



مطالعه مقاومت به ضربه پوشش‌های پلی‌یورتان

حسین یحیایی^۱، حمیدرضا قاینی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- استادیار، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۳۴۵۴-۱۶۷۶۵

تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۲۵ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۳/۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۳ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۳/۹/۱۰

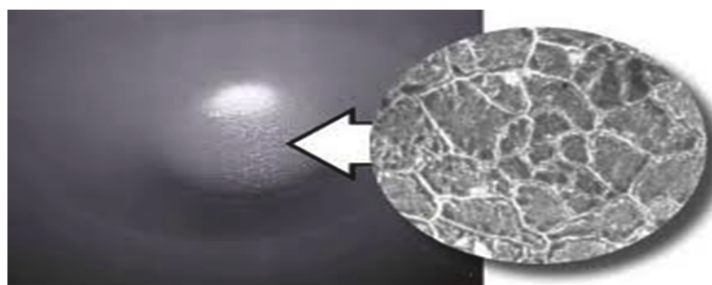
چکیده

استفاده از پوشش‌های آلی به منظور حفاظت از زیرآیندهای مختلف امری متداول محسوب می‌شود که سبب پدیدار شدن کاربردهای گسترده پوشش‌ها در حوزه‌های مختلف شده است، زیرا می‌توان با استفاده از لایه‌ای نازک از سازه‌هایی با ارزش بالا حفاظت کرد. در این میان، خواص مکانیکی پوشش‌ها از اهمیت فوق‌العاده زیادی برخوردار است. زیرا پوشش با هر نوع کاربردی، اولین و مهم‌ترین ویژگی که باید داشته باشد پایداری در برابر شرایط مختلف محیطی است. بنابراین، در انتخاب پوشش‌ها توجه به خواص مکانیکی پوشش امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. یکی از ویژگی‌هایی که در مورد پوشش‌ها از اهمیت فوق‌العاده زیادی برخوردار است، مقاومت پوشش در برابر ضربه است. از ضربه به عنوان یکی از حادث‌ترین شرایط اعمال نیرو به پوشش یاد می‌شود که موضوعی پیچیده بوده و ابعاد مختلفی از آن همچنان ناشناخته مانده است. در این گزارش به مطالعه مقاومت به ضربه یکی از پرکاربردترین پوشش‌های آلی یعنی پلی‌یورتان‌ها پرداخته شده است. بنابراین، پس از بیان رفتار پوشش‌های آلی در برابر ضربه و همچنین نوع تنش وارد شده به پوشش در هنگام اعمال ضربه به تحقیقات انجام گرفته در زمینه بهبود مقاومت به ضربه پوشش‌های یورتانی پرداخته خواهد شد. نتایج بررسی شده در این تحقیق نشان دادند که نوع ایزوسیانات در مقاومت به ضربه پوشش‌های پلی‌یورتانی موثر بوده و با تغییر نوع ایزوسیانات از هگزا متیلن دی ایزوسیانات به ایزوفورن دی ایزوسیانات مقاومت به ضربه از ۶۰ به ۷۰ Kg cm می‌رسد. نوع گسترش دهنده زنجیر، عاملیت آن و درصد وزنی مورد استفاده نیز بر مقاومت به ضربه موثر بوده است طوری که می‌توان با استفاده از عامل گسترش دهنده الکلی سه عاملی به میزان ۱۵٪ وزنی به مقاومت به ضربه ۹۵ Kg cm دست یافت. استفاده از پلیمرهای شاخه‌ای و نانوذرات در پوشش‌های پلی‌یورتان، روش‌های دیگری هستند که سبب بهبود مقاومت به ضربه و افزایش آن تا ۱۰۰ Kg cm می‌شوند.

واژه‌های کلیدی

پوشش آلی، مقاومت به ضربه، پلی‌یورتان، شکست، خواص مکانیکی.

چکیده تصویری





Impact Resistance Studying of Polyurethane Coatings

Hossein Yahyaie¹, Hamidreza Ghaeni^{*2}

1-Faculty of Polymer Engineering and Color Technology, Amirkabir University of Technology, P. O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran.

2- Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, P. O. Box: 16765-3454, Tehran, Iran.

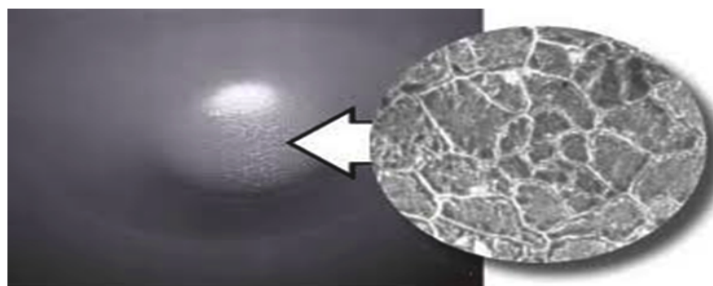
Abstract

In order to protection of different substrate, using organic coatings is a common matter which has caused emerging of extended application in various scopes, because by using a thin film it is possible to protect a structure. In the meantime, mechanical properties of coatings have prime importance. Because, regardless to application durability in different condition is so important. Therefore, to choose coating systems attending to mechanical properties is unavoidable. Impact resistance is one of the most substantial properties of organic coatings. Impact is considered as a one of the most critical condition to apply force that is a complicated phenomenon and many aspect of it are unknown. In this paper, impact resistance of polyurethane as one of the most useful coatings, has been studied. After discussion about behavior of organic coatings against impact and stress conditions, the method to improve impact resistance of polyurethane coatings will be presented. The results have been shown that the type of polyisocyanate is very important and by replacement of Hexa Methylene Diisocyanate by Isophorone Diisocyanate, impact resistance increase from 60 Kg- cm to 70 Kg- cm. Chain extender type, its functionality and its concentration are effective to enhance impact resistance. Using hyperbranch polymers and nanoparticle are another method to improve impact resistance of polyurethane coatings up to 100 Kg- cm.

Keywords

Organic coating, Impact resistance, Polyurethane, Fracture, Mechanical properties

Graphical abstract



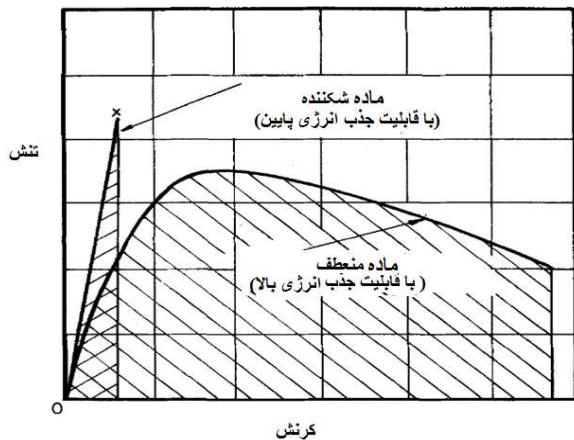
*Corresponding author: hamidghaeni@yahoo.com

