silica nanoparticles embedded in epoxy. *Appl Surf Sci.* 2010;257(3):665-9. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2010.07.041>
18. Hunt BJ, James MI. *Polymer characterisation*: Springer Science & Business Media; 2012.
19. Larsen FM. New lightning qualification test procedure for large wind turbine blades. International Conference on Lightning and Static Electricity (ICLOSE), Blackpool, 2003; <https://doi.org/10.1541/IEEJP ES.129.331>.
20. Ding R, Chen S, Lv J, Zhang W, Zhao X-d, Liu J, et al. Study on graphene modified organic anti-corrosion coatings: A comprehensive review. *J Alloys Compd.* 2019;806:611-35. <https://doi.org/10.1016/J.JALL COM.2019.07.256>.
21. Saparov B, Mitzi DB. Organic-inorganic perovskites: structural versatility for functional materials design. *Chem. Rev.* 2016;116(7):4558-96. <https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.5B00715>.
22. Mirzaee M, Seif A, Rashidi A, Silvestrelli PL, Zhou Z, Pourhashem S, et al. Investigating the effect of PDA/KH550 dual functionalized h-BCN nanosheets and hybridized with ZnO on corrosion and fouling resistance of epoxy coating: Experimental and DFT studies. *J Environ Chem Eng.* 2022;10(6):108746. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.108746>.
23. Mirzaee M, Rashidi A, Seif A, Silvestrelli PL, Pourhashem S, Gohari MS, Duan J. Amino-silane co-functionalized h-BN nanofibers with anti-corrosive function for epoxy coating. *React Funct Polym.* 2022;174:105244. <https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2022.105244>.
24. Fu P, Huang M, Shang Y, Yu N, Zhou HL, Zhang YB, et al. Organic-Inorganic layered and hollow tin bromide perovskite with tunable broadband emission. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2018;10(40):34363-9. <https://doi.org/10.1021/ACSAMI.8B07673>.
25. Mao L, Wu Y, Stoumpos CC, Traore B, Katan C, Even J, et al. Tunable white-light emission in single-cation-templated three-layered 2d perovskites ( $ch_3ch_2nh_3$ )<sub>4</sub>pb<sub>3</sub>br<sub>10-x</sub>cl<sub>x</sub>. *J Am Chem Soc.* 2017;139(34):11956-63. <https://doi.org/10.1021/JACS.7B06143>.
26. Lin K, Xing J, Quan LN, de Arquer FPG, Gong X, Lu J, et al. Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent. *Nature.* 2018;562(7726):245-8. <https://doi.org/10.1038/S41586-018-0575-3>.
27. Quan LN, García de Arquer FP, Sabatini RP, Sargent EH. Perovskites for light emission. *Adv. Mater.* 2018;30(45):1801996. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201801996>.
28. Zvonkina I, Soucek M. Inorganic-organic hybrid coatings: common and new approaches. *Curr Opin Chem Eng.* 2016;11:123-7. [10.1016/J.COCHE.2016.01.008](https://doi.org/10.1016/J.COCHE.2016.01.008)
29. Wen J, Wilkes GL. Organic/inorganic hybrid network materials by the sol-gel approach. *Chem Mater.* 1996;8(8):1667-81. <https://doi.org/10.1021/CM9601143>
30. Momber A, Marquardt T. Protective coatings for offshore wind energy devices (OWEAs): A review. *J. Coat. Technol. Res.* 2018;15(1):13-40. <https://doi.org/10.1007/S11998-017-9979-5>
31. Bilgili M, Yasar A, Simsek E. Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2011;15(2):905-15. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.006>.
32. Liu T, Tavner P, Feng Y, Qiu Y. Review of recent offshore wind power developments in china. *Wind. energy.* 2013;16(5):786-803. <https://doi.org/10.1002/WE.1523>.
33. Hu H, Hu Z, Zhong K, Xu J, Wu P, Zhao Y, Zhang F. Long-term offshore wind power prediction using spatiotemporal kriging: A case study in China's Guangdong Province. *Energy Explor Exploit.* 2020;38(3):703-22. <https://doi.org/10.1177/01445987198893>.
34. Karimirad M, Karimirad M. Combined wave-and wind-power devices. offshore energy structures: for wind power, wave energy and hybrid marine platforms. 2014:105-28. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12175-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12175-8_6).
35. Dong W, Moan T, Gao Z. Fatigue reliability analysis of the jacket support structure for offshore wind turbine considering the effect of corrosion and inspection. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2012;106:11-27. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2012.06.011>.
