مقاله ترجمه‌ای

بسپارش
فصلنامه علمی
سال دوازدهم، شماره ۱،
صفحه ۷۵-۶۴، ۱۴۰۱
ISSN: 2252-0449

# مروری بر کاربردهای پلی‌اوره در صنعت ساختمان

ترجمه و تلخیص: امیرحسین یزدان‌بخش

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵

دریافت: ۱۴۰۰/۴/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۱۶

## چکیده

پلی‌اوره با توجه به ساختار و خواص منحصر به فرد و شیوه به نسبت آسان اعمال آن، حتی در مکان‌های با دسترسی سخت، توجه مهندسان و فعالان ساختمان را به‌عنوان مصالح ساختمانی مدرن جلب کرده است. محدوده گسترده خواص عالی این پلیمر از قبیل دوام و مقاومت زیاد در برابر عوامل جوی، شیمیایی و زیستی آن را به گزینه عالی برای صنعت ساختمان تبدیل کرده است. قابلیت تقویت مصالح و سازه‌های ساختمانی همراه با مقاومت عالی در برابر خوردگی و سایش، به‌طور چشمگیری محبوبیت پلی‌اوره را به عنوان یک پوشش محافظ در صنعت ساختمان افزایش داده است. در این صنایع، درزگیری و عایق‌بندی کف‌ها و سطوح مختلف با استفاده از پوشش پلی‌اوره نیز مورد توجه قرار گرفته است. فناوری پوشش‌های پلی‌اوره، فناوری سبز و بدون آلودگی و سمیت برای محیط زیست است که مزیتی اساسی نسبت به بسیاری از فناوری‌های رقیب در صنعت ساختمان به‌شمار می‌رود. استفاده از سامانه‌های کامپوزیتی پلی‌اوره به‌منظور بهینه‌سازی خواص مختلف مانند خواص مکانیکی و گرمایی و همچنین کاهش هزینه‌ها و بار اقتصادی در حال افزایش است. در مقاله حاضر، کاربردهای چندگانه مواد برپایه پلی‌اوره در صنعت ساختمان شرح داده می‌شود.

امیرحسین یزدان‌بخش

## واژگان کلیدی

پلی‌اوره،
سامانه پوششی،
ساختمان،
مواد محافظ،
تقویت

منبع:

- Shojaei B., Najafi M., Yazdanbakhsh A.M., Abtahi M., and Zhang C., A Review on the Applications of Polyurea in the Construction Industry, *Polym. Adv. Technol.*, **32**, 2797-2812, 2021.

## مقدمه

پلی‌اوره، پلیمری کشسان، انطباق‌پذیر و پرکاربرد با پیوندهای اوره (-NHCONH-) است که از واکنش پلی‌ایزوسیانات‌ها با پلی‌آمین‌ها (شامل مخلوطی از رزین‌ها و زنجیرافزاها) تشکیل می‌شود و پیوندهای هیدروژن آن‌ها به‌طور چشمگیر با زنجیرهای پلیمر برهم‌کنش دارند:

$$-NCO + NH_2 \rightarrow -NHCONH-$$

از مزیت‌های واکنش تشکیل پلی‌اوره این است که نیاز به کاتالیزگر ندارد و بدون نیاز به گرم‌شدن، به‌سرعت انجام می‌شود [۱،۲].

از نظر شیمیایی، ترکیب شیمیایی پلی‌اوره به پلی‌یورتان شبیه است. اجزای اصلی پلی‌یورتان، مولکول‌های دی- یا پلی‌ایزوسیانات (گروه عاملی سیانات) و پلی‌اُل‌ها (گروه هیدروکسیل) هستند که از طریق فرایند واکنش گرمازا، دو جزء زنجیری گسترده و شبکه‌های پیوندیافته به‌وسیله گروه‌های یورتان –O(CO)(NH)– تشکیل می‌دهند. از نظر مکانیکی، پلی‌اوره پاسخ تقریبا کشسانی را در برابر تغییر شکل‌های حجمی نشان می‌دهد. با این حال، در بیش از دمای گذار شیشه‌ای ($T_g$)، پاسخ برشی آن در فشار و سرعت کرنش متوسط گرانروکشسان بوده، بنابر این تغییر شکل محوری جانبی آن تقریبا تراکم‌ناپذیر است [۳].

به‌طور کلی، مواد پلی‌یورتان و پلی‌اوره به‌ترتیب با پیوند یورتان و اوره در زنجیر اصلی آن‌ها دارای خواص مکانیکی و مقاومت به سایش عالی، خاصیت کشسانی زیاد، مقاومت به حلال و واکنش‌پذیری زیاد هستند. فناوری‌های برپایه این مواد بهترین توازن میان هزینه و کیفیت را ارائه می‌دهند. عملکرد کاربردی پلی‌یورتان‌ها از پلی‌اوره محدودتر است، زیرا واکنش پلی‌اُل–ایزوسیانات کاتالیزشده رفتار متفاوتی نسبت به آمین–ایزوسیانات نشان می‌دهد، به‌طوری که سامانه با تغییر دمای اعمالی از استحکام کمتری برخوردار می‌شود. بنابر این، هنگامی که زیرآیند حاوی بیش از ۵٪ رطوبت باشد، سامانه پلی‌یورتان به‌دلیل رقابت بین پلی‌اُل‌ها و آب برای واکنش با یک گروه ایزوسیانات مستعد تاول‌زدگی است. درواقع، درصد رطوبت محیط و دمای اعمالی عوامل محدودکننده پلی‌یورتان و بسیاری از سایر سامانه‌ها با واکنش‌های شیمیایی هستند. در حالی که پلی‌اوره می‌تواند در شرایط شدید جوی استفاده شود و هنگامی که از آن روی زیرآیندهای تقریبا اشباع از رطوبت زیاد هوا استفاده شود، پلی‌اوره تاول نمی‌زند [۴].

پلیمرهای برپایه اوره (به‌عنوان گروه شیمیایی اتصال‌دهنده) به‌دلیل قابلیت ذاتی آن‌ها در ایجاد پیوندهای دهنده–گیرنده الکترون متعدد، که به توالی جدیدی از اتم‌های اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن در اوره منجر می‌شوند، توجه زیادی را جلب کرده‌اند [۵].

تعداد زیاد پیوندهای هیدروژنی بین‌مولکولی در قطعه‌های زنجیر پلی‌اوره خواص مکانیکی عالی را به ارمغان می‌آورد. درواقع طی فرایند پخت پلی‌اوره، پیوند هیدروژنی نامنظم تشکیل‌شده در نزدیکی NH به پیوند منظم بازسازی می‌شود که تعداد قطعه‌های سخت را افزایش می‌دهد و خواص مکانیکی پلی‌اوره را بهبود می‌بخشد [۶]. افزون بر این، پلی‌اوره پایداری گرمایی زیاد و تأخیراندازی شعله خوبی نیز نشان می‌دهد. بدیهی است، افزایش محدوده پیوندهای هیدروژنی می‌تواند به بهبود درخور توجهی در خواص منجر شود [۷].

تجزیه عنصری کیفی نمونه‌های سنتزی پلی‌اوره با آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)، وجود پیک‌هایی را در $۱۰^\circ<2\theta<۳۰^\circ$ تأیید کرده است. از پیک‌های متعدد مشاهده‌شده در این ناحیه مشخص شده است، پلی‌اوره سنتزی بی‌شکل نیست، بلکه نیمه‌بلوری است. این پیک‌ها خیلی تیز نیستند، اما پهن هستند. حوزه‌های بلوری با پیوندهای هیدروژنی قوی به‌وسیله الگوهای اوره تشکیل می‌شوند، در حالی که زنجیرهای کربن نواحی بی‌شکل را تشکیل می‌دهند. بنابراین با افزایش طول زنجیر کربن بلوری‌شدن آشکارا کاهش می‌یابد [۸].

فرمول‌بندی پلی‌اوره تجاری در درجه اول در ترکیب رزین آمین متفاوت است که ترکیب همگنی از یک دی‌آمین زنجیربلند (قطعه نرم)، یک دی‌آمین زنجیرکوتاه (در نقش زنجیرافزا) و یک اتصال‌دهنده عرضی شیمیایی است. پیوندهای هیدروژنی در اتصالات اوره، به‌عنوان نقاط کانونی اتصالات عرضی فیزیکی عمل می‌کنند و در سراسر ماتریس پلی‌اوره توزیع می‌شوند. اتصالات عرضی شیمیایی با قابلیت کشسانی و مدول ذخیره پلی‌اوره ارتباط مستقیم دارند و بر پاسخ مکانیکی در رژیم شبه‌ایستا بسیار اثرگذار است [۹].

پلی‌اوره به‌دلیل ساختار آن، نوع خاصی از پلیمر محسوب می‌شود. این پلیمر زمان گیرش کوتاهی دارد، سبک است، مقاومت خوبی در برابر شکستگی و خوردگی دارد و برای استفاده در کاربردهای ضدضربه (antishock) بسیار مناسب است. دوام و قابلیت کشسانی زیاد این پلیمر، به‌عنوان پارامترهای مورد توجه در ساختمان، از ساختار زنجیری آن ناشی می‌شود [۱۰]. ارزیابی خواص گرانروکشسانی پلی‌اوره که با تجزیه و تحلیل کرنش در پاسخ به نیروی نوسانی اعمالی انجام می‌گیرد، نقش مهمی در مطالعه رفتار و کاربردهای این پلیمر از جمله کاربردهای ضدضربه

آن دارد [۱۱].