۱- مقدمه

به دلیل ارائه خواص مناسب و متنوع، پوشش‌های آلی در حوزه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، خواص مکانیکی نقشی عمده و تعیین‌کننده‌ای در کاربری پوشش‌ها دارد، زیرا در بسیاری از موارد نقش پوشش، حفاظت در برابر نیروهای مکانیکی است که به سطح وارد می‌شود. بنابراین، پوشش‌ها باید از خواص مکانیکی مناسب بسته به کاربردی که دارند برخوردار باشند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای پوشش‌ها، استفاده از آن‌ها به عنوان پوشش‌های مقاوم در برابر ضربه است و مطالعات زیادی جهت بررسی مقاومت به ضربه انجام گرفته است [۵-۱۱]. توانایی (قابلیت) یک ماده به مقاومت در برابر ضربات ناگهانی می‌تواند تعیین کند که آیا یک پوشش برای یک کاربرد خاص مناسب است یا خیر. مقاومت به ضربه مواد در طراحی سامانه‌های مختلف نقشی تعیین‌کننده دارد. از جمله کاربردهای پوشش‌های مقاوم در برابر ضربه می‌توان به کف‌پوش‌ها اشاره کرد که در معرض افتادن اجسام سنگین قرار می‌گیرند. کاربرد دیگر را می‌توان پوشش‌دهی ماشین‌آلات حفاری، خاک‌برداری و اکتشاف در معادن بیان کرد. این ماشین‌آلات به طور مداوم در معرض ضربه ناشی از پرتاب سنگ و سنگریزه‌ها قرار دارند و در پوشش‌دهی آن‌ها علاوه بر در نظر گرفتن مقاومت به خوردگی و عوامل محیطی، مقاومت به ضربه نیز باید در طراحی مد نظر قرار گیرد [۱۱]. آزمون ضربه به منظور بررسی توانایی یک ماده جهت پایداری در برابر وارد آمدن نیرویی ناگهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. از نظر نیلسن^۱ آزمون ضربه، بررسی شکست مواد با سرعت بالا است که انرژی مورد نیاز جهت شکست را اندازه می‌گیرد [۷]. اغلب موادی که مقاومت به ضربه پائینی دارند و در کاربرد دچار شکست شده و کارایی خود را از دست می‌دهند مواد ترد و شکننده هستند. به منظور جلوگیری از تخریب و عدم کارایی مواد می‌توان راه حل‌هایی را در نظر گرفت. اولین راه حل می‌تواند دور نگه‌داشتن قطعه مورد نظر از شرایط بحرانی که موجب شکست می‌شود، باشد. اگر چه این روش پیش‌گیری می‌تواند مفید واقع شود، اما گاهی اوقات کاربردهایی وجود دارند که دور ساختن ماده از شرایط بحرانی غیر ممکن است و یا آنکه از ماده به عنوان ضربه‌گیر استفاده می‌شود و کاربرد آن ایجاد می‌کند که مقاومت به ضربه مناسبی داشته باشد. در این گونه موارد استفاده از مواد با قابلیت جذب بالای انرژی در هنگام برخورد ضربه می‌تواند راه حل مناسبی باشد. در این مورد خواص مکانیکی ماده به گونه‌ای است که توانایی تحمل ضربه و جذب انرژی ناشی از آن را داشته و می‌تواند خود و قطعات متصل به خود را در برابر ضربه حفظ کند. پلیمرها یکی از مهم‌ترین موادی هستند که دامنه وسیع و قابل طراحی از خواص را نشان می‌دهند و مطالعه خواص آن‌ها و همچنین دانش نسبت به شرایط و عوامل ضربه می‌تواند ما را در طراحی سامانه‌هایی با جذب انرژی بالا و مقاوم به ضربه کمک کند [۵]. بدین منظور در ادامه به معرفی شرایط موجود در هنگام ایجاد ضربه پرداخته می‌شود.

۲- حالت‌های شکست پلیمرها تحت ضربه

مناسب‌ترین دسته‌بندی شکست پلیمرها تحت ضربه، قرار دادن آن‌ها در دو دسته شکننده و منعطف است. شکست از نوع شکننده فرآیندی با انرژی پائین است که قبل از آن که در ماده تسلیم‌شدن رخ دهد ترک ایجاد شده و پیشرفت می‌کند. در یک شکست از نوع منعطف تسلیم شدن وجود دارد، که احتمالاً به طور موضعی در ناحیه‌ای که تنش اعمال شده است رخ می‌دهد و انرژی قابل توجهی جذب می‌شود [۶]. شکل ۱ منحنی تنش- کرنش عمومی هر یک از این حالات را نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که هر دو نوع شکست ممکن است بسته به شرایط اعمال ضربه، در یک ماده مشاهده شود. برای مثال با کاهش دما، اغلب انتقال از شکست نوع منعطف به شکننده به وجود خواهد آمد. شکل ظاهری شکست رخ داده اغلب راهی برای تشخیص نوع آن است. شکست از نوع شکننده معمولاً سطح شکستی صاف، شیشه‌ای یا تراشه تراشه را نشان می‌دهد (شکل ۲ الف). از طرف دیگر شکست از نوع منعطف به طور معمول شواهدی از تغییر شکل محسوس و تسلیم‌شدن را بر جای می‌گذارد (شکل ۲ ب). تشخیص شکست از نوع منعطف معمولاً با سفیدشدن ماده توسط تنش در ناحیه شکست انجام می‌شود. در عمل شکستی حدواسط ممکن است رخ دهد. در این گونه موارد در راستای سطح شکست تغییری از یک حالت شکست به نوع دیگر آن به وجود می‌آید (شکل ۲ ج) [۸].

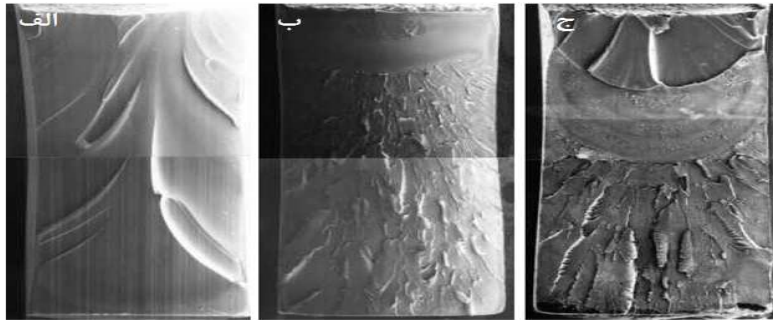


شکل ۱- نمودار تنش-کرنش برای حالت‌های مختلف شکست پلیمرها [۵].

۳- عوامل موثر بر مقاومت به ضربه پوشش‌های پلیمری

عوامل مختلفی بر مقاومت به ضربه پوشش‌های پلیمری موثر هستند. برخی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار عبارتند از: دما، دمای انتقال شیشه‌ای، سرعت اعمال ضربه و خواص ویسکوالاستیک، چسبندگی پوشش به زمینه، ساختار شیمیایی و جرم مولکولی [۷]. در ادامه به برخی از این عوامل موثر پرداخته خواهد شد.