36. Marzec I, Bobiński J, Tejchman J, Schönngel J. Finite element analysis on failure of reinforced concrete corner in sewage tank under opening bending moment. *Eng Struct* 2021;228:111506. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111506>.
37. Kirchgeorg T, Weinberg I, Hörmig M, Baier R, Schmid M, Brockmeyer B. Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Mar Pollut Bull.*



- 2018;136:257-68. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.08.058>
38. Moghaddam BT, Hamedany AM, Mehmanparast A, Brennan F, Nikbin K, Davies CM. Numerical analysis of pitting corrosion fatigue in floating offshore wind turbine foundations. *Procedia Struct. Integr.* 2019;17:64-71. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2019.08.010>.
  39. Price SJ, Figueira RB. Corrosion protection systems and fatigue corrosion in offshore wind structures: current status and future perspectives. *Coat.* 2017;7(2):25. <https://doi.org/10.3390/COATINGS7020025>.
  40. Adedipe O, Brennan F, Kolios A. Review of corrosion fatigue in offshore structures: Present status and challenges in the offshore wind sector. *Renew Sust Energ Rev.* 2016;61:141-54. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.02.017>.
  41. Wang D, Xu J, Yang J, Zhou S. Preparation and synergistic antifouling effect of self-renewable coatings containing quaternary ammonium-functionalized SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *J Colloid Interface Sci.* 2020;563:261-71. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2019.12.086>.
  42. Han W, Kim J, Kim B. Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines. *Renew Energ.* 2018;115:817-23. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.09.002>.
  43. Castorrini A, Corsini A, Rispoli F, Venturini P, Takizawa K, Tezduyar TE. Computational analysis of wind-turbine blade rain erosion. *Comput Fluids.* 2016;141:175-83. <https://doi.org/10.1016/J.COMPFLUID.2016.08.013>.
  44. Zhang S, Dam-Johansen K, Bernad Jr PL, Kiil S. Rain erosion of wind turbine blade coatings using discrete water jets: Effects of water cushioning, substrate geometry, impact distance, and coating properties. *Wear.* 2015;328:140-8. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2015.01.079>.
  45. O'Carroll A, Hardiman M, Tobin E, Young T. Correlation of the rain erosion performance of polymers to mechanical and surface properties measured using nanoindentation. *Wear.* 2018;412:38-48. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2018.07.008>.
  46. Ahuir-Torres J, Simandjuntak S, Bausch N, Farrar A, Webb S, Nash A, et al. Corrosion threshold data of metallic materials in various operating environment of offshore wind turbine parts (tower, foundation, and nacelle/gearbox). *Data in brief.* 2019;25:104207. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2019.104207>.
  47. Li M, Kefal A, Oterkus E, Oterkus S. Structural health monitoring of an offshore wind turbine tower using iFEM methodology. *Ocean Eng.* 2020;204:107291. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2020.107291>.
  48. Igwemezie V, Mehmanparast A, Kolios A. Materials selection for XL wind turbine support structures: A corrosion-fatigue perspective. *Mar Struct.* 2018;61:381-97. <https://doi.org/10.1016/J.MARSTRUC.2018.06.008>.
  49. Storm BK. Surface protection and coatings for wind turbine rotor blades. *Advances in wind turbine blade design and materials: Elsevier;* 2013. 417-40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103007-3.00012-4>.
  50. Prashar G, Vasudev H, Thakur L. Performance of different coating materials against slurry erosion failure in hydrodynamic turbines: A review. *Eng. Fail. Anal.* 2020;115:104622. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFANAL.2020.104622>.
  51. Márquez FPG, Chacón AMP. A review of non-destructive testing on wind turbines blades. *Renew. Energ.* 2020;161:998. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.07.145>.
  52. Singh S, Kharub M, Singh J, Singh J, Jangid V. Brief survey on mechanical failure and preventive mechanism of turbine blades. *Mater Today Proc.* 2021;38:2515-24. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.07.546>.
  53. Lee C. Corrosion and wear-corrosion resistance properties of electroless Ni-P coatings on GFRP composite in wind turbine blades. *Surf Coat Technol.* 2008;202(19):4868-74. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2008.04.079>.
  54. Qin CC, Mulrone AT, Gupta MC. Anti-icing epoxy resin surface modified by spray coating of ptfte teflon particles for wind turbine blades. *Mater Today Commun.* 2020;22:100770. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2019.100770>.
  55. Slot H, Gelinck E, Rentrop C, Van Der Heide E. Leading edge erosion of coated wind turbine blades: review of coating life models. *Renew Energ.* 2015;80:837-48. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.02.036>.
