

بررسی انواع پوشش‌های آلی و معدنی بر روی سطح شیشه

اعظم صمدبین^{۱*} - الهام صمدبین^۲

۱- کارشناس ارشد، پژوهشکده علوم و فناوری‌های شیمیایی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۳۷-۱۴۶۶۵

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۱۱-۱۴۱۱۵

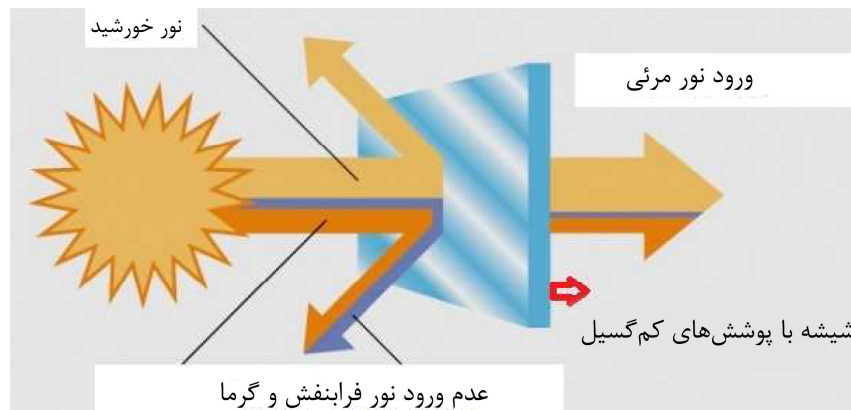
تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۲۳ تاریخ بازبینی ۱: ۹۲/۴/۵ تاریخ بازبینی ۲: ۹۲/۴/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۲۶

چکیده

اعمال پوشش بر روی شیشه یک بخش ضروری و مهم در ساخت شیشه‌های جدید است، زیرا اغلب محصولات شیشه بدون پوشش، خواص مناسب برای کاربردهای خاص را ندارند. شیشه‌های پوشش‌دار فرصت‌های جدیدی را برای عملکرد بهتر و کاربردهای جدیدتر فراهم کرده است. از میان این کاربردها می‌توان به کنترل گرمای ورودی، درصد نور بازتابی و عبوری از شیشه و هم چنین بهبود در خواص مکانیکی و الکترواپتیکی اشاره کرد. در این مقاله پوشش‌های عملی در شیشه‌های مسطح، بطری‌ها، الیاف شیشه‌ای کم‌گسیل و در شیشه‌های خودتمیزشونده بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی

انواع پوشش شیشه، شیشه مسطح، بطری، الیاف شیشه، روش‌های پوشش‌دهی.



*Corresponding author: samadbina@ripi.ir

Organic and inorganic coating on glass surface, A. Samadbin, E. Samadbin

۱- مقدمه

الکتروکرمیک در آینه‌های خودکار اتومبیل. در ادامه چند نمونه از انواع شیشه‌های پوشش دار بررسی شده است [۳-۱].

۲- انواع شیشه‌های پوشش دار

بسیاری از پیشرفت‌های مطرح شده در زمینه شیشه مدیون پوشش‌دهی بر روی آن است. این پوشش‌های شیشه‌ای خصوصیات متنوعی از جمله نوری، حرارتی، الکتریکی و مکانیکی را فراهم می‌کنند (جدول ۱) [۴]. در ساخت این پوشش‌ها انواع ترکیبات آلی و معدنی استفاده شده و در بعضی از کاربردها مانند شیشه‌های کم گسیل هر دو این پوشش‌ها به کار رفته است. پوشش‌های ضدلک، ضدالکتروسیته و ضدباکتری دارای پوشش‌های آلی بوده در حالی که در سایر پوشش‌های شیشه ترکیبات معدنی جز غالب می‌باشد [۴].

۲-۱- شیشه‌های مسطح

تقریباً سالیانه ۵۵۰ میلیون مترمربع شیشه مسطح در شمال امریکا پوشش داده می‌شود. کاربردهای این شیشه‌ها به دو دسته پوشش‌هایی با کاربرد در شیشه‌های کم گسیل و الکتروپتیک تقسیم می‌گردد. در سایر کشورها نیز پوشش‌دهی روی شیشه‌های مسطح مورد توجه قرار دارد. در ادامه این موضوع مورد بررسی قرار می‌گردد [۵].

۲-۱-۱- شیشه‌های کم گسیل^۱

شیشه‌های مسطح در حال تکامل هستند و بیشترین کاربردهای آن‌ها در زمینه شیشه‌های کم گسیل است. سایر شیشه‌ها نظیر شیشه‌های اتومبیل، شیشه‌های درب فریزر و شیشه‌های دستگاه کپی نیز در این دسته قرار داده می‌شوند. کاربردهای خاص این شیشه‌ها شامل شیشه‌های خود تمیزشونده و شیشه ضدانعکاس بوده و فناوری ساخت آن‌ها در حال تکامل است. مسأله مهم در شیشه‌های مسطح کاهش هزینه است. آینده‌ای که برای این شیشه‌ها پیش‌بینی می‌شود شامل توسعه شیشه‌های ضدسایش و ضدخوردگی و روش‌هایی که پوشش‌دهی را با سرعت بالاتری انجام دهد و بازده فرآیند را بهبود بخشد، می‌باشد [۶].

۲-۱-۲- ابزار الکتروپتیک

از اواسط سال ۱۹۶۰ به کارگیری شیشه‌های پوشش داده شده برای کنترل گرمای خورشیدی آغاز شد. پوشش‌های اپتیک در ابعاد وسیع و مقادیر بالا تولید شده و این صنعت با آمدن شیشه‌های منحنی شکل، رشد بیشتری یافته است. از کاربردهای این محصول می‌توان به عنوان شیشه‌های گرمایی الکتریکی که در قسمت جلوی اتومبیل جهت آب کردن برف و یخ استفاده می‌شود، اشاره کرد. به کارگیری این پوشش‌ها در سطح وسیع برای سلول‌های خورشیدی از پتانسیل بالایی برخوردار است. تمامی سلول‌های خورشیدی نیاز به مواد جاذب نور دارند و معمولاً به شکل چند لایه به کار می‌رود.

امروزه با پیشرفت فناوری و استفاده از تجهیزات پیچیده برای پوشش‌دادن لایه‌های بسیار نازک به روی شیشه، شیشه‌هایی تولید می‌گردد که تا حد زیادی کاستی‌های شیشه معمولی در زمینه‌های گوناگون را برطرف کرده است. اما در زمینه پوشش‌دهی بایستی ملاحظات را از لحاظ انرژی و کاهش در زمینه اتلاف آن در نظر گرفته شود تا به تولیدات صنعتی تبدیل گردند. هم‌چنین برای پوشش‌دهی کارآمدتر باید اطلاعاتی را در زمینه شیمی لایه نشانی، واکنش‌های سطحی و مشخصات فنی و روش‌های رسیدن به مطلوبات تئوری و موانع ساخت مدنظر قرار داد. مشکلاتی که اغلب در زمینه پوشش‌دهی بیان می‌گردد شامل فقدان درک اساسی از خواص شیشه‌ها در سطح مولکولی و واکنش‌های آن با دیگر مواد، اندازه‌گیری و کنترل فرآیندها جهت پوشش‌دهی مناسب و اقتصادی‌تر است.