^۱ Nielsen



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی از شکست (الف) نوع منعطف (ب) نوع شکننده (ج) حد واسط شکننده و منعطف [۸].

۳-۱- اثر دما و سرعت اعمال نیرو بر مقاومت به ضربه

با افزایش دما تا نزدیکی دمای انتقال شیشه‌ای پوشش، مقاومت به ضربه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در محدوده دمای انتقال شیشه‌ای، تحرکات مولکولی جهت آزادسازی تمرکز تنش به اندازه کافی وجود دارد. بنابراین، میزان زیادی از انرژی مکانیکی وارد شده به صورت گرما تلف می‌شود و تسلیم‌شدن پلیمر با مقدار زیادی از ازدیاد طول سبب افزایش انرژی مورد نیاز جهت رخ دادن پدیده شکست، می‌شود. همچنین، به دلیل برخورداری پلیمرها از ویژگی ویسکوالاستیک، خواص مکانیکی آن‌ها علاوه بر دما به زمان و سرعت اعمال نیرو وابسته است. در مورد سرعت اعمال ضربه می‌توان بیان داشت که افزایش سرعت ضربه اثری مانند کاهش دما و کاهش سرعت ضربه اثری مشابه با افزایش دما دارد. با کاهش سرعت ضربه، زنجیرهای پلیمری فرصت کافی برای پاسخ دادن به نیروی وارد شده و اتلاف آن را از طریق تغییر شکل پیدا می‌کنند. این در حالی است که افزایش سرعت اعمال نیرو سبب شکست سریع پوشش بدون فرصت کافی برای تغییر شکل و اتلاف انرژی می‌شود [۶، ۷].

۳-۲- ساختار شیمیایی

درک اثر ساختار شیمیایی بر مقاومت به ضربه بسیار پیچیده است. طوریکه، نمی‌توان تنها با اتکا بر ساختار پلیمر، منعطف بودن یا شکننده بودن آن را به طور قطعی تعیین کرد. به هر حال، برخی نتیجه‌گیری‌های کلی حاکی از آن است که افزایش جرم مولکولی پلیمر سبب افزایش مقاومت به ضربه می‌شود. البته، لازم به ذکر است که برای هر پلیمر جرم مولکولی خاصی وجود دارد که با رسیدن پلیمر به آن، خواص مکانیکی از جمله مقاومت به ضربه ثابت می‌ماند. همچنین، افزایش چگالی اتصالات فیزیکی و شیمیایی عرضی میان زنجیرهای پلیمری سبب افزایش مقاومت به ضربه می‌شود. البته در مورد پوشش‌های گرما سخت، که از ساختار شبکه‌ای و اتصالات شیمیایی برخوردارند، این افزایش مقاومت به ضربه با افزایش چگالی اتصالات عرضی تا حد خاصی رخ داده و پس از آن به دلیل محدود شدن تحرکات بخش‌های درگیر در اتصالات توانایی اتلاف نیروی حاصل از ضربه کاهش می‌یابد [۶، ۷].

۳-۳- چسبندگی پوشش به زمینه

چسبندگی پوشش به زمینه نیز بر مقاومت به ضربه مؤثر است. تحقیقات نشان داده است که با افزایش چسبندگی پوشش به زمینه مقاومت به ضربه بهبود می‌یابد. در واقع، با افزایش چسبندگی پوشش به زمینه قابلیت انتقال نیرو از پوشش به زمینه نیز افزایش یافته و در نتیجه مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد [۹].

۴- روش‌های اندازه‌گیری مقاومت به ضربه پوشش‌ها

چقرمگی یا مقاومت به شکست می‌تواند به عنوان توانایی یک پوشش در پایداری در برابر ضربه بدون ایجاد ترک یا شکست تعریف شود. این ویژگی به طبیعت پوشش پلیمری یا به چسبندگی پوشش و سطح بستگی دارد. مقاومت در برابر ضربه که با قابلیت تغییر شکل ارتباط پیدا می‌کند، می‌تواند توسط انداختن یک وزنه از فواصل مختلف که در درون یک لوله هدایت می‌شود و برخورد آن با سطح پوشش اندازه‌گیری شود [۱۰]. آزمون می‌تواند بر روی سمت پوشش‌دار (مستقیم) و یا بر روی سطح زمینه بدون پوشش (غیر مستقیم) انجام شود. ترک خوردگی یا شکست در اطراف محل برخورد وزنه مورد بررسی و توجه قرار می‌گیرد. آزمون استاندارد ASTM D 2794 سه روش برای تفسیر تخریب حاصل شده در آزمون ضربه پیشنهاد کرده است: بررسی چشمی، استفاده از محلول اسیدی سولفات مس و استفاده از یک تشخیص دهنده حفره‌سوزنی^۱. نتایج مقاومت به ضربه به صورت ارتفاع محلی که وزنه از آن افتاده و می‌تواند در پوشش تخریب ایجاد کند به صورت کیلوگرم-متر یا اینچ-پوند گزارش می‌شود [۱۰].

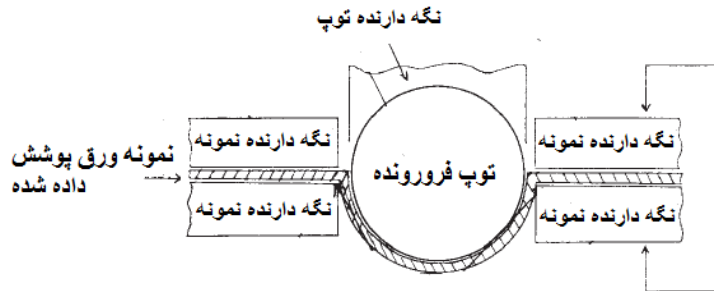
یک گوه خمیده وسیله‌ای است که جهت اندازه‌گیری مقاومت به ضربه و همچنین قابلیت تغییر شکل ورق‌های فلزی پوشش داده شده به وسیله روش غلطک در کارخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. نوار فلزی پوشش داده شده بر روی میله‌های فلزی به قطر ۳/۲ میلی‌متر که بر روی صفحه آزمون ضربه سوار شده است با زاویه ۱۷۰-۱۸۰ درجه خم می‌شود. یک میله ۱/۸۲ کیلوگرمی با انتهای صاف نیز بر روی نمونه می‌افتد. اختلاف در ارتفاع امکان اندازه‌گیری نیروی لازم جهت ایجاد