  56. Mishnaevsky Jr L, Sütterlin J. Micromechanical model of surface erosion of polyurethane coatings on wind turbine blades. *Polym. Degrad. Stab.* 2019;166:283-9. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2019.06.009>.
  57. Zhang S, Dam-Johansen K, Nørkjær S, Bernad Jr PL, Kiil S. Erosion of wind turbine blade coatings—design and analysis of jet-based laboratory equipment for performance evaluation. *Prog Org Coat.* 2015;78:103-15. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2014.09.016>.
  58. Oka Y, Miyata H. Erosion behaviour of ceramic bulk and coating materials caused by water droplet impingement. *Wear.* 2009;267(11):1804-10. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2009.02.009>.
  59. Caruso RA, Antonietti M. Sol-gel nanocoating: an approach to the preparation of structured materials. *Chem Mater.* 2001;13(10):3272-82. <https://doi.org/10.1021/CM001257Z>.
  60. Marinova N, Urbegain A, Benguria P, Travé A, Caracena R. Evaluation of anticorrosion coatings for offshore wind turbine monopiles for an optimized and time-efficient coating application. *Coat.* 2022;12(3):384. <https://doi.org/10.3390/COATINGS12030384>.
  61. Zuin S, Gaiani M, Ferrari A, Golanski L. Leaching of nanoparticles from experimental water-borne paints under laboratory test conditions. *J Nanopart Res.* 2014;16:1-17. <https://doi.org/10.1007/S11051-013-2185-1>.
  62. Veselov V, Kitaev M, Pastukhov P, Surov O, editors. Tests of paint and varnish ice-resistant protective coatings of ice class vessels. *IOP Conference Series. Mater Sci Eng.* 2020: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/986/1/012027>.
  63. ISO E. 2178: 2016 Non-magnetic coatings on magnetic substrates. Measurement of coating thickness Magnetic method European Standard. 2016.
  64. Kryvenko PV, Guzii SG, Bondarenko OP, editors. Alkaline aluminosilicate binder-based adhesives with increased fire resistance for structural timber elements. *Key Engineering Materials;* 2019: <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIEN.TIFIC.NET/KEM.808.172>
  65. Ford T. Royal Aeronautical Society Annual Conference. *Aircr Eng Aerosp Technol.* 2006;78(2). <https://doi.org/10.1108/AEAT.2006.12778BAC.001>
  66. Choi CH, Kim CJ. Advanced nanostructured surfaces for the control of biofouling: cell adhesions to three-dimensional nanostructures. *Green tribology: biomimetics, energy conservation and sustainability: Springer;* 2012. 79-103. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23681-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23681-5_4)

67. Dalili N, Edrisy A, Carriveau R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. *Renew Sust Energ Rev.* 2009;13(2):428-38. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2007.11.009>
68. Corten GP, Veldkamp HF. Insects can halve wind-turbine power. *Nature.* 2001;412(6842):41-2. <https://doi.org/10.1038/35083698>.
69. Sanchez C, Belleville P, Popall M, Nicole L. Applications of advanced hybrid organic-inorganic nanomaterials: from laboratory to market. *Chem. Soc. Rev.* 2011;40(2):696-753. <https://doi.org/10.1039/C0CS00136H>.
70. Beilin HI, Shapovalov L. US PATENT DOCUMENTS. 2010.
71. Keijman J. Inorganic-organic hybrid coatings in the protective coatings industry. *Proceedings, SSPC.* 2002.
72. Yeter B, Garbatov Y, Soares CG. Fatigue damage assessment of fixed offshore wind turbine tripod support structures. *Eng. Struct.* 2015;101:518-28. <https://doi.org/10.1016/J.COACHE.2016.01.008>.
73. Mirzaee M, Mohebbi T, Rezaei Abadchi M. A review of advances in encapsulation processes and self-healing mechanisms for active corrosion protection. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran.* 2023 (In Persian).
74. Mirzaee M, Rezaei Abadchi M, Mehdikhani A, Riahi Noori N, Zolriasatein A. Corrosion and UV resistant coatings using fluoroethylene vinyl ether polymer. *Prog. Color. Coating.* 2023;16(1):47-57. <https://doi.org/20.1001.1.20082134.2023.16.1.1.6>.
75. Amiri S, Rahimi A. Hybrid nanocomposite coating by sol-gel method: A review. *Iran. Polym. J.* 2016;25:559-77. <https://doi.org/10.1007/S13726-016-0440-X>.