پوشش‌دهی بر روی سطح شیشه بخش مهمی از این صنعت به حساب می‌آید. بدون پوشش‌دهی بیشتر شیشه‌ها خواص مطلوب برای کاربردهای خاص را نخواهند داشت. از دلایل به کار بردن پوشش بر روی شیشه‌ها می‌توان موارد زیر را ذکر کرد:

- به دلیل سایش بالایی که در لایف شیشه‌ای به کار رفته در عایق‌ها و کامپوزیت‌های اتومبیل ایجاد می‌شود، این لایف بدون پوشش محافظ نمی‌تواند کاربرد داشته باشند.
- ساخت شیشه‌هایی با اتلاف پایین‌تر انرژی و شیشه‌های کنترل‌کننده انرژی خورشیدی، سبب صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود و این امر جز با پوشش‌دهی شیشه‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. این شیشه‌ها اغلب به چندین لایه پوشش نیاز دارند.
- در هر دقیقه ۷۰۰ بتری شیشه‌ای ساخته می‌شود. پوشش‌دهی بتری‌ها، علاوه بر کاهش وزن آن‌ها، استحکام در برابر شکسته شدن را نیز افزایش می‌دهد.
- محصولات جدیدی هم چون شیشه‌های هوشمند و صفحات تخت اغلب با تکیه بر پوشش‌دهی شیشه تولید می‌گردند [۱]. از کاربردهای محصولات شیشه‌ای پوشش‌دار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- کاربردهای ساختمانی: عایق‌های حرارتی، مواد ضدحریق و غیره
- محصولات الکتریکی و الکترونیکی: صفحات تخت نمایشی، مواد لیزری و غیره
- کاربردهای نوری و فوتونیک: اپتوالکترونیک، وسایل امنیتی نوری، در لنزها و آینه‌های خورشیدی و سیستم‌های فتوولتاییک و غیره
- کاربردهای بیولوژیکی و دارویی: شیشه‌های با پوشش زیستی در قطعات استخوانی و در محصولات که به شکل کنترل شده دارو آزاد می‌کنند.
- سایر موارد هم چون ویژگی ضدانجمادی که در فریزرهای سوپرمارکت‌ها و در پنجره‌های وسایل نقلیه به کار می‌رود، در دستگاه‌های بارکدخوان با ویژگی ضدسایشی و آینه‌های

¹ Low Emitt

جدول ۱- معرفی انواع خصوصیات و پوشش‌های شیشه با قابلیت ویژه [۴].

با خصوصیات یهداشتی	با خصوصیات الکتریکی/مغناطیسی	با خصوصیات مکانیکی ساختاری	با خصوصیات شیمیایی فیزیکی	با خصوصیات حرارتی	با خصوصیات نوری
پوشش‌های ضدباکتری	پوشش‌های ضد الکتروسیته پوشش‌های هادی پوشش‌های فروالکترونیک و پیزوالکترونیک پوشش الکترومغناطیسی (ضدادار) جاذب‌های جاذب موج	پوشش‌های سخت و ضد سایش پوشش‌های سخت	پوشش‌های کاتالیست نوری پوشش‌های ضدلک پوشش‌های ضدخوردگی پوشش‌های حایل	پوشش‌های ایتوست ^۱ مقاوم حرارتی پوشش مقاوم نور (زیر قرمز)	تابش نور (پوشش‌های فلورسنتس و فسفرسنتس) پوشش‌های ضدانعکاس پوشش‌های فوتوکرومیک/رنگی

1 Intumescent

دیده می‌شود. پوشش‌های ضدانعکاس (AR)^۲ به صورت تک‌لایه یا چندلایه، بر اساس شرایط انعکاسی یا عبوری نور، برای محدوده‌های خاصی از طول موج طراحی می‌شوند [۱۰]. کاربرد گسترده این پوشش‌ها در سلول‌های خورشیدی است. این امر به دلیل انعکاس تقریبی ۳۵٪ از نور خورشید در هنگام برخورد با سطح سلول‌های خورشیدی می‌باشد. پوشش ضدانعکاس بر روی سطح شیشه (اکسید رسانای شفاف) قرار می‌گیرد و بازده را افزایش می‌دهد. رایج‌ترین اکسید مصرفی، اکسیدهای تیتانیم و اکسیدهای سیلیکون هستند. هم‌چنین این پوشش‌ها در صافی‌های طول موج که جهت عبور امواج ناخواسته ساخته شده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. محدوده طیف عبوری از طریق میزان جذب لایه‌های پوشش‌داده به‌طور جداگانه تعیین می‌شود و معمولاً ضریب جذب کمتر از ۰/۰۰۰۱ است. اکسید تیتانیم رایج‌ترین اکسیدی است که برای AR باند پهن و برخی از پوشش‌های صافی در نور مرئی به کار می‌رود. TiO₂ نیمه هادی نوع n، با شکاف انرژی در حدود ۳/۱ eV و ضریب شکست ۲/۶ است [۱۱، ۱۰]. موادی که برای این پوشش‌ها استفاده می‌شود با حرارت مولکول‌ها تبخیر شده و بر سطح سیلیکون چگالش می‌شود و یا با روش کندوپاش صورت می‌گیرد، ولی بهترین روش، پوشش‌دهی با روش سل-ژل^۳ است. سایر پوشش‌های ضدانعکاس مطرح شده، لایه بسیار نازکی از مواد مختلف نظیر آلومینیم و طلا و غیره را در برمی‌گیرد که برای تغییر دادن برخی از خواص نوری روی سطوح مختلف مانند ژرمانیم، شیشه، فلز یا پلاستیک و غیره اعمال می‌شوند. خواصی مانند انعکاس، شکست، خاصیت ضدبازتاب، رسانش از خاصیت‌هایی هستند که می‌توانند در یک طول موج مشخص از نور به‌وسیله معین کردن دقیق تعداد لایه‌های پوشش، به‌وجود آیند یا اصلاح شوند. این پوشش‌ها برای استفاده در صنایع هوا فضا، نظامی و اقتصادی تولید می‌گردند [۱۲].