^۱ Pin hole

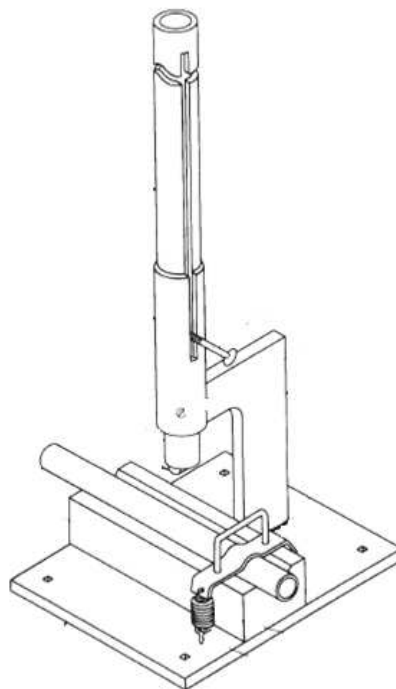
افتادن وزن مشخصی از یک نوع خاصی از سنگ آهک می‌شود که در مسیر یک شیب بر روی لوله پوشش داده شده رها می‌شود. تعداد تکرار افتادن مورد نیاز جهت تشخیص چشمی یا الکتریکی نفوذ سنگ آهک به داخل پوشش، به عنوان مقاومت به ضربه گزارش می‌شود. آزمون انداختن وزنه با آن چه که در بالا توضیح داده شد، مشابه است با این تفاوت که لوله توسط دستگاه خاصی به صورت ثابت نگه داشته می‌شود. شکست پوشش یا نفوذ در آن توسط اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی تشخیص داده شده و مقاومت به ضربه به صورت مقدار انرژی مورد نیاز جهت ایجاد شکست گزارش می‌شود. آزمون مقاومت نفوذ شامل یک میله پهن می‌شود که توسط یک وزنه بر روی سطح پوشش اعمال شده بر روی لوله فشار داده می‌شود. عمق یا نرخ نفوذ میله به درون پوشش به صورت تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود. این تابع همراه با هرگونه تخریب، ترک، نفوذ یا شکست گزارش می‌شود [۱۰].

ترک در پوشش را فراهم می‌کند. آزمون دیگری وجود دارد که جهت اندازه‌گیری مقاومت به ضربه و انعطاف‌پذیری ورق‌های فلزی پوشش داده شده با آستری غنی از روی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمون از یک توپ فرورونده^۱ که با نیروی بالا بر روی سطح فشار داده می‌شود استفاده می‌شود (شکل ۳) [۱۲]. همچنین آزمون‌هایی وجود دارد که در آن مقاومت به ضربه و انعطاف‌پذیری فلز پوشش داده شده را توسط وارد کردن یک ماده رنگزا اندازه‌گیری می‌کنند. در این روش به دلیل تنش وارد شده به سیستم ماده رنگزای حساس به تنش در نقاط ترک تغییر رنگ داده و تنش مورد نیاز جهت ایجاد ترک را مشخص می‌کند [۱۳]. مقاومت به ضربه پوشش‌های خطوط لوله را توسط آزمون‌های افتادن سنگ آهک^۲ [۱۴]، افتادن وزنه (شکل ۴) [۱۵] و مقاومت در برابر نفوذ اندازه‌گیری می‌کنند (شکل ۵) [۱۶]. آزمون انداختن سنگ آهک شامل

- ¹ Indenter
- ² Limestone

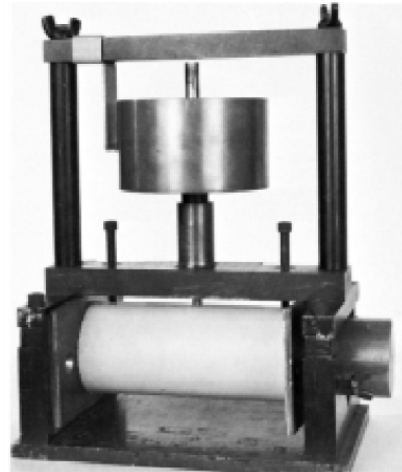


شکل ۳- شمایی از دستگاه اعمال نیرو در استاندارد ASTM D4146 [۱۱].



شکل ۴- تصویری از دستگاه موجود در استاندارد ASTM G 14 [۱۵].

می‌شوند. درجه جدایی فازی بین بخش سخت و بخش نرم، نقش اساسی در تعیین خواص حالت جامد این پوشش‌ها ایفا می‌کند [۱۸]. خواص پوشش‌های پلی‌یورتانی بستگی به چند عامل مثل ترکیب بخش‌های سخت و نرم، طول بخش‌های سخت و نرم و توزیع طولی متوالی^۱، ذات شیمیایی واحدهای سازنده پلیمر، پیوندهای غیرعادی (پیوندهایی که منجر به شاخه‌ای شدن یا شبکه‌ای شدن می‌شوند)، جرم مولکولی و ساختار بستگی دارد. با توجه به ویژگی‌های پلی‌یورتان که قابلیت تنظیم میزان استحکام و انعطاف‌پذیری را به طور هم‌زمان دارد نگرش مثبتی در مورد استفاده از این پوشش به عنوان پوشش‌های مقاوم به ضربه وجود دارد [۱۸] که در ادامه به مرور تحقیقات انجام یافته در مورد مقاومت به ضربه پوشش‌های پلی‌یورتان پرداخته خواهد شد.



شکل ۵- تصویر مربوط به دستگاه موجود در استاندارد ASTM G 17 [۱۶].

۵-۱- بررسی تاثیر تغییر در ساختار شیمیایی پوشش

پلی‌یورتان بر مقاومت به ضربه

زانگ^۲ و همکارانش [۱۹] به مطالعه خواص مکانیکی پوشش‌های پلی‌یورتان تهیه شده از پلی‌استر پلی‌ال‌های مختلف که با تری‌مرهای HDI^۳ و IPDI^۴ پخت شده بودند پرداختند. نتایج نشان داد هنگامی که از تری‌مر HDI و IPDI به تنهایی و به‌طور جداگانه استفاده می‌شود، پوشش تهیه شده از IPDI مقاومت به ضربه بالاتری (۷۵ Kg-cm) در مقایسه با پوشش پلی‌یورتان تهیه شده از HDI (۶۰ Kg-cm) ارائه می‌دهد. دلیل این مشاهده به عدم تقارن در IPDI در مقایسه با HDI نسبت داده شده است که سبب کاهش بلورینگی و در نتیجه افزایش الاستیسیته^{۱۰} پوشش می‌شود در حالیکه تقارن مولکولی در HDI سبب ایجاد واحدهای بلورینه در پوشش شده که الاستیسیته را کاهش داده و منجر به کاهش مقاومت به ضربه می‌شود.

۵- مقاومت به ضربه پوشش‌های پلی‌یورتان

امروزه می‌توان پوشش‌های پلی‌یورتان را به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع پوشش‌ها در نظر گرفت. خواص قابل تنظیم این پوشش‌ها سبب شده است که در بسیاری از موارد به عنوان گزینه اول انتخاب شوند و توانسته‌اند جایگزین بسیاری از انواع پوشش‌های دیگر شوند. در واقع پلی‌یورتان‌ها پلیمرهای دویخشی^۱ هستند. این پلیمرها بخش نرمی^۲ دارند که انعطاف‌پذیری آن‌ها را ایجاد می‌کند و بخش سختی^۳ که به آن صلبیت^۴ و استحکام می‌بخشد (شکل ۶) [۱۷].