تحلیل‌های دینامیکی–مکانیکی نشان داده است، با افزایش مقدار ایزوسیانات، مدول‌های ذخیره و اتلاف پلی‌اوره به‌طور درخور ملاحظه‌ای تغییر می‌کنند، اما دمای گذار شیشه‌ای آن تقریبا بدون تغییر باقی می‌ماند. پاسخ پلی‌اوره به بارگذاری دینامیکی، به‌ویژه از آن جهت درخور توجه است که قابلیت این پلیمر را در جذب و اتلاف انرژی نشان می‌دهد [۱۲].

پلی‌اوره به سرعت کرنش بسیار حساس است و در صورت افزایش سرعت کرنش، به‌طور منحصر به فردی به آن پاسخ می‌دهد. این حساسیت به پدیده گذار شیشه‌ای پویای آن نسبت داده می‌شود. با توجه به اینکه بسیاری از خواص مکانیکی درخور توجه پلی‌اوره، به‌طور ویژه در سرعت‌های کرنش زیاد مشاهده می‌شوند، مطالعات زیادی درباره خواص مکانیکی پلی‌اوره در سرعت‌های کرنش زیاد انجام شده است [۱۳]. به‌عنوان مثال، استفاده از پلی‌اوره به‌عنوان پوشش برای بهبود بقای سازه‌ها در هنگام بارگذاری سریع در حال گسترش بوده که نمونه‌ای از اهمیت مطالعه رفتار این پلیمر در سرعت کرنش زیاد است [۱۴]. از این جمله می‌توان به قابلیت عالی پلی‌اوره در کاهش آثار ناشی از امواج انفجار و مزیت‌های آن نسبت به سایر روش‌های موجود برای دستیابی به این هدف اشاره کرد [۱۵]. پلی‌اوره به‌دلیل ماهیت تقریبا تراکم‌ناپذیر آن، ظرفیت زیادی برای بهبود مقاومت ضربه‌ای در برابر امواج انفجار دارد. این ویژگی آن را برای کاربردهایی مناسب می‌سازد که ممکن است در آن‌ها تغییرات فشار زیادی رخ دهد. مثلا می‌تواند به‌عنوان ماده تعلیق در کلاه‌های ایمنی پیشرفته استفاده شود [۱۶]. سهم بخش گرانرو در پلی‌اوره را می‌توان با افزایش چگالی اتصالات عرضی شیمیایی و ثابت نگه‌داشتن نسبی مقدار زنجیرافزا تنظیم کرد. این کار از آن جهت حائز اهمیت است که پلی‌اوره با بخش گرانرو بزرگ‌تر (شدت ضریب اتلاف بیشتر)، نسبت به سرعت کرنش حساس‌تر است که می‌تواند به‌طور مستقیم به قابلیت بالقوه پلی‌اوره در کاهش آثار انفجاری و بالستیکی مرتبط باشد [۱۷].

بررسی رفتار تنش–کرنش پلی‌اوره در سرعت‌های تغییر شکل زیاد، یک رابطه غیرخطی بین تنش و کرنش بسته به سرعت کرنش نشان داده است. منحنی تنش–کرنش پلی‌اوره در کرنش کم مانند مواد لاستیکی و در کرنش زیاد مانند مواد چرمی است [۱۸].

از پلی‌اوره به‌عنوان ماده محافظ در صنایع نظامی، عمران و ساختمان، مهندسی دریایی و غیره استفاده می‌شود. پلی‌اوره عملکرد میرایی و خواص دینامیکی عالی دارد و می‌تواند به‌عنوان سدی برای کنترل لرزش استفاده شود [۱۹]. پلی‌اوره در طیف گسترده‌ای از فام‌ها رنگ‌پذیری دارد که چشم‌اندازهای بسیاری را در طراحی داخلی پروژه‌های ساختمانی فراهم می‌کند. همچنین، به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خاص پلی‌اوره، این پلیمر به‌عنوان پوشش ایده‌آلی برای عایق‌بندی و حفاظت از هر گونه سطح در برابر تغییرات جوی به شمار می‌رود. از آن به‌عنوان کف‌پوش و ماده ضدآب به‌منظور جلوگیری از جمع‌شدگی استفاده می‌شود که هنگام خشک‌کردن رخ می‌دهد [۲۰].

ظرفیت تقویت مکانیکی و مقرون به صرفه‌بودن از مهم‌ترین نکات در صنعت ساختمان و سازه‌هاست. بدین منظور، استفاده از پلی‌اوره تاکنون در این صنایع مورد توجه قرار گرفته است. پلی‌اوره قابلیت افزایش استحکام‌های خمشی و برشی مواد استفاده‌شده در ساختمان را دربرابر ضربه‌ها و امواج انفجار دارد. افزون بر بهبود خواص لرزه‌ای سازه، پلی‌اوره می‌تواند به‌عنوان اتصال پلاستیکی عمل کرده و ظرفیت تغییر شکل و مدول جانبی را افزایش دهد [۲۰]. جدول ۱ بخشی از کاربردهای رایج و منحصر به فرد پلی‌اوره در صنایع ساختمان و همچنین تعدادی از کاربردهای فعلی این پلیمر را در سایر صنایع و زمینه‌ها نشان می‌دهد.

روش‌های مختلفی می‌توانند برای تقویت و بهبود خواص گوناگون پلی‌اوره به‌منظور استفاده عملی‌تر و بهتر از آن در صنایع مختلف از جمله صنایع ساختمان به‌کار روند. به‌عنوان مثال، پلی‌اوره را می‌توان برپایه ماده Cardanol به‌منظور بهبود عملکرد مکانیکی و الکتروشیمیایی سنتز کرد تا بدون توجه به ایزوسیانات استفاده‌شده، عملکرد را ارتقا بخشید [۲۲]. بسیاری از تقویت‌کننده‌ها و پرکننده‌ها نیز می‌توانند برای بهبود خواص پلی‌اوره استفاده شوند. اصلاح‌کننده‌ها برای افزایش عملکرد پلی‌اوره و کاهش هزینه‌ها استفاده می‌شوند. این اصلاح‌کننده‌ها

جدول ۱– کاربردهای پلی‌اوره در ساختمان و سایر صنایع [۲۱].

| کاربردهای پلی‌اوره در ساختمان | سایر کاربردهای پلی‌اوره |
|---|---|
| پوشش‌های بام | حفاظت لوله |
| مرمت بام مسطح | مرمت لوله داخلی |
| غشاهای ضدآب | پوشش مخازن |
| مهار ثانویه | آستری‌های بارکش کامیون |
| کفپوش پارکینگ‌ها | آسترهای کشتی‌های باری |
| پل‌ها | آسترهای واگن‌های حمل و نقل |
| | بدنه پل |

اغلب پرکننده‌های ارزان و متداول تجاری مانند گرافیت، تالک و غیره هستند که می‌توانند پایداری گرمایی و خواص مکانیکی را بهبود بخشند. همچنین، از کامپوزیت‌های پلی‌اوره دارای ماتریس پلی‌اوره و پرکننده‌ها یا الیاف مختلف برای دستیابی به خواص عالی و بهینه استفاده شده است [۲۳].

تغییرات دما می‌تواند بر خواص مکانیکی پلی‌اوره مانند استحکام کششی و مقاومت در برابر تشکیل و ایجاد ترک‌ها و شیارها اثر بگذارد [۲٤]. پایداری گرمایی (مقاومت در برابر تخریب گرمایی) پلی‌اوره را می‌توان با افزودن موادی مانند آمونیوم پلی‌فسفات یا گرافیت بسط‌پذیر اصلاح کرد تا اثرهای نامطلوب افزایش دما به حداقل برسد [۲۵]. به‌طور کلی، مقاومت پلی‌اوره به آتش را می‌توان با فسفات‌هایی مانند تری‌فنیل فسفات بهبود بخشید [۲٦]. همچنین، گرافن اکسید کاهش‌یافته می‌تواند برای افزایش خواص گرمایی، رسانندگی و مکانیکی، حتی تأخیراندازی شعله پلی‌اوره استفاده شود [۲۷]. پلی‌اوره‌ها با روش‌های متعددی سنتز می‌شوند، اما متداول‌ترین روش، واکنش دی‌آمین‌ها با دی‌ایزوسیانات‌هاست [۲۸،۲۹].

در این مقاله، کاربردهای پلی‌اوره در صنعت ساختمان در شکل‌های مختلف پوشش، کف‌پوش و کامپوزیت مرور می‌شود.

## پوشش‌ها و کف‌پوش‌های پلی‌اوره

پوشش‌های کشسان پلی‌اوره به‌دلیل انعطاف‌پذیری، خواص کششی عالی، مقاومت به خوردگی خوب، عدم‌سمیت و سازگاری با محیط زیست به‌طور گسترده در ساخت‌وسازهای مهم و مختلف استفاده می‌شود. این پوشش‌ها ٪۱۰۰ جامد بوده، هیچ‌گونه ماده فراری ندارند و بویی منتشر نمی‌کنند که از مزیت‌های عمده پوشش پلی‌اوره نسبت به پلی‌یورتان از نظر زیست‌بهداشتی است. نقطه قوت اصلی پوشش‌های پلی‌اوره در مقایسه با پوشش‌هایی نظیر اپوکسی، پلی‌استر و وینیل استر انعطاف‌پذیری زیاد آن‌هاست.