۲-۲- باتری‌ها و مخازن

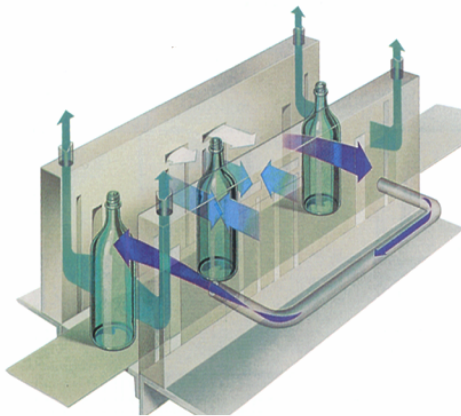
اغلب باتری‌های شیشه‌ای با یک یا چند لایه پوشش داده می‌شوند. این محصولات با انواع باتری‌های پلاستیکی در بسیاری از ویژگی‌ها قابل رقابت هستند. از دلایل پوشش‌دهی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

انتخاب این مواد برای سلول‌های خورشیدی به‌گونه‌ای است که در محدوده نور مرئی خورشید شفاف و در عین حال از هدایت الکتریکی مناسبی برخوردار هستند [۱۷]. کاربردهای پوشش‌های اپتیکی از لحاظ نحوه انعکاس طیفی آن‌ها (انعکاس بالا یا ضد انعکاس) تعریف می‌شود. نور بازتاب شده در بسیاری از موارد کاربرد قطعه را مختل می‌کند، بنابراین مهم‌ترین هدف از استفاده پوشش‌های ضدبازتاب، حذف این مقدار نور بازتاب شده است. علاوه بر این برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هم می‌تواند بهبود داده شود. هنگامی که نور از یک محیط به محیط دیگری می‌رود (مثلاً از یک لنز به هوا و یا برعکس) مقداری از نور عبور کرده و مقداری هم بازتاب می‌شود. در حالی که هیچ پوشش ضدبازتابی وجود نداشته باشد، مقدار نور بازتاب شده از یک شیشه معمولی با زاویه تابش عادی بیشتر از ۴٪ است. مقدار نور بازتاب شده بسته به زاویه تابش و یا ضریب شکست محیط می‌تواند تغییر کند [۱۸]. با حذف پوشش‌های ضدبازتاب، نور بازتاب شده می‌تواند باعث درخشندگی صفحه شود. در وسایل عکس‌برداری این نور می‌تواند باعث نتایج غیردلخواه و وجود یک تاری و شبه در تصاویر شود. در برخی از سیستم‌های پیچیده، نور تلف شده می‌تواند در محل اتصال زیادتر شده و تأثیرات بیشتری داشته باشد. در حالی که می‌توان این اثر را با پوشش‌های ضدانعکاس به‌طور کامل از بین برد [۹]. برای ساختن شیشه‌های ضدبازتاب نور دو روش وجود دارد. در روش اول شیشه با چندین لایه اکسید فلزی مانند TiO₂ که ضریب انکسار بالایی دارد، پوشش داده می‌شود. ضریب انکسار بالا عبور نور از شیشه را تسهیل می‌کند. ضخامت لایه‌ها به طول موج نور بستگی دارد، در نتیجه تطبیق ناقص نور بازتابیده از سطح را منجر می‌شود و این امر شیشه را غیر بازتاب‌کننده نور می‌کند. روش دوم شامل پوشش‌دهی شیشه با یک تک لایه متخلخل نانومتری از جنس SiO₂ است. ضریب انکسار پوشش متخلخل بین هوا و شیشه است، بنابراین بازتابش نور را کم و عبوردهی نور از شیشه را زیاد می‌کند. برای ساختن شیشه‌های قابل سویچ (تغییر حالت از روشن به خاموش یا از شفاف به مات)، نانولایه‌ای از محلول محتوی ذرات میله‌ای شکل، بین دو لایه شیشه‌ای قرار می‌گیرد. در شرایط عادی ذرات معلق آرایش تصادفی دارند و می‌خواهند نور را جذب کنند، در این حالت شیشه یخی دیده می‌شود. با اعمال ولتاژ مناسب، ذرات معلق صاف شده و به نور اجازه عبور می‌دهد، بنابراین شیشه شفاف

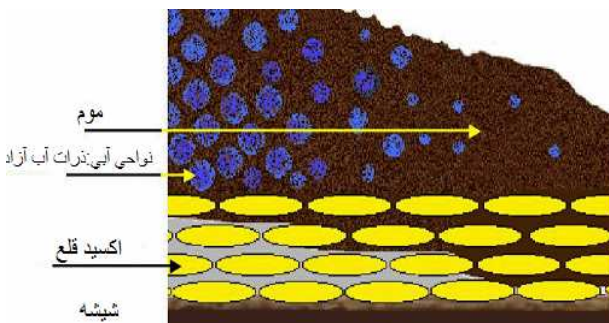
² Anti reflect

³ Sol-gel

نمی‌چسبد. بسته به فرمولاسیون شیشه، خواص و عملکرد آن، درصدهای گوناگونی از پلی اتیلن به کار می‌رود [۱۴]. در بعضی از پوشش‌های بطری درصدی بیواسید برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها استفاده می‌شود. این مقدار بایستی به شدت کنترل شود در غیر این صورت مشکل کلوخه‌ای شدن پوشش به وجود می‌آید. بعد از پوشش‌دهی، برای بررسی کیفیت شیشه، آزمون‌های گوناگونی صورت می‌گیرد. از جمله این آزمون‌ها زاویه لغزش بطری‌ها و مقاومت در برابر خراش است و باید مقادیر آن مطابق با استانداردهای موجود باشد [۱۵].



شکل ۱- تصویر فرآیند پوشش‌دهی بطری در مرحله HEC [۱].



شکل ۲- تصویر بطری شیشه با پوشش CEC و HEC [۱].

۲-۳- پوشش‌دهی الیاف شیشه‌ای

پوشش‌دهی نقش اساسی در ساخت الیاف شیشه‌ای دارد و بدون آن، الیاف تخریب می‌گردد. برای آن که الیاف ضدسایش شوند معمولاً پوشش داده می‌شوند. پوشش‌دهی الیاف شیشه‌ای با محلول‌های آبی معروف به سایزینگ صورت می‌گیرد. سایزینگ معمولاً به سرعت بعد از شکل‌دهی الیاف اعمال شده و حاوی اجزای مختلفی است که نه تنها طول عمر و دوام الیاف را افزایش می‌دهد بلکه ویژگی‌های مطلوب دیگری را نیز به الیاف می‌دهد. فرآیند سایزینگ یکی از مراحل اصلی و حساس در تولید الیاف شیشه‌ای است و در حقیقت این مرحله، مهم‌ترین مرحله در تعیین خصوصیات عملکردی و مکانیکی الیاف در هر دو حوزه تولید مواد اولیه و

(۱) با پوشش‌دهی قابلیت حذف بریدگی یا ناصافی‌ها و تولید محصولاتی با سطح صاف‌تر امکان‌پذیر می‌شود. همچنین با پوشش‌دهی مقاومت به خراش از ۰/۱ به ۳۰ کیلوگرم افزایش می‌یابد. (۲) با پوشش‌دهی استحکام بطری‌ها در مقابل شکستن از ۱۰ به ۳۰ بار افزایش می‌یابد. چنین استحکامی در مراحل مختلف مانند مراحل ساخت، نگهداری، انتقال و پرکردن بطری‌ها حائز اهمیت است. (۳) با افزایش استحکام بطری‌ها به دلیل پوشش‌دهی آن‌ها، می‌توان وزن بطری‌ها را کم کرد. بنابراین با کاهش مواد مصرفی صرفه‌جویی در هزینه‌ها حتی تا ۲۵٪ افزایش می‌یابد.