مقدار و طول بخش‌های سخت و نرم می‌تواند با توجه به کاربرد خاص محصول مورد نظر تغییر کند. بخش‌های سخت در بستری از بخش نرم پخش می‌شوند و با کنار هم قرار گرفتن تشکیل ریز دامنه^۵ می‌دهند. این ریز دامنه‌ها اتصال‌های عرضی فیزیکی ایجاد می‌کنند و استحکام، سفتی و صلبیت به ماده می‌دهند [۱۷]. این نواحی نوعی جدایی فازی را نشان می‌دهند. این جدایی فازی به دلیل ناسازگاری ذاتی یا امتزاج‌ناپذیر بودن ترمودینامیکی بخش‌های سخت و نرم روی می‌دهد. بخش‌های سخت از مواد قطبی تشکیل شده‌اند و این امکان وجود دارد که بین گروه کربونیل و آمین پیوند هیدروژنی تشکیل شده و تمایل به تجمع ایجاد شده و نواحی سخت به طور منظم کنار یکدیگر قرار گیرند. بخش‌های نرم نواحی بی‌شکل را تشکیل می‌دهند. بخش‌های سخت مثل پرکننده عمل می‌کنند و نیز مانند یک عامل شبکه‌کننده مانع از حرکت بخش‌های نرم

¹ Segmented
² Soft segment
³ Hard segment
⁴ Rigidity
⁵ Microdomain
⁶ Sequence of length distribution
⁷ Zhang
⁸ Hexa Methylene Diisocyanate
⁹ Isophorene Diisocyanate
¹⁰ Elasticity



شکل ۶- بخش‌های سخت و نرم در پلی‌یورتان [۱۷].

همان طور که در جدول ۱ نتایج نشان داده شده است می‌توان با افزایش درصد استفاده از مولکولی سه عاملی به مقاومت به ضربه ۹۵ Kg-cm رسید. کاتالوار^۲ و همکارانش [۲۱]، از پلی‌آل‌هایی با منشا گیاهی با عدد هیدروکسیل متفاوت و دو نوع ایزوسیانات Desmodure N 75 و 3390 جهت تهیه پوشش‌های پلی‌یورتان استفاده کردند. نتایج آزمون‌های مکانیکی مانند: چسبندگی به سطح فلز (B 5)، سختی مدادی (4H) و انعطاف‌پذیری (1mm) برای تمامی نمونه‌ها یکسان گزارش شد. در آزمون کشش پلی‌آل با عدد هیدروکسیل بالاتر استحکام کششی بالاتر اما درصد ازدیاد طول پایین‌تر داشته است. تفاوت در سخت‌کننده‌ها در آزمون کشش، تفاوت معنی داری ایجاد نکرد. آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D-2794 انجام گرفته و نتایج نشان داد که بهترین نتیجه (($81/64 \text{ kg cm}$) ($70/86 \text{ lb-in}$)) در مورد نمونه تهیه شده از پلی‌آل با عدد هیدروکسیل بالاتر و Desmodure N 75 به دست آمده است. دلیل آن برقراری تعادل میان سختی و نرمی در این نمونه گزارش شده است. پلی‌آل دارای عدد هیدروکسیل بالاتر چگالی اتصالات عرضی بالاتری را فراهم می‌کند در حالی که Desmodure N 75 به دلیل شاخه‌ای بودن در مقایسه با سخت‌کننده دیگر که دارای ساختار حلقوی سخت است، منعطف‌تر است. اسماعیل^۳ و همکارانش [۲۲] از پلی‌استر پلی‌آل با درصدهای هیدروکسیل مختلف و همچنین MDI^۴ به عنوان سخت‌کننده در نسبت‌های ایزوسیانات به هیدروکسیل ۱/۲، ۱/۴ و ۱/۶ برای تهیه پوشش پلی‌یورتان استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش نسبت بخش سخت سبب بهبود چسبندگی و افزایش سختی می‌شود. این درحالی است که افزایش بخش سخت تا ۶۵/۶۴٪ در آزمون مندرل هیچ گونه ترکی مشاهده نمی‌شود اما در حالتی که بخش سخت ۷۴/۱۵ باشد، پوشش دچار ترک می‌شود. آزمون ضربه نیز از آزمون انعطاف‌پذیری پیروی کرده است، نمونه‌های با درصد بخش سخت تا ۷۴/۱۵٪ افتادن وزنه ۵۰۰ گرمی از فاصله ۲۵ سانتی‌متری را به خوبی پاسخ می‌دهند، اما پس از آن و با افزایش درصد بخش سخت در پلی‌یورتان پوشش با افتادن ضربه دچار شکست می‌شود. این نتایج حاکی از هماهنگی آزمون‌های ضربه و انعطاف‌پذیری و نقش تعادل میان بخش‌های سخت و نرم است.

این درحالی است که در صورت استفاده از مخلوط ترکیبات ایزوسیانات مقاومت به ضربه به بالاترین مقدار خود می‌رسد که نشان می‌دهد حضور IPDI در کنار HDI در برهم زدن تقارن موثر بوده و با جلوگیری از بلورینگی مقاومت به ضربه را افزایش داده است (۷۵ Kg cm). نتایج آزمون پراکنش اشعه ایکس^۱ و گرماسنجی تفاضلی روبشی^۲ نیز بلورینگی بیشتر پلی‌یورتان تهیه شده از HDI را تایید کرده‌اند. موضوع دیگر بررسی شده در این تحقیق نسبت‌های متفاوت از ایزوسیانات به پلی‌آل بوده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ایزوسیانات به پلی‌آل از ۰/۸ به ۱/۲ مقاومت به ضربه از ۶۰ به ۷۵ Kg cm افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش نسبت ایزوسیانات به پلی‌آل از ۱/۴ به ۱/۶ مقاومت ضربه به کاهش می‌یابد. محققین این روند را این‌گونه توضیح داده‌اند که ابتدا با افزایش نسبت ایزوسیانات به پلی‌آل چگالی اتصالات عرضی افزایش یافته و این به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر ضربه کمک کرده است، در حالی که پس از آن با افزایش میزان ایزوسیانات نسبت بخش‌های سخت به نرم در پوشش پلی‌یورتانی افزایش یافته و این افزایش سختی منجر به کاهش مقاومت به ضربه شده است. در این تحقیق همچنین اثر تغییر نسبت ادپیک اسید در تهیه پلی‌استر پلی‌آل بر مقاومت به ضربه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاکی از آن است که با افزایش نسبت ادپیک اسید که مولکولی خطی و بلند است الاستیسیت پوشش افزایش یافته و منجر به بهبود مقاومت به ضربه پوشش می‌شود. گوگوی^۱ و همکارانش [۲۰] پوشش‌های پلی‌یورتان تهیه شده از گسترش‌دهنده^۳ زنجیر آمینی و الکی و همچنین گسترش‌دهنده زنجیر خطی دوعاملی و شاخه‌ای سه عاملی را در درصدهای مختلف ساختند. خواص مکانیکی پوشش‌های پلی‌یورتان تهیه شده به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پوشش تهیه شده از عامل گسترش‌دهنده زنجیر آمینی به دلیل تشکیل گروه‌های اوره برهم‌کنش بین زنجیری قوی‌تری در مقایسه با استفاده از گسترش‌دهنده زنجیر الکی داشته و این برهم‌کنش قوی‌تر منجر به بهبود خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و درصد ازدیاد طول بیشتر شده است. نتایج آزمون ضربه انجام یافته طبق استاندارد ASTM D 1037 با نتایج آزمون کشش همراهی می‌کند و پوشش با استحکام مکانیکی و ازدیاد طول بیشتر مقاومت به ضربه بیشتری ارائه می‌دهد. بررسی اثر عاملیت گسترش‌دهنده زنجیر به وضوح بیانگر بهتر بودن خواص مکانیکی از جمله مقاومت به ضربه در صورت استفاده از مولکول سه عاملی به جای دوعاملی بوده است.