76. Mirzaee M, Rezaei Abadchi M, Rashidi A. A Review of the Application of Two-dimensional Nanosheets as a Reinforcement to Increase the Corrosion Resistance of Polymer Coatings. *J. Stud. Color world.* 2023;13(2):95-132. (In Persian) <https://doi.org/20.1001.1.22517278.1402.13.2.1.5>.
77. Zhong H, Hu Y, Wang Y, Yang H. TiO<sub>2</sub>/silane coupling agent composed of two layers structure: A super-hydrophilic self-cleaning coating applied in PV panels. *Appl. Energy.* 2017;204:932-8. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.04.057>.
78. Rezaei Abadchi M, Mirzaee M, Dorkhani E, Zolriasatein A, Noori NR. Surface modification of acrylic coating with anti-corrosion and anti-UV materials. *J Chin Chem Soc.* 2022;69(6):912-24. <https://doi.org/10.1002/JCCS.202200169>.
79. Ji X, Seif A, Duan J, Rashidi A, Zhou Z, Pourhashem S, et al. Experimental and DFT studies on corrosion protection performance of epoxy/graphene quantum dots@ TiO<sub>2</sub> nanotubes coatings. *Constr Build Mater.* 2022;322:126501. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126501>.
80. Zhou Z, Seif A, Pourhashem S, Duan J, Rashidi A, Silvestrelli PL, et al. Multi-treatments based on polydimethylsiloxane and metal-organic framework wrapped with graphene oxide for achieving long-term corrosion and fouling protection: experimental and density functional theory aspects. *Constr. Build. Mater.* 2023;384:131229. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131229>
81. Zhou Z, Seif A, Pourhashem S, Duan J, Rashidi A, Mirzaee M, et al. Anti-corrosion and anti-fouling properties of ball-like GQDs hybridized MOFs functionalized with silane in waterborne epoxy-polydimethylsiloxane coatings: experimental and theoretical studies. *Appl Mater Today.* 2023;30:101704. <https://doi.org/10.1016/J.APMT.2022.101704>.
82. Nguyen HL, Gándara F, Furukawa H, Doan TL, Cordova KE, Yaghi OM. A titanium-organic framework as an exemplar of combining the chemistry of metal-and covalent-organic frameworks. *J Am Chem Soc.* 2016;138(13):4330-3. <https://doi.org/10.1021/JACS.6B01233>.
83. Salomatina E, Bityurin N, Gulenova M, Gracheva T, Drozdov M, Knyazev A, et al. Synthesis, structure, and properties of organic-inorganic nanocomposites containing poly (titanium oxide). *J Mater Chem C.* 2013;1(39):6375-85. <https://doi.org/10.1039/C3TC30432A>.
84. Pourhashem S, Seif A, Saba F, Nezhad EG, Ji X, Zhou Z, et al. Antifouling nanocomposite polymer coatings for marine applications: A review on experiments, mechanisms, and theoretical studies. *J Mater Sci. Technol.* 2022;118:73-113. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2021.11.061>.
85. Guo F, Gao J, Li X. Research Progress on Titanium-Containing Organic-Inorganic Hybrid Protective Coatings. *Surf. Rev. Lett.* 2019;26(09):1930002. <https://doi.org/10.1142/S0218625X19300028>.
86. Ballard R, Williams J, Njus J, Kiland B, Soucek M. Inorganic-organic hybrid coatings with mixed metal oxides. *Eur Polym J.* 2001;37(2):381-98. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(00\)00105-1](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(00)00105-1).
87. Li S, Fu J. Improvement in corrosion protection properties of TiO<sub>2</sub> coatings by chromium doping. *Corros. Sci.* 2013;68:101-10. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2012.10.040>.
88. Grundwürmer M, Nuyken O, Meyer M, Wehr J, Schupp N. Sol-gel derived erosion protection coatings against damage caused by liquid impact. *Wear.* 2007;263(1-6):318-29. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2006.12.039>
89. Hojjati Najafabadi A, Shoja Razavi R, Mozaffarinia R, Rahimi H. A new approach of improving rain erosion resistance of nanocomposite sol-gel coatings by optimization process factors. *Metall Mater Trans. A.* 2014;45:2522-31. <https://doi.org/10.1007/S11661-013-2180-2>.
90. Dashtkar A, Hadavinia H, Sahinkaya MN, Williams NA, Vahid S, Ismail F, Turner M. Rain erosion-resistant coatings for wind turbine blades: A review. *Polym. Polym Compos.* 2019;27(8):443-75. <https://doi.org/10.1177/096739111984823>.