(۴) پوشش‌دهی شیشه بهبود در جلوه‌های نوری بطری‌ها را نیز به همراه دارد که برای جلب مشتری مناسب به نظر می‌آید.

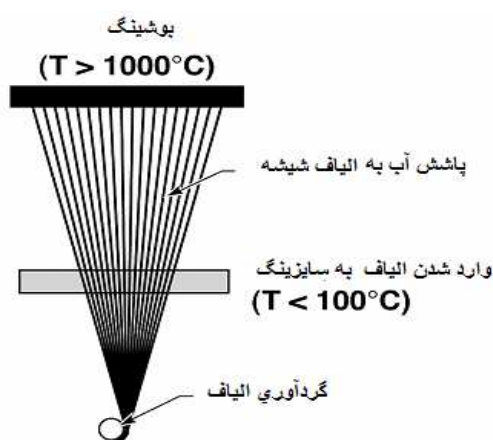
به‌طور کلی ویژگی‌هایی که با پوشش ایجاد می‌گردد شامل افزایش مقاومت به شکست، استحکام بالاتر در برابر فشار پرشدن، افزایش مقاومت به خراش، داشتن سطحی صاف‌تر، امکان نگهداری شیشه در مقابل واکنش‌های ناخواسته و غیره است. بطری‌های پوشش داده شده با سرعت بالاتری از مراحل بازرسی و پرکردن عبور کرده و سطح آن از آسیب حفظ می‌گردد. علاوه بر این وزن شیشه‌ها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر لایه نازکی از یک شیشه پوشش‌دار، به جای لایه ضخیمی از یک شیشه بدون پوشش، استحکام به مراتب بالاتری خواهد داشت و همین امر منجر به کاهش هزینه‌های ساخت، و تولید محصول مناسب‌تر می‌گردد [۱]. دو نوع پوشش بر روی بطری‌های شیشه‌ای به کار می‌رود: HEC^۱ و CEC^۲. نوع HEC از سطح شیشه در برابر آسیب محافظت می‌کند و سطح چسبنده‌ای را برای پوشش CEC فراهم می‌کند. پوشش HEC یک لایه نازک تقریباً ۱۰ نانومتری از جنس SnO₂ است، در حالی که CEC ها در حدود ۵۰ نانومتر از مواد آلی و معمولاً از جنس پلی اتیلن ضخامت دارند. در بعضی از کاربردها هر یک از این پوشش‌ها به تنهایی کافی می‌باشد [۱۳]. پوشش‌های HEC در حالت گرم به روش CVD اعمال می‌گردند و از جنس SnO₂ یا TiO₂ هستند. این مواد سریعاً بعد از شکل‌دهی به کار برده شده و در مرحله پوشش‌دهی، شیشه دمایی در حدود ۴۰۰-۶۰۰ °C دارد. اعمال سریع و با بازده بالا، پوشش‌دهی به شکل یکنواخت، ایمن و بدون آن که خوردگی برای آن‌ها ایجاد گردد و همچنین عدم حساسیت به دما و محیط خاص از جمله نکاتی است که در این پوشش‌دهی بایستی مدنظر قرار گرفته شود. سرعت لایه نشانی لایه SnO₂ بستگی به غلظت آن، سرعت و دمای گاز دارد. برای رسیدن به سرعت بیشینه معمولاً محلولی حاوی سه مول آب در یک مول قلع کافی می‌باشد [۱۳]. CEC معمولاً شامل اکسید پلی‌اتیلن است که از محلول ۱٪ امولسیون آبی یا استتارات بر روی سطح HEC اسپری می‌گردد. این پوشش‌ها با ضخامت ۵۰ نانومتر، بر روی شیشه‌ای با دمای تقریبی ۱۶۵-۱۳۵ °C لایه نشانی می‌گردند. سپس شیشه به منظور خارج شدن تنش، عملیات حرارتی (آنیل) می‌شود. این دما بحرانی است و اگر بالاتر باشد پوشش به شکل فیلم آبکافت در می‌آید و بر روی بطری

^۱ Hot-End coating

^۲ Cold-End coating

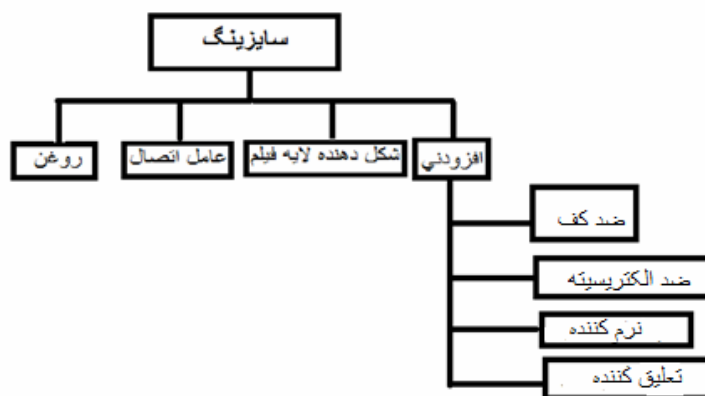
عده دارد و علاوه بر محلول‌سازی، الیاف داغ را سرد می‌کند و بستر حضور اجزای بسیار ریز در سطوح وسیع‌تر را فراهم می‌نماید. آب به آسانی سطح شیشه را تر کرده، امکان حضور سائزینگ بر روی شیشه را می‌دهد و مانند روغن موجب کاهش تماس بین دو الیاف می‌شود. اجزای جامد سائزینگ به شکل فیلم در می‌آید و همانند یک عامل اتصال، چسبندگی بین الیاف با زمینه کامپوزیت را فراهم می‌کند. روغن موجود در سائزینگ از نوع کاتیونی و یا آنیونی بوده و موجب مقاومت در برابر سایش می‌شود. افزودنی‌های دیگر هم چون ضد الکتریسیته، تعلیق‌کننده‌ها، عوامل ترک‌کننده، مواد ضد اکسید و غیره برای بهبود خواص به سائزینگ اضافه می‌شوند. زمانی که امولسیون ایجاد می‌شود، اجزای با وزن مولکولی بالا و دیگر اجزای نامحلول در آب رسوب می‌کند و به شکل فیلم در می‌آید. روغن‌های کاتیونی روی سطح شیشه جذب شده و شکسته شدن الیاف را کاهش می‌دهد. روغن‌های آنیونی شبیه به مواد فعال سطح عمل می‌کند و سطح نخ‌ها و الیاف را نرم کرده و پوشش نرمی را شکل می‌دهد. برای رسیدن به خواص مطلوب، واکنش‌های شیمیایی که در تشکیل الیاف اتفاق می‌افتد و نیز مراحل رسوب‌کردن پوشش، خشک‌کردن و مراحل دیگر ساخت بایستی به‌طور کامل و دقیق صورت گیرد. امروزه سائزینگ‌های جدیدی از جنس محلول‌های غیرآبی در حال تولید و بررسی هستند که خواص را بهبود می‌بخشند و بازه پوشش را افزایش می‌دهند [۱۰، ۱۷]. در صورت تماس الیاف بدون سائزینگ با یکدیگر، ساییده شده و این سایش می‌تواند منجر به ظهور نقص‌های سطحی و در نتیجه افت قابل توجه در استحکام گردد. استحکام الیاف شیشه در مراحل اولیه تولید بالاتر از ۳۴۵۰ MPa است، اما صدمات سطحی ناشی از سایش الیاف با یکدیگر و یا سایش الیاف با تجهیزات موجود در فرآیند تولید، مقدار واقعی استحکام را به حدود ۲۰۷۶-۱۷۲۰ MPa کاهش می‌دهد. به همین دلیل قبل از آن که الیاف در کنار هم قرار بگیرد به آن سائزینگ زده می‌شود. فرمولاسیون سائزینگ‌های الیاف شیشه با تمام گستردگی، شامل اصول فرمولاسیونی مشابهی است که در نمودار شکل ۴ به اختصار عنوان گردیده است. [۱۷].