¹ Gogoi

² Chain extender

³ Kathalewar

⁴ Ismail

⁵ Methylene Diphenyl Diisocyanate

¹ X-ray Diffraction (XRD)

² Differential scanning calorimetry (DSC)

جدول ۱ - نتایج آزمون مکانیکی مرجع ۲۰.

| گسترش‌دهنده زنجیر | | | | آزمون | |
|--------------------|--------------------|-------------------|-------|--------------|------------------------|
| الکی ۳ عاملی (۱۵٪) | الکی ۳ عاملی (۱۰٪) | الکی ۳ عاملی (۵٪) | آمینی | الکی ۲ عاملی | |
| ۱۶/۰۹ | ۱۴/۳۱ | ۱۲/۰۹ | ۱۱/۳۲ | ۹/۴۲ | استحکام کششی (MPa) |
| ۵۲۸ | ۴۹۵ | ۴۵۶ | ۴۵۲ | ۴۰۴ | درصد ازدیاد طول |
| ۹۵ | ۹۵ | ۹۰ | ۹۰ | ۸۵ | مقاومت به ضربه (Kg cm) |

وجود دارد و حاکی از موثر بودن افزودن پلیمر شاخه‌ای در منعطف کردن پوشش و افزایش قابلیت ضربه‌پذیری آن است. طوریکه استحکام ضربه پوشش (میزان انرژی مورد نیاز جهت شکست پوشش در واحد سطح) از ۲/۲۸ کیلوژول بر مترمربع به ۶/۰۱ کیلوژول بر متر مربع رسیده است.

۵-۳- بررسی مقاومت به ضربه پوشش‌های پلی‌یورتان آب پایه

پاتل^۱ و ماناری^۲ [۲۵]، از ترکیب روغن کاردانول، پلی‌تترامتل گلاکول و ایزوفورن دی‌ایزوسیانات پلی‌یورتان پایه آبی را تهیه کردند که با وجود مقاومت خوردگی مناسب، از مقاومت به ضربه چندان بالایی برخوردار نبوده و تنها ضربه مستقیم (۲۳/۰۴Kg-cm) (۲۰ lb-in) و غیر مستقیم کمتر از (۲۳/۰۴Kg-cm) (۲۰ lb in) را تحمل کرده است.

وو^۳ و همکارانش [۲۶] نیز به مطالعه خواص مکانیکی پلی‌یورتان پایه آبی پرداختند. در این تحقیق پراکنه‌ای از پلی‌آل‌آنیونی بر پایه تریانتین که دارای گروه‌های اپوکسی بوده همراه با پلی‌ایزوسیانات بر پایه هگزامتیلن دی‌ایزوسیانات استفاده شد. عامل مورد تغییر در این تحقیق نسبت‌های مختلف ایزوسیانات به هیدروکسیل بوده که از ۰/۸ تا ۱/۴ متغیر بوده است. نتایج ارائه شده (جدول ۲) بسیار جالب است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ایزوسیانات به هیدروکسیل سختی افزایش یافته و هم‌زمان انعطاف‌پذیری نیز بهبود می‌یابد. مقاومت در برابر آب نیز با افزایش نسبت ایزوسیانات به هیدروکسیل افزایش یافته است. مقاومت به ضربه نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود از ۶۰ Kg cm به ۷۰ Kg cm می‌رسد که نشان از افزایش مقاومت به ضربه است. محققین بهبود سختی، انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه را به‌طور هم‌زمان با بیشتر شدن نسبت ایزوسیانات به هیدروکسیل به افزایش چگالی اتصالات عرضی نسبت داده‌اند. در این تحقیق ادعا شده است که میزان ایزوسیانات اضافی با آب وارد واکنش شده و ترکیبات اوره تشکیل می‌دهد که این ترکیبات قابلیت تسریع واکنش پخت و همچنین افزایش چگالی اتصالات عرضی و در نتیجه بهبود استحکام پوشش را سبب می‌شوند.

۵-۲- بررسی اثر پلیمرهای شاخه‌ای بر مقاومت به ضربه تاکور^۱ و همکارانش [۲۳] خواص مکانیکی پوشش‌های پلی‌یورتان پرشاخه را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از یک پلی‌آل خطی به عنوان شاهد و از روغن کرچک^۲ و همچنین مونوگلیسرید که شاخه‌ای‌تر است در کنار پلی‌کاپرولاکتون به عنوان پلی‌آل جهت واکنش با تولوئن دی‌ایزوسیانات استفاده شد. در آزمون انعطاف‌پذیری، نمونه دارای پلی‌آل خطی در حالت استفاده از میله به قطر ۳ میلی‌متر در دستگاه مندرل دچار شکست شده، درحالی‌که در مورد پلی‌یورتان‌های پرشاخه حتی در مورد میله با قطر ۱ میلی‌متر نیز پوشش دچار ترک نشده است. این روند در مورد آزمون ضربه نیز قابل مشاهده است. درحالی‌که پلی‌یورتان خطی در ۴۴ cm دچار شکست شده است، پلی‌یورتان شاخه‌ای در ۱۰۰ cm همچنان در برابر ضربه مقاوم باقی مانده است. پلی‌یورتان با میزان شاخه‌ای بودن بیشتر استحکام کششی بیشتری ارائه کرده است (۱۱ مگاپاسکال در مقابل ۷ مگاپاسکال) در حالی‌که پوشش با میزان شاخه‌ای بودن کمتر درصد ازدیاد طول بیشتری را نشان می‌دهد (۷۹۱٪ در مقابل ۶۵۱٪). در این تحقیق پلی‌یورتان شاخه‌ای با میزان شاخه‌ای بودن کمتر به عنوان بهینه در نظر گرفته شده است. باوو^۳ و شی^۴ [۲۴] با استفاده از واکنش پلیمر شاخه‌ای دارای گروه هیدروکسیل و ایزوفورن دی‌ایزوسیانات پلیمر شاخه‌ای یورتانی تهیه کرده و سپس با واکنش گروه‌های ایزوسیانات آزاد آن با یک آمینو آکریلات، موفق به تهیه پلیمر پرشاخه یورتانی دارای گروه‌های آکریلات شدند. این پلیمر شاخه‌ای به دلیل دارا بودن پیوند دوگانه قابلیت استفاده در پوشش‌های تابش‌پذیر را می‌یابد که به همین منظور جهت بهبود خواص اپوکسی آکریلات به آن اضافه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن پلیمر شاخه‌ای تا ده درصد سبب افزایش میزان تبدیل پیوندهای دوگانه شده و پس از آن افزودن بیشتر پلیمر شاخه‌ای سبب کاهش میزان تبدیل می‌شود. نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان می‌دهد که با افزایش میزان پلیمر شاخه‌ای تا ۱۰ درصد، استحکام کششی افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. نویسندگان بهبود اولیه را به افزایش میزان تبدیل و چگالی اتصالات عرضی نسبت داده و کاهش استحکام کششی با افزودن پلیمر شاخه‌ای به میزان بیشتر از ۱۵ درصد را ناشی از طبیعت منعطف پلیمر شاخه‌ای دانسته‌اند. نتایج درصد ازدیاد این مطلب را تایید می‌کند، زیرا با افزایش غلظت پلیمر شاخه‌ای درصد ازدیاد طول از ۵/۵ درصد برای پوشش بدون پلیمر شاخه‌ای به ۷/۲٪ برای پوشش دارای ۳۰٪ درصد پلیمر شاخه‌ای می‌رسد. این روند افزایشی در آزمون ضربه نیز