پوشش‌های پلی‌اوره به‌طور هم‌زمان باعث سختی و کشسانی سطح زیادی می‌شوند که نتیجه آن مقاومت سایشی عالی این پوشش‌ها در زوایا و سرعت‌های ضربه مختلف است. همچنین، آن‌ها دارای استحکام برشی خوب و مقاومت خستگی زیاد (حتی بیش از ۱۰۰ bar cycles) هستند و می‌توانند به‌عنوان پوشش محافظ و تقویت‌کننده در مواردی مانند لوله‌های آب به‌کاررفته در لوله‌کشی ساختمان استفاده شوند [۳۰]. جدول ۲ خواص مختلف پوشش‌های پلی‌اوره ٪۱۰۰ جامد و الاستومری را نشان می‌دهد [۳۱].

پوشش‌های پلی‌اوره می‌توانند آسیب‌های ساختاری ناشی از

جدول ۲- مشخصه‌های عملکردی پوشش‌های رایج پلی‌اوره [۳۱].

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| استحکام کششی (psi) | ۱۱۰۰-٤۰۰۰ |
| سختی (shore) | A20-D65 |
| ازدیاد طول (٪) | ۲۰-۱۰۰۰ |
| مدول (psi) | ۵۰۰-۲۰۰۰ |
| جذب آب (٪) | ۵-۱٦ |
| مقاومت سایشی (mg افت وزن) | ٦-۷۰ |
| مقاومت ضرب‌های (in.lbs) | ٦۰-۲۰۰ |

تکانش‌های زلزله و آوار را در تأسیسات به حداقل برسانند. این پوشش با چسبندگی عالی به زیرآیند، استحکام کششی زیاد و چقرمگی خوب می‌تواند در مقاوم‌سازی سازه‌ها و کاربردهای ضدزلزله مانند ساخت اتاق زلزله و غیره بسیار کارآمد باشد. از پوشش‌های پلی‌اوره می‌توان روی ستون‌ها، دیواره‌های داخلی، دیوارهای باربر (به‌جای تقویت‌کننده‌ها، مانند پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف (FRPs))، نماهای خارجی و بام‌ها استفاده کرد. اثر محدودکننده را می‌توان برای افزایش استحکام لرزه‌ای و انعطاف‌پذیری با استفاده از پلی‌اوره نوع سفت (STPU) به جای پلی‌اوره نوع انعطاف‌پذیر (FTPU) به‌حداکثر رساند که با تغییر نسبت اجزای پیش‌پلیمر و سخت‌کننده FTPU به‌دست می‌آید [۳۲].

عملکرد مکانیکی پلی‌اوره هنگامی که در طولانی‌مدت در معرض تابش نور خورشید باشد، می‌تواند به‌طور درخور توجهی کاهش یابد. پوشش پلی‌اوره می‌تواند به‌عنوان جاذب فرابنفش (UV) نیز عمل کند، بدین منظور می‌توان از واکنش مواد نوررنگ حل‌شده در حلال مناسب با پیش‌پلیمر پلی‌اوره استفاده کرد. این پوشش‌های ضد UV می‌توانند به‌منظور حفاظت از سازه‌های ساختمانی اساسی از تابش فرابنفش خورشید استفاده شوند [۳۳]. همچنین، می‌توان به‌کمک میکروکپسول‌های غربالگر UV، پوشش هوشمند مکانیکی حساس به تابش فرابنفش سنتز کرد [۳٤].

آستری‌های پلی‌اوره با قابلیت تشکیل فیلم نازک و به‌کارگیری در درزگیری و غبارزدایی، خاصیت ضدخوردگی، قابلیت درزگیری سطوح فلزی و بتنی و بسیاری از سایر موارد به‌عنوان یکی از بهترین انواع آستری شناخته شده‌اند. این آستری‌ها از پایداری گرمایی خوب و مقاومت به UV برخوردارند. آن‌ها مقاومت شیمیایی زیادی در برابر بسیاری از مایعات دارند، به‌سرعت خشک می‌شوند و قابلیت اعمال با ضخامت زیاد و سطح صاف

بسیار یکنواخت را دارند. سرعت پخت زیاد در محیط و امکان آماده‌سازی مناسب سطح و انجام آزمون‌های کیفی در زمان اعمال از جمله مزایای آسترهای پلی‌اوره نسبت به سایر آستری‌ها مانند کفپوش اپوکسی در حین پوشش‌دهی است.

آستری‌های پلی‌اوره دارای خواص چسبندگی زیاد به سطح اعمالی هستند و جایگزین مناسبی برای رزین اپوکسی، رزین پلی‌یورتان، فایبرگلاس و سایر سامانه‌های آستری به‌شمار می‌روند. در این آستری‌ها براساس ترکیب اجزا، خواص کششی زیاد با نفوذپذیری سطحی اندک و مقاومت ضربه‌ای زیاد ترکیب می‌شوند تا سامانه بادوام و انعطاف‌پذیری ایجاد شود. آستری‌های پلی‌اوره می‌توانند به‌عنوان غشا و محافظ یک‌پارچه بر زیرآیندهای مختلف با افشانش اعمال شوند. این آستری‌ها به‌دلیل مزایا و ویژگی‌هایی که دارند، می‌توانند در شرایط شدید مانند محیط‌های اسیدی یا نزدیک آب دریا در محیط‌های قلیایی استفاده شوند [۲۸].

آستری‌های پلی‌اوره به لحاظ ساختاری به دو دسته آروماتیک و آلیفاتیک تقسیم می‌شوند. پلی‌اوره آروماتیک مقاومت کمی در برابر تابش UV دارد. این نوع از پلی‌اوره رنگ و براقیت خود را از دست می‌دهد، بنابراین برای کاربرد در فضاهای باز و مصارف زیبایی مناسب نیست و بیشتر در بناهای سرپوشیده استفاده می‌شود. در حالی که نوع آلیفاتیک به تابش UV مقاوم است و به‌عنوان یک پوشش کامل به‌کار می‌رود. البته باید درنظر داشت، نوع آلیفاتیک به مراتب گران‌تر از نوع آروماتیک است [۳۵].

پلی‌اوره خالص بهترین نوع عایق است و آستری‌های پلی‌اوره نیز بدین جهت از بهترین گزینه‌ها برای کف‌پوش ساختمان‌هاست و مزایای بسیاری دارد. آستری‌های پلی‌اوره با داشتن ویژگی‌هایی چون مقاومت به سایش، خواص مکانیکی عالی و حساس‌نبودن به تاول‌زدگی طی فرایند پخت، به‌ویژه در شرایط مرطوب، در محوطه پارکینگ‌ها، سالن‌ها، استخرهای شنا، مراکز خرید، انبارهای کالا، کارخانه‌ها و پوشش‌های اماکن ورزشی مانند کف‌پوش‌های زمین‌های بازی در فضای باز دارای جاذب ضربه کاربردهای بسیاری یافته‌اند. پوشش‌های پلی‌اوره از نظر نحوه اعمال و اجرا به دو دسته پلی‌اوره گرم و پلی‌اوره سرد تقسیم می‌شوند. پلی‌اوره گرم، پلی‌اوره خالص بوده و پلی‌اوره سرد که به آن پلی‌اوره هیبریدی نیز گفته می‌شود، ترکیب پلی‌یورتان و پلی‌اوره است و رفتار آن مشابه پلی‌اوره خالص نیست. پلی‌اوره سرد عموما برای مصارف خانگی و کارهای کوچک و پلی‌اوره گرم برای مصارف تخصصی و صنعتی (از قبیل کاربردهای ساختمانی) استفاده می‌شود. در اجرای پلی‌اوره سرد نیازی به استفاده از تجهیزات و ماشین‌آلات پیچیده نیست. پوشش را می‌توان با استفاده از ابزار معمولی مانند رول‌ها، غلتک‌ها و غیره اجرا کرد. هرچند، اعمال پلی‌اوره خالص نیازمند تجهیزات خاص است و این پوشش افشانده و گرم می‌شود. این روش در بسیاری از موارد از جمله محافظت در برابر خوردگی، آستری، غشاها و درزگیرها با توجه به رخ‌نمای پخت ویژه و ویژگی‌های خاص فیلم پلیمر استفاده می‌شود [۳۶].

افشانش پوشش پلی‌اوره نیازمند واکنشگاه (مانند واکنشگاه E-XP2 ساخت شرکت GRACO) و فشار باد تا حدود ۲۷۰۰ psi است. پوشش پلی‌اوره دوجزئی پس از گرمایش تا دمای ۷۰– ۸۰ °C به‌وسیله واکنشگاه، به کمک شیلنگ‌های مجهز به حسگر دما روی سطح افشانده و با وسیله مخصوصی فشرده می‌شود. با توجه به سرعت پخت زیاد پلی‌اوره خالص که از مزیت‌های عمده آن است، واکنش به‌سادگی پس از ٤ s تا ٦ s کامل می‌شود.