ساخت سازه کامپوزیتی می‌باشد. به عبارت دیگر، این مرحله نه تنها در فرآیند تولید اهمیت ویژه‌ای دارد، بلکه نقش بسیار مهمی در تعیین ویژگی‌های مکانیکی الیاف ایفا می‌کند. الیاف شیشه تولیدی و حاصل از کوره مذاب، بسیار ساینده و مستعد به خوردگی هستند و می‌بایست از مجاورت با سایر الیاف حاضر در همسایگی خود محافظت شود. بدون اعمال سائزینگ چیزی به جز توده جریان مذاب در دست نخواهد بود [۱۶]. الیاف شیشه‌ای کاربردهای مختلفی دارند و در اشکال گوناگون مانند بافته شده، صفحه‌ای، به شکل عایق و غیره به کار می‌روند. کاربرد اصلی این الیاف به عنوان یکی از اجزای کامپوزیت و با عنوان الیاف شیشه می‌باشد. الیاف شیشه‌ای نیز نیاز به سائزینگ دارند. شکل ۳ مراحل ساخت الیاف شیشه به همراه مرحله سائزینگ را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۳- تصویر فرآیند کشیدن و پوشش‌دهی الیاف شیشه‌ای [۱].

گستره وسیعی از محصولات با به کار بردن بیش از ۱۰۰ نوع ترکیب سائزینگ تولید می‌گردد و سائزینگ در آن‌ها حاوی ۲ تا ۱۰ جزء است. همه سائزینگ‌ها ۰/۰۵ الی ۱۰٪ جامد دارند. آب نقش اساسی را در سائزینگ به



شکل ۴- نمودار فرمولاسیون سائزینگ [۱۷].

۴-۲- شیشه‌های خود تمیز شونده

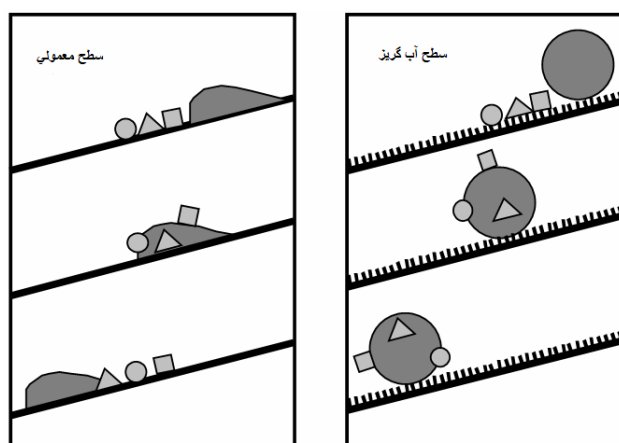
شیشه‌های خود تمیز شونده (فتوکاتالیتی + آب دوستی) از سال ۲۰۰۲ در دسترس بوده و هر روز نیاز و تقاضا برای استفاده از آن‌ها افزایش می‌یابد. برای عمل خود تمیز شوندگی این شیشه‌ها نور فرابنفش (UV) به عنوان یک پیش شرط لازم است. بنابراین شیشه‌ها را می‌توان تنها برای سطوح خارجی به کار برد. با اعمال پوشش خاص (اکسید تیتانیوم) و به کارگیری فرابنفش (UV) که در بخشی از نور خورشید وجود دارد، تشکیل اکسیژن فعال بر روی سطح شیشه تسریع می‌گردد [۱۸]. در ساخت این شیشه‌ها، لیزرهای فتوکاتالیتی روی نوارهای شیشه‌ای داغ در دمای بالای 600°C پاشیده می‌شوند. این فرآیند پوشش دهی پیرولیز^۱ نامیده می‌شود. پوشش های فتوکاتالیتی بسیار پایداری و نیاز به تجدید و بازسازی دوباره ندارند. پوشش‌های با ضخامت ۴۰ نانومتر را می‌توان به روش CVD در این شیشه‌ها اعمال نمود [۱۹]. سازوکار عملکرد این شیشه‌ها آب دوستی یا آب‌گریزی^۲ است. در روش آب‌گریزی با به کار بردن پوشش‌های خاص، امکان افزایش کشش سطحی شیشه وجود دارد. در این حالت به راحتی می‌توان اثر آب‌گریزی را مشاهده کرد، یعنی آب دفع شده و به شکل دانه‌هایی جریان می‌یابد. عمل تمیز کنندگی این پوشش‌ها به این علت است که نه تنها آب، بلکه لکه چربی‌ها و آلودگی‌ها نیز قادر به چسبیدن به سطح نبوده و همین امر باعث می‌شود که اگر بر روی سطح آب ریخته شود یا بعدها باران بیارد، سطح شسته شود (لکه چربی‌ها دفع شده و سطح به راحتی تمیز می‌شود). سازوکار عملکرد این شیشه‌ها در شکل ۵ آمده است [۲۰].

در سازوکار آب دوستی کشش سطحی کم شده و به همین دلیل قطرات آب بر روی سطح پخش گردیده و یک فیلم آب بر روی سطح تشکیل می‌شود.