¹ Thakur

² Castor Oil

³ Bao

⁴ Shi

⁵ Patel

⁶ Mannari

⁷ Wu

جدول ۲- نتایج خواص مکانیکی پوشش پلی‌یورتان پایه آب با نسبت‌های مختلف ایزوسیانات به هیدروکسیل مرجع ۲۶.

| خواص مکانیکی و شیمیایی پوشش | ۰/۸ | ۱ | ۱/۲ | ۱/۴ |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|------------|------------|
| سختی مدادی | H | H | 2H | 2H |
| انعطاف‌پذیری (mm) | ۱ | ۱ | ۰/۵ | ۰/۵ |
| مقاومت به ضربه (Kg cm) | ۶۰ | ۶۵ | ۷۰ | ۷۰ |
| مقاومت در برابر آب | دچار عارضه سفیدشدگی | دچار عارضه سفیدشدگی | بدون تغییر | بدون تغییر |

ترک و شکستی نداشته‌اند. بیشتر بودن مقاومت به ضربه نانوپوشش نسبت به پوشش پلی‌یورتان به برهم‌کنش قوی میان نانوذرات و بستر نسبت داده شده است که سبب استحکام بیشتر پوشش و افزایش قابلیت تحمل و دفع نیروی حاصل از ضربه شده است. کاهش یکباره مقاومت به ضربه در نمونه دارای ۴٪ نانوذره نیز به عدم پراکنش مناسب نانوذرات در این نمونه نسبت داده شده است که تجمعات نانوذرات می‌توانند محلی برای تمرکز تنش قرار گرفته و توانایی دفع ضربه را به میزان مناسب نداشته باشند و مقاومت به ضربه پایین‌تری نشان دهند. کاتالوار^۱ و همکارانش [۲۹] نیز با افزودن نانوذرات اکسید روی بدون و دارای آمایش سطحی، قصد بهبود خواص مکانیکی پوشش پلی‌یورتان آلیفاتیک را داشتند. نتایج آزمون‌های مکانیکی مانند چسبندگی، سختی، انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه نشان دادند که در مورد پوشش بدون نانوذره و همچنین نانوپوشش‌های حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد نانو اکسید روی خواص یاد شده از اندازه مناسبی برخوردار بوده و افزودن نانوذره در حالت بدون و دارای آمایش تاثیر قابل توجهی بر نتایج یاد شده نداشته است. در آزمون مکانیکی-حرارتی دینامیک تغییر در دمای انتقال شیشه‌ای با افزودن نانوذره به میزان قابل توجهی نبوده و دمای انتقال شیشه‌ای پوشش پلی‌یورتان از ۳۹ به ۴۲ °C در مورد نمونه نانوپوشش حاوی ۳٪ نانوذرات دارای آمایش سطحی می‌رسد. در مورد مدول ذخیره تغییرات قابل ملاحظه‌تر بوده و از ۱ به ۲/۲ گیگاپاسکال در مورد نمونه نانوپوشش حاوی ۳٪ نانوذره آمایش شده می‌رسد. بنابراین، در این تحقیق افزودن نانوذره به صورت آمایش شده و آمایش نشده بر بهبود چسبندگی، سختی، انعطاف‌پذیری، مقاومت به ضربه و دمای انتقال شیشه‌ای تاثیر چندانی نداشته است. عدم تأثیر نانو ذره بر خواص مکانیکی به کاهش میزان پخت (حتی در مورد نانوذره آمایش یافته) در اثر حضور نانوذره نسبت داده شده است که می‌تواند اثر بهبوددهندگی نانوذره را خنثی کند.

جی^۱ و لوو^۲ [۲۷] جهت بهبود خواص پلی‌یورتان‌های پایه آبی از ترکیبات سیلوکسانی بهره گرفتند. در این تحقیق پلی‌پروپیلین گلایکول به عنوان پلی‌آل استفاده شده که جهت بهبود خواص پلی دی متیل سیلوکسان با گروه‌های انتهایی هیدروکسی بوتیل در درصدهای ۱، ۳ و ۵ به آن افزوده شد و پخت این پوشش پلی‌یورتان دوجزئی توسط پلی‌ایزوسیانات با درصد ایزوسیانات ۲/۵ انجام گرفت. نتایج نشان داد که سختی تمام نمونه‌ها در آزمون‌های سختی مدادی و آونگی بدون تغییر باقی می‌ماند و افزودن سیلوکسان به پلی‌یورتان بر سختی آن بی اثر بوده است. نتایج چسبندگی و انعطاف‌پذیری نیز نشان از کامل بودن چسبندگی در آزمون کراس هچ^۳ و انعطاف‌پذیری در مندرل^۴ دارد. نتایج آزمون ضربه که طبق استاندارد ISO 6272 انجام شده است نشان داد که نمونه بدون سیلوکسان و نمونه با ۱٪ سیلوکسان دارای مقاومت به ضربه (۵۰ Kg-cm) (۵ Kg-m) بوده در حالی‌که با افزودن ۳ و ۵ درصد سیلوکسان مقاومت به ضربه بیشتر از دو برابر افزایش یافته و به (۱۲۰ Kg-cm) (۱۲ Kg-m) می‌رسد که از آن به عنوان دستاوردی مناسب یاد شده است.