**حفاظت از مصالح ساختمانی**

در سال‌های اخیر، پژوهشگران به کاربردهای پوشش پلی‌اوره به‌عنوان محافظ و تقویت کننده مصالح به‌کاررفته در ساختمان و سازه‌های ساختمانی، به‌دلیل چسبندگی عالی پلی‌اوره به فولاد، فلزات، بتن، چوب و بسیاری مواد مشابه توجه ویژه‌ای داشته‌اند. همچنین، اعمال پوشش پلی‌اوره حتی در مکان‌های با دسترسی سخت آسان است و به‌دلیل انعطاف‌پذیری و ویژگی‌های کششی عالی، مزایای منحصر به فردی برای تقویت سازه ارائه می‌دهد. با استفاده از این پوشش می‌توان سازه‌های فولادی را در برابر خوردگی، آتش و الکتریسیته عایق کرد. همچنین، عایق‌کردن سازه‌های بتنی در برابر ضربه، خوردگی شیمیایی، آتش و غیره امکان‌پذیر است. در صورت استفاده از این پوشش با ضخامت زیاد (بیش از ۵ mm)، سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی و استاتیکی مقاوم می‌شوند [۳۷]. قابلیت درخور توجه پوشش‌های پلی‌اوره در جذب انرژی نسبت به سایر پوشش‌های مشابه صنعت ساختمان، مزیت بزرگی است. پوشش‌های پلی‌اوره را می‌توان در سطوح بیرونی سازه به عنوان پوشش یا میان‌لایه در یک ساختار کامپوزیتی برای حفاظت از بسیاری از مواد ساختمانی (از قبیل بتن، فولاد و آلومینیم) با استفاده از خواص فشاری یا کششی آن استفاده شوند [۳۸]. در دهه گذشته، کاربردهای بسیار متنوعی برای پلی‌اوره به‌عنوان یک پوشش محافظ روی سازه‌های فلزی و سرامیکی درنظرگرفته شده است [۳۹] که در ادامه به‌طور مفصل‌تری بحث می‌شوند.

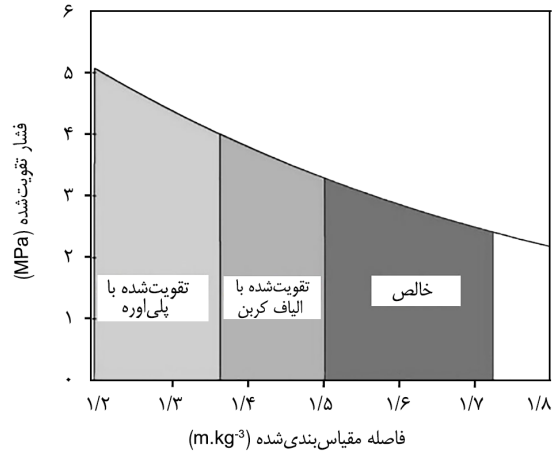
**حفاظت از بتن**

هزینه کم، استحکام زیاد و خواص ساختاری بتن باعث شده است تا این ماده، گزینه رایجی برای صنعت ساختمان باشد. برخی از خواص معمولی بتن مانند مقاومت شیمیایی محدود، رهاسازی گرد و غبار، تخلخل و نفوذپذیری باعث لزوم استفاده از یک لایه محافظ-تزئینی روی سطح بتن می‌شود. فناوری پوشش‌دهی افشانشی پلی‌اوره به‌منظور حفاظت از بتن در ساختمان یکی از پیشرفت‌های جدید دو دهه اخیر در صنعت پوشش‌های پلی‌یورتانی است. این فناوری پخت سریع، حتی در دماهای بسیار کم، عدم حساسیت به آب را به‌همراه خواص مکانیکی استثنایی، مقاومت شیمیایی و دوام برای بتن به ارمغان می‌آورد. گستردگی و تنوع کاربردها، شامل رواداری زیاد رطوبت، چه از لحاظ محیط، زیرآیند یا دما، باعث می‌شود تا پلی‌اوره یک پوشش بسیار مناسبی برای بتن در کاربردهای ساختمانی مانند تعمیر سقف، آسترهای نگهدارنده (به‌دلیل مقاومت سایشی زیاد)، غشاها، کف پارکینگ‌ها، پل‌ها و بخش‌های ساحلی باشد [۲۱]. نشان داده شده است، این پوشش‌ها در بتن باعث کاهش جذب آب و بهبود سایش شیمیایی و مقاومت در برابر سرما می‌شوند [۳۵].

پوشش‌های پلی‌اوره، افزون بر ظرفیت زیاد جذب انرژی تولیدشده در اثر بارگذاری‌های انفجاری تکانشی و پویا، چسبندگی خوبی به بتن دارند و می‌توانند چقرمگی و استحکام خمشی آن را افزایش و سفتی آن را کاهش دهند. Parniani و Toutanji در مطالعه رفتار میلگردهای بتنی تقویت‌شده با سامانه پوشش پلی‌اوره، به نقش این پوشش در افزایش ظرفیت خمشی و انعطاف‌پذیری و همچنین افزایش مقاومت خستگی میلگردهای بتنی تقویت‌شده پی بردند [۲۰].

Chen و همکاران استفاده از پوشش پلی‌اوره در اسفنج‌های بتنی را به‌عنوان روش مؤثری برای مقاومت انفجاری آن بررسی کردند [۴۰]. دیواره‌های بتن هوادهی‌شده اتوکلاوی (autoclaved aerated concrete, AAC) عایق گرمایی عالی بوده و دارای وزن بسیار سبک و جذب انرژی مناسب هستند. بنابراین، به‌عنوان یک ماده ساختمانی ایده‌آل برای سازه‌های محافظ مطرح هستند. برای بهبود مقاومت در برابر انفجار این دیواره‌ها، پوشش پلی‌اوره با ضخامت ۴ mm از بالا، پایین و دوطرف اعمال شد. در آزمون‌های خمشی ۳ نقطه‌ای، دیواره‌های ACC با پوشش پلی‌اوره دارای ظرفیت بار حداکثری نسبت به دیواره‌های بدون پوشش بودند. هرچند، این مقدار در پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) کمی کمتر بود و به عبارت دیگر آزمون‌های انفجار اثر تقویت پویای پوشش پلی‌اوره را تأیید کرد. این پوشش مقاومت انفجاری کم و دوطرف دیواره ACC را به‌طور مؤثر افزایش داد. مهم‌تر آنکه دیواره ACC با پوشش پلی‌اوره خواص مکانیکی پایای ضعیف‌تری نسبت به دیواره CFRP نشان داد. با این وجود، مقاومت انفجاری بسیار بیشتر از آن بود، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است.

در پژوهشی مشابه Raman و همکاران، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رفتار دیواره‌های بتنی مسلح (RC) با پوشش پلی‌اوره در معرض انفجار را ارائه دادند [۴۱]. آن‌ها ۳ نمونه از دیواره‌های بتنی مسلح (دو نمونه با پوشش پلی‌اوره و یکی بدون پوشش) به ابعاد ۱۷۰۰×۱۰۰۰×۶۰ $mm^3$ ساخته‌شده با بتن با استحکام فشاری ۴۳ MPa و تقویت‌شده در هر دو جهت طولی و عرضی استفاده کردند. پوشش پلی‌اوره با ضخامت ۴ mm روی تخته‌های بتنی مسلح اعمال و از ۱ kg آمونیت به‌عنوان ماده منفجره استفاده شد. تحلیل نتایج نشان داد، یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از پلی‌اوره به‌عنوان پوشش تقویت‌کننده سازه‌های بتنی در برابر اثرهای انفجار، تکه‌تکه‌شدن محدود است. به‌عبارت دیگر، چنین پوششی قابلیت محافظت از اجزا را در برابر تکه‌تکه‌شدن دارد که به نوبه خود می‌تواند از فروپاشی کل ساختار جلوگیری کند. همچنین، این پوشش می‌تواند کاهش انحراف دیواره‌های RC دارای پوشش پلی‌اوره را کاهش دهد و موجب کاهش درخور توجه ترک‌برداری بتن با پوشش پلی‌اوره شود. در همین راستا Szafran و همکاران، مقاومت در برابر خردشدن حلقه‌های بتنی تقویت‌شده با پوشش پلی‌اوره را ارزیابی کردند [۳۷]. آن‌ها یک آزمون استحکام خردشوندگی را روی این حلقه‌ها انجام و سازوکارهای شکست




شکل ۱- فشار اوج تحمل‌شده به‌وسیله دیواره‌های AAC با تقویت‌های متفاوت [۴۰].

نمونه‌های بتنی را با توجه به نحوه استفاده از پوشش پلی‌اوره شرح دادند. نتایج نشان داد، استفاده از پوشش پلی‌اوره در هر دو سطح حلقه‌های بتنی مقاومت در برابر خردشدن آن‌ها را بیش از ٪۲۰ بهبود می‌بخشد و امکان استفاده ایمن از بتن را حتی پس از ترک‌برداری فراهم می‌سازد.