^۱ Pyrolysis
^۲ Hydrophilic

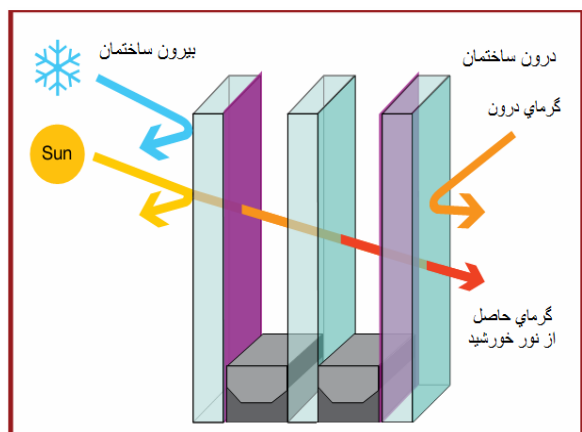
تشکیل این فیلم دو مزیت دارد: اول این که مقدار یکسانی از آب سطح بزرگتری را خیس می‌کند. این عمل به‌طور طبیعی راندمان تمیزکاری را در مقایسه با سطح شیشه‌های معمولی بهبود می‌بخشد. دوم این که هیچ قطره آبی بعد از باران باقی نمانده و فیلم آب جریان می‌یابد. بدین ترتیب شیشه سریع‌تر خشک شده و هیچ اثری از لکه باران روی شیشه به جا نمی‌ماند. سازوکار خود تمیز شوندگی پوشش بدین صورت می‌باشد که تیتانیا یک ماده نیمه‌هادی است که باند نسبتاً وسیع $3/2$ الکترون ولت دارد. وقتی یک پرتو نور با انرژی مساوی یا بالاتر از $3/2$ الکترون ولت به آن بتابد، الکترون از باند ظرفیت خارج شده و به باند هدایت می‌رود. بدین ترتیب یک حفره در باند ظرفیت و یک الکترون در باند هدایت ایجاد خواهد شد. در نتیجه این عمل یک جفت الکترون - حفره به وجود می‌آید. یون‌های هیدروکسیل در داخل حفره می‌افتد و منجر به تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود که از عوامل اکسیداسیون بسیار قوی می‌باشد. وقتی که تله‌ها برای الکترون‌ها، گونه‌های اکسیژنی باشند، منجر به تشکیل گونه‌های سوپر اکسیدی O_2 می‌شوند که عوامل کاهنده قوی هستند. تولید این عوامل کاهنده و اکسیدکننده قوی سبب می‌شوند تا ماده آلی به CO_2 یا H_2O تبدیل شود. بدین ترتیب قدرت چسبندگی ماده آلی روی سطح شیشه کم شده و محصولات تولیدی حاصل از واکنش چربی‌ها با پوشش، در اثر وزش باد یا بارش آب باران از سطح جدا می‌شوند [۲۱].

در محیط‌هایی که میزان نور و پرتو فرابنفش (UV) برای فعال شدن خاصیت کاتالیزوری کافی نباشد، انرژی برای خارج کردن الکترون‌های باند ظرفیت تیتانیا کم است. برای رفع این مسئله یک راه مناسب برای کاهش باند ممنوعه تیتانیا وارد کردن یون‌های فلزی به تیتانیا است. به دنبال این کار خاصیت فتوکاتالیزور نوری، ضدباکتری و خود تمیز شوندگی تا حد زیادی بهبود می‌یابد [۲۲].



شکل ۵- مقایسه شیشه معمولی با شیشه‌های پوشش‌دار با عملکرد آب‌گریزی [۲۰].

مطلوب پوشش، دمای انتقال شیشه بایستی با شیمی لایه نشانی پوشش سازگاری داشته باشد و به دقت کنترل گردد [۱، ۳]. فرآیندهای پوشش‌دهی اغلب نیاز به صرف انرژی بالایی دارد و به همین دلیل اتلاف انرژی و مساله محیط زیست در آن‌ها مطرح است. به عنوان مثال در لایه نشانی شیشه‌های مسطح در بیشتر مواقع روش لایه نشانی CVD با بازدهی در حدود ۷۵٪-۸۰٪ به کار می‌رود. بنابراین ۲۵٪-۲۰٪ احتمال دارد که این روش مناسب نباشد و بایستی شیشه مجدداً ذوب گردد که این کار هزینه‌های بالایی را در بر خواهد داشت [۱].



شکل ۶- نمونه‌ای از عملکرد شیشه‌های کم‌گسیل [۲۳].

روش‌های پوشش‌دهی شیشه، شامل روش‌های مرسوم لایه نشانی رسوب‌دهی بخار شیمیایی (CVD) ^۵ و روش کندوپاش، سل ژل، EPD و غیره است. روش کندوپاش در ساخت لایه‌های نازک کاربرد دارد. در این فرآیند، با استفاده از ذراتی پراثری (۱۰۰۰-۵۰ الکترون ولت) سطح هدف بمباران می‌شود. در نتیجه برخورد ذرات پراثری به هدف، یک و یا تعداد بیشتری از اتم‌های هدف به بیرون پرتاب می‌شود. این روش برای ایجاد پوشش و تولید نانو لایه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاند به ولتاژ منفی متصل شده و از جنس ماده پوشش‌دهنده انتخاب می‌شود. آند که در واقع زیر پایه پوشش است می‌تواند به صورت صاف، زاویه‌دار یا شناور قرار گیرد. گاز و یا مخلوطی از گازهای مختلف با فشاری از چند میلی تور تا چند صد میلی تور، از طریق شیرهای ویژه‌ای به صورت کنترل شده وارد محفظه کندوپاش می‌شوند. متداول‌ترین گاز مورد استفاده برای محفظه کندوپاش آرگون است. زیرا نسبت به سایر مواد کندوپاش شده، ضریب نشر ثانویه بزرگ‌تری دارد. می‌توان از گازهای نجیب دیگر مانند هلیم و یا نئون نیز برای این منظور استفاده کرد. استفاده از گازهای سبک‌تر در فرآیند کندوپاش می‌تواند مشکلات مربوط به استوکیومتری را در کندوپاش واکنشی یا کندوپاش ترکیبات مختلف کاهش دهد. در این صورت گازهای O₂ و N₂ با نسبت‌های مشخص نسبت به گاز خنثی وارد محفظه کندوپاش می‌شوند. فرآیند کندوپاش با توجه به پدیده‌های زیر درک می‌شود:

۲-۵- شیشه‌های کم‌گسیل با پوشش نانویی جهت کاهش

مصرف انرژی

امروزه در کنار بحث عایق‌کاری حرارتی در بخش‌های مختلف ساختمان، استفاده از پنجره‌های دوجداره تأکید می‌گردد. استفاده از شیشه با نشر پایین^۱ در یکی از جداره‌های پنجره دوجداره یا شیشه‌های طلقی^۲ موجب کاهش چشم‌گیری در تبادل انرژی ساختمان با فضای بیرون می‌شود. در این راستا می‌توان با استفاده از روکش‌های نانویی بر روی شیشه پنجره‌ها، آنها را در خاصیت عایقی و کنترل تبادل حرارتی بهینه کرد و اصطلاحاً به آنها خاصیت کم‌گسیلی اضافه کرد. در این صورت نقش آن‌ها در کاهش مصرف انرژی غیر قابل انکار خواهد بود. پوشش نانویی در شیشه با نشر پایین، اجازه عبور بخش مرئی طیف نور خورشید را می‌دهد اما طیف حرارتی (امواج زیر قرمز) و امواج مضر (فرابنفش) را منعکس و جدا می‌کند. این شیشه‌ها انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما که ترکیبی از پدیده‌های هدایت، جابجایی و تابش است، به مقدار زیادی کاهش می‌دهد و همچنین انتقال حرارت تابشی (کسب انرژی خورشید) را تحت کنترل دارد [۲۳]. پوشش در این شیشه‌ها به‌طور متوسط از شش لایه تشکیل شده که در موارد ویژه ممکن است تعداد و خواص لایه‌ها تغییر کند. لایه آستر دارای پوشش سیلیکونی است و با خاصیت نجسب بودن موجب می‌گردد که قبل از شروع فرآیند نصب، جداسازی به‌راحتی صورت گیرد. لایه چسب، جاذب پرتو فرابنفش است و علاوه بر این، با سازوکارهای متفاوت (پیوندهای شیمیایی، مکانیکی و نفوذ) به شیشه می‌چسبد. لایه رنگی به کمک لایه چسب، تا ۹۹٪ از ورود پرتو فرابنفش جلوگیری می‌کند. لایه پوشش فلزی دارای قابلیت دفع پرتو حرارت‌زای خورشید (زیر قرمز)، با حفظ شفافیت شیشه است. این لایه معمولاً از جنس اکسید فلزی است که مانع انتقال گرما می‌شود. لایه شفاف از جنس پلی استر تقویت شده است و خواص فیزیکی-مکانیکی محصول مانند استحکام کششی را بهبود می‌بخشد. پوشش ضدخش نیز از جنس اکریلیک است و در مقابل مواد و لوازم پاک‌کننده رایج، عملکرد ضد خش دارد. در نسل جدیدتر شیشه‌های کم‌گسیل، این کاربرد با استفاده از نانوذرات سرامیکی در فیلم‌های پوشش‌دهنده شیشه ایجاد می‌شود. با استفاده از این فیلم‌ها بر روی شیشه ساختمان‌ها، می‌توان در مصرف انرژی صرفه جویی کرد و از ورود پرتو مضر فرابنفش نیز جلوگیری نمود (شکل ۶) [۲۲].