91. Jung de Andrade M, Lima MD, Stein L, Pérez C, Roth S. Single-walled carbon nanotube silica composites obtained by an inorganic sol-gel route. *Phys. Status. Solidi. B.* 2007;244(11):4218-22. <https://doi.org/10.1002/PSSB.200776114>.
92. Hosseinpour A, Abadchi MR, Mirzaee M, Tabar FA, Ramezanzadeh B. Recent advances and future perspectives for carbon nanostructures reinforced organic coating for anti-corrosion application. *Surf Interfaces.* 2021;23:100994. <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2021.100994>.
93. Vadukumpully S, Gupta J, Zhang Y, Xu GQ, Valiyaveetil S. Functionalization of surfactant wrapped graphene nanosheets with alkylazides for enhanced dispersibility. *Nanoscale.* 2011;3(1):303-8. <https://doi.org/10.1039/C0N00547A>.
94. Pathak SM, Kumar VP, Bonu V, Mishnaevsky Jr L, Lakshmi R, Bera P, Barshilia HC. Development of Cellulose-Reinforced Polyurethane Coatings: A Novel Eco-Friendly Approach for Wind Turbine Blade

- Protection. *Energies*. 2023;16(4):1730. <https://doi.org/10.3390/EN16041730>.
95. Pathak SM, Kumar VP, Bonu V, Latha S, Mishnaevsky Jr L, Lakshmi R, et al. Solid particle erosion studies of ceramic oxides reinforced water-based PU nanocomposite coatings for wind turbine blade protection. *Ceram Int*. 2022;48(23):35788-98. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2022.07.143>.
  96. Alajmi AF, Ramulu M. Solid particle erosion of graphene-based coatings. *Wear*. 2021;476:203686. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2021.203686>
  97. Mishra P, Acharya S. Solid particle erosion of bagasse fiber reinforced epoxy composite. *Int J Phys Sci*. 2010;5(2):109-15.
  98. Mantry S, Satapathy A, Jha AK, Singh SK, Patnaik A. Preparation, characterization and erosion response of jute-epoxy composites reinforced with SiC derived from rice husk. *Int J Plast Technol*. 2011;15:69-76. <https://doi.org/10.1007/S12588-011-9007-Z>.
  99. Padhi PK, Satapathy A. Prediction and simulation of erosion wear behavior of glass-epoxy composites filled with blast furnace slag. *Adv. Mat. Res*. 2012;585:549-53. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.585.549>.
  100. Das G, Biswas S. Erosion wear behavior of coir fiber-reinforced epoxy composites filled with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filler. *J. Ind. Text. J IND TEXT*. 2017;47(4):472-88. <https://doi.org/10.1177/15280837166528>
  101. Latha PS, Rao MV. Investigation into effect of ceramic fillers on mechanical and tribological properties of bamboo-glass hybrid fiber reinforced polymer composites. *Silicon*. 2018;10:1543-50. <https://doi.org/10.1007/S12633-017-9637-7>
  102. Singh T, Tejyan S, Patnaik A, Singh V, Zsoldos I, Fekete G. Fabrication of waste bagasse fiber-reinforced epoxy composites: study of physical, mechanical, and erosion properties. *Polym Compos*. 2019;40(9):3777-86. <https://doi.org/10.1002/PC.25239>
  103. Deep N, Mishra P, editors. Study and optimization of erosive behavior of carbon black-epoxy polymer composites using taguchi method. *Innov. Adv. Mater. Sci. Eng*. 2017, Volume 2; 2019: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2944-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2944-9_21)
  104. Öztürk B, Gedikli H, Kılıçarslan YS. Erosive wear characteristics of E-glass fiber reinforced silica fume and zinc oxide-filled epoxy resin composites. *Polym Compos*. 2020;41(1):326-37. <https://doi.org/10.1002/PC.25372>
  105. Bağcı M, Demirci M, Sukur EF, Kaybal HB. The effect of nanoclay particles on the incubation period in solid particle erosion of glass fibre/epoxy nanocomposites. *Wear*. 2020;444:203159. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2019.203159>
  106. Aghaebrahimi, M. R., Taherian, H., Nazer-Kakhki, I., Farshad, M., Goldani, S. R. Short Term Price Forecasting in Electricity Market Considering the Effect of Wind Units' Generation. *Computational Intelligence Electrical Eng*. 2014; 5(1):105-122.

#### How to cite this article:

Mirzaee M, Mohebti T. Review of anti-corrosion and erosion protective coatings in offshore wind power devices. *J Stud Color World*. 2024;14(2):133-159. <https://doi.org/10.30509/JSCW.2024.82001> [In Persian].