سیمان نیز به‌عنوان یک جزء اصلی سازنده بتن برای پوشش‌دهی با پلی‌اوره به‌منظور بهبود عملکرد نهایی سازه بتنی مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، Toutanji و همکاران استفاده از پوشش پلی‌اوره را روی مواد سیمانی کارا مطالعه کردند [٤٢]. آن‌ها یک پوشش پلی‌اوره با مدول کم، کشش و ظرفیت جذب انرژی زیاد و زمان ژل‌شدن سریع را با افشانش تحت شرایط خاص روی سطوح مواد سیمانی اعمال کردند. آزمون‌های فشاری برای ایجاد عملکرد تر–خشک سیلندرهای بدون پوشش انجام و محیط ایجادشده از ماتریس سیمان پلیمری کارا با پلی‌وینیل بوتیرال (PVB) به‌عنوان تنها مصالح ساخته شد. نتایج نشان داد، این پوشش، استحکام فشاری نمونه‌ها را در معرض محیط‌های آب شیرین و آب دریا افزایش می‌دهد. نتایج مشابهی به هنگام قرارگیری بستر سبک‌وزن حاوی ماسه در همان محیط آبی به‌دست آمد. آزمون‌های انعطاف‌پذیری روی صفحات بدون پوشش و کاملا محصور در شرایط عملیاتی عادی انجام شد که این دو ماتریس برای ایجاد رفتار تنش–کرنش در آن نگه‌داری شده بودند. همچنین، ماتریس PVB با الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) به‌عنوان تقویت‌کننده اضافه شد. نتایج نشان داد، اضافه‌کردن الیاف و پوشش استحکام خمشی نهایی و چقرمگی شکست را افزایش و سفتی را کاهش می‌دهد.

Lyu و همکاران نیز مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید را در ملات سیمان با پوشش پلی‌اوره بررسی کردند [٤٣]. استفاده از روش‌های کارآمد و قابل اعتماد برای ارزیابی استحکام بتن در برابر نفوذ یون‌های کلرید، به‌ویژه از نظر دوام ساختارهای بتنی بسیار مهم است. ملات سیمانی با پوشش پلی‌اوره تحت بار خمشی، چرخه خشک–مرطوب و فروبری در محلول NaCl، مقاومت خوبی دربرابر نفوذ یون‌های کلرید نشان داد. به‌طوری که ضریب نفوذ یون‌های کلرید زیر $۲/۵\times۱۲-۱۰\ m^2/s$ بود که استحکام‌بخشی پوشش پلی‌اوره به ملات سیمان را تأیید کرد. ترک‌های بتن باعث افزایش نفوذپذیری و تشدید اثرهای مضر هوازدگی و حملات شیمیایی بالقوه می‌شوند. فن‌های استفاده‌شده معمول به‌منظور خودترمیم ترک‌ها شامل استفاده از درزگیرها و روش‌های باکمک زیست‌فناوری است. زمانی و همکاران از پلی‌اوره سنتزی برای کپسولی‌کردن باکتری‌ها به‌منظور پوشش‌دهی و خودترمیم خمیر سیمان استفاده کردند [٤٤]. آن‌ها پلی‌اوره را به‌دلیل خواص مکانیکی منحصربه‌فرد، انعطاف‌پذیری و واکنش پخت سریع به‌عنوان یک محافظ و حامل بالقوه باکتری باسیل، به‌منظور تولید بلور کلسیم کربنات به‌کار بردند و برای سنتز پلی‌اوره و کپسولی‌کردن باکتری در آن از پلیمرشدن در جا استفاده کردند. شناسایی شیمیایی و تحلیل‌های میکروساختاری، کپسول‌شدن باکتری در پلی‌اوره را بدون کاهش خواص مکانیکی آن تأیید کردند. میکروکپسول‌های پلی‌اوره دارای باکتری در خمیر سیمان به‌خوبی مخلوط شدند. شکل‌شناسی و آزمون‌های شناسایی شیمیایی، ته‌نشینی کربنات کلسیم را در اطراف منطقه ترک‌خورده تأیید کردند. درنهایت، کپسولی‌کردن پلی‌اوره به‌عنوان رویکردی عملی برای محافظت باکتری‌های موجود در مواد سیمانی به‌منظور خودترمیم آن‌ها و به تبع آن بهبود عملکرد بتن معرفی شد.

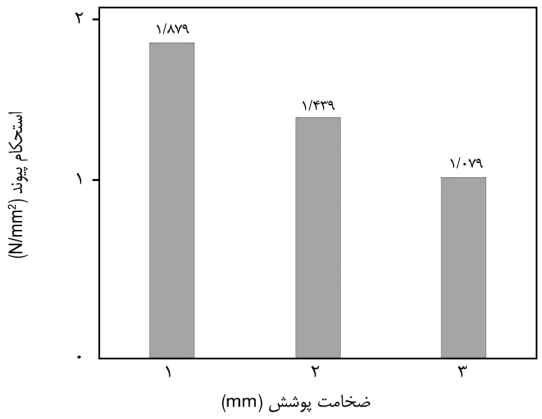
تلاش‌های زیادی برای تعیین بهترین ترکیب برپایه پلی‌اوره به‌عنوان پوشش محافظ بتن در سازه‌ها انجام شده است. Feng و همکاران، نتایج تجربی انتخاب بهینه‌ترین ترکیب پلی‌اوره و مخلوطی از سایر مواد را به‌منظور استفاده از آن به‌عنوان پوشش محافظ بتن برمبنای استحکام‌چسبندگی پوشش و زاویه تماس آن با آب ارائه دادند [٤٥]. سپس، آن‌ها مخلوط را برای بررسی خواص مکانیکی و سطحی آزمودند. بهترین خواص با استفاده از مخلوط تریمر هگزامتیلن دی‌ایزوسیانات (HDI)، پیش‌پلیمر ایزوفورون دی‌ایزوسیانات (IPDI) و مخلوطی از پلی‌اسپارتیک استر و مواد افزودنی (A) به‌دست آمد. آن‌ها بهترین نسبت وزنی را برای مخلوط HDI-IPDI-A، ۱/۰– ۰/٤۰۸–۰/٦۱۲ گزارش کردند. طبق مشاهدات آن‌ها، ترکیب این مخلوط و پلی‌اوره چسبندگی زیادی به بتن نشان داد و افزون بر این هیچ‌گونه ترکی تحت نیروهای کششی مشاهده نشد. این ترکیب با چسبندگی زیاد به بتن (٤/٥ MPa)، استحکام کششی ۱٦/٤ MPa، استحکام کششی در شکست ٪٤٥٦ و زاویه تماس با آب °۱۰۵ شناسایی شد و به‌عنوان پوشش مناسبی برای بهبود مقاومت در برابر ترک‌برداری و نفوذناپذیری بتن معرفی شد.

**حفاظت از فولاد**

استحکام زیاد، شکل‌پذیری و مقاومت مشابه در برابر فشار و کشش از مشخصه‌های مهم فولاد است که آن را نسبت به سایر مصالح ساختمانی برتر می‌سازد. افزون بر این، فراوانی معادن سنگ آهن نیز عاملی در تعمیم مصرف فولاد است. بنابراین، پوشش‌دهی و

محافظت از فولاد در ساختمان برای بهبود عملکرد سازه‌ها ضروری است. پژوهش‌های متعددی در راستای استفاده از پوشش پلی‌اوره بدین منظور انجام شده است [۳۸،٤٦]. در مطالعه‌ای، Arunkumar و Ramachandran چسبندگی پلی‌اوره را به فولاد نرم به‌منظور حفاظت از آن مطالعه کردند. آن‌ها در آزمون‌های خود برای نشان‌دادن سازش خوب میان استحکام، قابلیت کشسانی و خواص مکانیکی از فولاد AISI 1018 استفاده کردند. آزمون‌ها روی نمونه‌های فولادی پوشش‌یافته با پلی‌اوره با سه ضخامت مختلف انجام شد. پوشش پلی‌اوره در فاصله ۵۰ mm از فولاد اعمال شد. آزمون‌های خراش برای تعیین بار بحرانی مرتبط با چسبندگی پوشش انجام شد. نتایج این آزمون، مقاومت بسیار زیاد پلی‌اوره را در برابر خراش نشان داد که با افزایش ضخامت پوشش اعمال‌شده، افزایش می‌یابد. همچنین، آزمون پیوندش به‌منظور ارزیابی کیفیت اتصال مواد آزمون‌شده انجام شد. نشان داده شد، مقدار نیروی مورد نیاز برای جداکردن پوشش با ضخامت آن افزایش می‌یابد که در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، آزمون خمش برای ارزیابی سهولت خمش نمونه‌ها بدون تخریب آن‌ها انجام شد که اثر تقویتی پوشش پلی‌اوره را در صورت اتصال مناسب آن تایید کرد. با توجه به نتایج، می‌توان از لایه‌های پس‌زمینه مناسب میان پلی‌اوره و فولاد برای افزایش چسبندگی پلی‌اوره استفاده کرد. در نهایت نتیجه‌گیری شد، پلی‌اوره می‌تواند اثر تعیین‌کننده بر رفتار عناصر فولادی باربر داشته باشد [٤٧].

Arunkumar و همکاران در کار بعدی خود اشتعال‌پذیری مواد کامپوزیتی به‌شکل ورق‌های فولادی پوشش‌یافته با پلی‌اوره را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، مقاومت به شعله این مواد با این پوشش افزون بر این حقیقت که آتش خودبه‌خود خاموش شده است به‌طور درخور توجهی بهبود یافته، همین موضوع باعث توجیه استفاده از




شکل ۲- ارتباط استحکام پیوند و ضخامت پوشش پلی‌اوره [٤٧].