۳- فرآیند پوشش‌دهی شیشه‌ها

پوشش‌دهی یک بخش اصلی در ساخت شیشه است و تنها در مرحله آخر به کار نمی‌رود. بنابراین برای آن فرآیند ساخت در نظر گرفته می‌شود و این مرحله بر تمامی مراحل تأثیر خواهد گذاشت. در مراحل ساخت دمای انتقال شیشه^۳ (Tg) و سرعت اتصال و نشست پوشش حائز اهمیت است. در روش‌های لایه نشانی پوشش مانند کندوپاش^۴، میزان تمیز بودن سطح و امکان تولید مجدد محصول اهمیت دارد. برای رسیدن به خواص

¹ Low-Emission

² Laminate

³ Glass transition

⁴ Sputtering

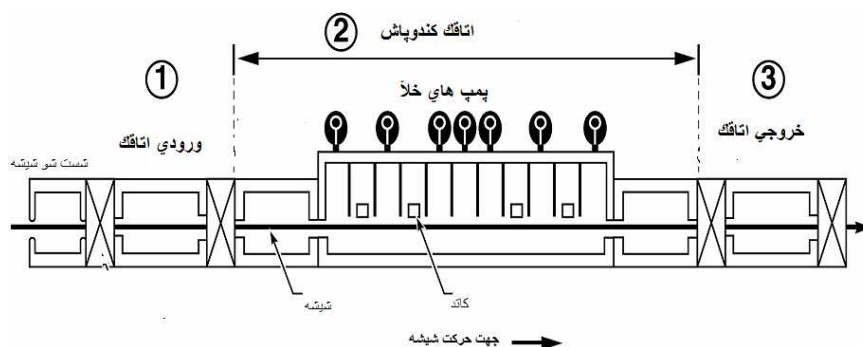
⁵ Chemical Vaporation Deposition

اختلاف دما به سرعت سرد شده و پوشش نانوساختار را شکل می‌دهد [۲۳]. روش دیگر پوشش‌دهی، روش سل-ژل می‌باشد و بیشتر در زمینه نانوپوشش‌ها مطرح است. در این روش از اصول محلول‌سازی و رسوب‌دهی جامدات در مایعات، با استفاده از تغییر متغیرهایی مثل دما استفاده شده و محصولات مثل پوشش و پودر تولید می‌شود. برای این کار ابتدا از ماده مناسب برای پوشش‌دهی، یک محلول تهیه شده و سپس با حرارت دادن محلول، یک ماده ژلاتینی به دست می‌آید. با ادامه حرارت دادن، مواد معلق در محلول روی ماده پذیرنده پوشش رسوب داده می‌شود. این رسوب می‌تواند به صورت یک لایه پیوسته باشد که در آن صورت یک لایه نانومتری تشکیل می‌شود. اگر ضخامت لایه از ۱۰۰ نانومتر بیشتر باشد، به علت این که از ذرات نانومتری تشکیل شده است، یک لایه نانوساختار ایجاد می‌گردد. اما باید دقت کرد که دما و سرعت حرارت‌دهی و غیره ممکن است باعث شود که به جای یک لایه پیوسته، مجموعه‌ای از ذرات تشکیل‌دهنده لایه به صورت پودر تشکیل شود. باید یادآور شد که پوشش‌هایی که از این روش تولید می‌شوند دارای تخلخل‌هایی هستند که خواص آنها را تضعیف می‌کند [۲۴]. روش نشست الکتروفوریتیک یکی دیگر از روش‌های جدید و ارزان پوشش‌دهی است. سازوکار نشست الکتروفوریتیک^۱ حرکت ذرات باردار در سوسپانسیون در اثر میدان الکتریکی و نشست آنها بر الکتروود متناسب است. روش نشست الکتروفوریتیک (EPD) دارای کاربردهای فراوان و جدیدی در ساخت مواد سرامیکی پیشرفته و پوشش‌هاست، و در صنعت و تحقیقات دانشگاهی مورد توجه قرار گرفته است.

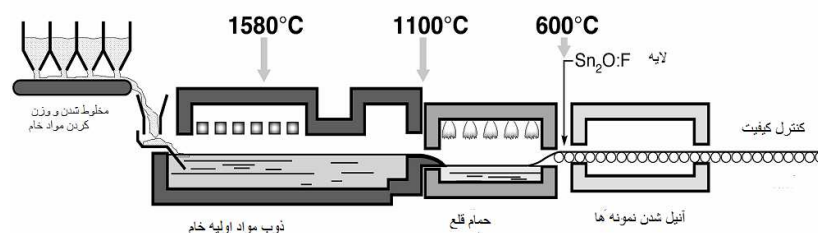
^۱ Electrophoretic depositio

یون‌های مثبت که از یونی‌زاسیون گاز توسط تخلیه الکتریکی، ایجاد شده‌اند، به سطح هدف برخورد کرده و از طریق انتقال انرژی و اندازه حرکت، اتم‌هایی را از هدف جدا می‌کنند. این اتم‌ها با مقادیر مشخصی از انرژی هدف را ترک می‌کنند و روی زیرپایه تجمع می‌یابند و در نتیجه یک لایه نازک ایجاد می‌شود. در شکل ۷ این روش نشان داده شده است [۱، ۳]. این روش توانایی تولید پوشش‌هایی از جنس فلز خالص یا حاوی اجزای فلزی (نیتريدی، اکسیدی ...) را دارد و از لحاظ عدم تابش‌دهی پرتوهای فرابنفش (UV) و زیر قرمز (IR) مطلوب می‌باشد. روش دیگر، CVD، روش پوشش‌دهی مستقیم شیشه داغ است و امکان آن را دارد که شیشه زمانی که در روی خط تولید است، پوشش‌دهی گردد. در این روش پیش ماده (مایع یا گاز) در راکتور تبخیر شده و به شکل یکنواخت بعد از یک سری واکنش‌های شیمیایی بر روی سطح شیشه نشسته و به شکل فیلم رشد پیدا می‌کند. اولین پوشش با این روش، SnO_2 ، با استفاده از مواد آلی، SnCl_2 و اکسیژن تولید شده است. فرآیند CVD ارزان و سریع بوده و کنترل دما در آن راحت‌تر است. این روش نسبت به نوع کندوپاش، پوشش‌های قوی‌تری تولید می‌کند که به دلیل دمای لایه نشانی بالاتر این روش است (700°C - 600°C). همین امر موجب اتصالات محکم‌تری می‌شود. این پوشش‌ها در طول مدت ۱/۵ - ۱ ثانیه اعمال می‌گردد ولی عمق سطحی که در این روش پوشش‌دهی می‌شود از روش کندوپاش کم‌تر است [۳]. در شکل ۸ فرآیند CVD برای پوشش اپتیکی SnO_2 را می‌توان مشاهده کرد.

روش دیگر روش پاشش حرارتی است. در این روش از پودر برای تولید پوشش استفاده می‌شود. پودر با قدرت به سمت قطعه مورد نظر پاشیده می‌شود و در مسیر پاشش، پرتو لیزر قرار داده شده است. پرتو لیزر با سرعت و قدرت زیاد محیط را گرم کرده و باعث می‌شود پودر در مسیر به صورت مذاب درآید. وقتی پودر با سطح تماس پیدا می‌کند، به علت



شکل ۷- تصویر شمایی روش لایه‌نشانی کند و پاش [۱].



شکل ۸- تصویر شمایی روش لایه‌نشانی CVD [۱].

۴- نتیجه‌گیری

امروزه با پیشرفت فناوری و پوشش‌دادن لایه‌های بسیار نازک بر روی شیشه با استفاده از تجهیزات بسیار پیشرفته، شیشه‌هایی تولید می‌گردد که تا حد زیادی کاستی‌های شیشه معمولی در زمینه‌های گوناگون را ندارند و موجب استفاده از شیشه‌ها در کاربردهای پیشرفته شده است. علاوه بر این استفاده از پوشش در بسیاری از کاربردها نظیر بطری‌ها، موجب کاهش هزینه و عملکرد بهتر شیشه‌ها شده است. هم‌چنین به کارگیری پوشش در الیاف شیشه موجب بهبود خواص مکانیکی و ممانعت از چسبندگی الیاف به هم می‌گردد. در بعضی از کاربردها نظیر شیشه‌های خودتمیزشونده و کم‌گسیل به کارگیری پوشش بر شیشه موجب دگرگونی کاربرد آن شده است و عملکرد منحصر به فردی را به آن‌ها داده است. در میان روش‌های موجود در پوشش‌دهی روش‌های EPD و سل ژل به تازگی مورد توجه قرار گرفته‌اند که از ویژگی قیمت مناسب و کیفیت بالاتر پوشش‌دهی برخوردار است.

۵- مراجع

1. R. J. Mccurdy, C. Mckown, E. Atochem, "Coatings on glass", Technology Roadmap Workshop, Sandia National Laboratories Livermore, California, pp1-20, 2000.
2. H. K. Pulker, H. Schmidt, "Hand book of Coatings on Glass", Chem. Rev. 99, 304, 1998.
3. B. Larsson, "Coatings on floatglass", J. Non-cryst 10, 1-43, 2006.
4. G. E. Sakoske, "Functional glass coatings, IMI international workshop on scientific challenges of new functionalities in glass", 2007.
5. W. Bayer, J. Hupkes, "Transparent conducting oxide films for thin film silicon photovoltaics", J. Non-Cryst. Solids, 95, 1671-1677, 2007.
6. G. Bräuer, "Large area glass coating", J. Surface and Coatings Technology, 8, 358-365, 1999.
7. J. Deubener, G. Hensch, A. Moiseev, "Glasses for solar energy conversion systems", J. European Ceramic Society 17, 29, 2009.
8. Troy Bedinghaus, "Anti-reflective coating", [http:// vision.about.com](http://vision.about.com). 2009.
9. م. محسنی، "پوشش‌های ضدانعکاس"، <http://macmol.ir/news/1387/11>، ۳ مهر ۱۳۸۷.
10. G. E. Sakoske, "Function and Production of Coatings on Architectural Glass", Leybold Optics GmbH, Alzenau, Germany, 11, 1999.
11. ش. موسی‌خانی، ع. ا. صباغ‌الوانی، ع. ا. سرابی، س. کیانی، ح. سامعی، "سل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی و روش‌های بهبود بازدهی"، مطالعات در دنیای رنگ، جلد دوم، شماره اول، صفحات ۶۲-۵۱، ۱۳۹۱.
12. ف. نیک‌انجام، "بررسی پوشش‌های اکسیدی اپتیکی با کاربرد در سلول‌های خورشیدی"، کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲.
13. ح. معتمدی، "پوشش‌های نانوساختار با تأکید بر ترکیبات کربیدی"، کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
14. S. R. Schmid, A. F. Toussaint, "Hand book of Optical Fiber Coatings", chapter 4, 2003.
15. ع. حسینی، "فرآیند تولید الیاف شیشه"، صنعت شیشه فلوت، <http://float-glass.blogfa.com>. ۱۳۹۱.
16. L. Holland, "The Properties of Glass Surfaces", Chapman & Hall, London, 1964.
17. R. Glang, L. I. Maissel, R. Glang (Eds), "Handbook of Thin Film Technology", Chapter 1, McGraw-Hill, New York, 98, 1970.
18. Piispanen, Minna, Hupa, Leena, "Comparison of self-cleaning properties of three titania coatings on float glass", J. Applied Surface Science 3, 1126-1131, 2011.
19. Lie-Miao, Li Fen Seo, "Sakae Tanemora, cost effective nano porous SiO₂-TiO₂ coating on glass substrate with substrates with antireflective and self-cleaning properties", J. Applied energy. 5, 46-58, 2012.
20. M. Estonia, Lithuania, "Impact of Solar Control Glazing on energy and CO₂ savings in Europe" www.glassforeurope.com, 12 July 2008.
21. A. Fujishima, K. Hashimoto, T. Watanabe, "TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications", J. Applied Surface Science. 4, 32-34, 1999.
22. R. Benedix, F. Dehn, J. Quaas, M. Orgass, "Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Create Self-Cleaning Building Materials", J. Applied energy. 42, 378, 1994.
23. E. saghyre, "Low-E Insulating glass for Energy efficient buildings", www.glassforeurope.com, 30 May 2009.
24. ع. فلاحتی، "فرآیند سل ژل برای پوشش‌دهی نانو و تهیه نانو"، <http://www.irsme.ir/usersblog/1615.html>، شهریور ۱۳۹۱.
25. ا. طایف، "مروری بر تکنیک نشست الکتروفوریتیک و پارامترهای موثر بر آن"، <http://ta3oraya.blogfa.com/post/1008>، بیست و یکم مرداد ۱۳۹۱.