پلی‌اوره به‌عنوان پوشش برای ورق‌های فولادی می‌شود [٤٨].

پژوهش‌های تجربی و عددی نشان داده‌اند، استفاده از پوشش‌های پلی‌اوره در طراحی سازه‌های فولادی مقاوم به انفجار بسیار سودمند است. Ackland و همکاران، اثر پوشش پلی‌اوره را بر مقاومت به انفجار صفحات فولادی نرم بررسی کردند [٤٦]. آن‌ها در آزمون‌ها از صفحات فولادی ساخته‌شده با فولاد Bluescope XLERPLATE350 استفاده کردند و براساس نتایج آزمون‌ها و تحلیل عددی اظهار داشتند، استفاده از پوشش پلی‌اوره اثر مثبتی بر مقاومت بالستیکی این صفحات در مقایسه با ورق‌های فولادی بدون پوشش با همان چگالی سطح دارد. همچنین، آن‌ها تطابق خوب نتایج تحلیل محاسباتی با نتایج حاصل از آزمون‌ها را بیان کردند. در مطالعه مشابهی Samiee و همکاران، نتایج تحلیل عددی–دینامیکی پاسخ در یک صفحه فولادی را با و بدون پوشش پلی‌اوره برای فشار انفجار ارائه دادند [٤٩]. آن‌ها از صفحات فولادی HD-36 استفاده کردند و ابراز داشتند، در نمونه با پوشش پلی‌اوره تغییر شکل کمتری هنگام انفجار رخ می‌دهد و هرچه ضخامت پوشش پلی‌اوره بیشتر می‌شود، اثر مثبت آن افزایش می‌یابد.

Xue و همکاران مقاومت ضربه‌ای صفحات فولادی HD-36 را بررسی کردند که در ضربه‌های پرسرعت برای ارزیابی قابلیت جذب انرژی پوشش پلی‌اوره روی فولاد استفاده می‌شود و برای سازه‌های فولادی از اهمیت زیادی برخوردار است [۳۸]. آن‌ها یک صفحه فولادی بدون پوشش، یک صفحه فولادی با لایه ضخیمی از پوشش پلی‌اوره و دو صفحه فولادی یکسان هر یک با نیمی از ضخامت اصلی در دو طرف لایه پلی‌اوره را بررسی کردند. آن‌ها ابراز داشتند، برای صفحه فولادی که دارای پوشش ضخیم پلی‌اوره به‌شکل روکش، دو سازوکار جذب انرژی و به تبع آن مقاومت بیشتر وجود دارد: ۱) افزایش انرژی اتلافی به‌وسیله صفحه فولادی و ۲) افزایش انرژی ذخیره‌شده در پلی‌اوره. برای پیکربندی کامپوزیتی که در آن لایه پلی‌اوره بین دو صفحه فولادی قرار گرفته است، هیچ مزیتی از نظر مقاومت در برابر نفوذ مشاهده نشد.

**حفاظت از فلزات، سرامیک‌ها و چوب**

استفاده از سامانه‌های پوششی پلی‌اوره به حالت پوشش‌های بیرونی یا میان‌لایه در ساختار کامپوزیت برای محافظت از سازه‌های مهم فلزی در هنگام بارگذاری‌های انفجاری و کاربردهای نیازمند مقاومت ضربه‌ای زیاد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. پلی‌اوره با خواص مکانیکی و شیمیایی عالی آن باعث افزایش جذب انرژی، مقاومت انفجاری و مقاومت در برابر شکستگی دینامیکی سازه‌های

صفحه فلزی می‌شود [۵۰].

فلز آلومینیم یکی از پرکاربردترین فلزات در مهندسی ساختمان است. وزن کم و شکل‌پذیری زیاد آن، این فلز را برای ساخت در و پنجره، سقف‌های داخلی و خارجی، نمای ساختمان‌ها و غیره مناسب ساخته است. استفاده از آلومینیم بار استاتیکی وارد بر ساختمان را کاهش می‌دهد. درنتیجه، مصالح لازم کاهش می‌یابد و فشار کمتری به پی ساختمان وارد می‌شود. پوشش‌دهی آلومینیم با پلی‌اوره برای حفاظت و تقویت این فلز با هدف کاربرد بهینه در سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. Mohotti و همکاران نفوذ پرتابه‌های پرسرعت را از میان لایه سامانه‌های صفحه‌ای کامپوزیت آلومینیم-پلی‌اوره بررسی کردند [۵۱]. آن‌ها در آزمون‌های خود از آلیاژ آلومینیم AA5083-H116 و پلی‌اوره Eraspray ESU630D® استفاده کردند و جذب انرژی پوشش پلی‌اوره را با قابلیت آن در کاهش سرعت باقی‌مانده پرتابه ارزیابی کردند. آن‌ها براساس نتایج تحلیلی، عددی و تجربی ابراز کردند، پلی‌اوره در حالی که به‌عنوان سپر اضافی در برابر ذرات در حال پرواز عمل می‌کند، قابلیت خوبی در کاهش سرعت باقی‌مانده و درنتیجه جذب انرژی دارد و درنهایت از آلومینیم محافظت می‌کند.

آن‌ها در کار دیگر خود رفتار مواد کامپوزیتی به‌شکل صفحه آلومینیمی پوشش‌یافته با پلی‌اوره را تحت ضربه‌های سخت یک جسم کوچک با سرعت کم (کمتر از ۱۵ m/s) مطالعه کردند. سامانه بررسی‌شده عین همان سامانه کار بود. آن‌ها بر مطالعه تغییر شکل خارج صفحه صفحات کامپوزیت آلومینیم و پلی‌اوره قرارگرفته در معرض ضربه کم‌سرعت متمرکز شدند. ضخامت صفحات آلومینیم ۳ mm یا ۶ mm و ابعاد آن‌ها ۳۰۰×۳۰۰ $mm^2$ بود. ضخامت پوشش‌های پلی‌اوره استفاده‌شده نیز ۶ mm یا ۱۲ mm بود. آن‌ها براساس تحلیل عددی و نتایج تجربی اظهار داشتند، استفاده از پلی‌اوره در ترکیب با آلومینیم باعث افزایش جذب انرژی طی انفجار و کاهش تغییر شکل دائمی نمونه‌ها می‌شود. آن‌ها همچنین خاطرنشان کردند، از پلی‌اوره به‌عنوان یک دافع برای محافظت از سازه‌ها در برابر ضربات ناگهانی می‌توان استفاده کرد [۱۰].

سرامیک‌ها، به‌ویژه به‌شکل کاشی‌های سرامیکی، از جمله رایج‌ترین و پرکاربردترین مصالحی هستند که برای دیوارهای داخلی ساختمان‌ها و در ابعاد مختلف برای تزئین داخلی و خارجی ساختمان‌ها و همچنین عایق رطوبتی استفاده می‌شوند. بسیاری از پژوهشگران، استفاده از سرامیک‌ها را به‌عنوان جاذب انرژی مطالعه کرده‌اند و برخی از پیشرفت‌ها در عملکرد بالستیک کاشی‌های سرامیکی با پوشش‌دهی آن‌ها با لایه‌هایی از مواد مختلف همچون رزین اپوکسی به‌همراه الیاف شیشه یا الیاف کربن و غیره ایجاد شده است. استفاده از سرامیک برای کاربردهای جذب انرژی به کاهش وزن درخور توجهی در سازه‌ها منجر می‌شود، بنابراین هرگونه تغییر در پیکربندی سرامیک در سامانه که موجب جذب انرژی بیشتر با همان چگالی پیشین شود، درخور توجه است.

از سوی دیگر ثابت شده است، پوشش پلی‌اوره عاملی برای اتلاف انرژی در بسیاری از کاربردهاست و از سایر موادی که معرفی‌شده در پوشش‌دهی سرامیک‌ها و محافظت از آن‌ها عملکرد مؤثرتر و اثربخش‌تری دارد [۵۲]. Kamonchaivanich و همکاران، سازوکار پوشش پلی‌اوره در استحکام خمشی کاشی‌های سرامیکی را بررسی کردند [۵۳]. همچنین، آن‌ها مدول یانگ و اثر موضعی پوشش پلی‌اوره اعمال‌شده را بر نمونه‌های سرامیکی ارزیابی کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند، سرامیک‌های با پشت‌پوش پلی‌اوره با مدول کمتر (حدود ۲۰۰ MPa)، استحکام خمشی زیادی نشان می‌دهند. هرچند این استحکام هنگامی که از پشت‌پوش پلی‌اوره با مدول زیاد (حدود ۹۰۰ MPa) استفاده شود، نسبت به حالت قبل دو برابر می‌شود. آن‌ها در پژوهش دیگری، توزیع تنش در زیرآیند سرامیکی را با روش اجزای محدود تجزیه و تحلیل و سازوکار بهبود خواص مکانیکی را مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند، توزیع تنش در کاشی‌های سرامیکی با پشت‌پوش پلی‌اوره به‌دلیل اثر بالشتکی پین‌های پشتی یکنواخت‌تر و مؤثرتر است. بنابراین، توزیع تنش ناشی از پلی‌اوره برای بهبود مقاومت خمشی زیرآیندهای سرامیکی مهم است [۵۴].

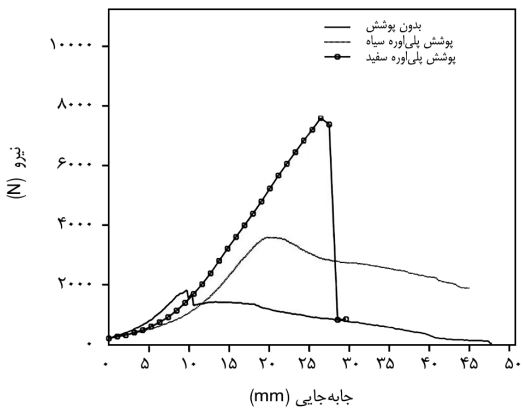
چوب یکی از قدیمی‌ترین و ابتدایی‌ترین مصالح ساختمانی موجود در طبیعت است که بشر در طول تاریخ از آن بهره برده است. چوب تنها مصالح ساختمانی است که از منبع تجدیدپذیر به‌دست می‌آید و از مصالح خوبی برای مناطق زلزله‌خیز محسوب می‌شود. چوب با دارابودن مقاومت مکانیکی نسبتا خوب، گرما و سرماعایقی، قابلیت پرداخت سطح و رنگ‌پذیری، ارزانی و سهولت ساخت کاربردهای بسیاری در صنایع ساختمان و معماری دارد. در سازه‌های چوبی، ضعف اصلی استفاده از موادی مانند اپوکسی یا الوار و بلوک‌های چوبی به‌منظور مقاوم‌سازی این سازه‌ها، زمانبری این فرایندهاست. اعمال پوشش پلی‌اوره به‌عنوان یک رویکرد سریع و مؤثر برای تقویت سازه‌های چوبی مورد توجه قرار گرفته است [۵۵].

Alldredge و همکاران قابلیت بالقوه پوشش‌دهی پلی‌اوره را به‌عنوان یک روش تقویت ساختاری چارچوب‌ها و اتصالات سازه‌های سنتی چوبی نشان دادند [۵۶]. آن‌ها به‌منظور بررسی اثر

پوشش پلی‌اوره بر ظرفیت باربری اتصالات، آزمون بار را روی یک چارچوب سبک انجام دادند که اثر تکیه‌گاه چوبی را در یک صفحه شبیه‌سازی می‌کرد. در این آزمون از یک چارچوب معمولی و تقویت‌شده با نوار مسطح و نیز دو نوع پلی‌اوره شامل پلی‌اوره سیاه با کشش نسبتا زیاد و مدول کشسانی کم (حدود MPa ۲۰۰) و دیگری پلی‌اوره سفید با کشش تقریبا کم و مدول کشسانی زیاد (حدود MPa ۵۰۰) استفاده شد. ضخامت پوشش روی نمونه حدود mm ۲ بود. در این آزمون، از یک دستگاه MTS با ظرفیت تقریبی kN ۱۰۰ استفاده شد که مقاومت اتصال در برابر پارگی را با اعمال نیرو با سرعت جابه‌جایی cm/min ۱/۲۷ ارزیابی می‌کرد. نتایج آزمون نشان داد، استفاده از پوشش پلی‌اوره در هر مورد، خطر وادادگی را کاهش و ظرفیت بار اتصال را به مقدار درخور توجهی افزایش می‌دهد. همچنین شایان ذکر است، نیروی بیشتری برای حذف اتصال پس از اعمال پوشش پلی‌اوره برای هر مورد احتمالی، باید استفاده شود. در چند مورد، اختلاف حتی ٪۸۰۰ بهتر از اتصال بدون پوشش بود. سرانجام آن نتیجه‌گیری کردند، پوشش پلی‌اوره برای تقویت و بقای سازه‌های چوبی بسیار مناسب است، افزون بر این واقعیت که این پوشش مقاومت خوبی در برابر سیلاب دارد که در مصالح چوبی حائز اهمیت است. شکل ۳ نمودار بار برحسب خمش را برای یک چارچوب چوبی معمولی (بدون نوار تقویت‌کننده) در حالت بدون پوشش و با پوشش‌های پلی‌اوره سیاه و سفید نشان می‌دهد.

## حفاظت از سازه‌های هیدرولیکی

پوشش‌های پلی‌اوره می‌توانند برای محافظت هیدرولیکی سازه‌های




شکل ۳- نمودار بار برحسب خمش برای قاب چوبی معمولی (بدون نوار تقویت‌کننده) در حالت بدون پوشش و با پوشش‌های پلی‌اوره سیاه و سفید [۵۶].

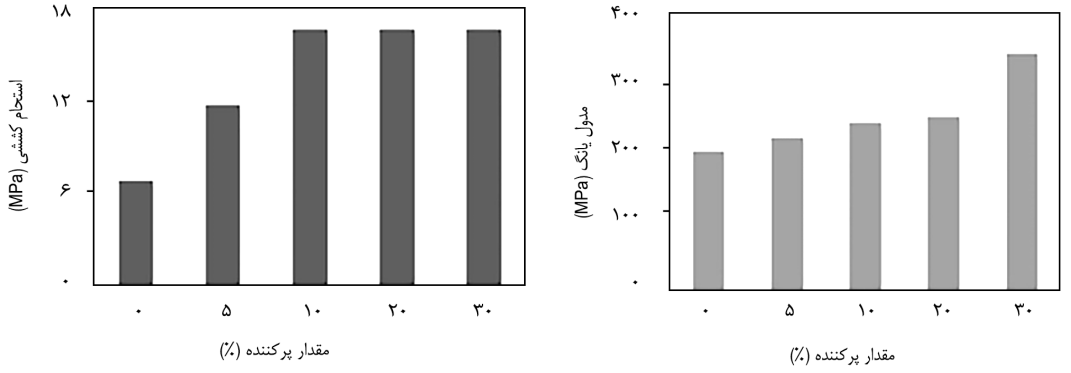
بتنی به‌منظور تأمین عملکرد بلندمدت در تأسیسات دریایی استفاده شوند [۶۰]. Huang و همکاران نوعی پوشش پلی‌اوره آلیفاتیک را برای محافظت سازه‌های بتنی دریایی مطالعه کرده و دریافتند، تغییر درخور توجهی پس از ۲۰۰ روز قرارگیری در معرض مه‌نمک در شکل‌شناسی سطح و ساختار پوشش رخ نمی‌دهد [۶۱]. خواص مواد برپایه پلی‌اوره، آن‌ها را برای کاربردهای پوششی نیازمند مقاومت ضربه‌ای و مقاومت به آب پرفشار مناسب می‌سازد [۶۲،۶۳]. مطالعات متعددی توسط پژوهشگران انجام شد که کارایی این پوشش‌ها را در این زمینه کاربردی تأیید می‌کنند [۶۹-۶۴].

## کامپوزیت‌های پلی‌اوره

کامپوزیت‌های پلی‌اوره که در آن‌ها از پلی‌اوره به‌عنوان ماتریس و سایر مواد مانند نانولوله‌های کربن (CNT) و انواع الیاف (به‌ویژه الیاف شیشه و کربن) و غیره به‌عنوان تقویت‌کننده و پرکننده استفاده می‌شود، به‌سبب خواص عالی گوناگون و منحصربه‌فرد و صرفه اقتصادی در صنایع ساختمان مورد توجه قرار گرفته‌اند که در ادامه به بررسی این موارد پرداخته می‌شود.

از جمله موادی که به‌عنوان پرکننده در کامپوزیت‌های پلی‌اوره استفاده می‌شود، خاکستر بادی (fly ash) است که با افزودن آن خواص کششی و به‌ویژه مدول کششی پلی‌اوره تا حد معینی افزایش می‌یابد [۷۰]. الیاف بازالت آسیاب‌شده از مواد دیگری است که برای بهبود خواص سامانه‌های کامپوزیتی با بستر پلی‌اوره استفاده می‌شود. افزودن ٪۵ تا ٪۳۰ وزنی از این الیاف به پلی‌اوره، افزون بر اینکه نوعی اصلاح کم‌هزینه است، به‌طور درخور توجهی عملکرد مکانیکی و پایداری گرمایی و ترمودینامیکی محصول نهایی را افزایش می‌دهد که به عنوان پوشش افشانه‌ای برای محافظت از اقلام هیدروتکنیکی در ساختمان و غیره استفاده می‌شود. در شکل ٤ خواص مکانیکی پلی‌اوره و کامپوزیت پلی‌اوره-BMF در درصدهای وزنی مختلف پرکننده مقایسه شده‌اند. نکته قابل توجه آنکه ویژگی‌ها (مدول و استحکام کششی) با افزایش درصد وزن پرکننده تا حدی بهبود یافته‌اند [۷۱].

تقویت با نانولوله‌های کربن چنددیواره نیز روش متداولی برای افزایش $T_g$ و بهبود خواص مکانیکی و پایداری گرمایی در سامانه‌های نانوکامپوزیت برپایه پلی‌اوره است. به‌طور کلی، استفاده از پلی‌اوره در این سامانه‌ها عملکرد مکانیکی و گرمایی را نسبت به بستر اپوکسی افزایش می‌دهد [۷۲]. هرچند، سامانه‌های نانوکامپوزیت پلی‌اوره اغلب دو دمای گذار شیشه‌ای ($T_{g1}$،$T_{g2}$) نشان می‌دهند. $T_{g1}$ مربوط به حرکت‌های بخش مولکولی در




شکل ٤- خواص مکانیکی پلی‌اوره و کامپوزیت‌های پلی‌اوره-BMF: (الف) مدول و (ب) استحکام کششی [۷۱].

بستر پلیمری نرم و $T_{g2}$ به تحرک محدود در نواحی نانو مربوط است [۷۳]. نانورس تقویت‌کننده متداول دیگری برای سامانه‌های نانوکامپوزیت پلی‌اوره است که باعث افزایش مدول یانگ و ازدیاد طول تا پارگی پلی‌اوره می‌شود. البته ساختار درشت‌مولکول پلی‌اوره برای بهینه‌سازی این تقویت‌کننده مهم است و به‌طور مثال در پلی‌اوره با چگالی اتصالات عرضی تقویت مطلوب انجام نمی‌گیرد [۷٤].

استفاده از سامانه‌های کامپوزیت پلی‌اوره به‌دلیل یک‌پارچگی، مقاومت ضربه‌ای عالی، پایداری و مقاومت به ترک‌برداری می‌تواند مشکلات روش‌های ضدآب‌سازی از قبیل نشت آب را مرتفع سازد [۷۵]. مخازن فولادی ریلی در ساختمان‌سازی برای مواردی مانند حمل و نقل سیمان و غیره استفاده می‌شوند [۷٦]. بدین ترتیب، سامانه‌های کامپوزیت پلی اوره-اکستیک (Auxetic) (مواد با نسبت پواسون منفی) می‌توانند مقاومت انفجاری سازه‌ها را افزایش دهند [۷۷].

پژوهش‌های متعددی درباره استفاده از گرافن اکسید در پلی‌اوره [۷۸] و کامپوزیت‌های پلاستیک تقویت‌شده با الیاف [۷۹-۸۲]، پلی‌اوره تقویت‌شده با الیاف [۸۳]، پلی‌اوره- الیاف کربن [۸٦-۸٤]، پلی‌اوره تقویت‌شده با الیاف شیشه [۹۱-۸۷] و پلی‌اوره تقویت‌شده با الیاف گسسته [۹۲،۹۳] برای بتن انجام شده و تغییرات خواص ناشی از اعمال آن‌ها بررسی شده است.

## نتیجه‌گیری

افزایش مداوم تقاضا برای سازه‌های مهندسی و ساختمان‌سازی به توسعه موادی با مشخصه‌های منحصربه‌فرد و عالی، مانند پلی‌اوره، در صنعت ساختمان منجر شده است. افزون بر این زمینه، در اجرای پروژه‌های جدید مهندسی و نوسازی و نگه‌داری از پروژه‌های موجود، کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده است. گرچه به‌طور کلی، خواص استثنایی از قبیل ظرفیت جذب انرژی و کشسانی زیاد، مقاومت به خراش و چسبندگی زیاد باعث شده است تا پلی‌اوره تقریبا برای هر صنعت و برای کاربردهای متعددی مانند جلوگیری از سایش و خوردگی پوشش‌ها در تونل‌ها و خودروها و همچنین پوشش‌های داخلی و خارجی برای محافظت از سازه‌های ساختمانی در برابر انفجار، مناسب باشد.

پلی‌اوره دارای خواص درخور توجهی همچون استحکام کششی، مقاومت پارگی، مقاومت ضربه‌ای، همچسبی، استحکام کششی، مقاومت در برابر ترک‌برداری و خردشدن و مقاومت سایشی بوده که آن را برای کاربردهای ساختمانی از قبیل تقویت انواع مصالح و سازه‌ها مناسب ساخته است. همچنین، پلی‌اوره عملکرد ضدخوردگی خوبی دارد و در برابر فروبری طولانی‌مدت در اکثر اسیدهای خورنده، بازها، نمک‌ها، یون‌های کلرید و غیره مقاوم است. افزون بر این، قابلیت پلی‌اوره در افزایش پایداری سازه‌ها زیر بارهای استاتیکی و دینامیکی پیش‌تر به اثبات رسیده است. این قابلیت باعث می‌شود تا پلی‌اوره یکی از گزینه‌های بالقوه برای جایگزینی مواد به‌کاررفته فعلی برای بهبود ظرفیت باربری سازه‌ها باشد.

پژوهش‌های عملی متعددی که در این مقاله مرور شدند، نشان دادند، می‌توان از پلی‌اوره برای طولانی‌ترکردن عملکرد بسیاری از اقلام و سازه‌های مهندسی موجود از طریق بهبود مقاومت آن‌ها در برابر عوامل بیرونی (از قبیل خوردگی شیمیایی و زیستی و عوامل جوی) استفاده کرد.

پلی‌اوره دارای مزایای متعددی است که آن را برای پوشش‌دهی در ساختمان‌ها مناسب می‌سازد که شامل موارد زیر است:

- ضدآب است.
- سرعت اعمال آن زیاد است و بدون هیچ گونه درز و شکافی به‌صورت یک‌پارچه اجرا می‌شود.
- در برابر تابش UV و نور خورشید مقاوم است.
- ضدانفجار است.
- به‌راحتی قابل اجرا بوده و پس از آن به‌سرعت قابل استفاده است.
- نسبت به مواد شیمیایی و عوامل فیزیکی بسیار مقاوم است.
- انعطاف‌پذیری زیادی دارد.
- در برابر ضربه‌ها و ترک‌برداری و همچنین سایش بسیار مقاوم است.
- چسبندگی عالی به سطوح مختلف دارد.
- مقاومت زیادی در برابر شرایط محیطی و جوی مختلف دارد.
- مواد زیستی مانند میکروب‌ها و باکتری‌ها به آن نمی‌چسبند.
- غیرسمی و بی‌بو بوده و گاز تولید نمی‌کند.

مزایای بیان‌شده، پوشش پلی‌اوره را از لحاظ عملکردی نسبت به سایر سامانه‌های پوششی همچون پلی‌یورتان، اپوکسی و پلی‌استر و نیز پوشش‌های لاستیکی مانند لاستیک نیتریل (NBR)، کلروپرن، بوتیل و غیره مناسب‌تر می‌سازد. نقطه قوت اصلی پوشش پلی‌اوره نسبت به پوشش‌های اپوکسی و پلی‌استر، انعطاف‌پذیری و ضعف اصلی آن مقاومت به قلیا و حلال است.

با وجود اینکه پوشش‌های پلی‌اوره باعث افزایش مقاومت در سازه‌ها و مصالح ساختمانی، به‌ویژه بتن‌ها می‌شوند، پژوهش‌های بیشتری در آینده برای کشف کامل این قابلیت بالقوه در کاربردهای خاص لازم است. به‌عنوان مثال، در مواردی که احتمالا یک سازه در معرض آتش‌سوزی قرار می‌گیرد، ارزیابی رفتار بتن و پوشش پلی‌اوره اهمیت می‌یابد. در کاربردهای حساس زیست‌محیطی، نشت احتمالی مواد مضر از بتن با پوشش پلی‌اوره باید مدنظر قرار گیرد و در مواردی که عملکرد بلندمدت اهمیت داشته باشد، ارزیابی دوام پوشش پلی‌اوره و اجزای سازنده بتن ضروری است.

بهبود خواص مختلف مکانیکی، گرمایی و غیره پلی‌اوره در کنار برطرف‌کردن یکی از ضعف‌های اصلی سامانه‌های پلی‌اوره، که قیمت زیاد آن است، همواره می‌تواند مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد. یکی از راه‌های تحقق این مهم، استفاده از سامانه‌های کامپوزیت پلی‌اوره با انواع تقویت‌کننده‌های گوناگون اعم از گرافیت، نانورس، CNT، الیاف مختلف و غیره است که باتوجه به کاربرد هر یک از آن‌ها، خواص ویژه‌ای را در کنار صرفه اقتصادی (که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سامانه‌های کامپوزیت است) به ارمغان می‌آورد. بنابراین در استفاده از سامانه‌های کامپوزیت پلی‌اوره، بررسی‌های امکان‌سنجی فنی–اقتصادی و نگه‌داری سامانه‌های کامپوزیت نقش مهمی دارد.

درنهایت می‌توان گفت، استفاده از مواد برپایه پلی‌اوره به‌طور پیوسته در حال رشد و توسعه است. این مواد بیشترین کاربرد را در پوشش‌دهی سطوح گوناگون دارند. مسائل زیست‌محیطی و مقررات جدید، فناوری نوین ساخت پوشش را به‌سوی سامانه‌های بدون حلال، پرجامد و برپایه آب هدایت می‌کنند. در آینده سامانه‌های پوشش پلی‌اوره بدون ماده سمی و گران ایزوسیانات کاربری بیشتری می‌یابند. طرح‌های نوین جالبی مانند آنچه که پیش‌تر بررسی شد [۴۲]، نیز برای سامانه‌های سیمانی اصلاح‌شده با پلی‌اوره به‌منظور حفاظت کف و سطوح گوناگون وجود دارد. با ورود سامانه‌های جدید به بازار، ساختمان‌های قدیمی از رده خارج می‌شوند و برای سامانه‌های جدید، آینده‌روشنی پیش‌بینی می‌شود.

## مراجع

مراجع این مقاله در وبگاه نشریه بسپارش برای اطلاع بیشتر خوانندگان درج شده است.