۵-۴- بررسی تاثیر نانوذرات بر مقاومت به ضربه پوشش پلی‌یورتان

علم نانو و استفاده از نانوذرات نیز جهت بهبود مقاومت به ضربه و دیگر خواص مکانیکی پوشش‌ها به کمک محققین آمده‌اند. آناند^۵ [۲۸] و همکاران از نانو اکسید روی جهت بهبود خواص پوشش پلی‌یورتان برپایه روغن گیاهی سوربیتول و پلی‌ایزوسیانات مشتق شده از MDI استفاده کردند. نانو اکسید روی در درصدهای وزنی ۱، ۲، ۳ و ۴ به پلی‌یورتان افزوده شده و نتایج آزمون‌های مکانیکی در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نمونه‌ها در آزمون چسبندگی هیچ‌گونه جدایشی نشان نداده و چسبندگی مناسب را ارائه می‌دهند. آزمون خمش نیز نشان از انعطاف‌پذیری مناسب پوشش‌ها داشته و هیچ‌گونه شکست یا ترکی مشاهده نشده است. نتایج آزمون خراش نشان می‌دهد که با افزایش نانوذرات تا ۲٪ بهبود مقاومت خراش حاصل می‌شود و با افزایش استفاده از نانوذرات مقاومت خراش روند کاهشی می‌یابد. در مورد آزمون ضربه نیز ملاحظه می‌شود که نانو پوشش‌های حاوی ۳٪ وزنی نانو ذره مقاومت به ضربه ۱۰۰ Kg cm داشته و هیچ‌گونه

¹ Gi
² Lou
³ Cross hatch
⁴ Mandrel
⁵ Anand
⁶ Kathalewar

جدول ۳- نتایج آزمون‌های مکانیکی بر روی نانوپوشش‌های پلی‌یورتانی مرجع ۲۸.

| میزان وزنی نانو ذره (%) | | | | | آزمون | |
|-------------------------|------|------|------|------|------------------------------------|--|
| ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | ۰ | | |
| ۸۷/۵ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۷۵ | مقاومت به ضربه (ASTM D 2794) Kg-cm | |
| ۰/۸ | ۲ | ۳/۵ | ۲/۲ | ۲ | خراش (ASTM D 7027) Kg | |
| قبول | قبول | قبول | قبول | قبول | آزمون خمش | |
| ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | چسبندگی | |

۶- نتیجه‌گیری

روش‌های مختلفی جهت بهبود مقاومت به ضربه پلی‌یورتان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهبود خواص مکانیکی پلی‌یورتان‌ها از طریق تغییر در ساختار شیمیایی پلی‌آل یا ایزوسیانات، تغییر نسبت میان دو جزء و همچنین افزودن نانوذرات به صورت واحدهای ساختاری نانو ذره یا تشکیل درمکان به روش سل-ژل امکان‌پذیر است. تغییر در ساختار شیمیایی پلی‌یورتان از جمله تغییر نوع پلی‌ایزوسیانات تاثیر بسزایی در رفتار پلی‌یورتان در برابر ضربه داشته و پلی‌ایزوسیانات با انعطاف‌پذیری بهتر و تقارن کمتر جهت جلوگیری از بلورینگی سبب بهبود مقاومت به ضربه می‌شود. عامل دیگر در بهبود مقاومت به ضربه با تغییر در ساختار شیمیایی پلی‌یورتان استفاده از پلی‌آل‌های شاخه‌ای بوده که در عین حفظ انعطاف‌پذیری سامانه سبب افزایش استحکام پوشش نیز می‌شوند. افزودن نانوذرات معدنی نیز می‌تواند با توجه به اندازه کوچک نانوذره برهم‌کنش بالایی میان فازهای آلی و معدنی برقرار کرده و بدین ترتیب سبب افزایش استحکام و مقاومت به ضربه پوشش شود.

¹ Ahmad² Sol-gel³ Toluene Diisocyanate⁴ Akram

بنابراین، افزودن نانوذره سبب شکننده شدن پوشش پلی‌یورتان نشده در حالیکه منجر به بهبود مقاومت به خوردگی پوشش پلی‌یورتان شده است. احمد^۱ و همکارانش [۳۰] از روش سل-ژل^۲ جهت بهبود مقاومت به ضربه پلی‌یورتان استفاده کردند. در این تحقیق ابتدا روغن بزرک دارای گروه‌های امیدی با تترائیل ارتوسیلیکات در درصدهای ۲۰، ۲۵ و ۳۰ واکنش داده و سپس با عامل پخت TDI^۳ وارد واکنش شد. نتایج نشان داد که پوشش بدون تترائیل ارتوسیلیکات نمی‌تواند ضربه (۱۷۲/۸۲Kg-cm) را پاسخ دهد در حالیکه نمونه‌های دارای پیوند Si-O-Si به راحتی این ضربه را تحمل می‌کنند. اکرم^۴ و همکارانش [۳۱] نیز از فرآیند سل-ژل در کنار افزودن نانو ذرات سیلیکای تهیه شده به روش غباری جهت بهبود مقاومت به ضربه پوشش پلی‌یورتان متشکل از روغن بزرک و TDI استفاده کردند. مقاومت به ضربه در این پژوهش (۲۸۸/۰۳Kg-cm) گزارش شده که در مقایسه با داده‌های احمد و همکارانش [۲۹] بالاتر بوده است. در این تحقیق [۳۱] نمونه حاوی ۳٪ نانوسیلیکای غباری عاری از هرگونه ترک بوده، درحالیکه افزودن بیش از ۵٪ نانوسیلیکا سبب ایجاد ترک شده است.

۷- مراجع

- P. I. Vincent, "Impact tests and service performance of thermoplastics", Plastic Institute, London, England, 1971.
- C. B. Bucknall, K. V. Gotham, P. I. Vincent, In: Polymer science, ed. by A. D. Jenkins, North- Holland, Amsterdam, Netherland, 1973.
- S. Turner, Mechanical testing of plastics, Iliffe, London, England, 1973.
- C. B. Bucknall, Toughened plastics, Appl. Sci. publishers Ltd., London, England, 1977.
- P. E. Reed, In: developments in polymer fracture, ed. by E. H. Andrews, Appl. Sci. publishers Ltd., London, England, 1979.
- A. J. Kinloch, R. J. Young, Fracture behaviour of polymers, Elsevier app. sc. publisher, London and New York, England and USA, 1988.
- L. E. Nielsen, R. F. Landel, Mechanical properties of polymers and composites, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1994.
- J. P. F. Inberg, Fracture of polycarbonate/ ABS blends, Ph. D Thesis University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2001.
- R. A. Meyers, Encyclopedia of Analytical Chemistry, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2012.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "ASTM D 2794", 'Resistance of Organic Coatings to the Effects of Rapid Deformation (Impact)', in Annual Book of ASTM Standards, V 06.01, ASTM, West Conshohocken, PA, 2003.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "ASTM D 3281", 'Formability of Attached Organic Coating with Impact-wedge Bend Apparatus', in Annual Book of ASTM Standards, V 06.01, ASTM, West Conshohocken, PA, 2003.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "ASTM D 4146", 'Formability of Zinc-rich Primer/Chromate Complex Coatings', in Annual Book of ASTM Standards, V 06.01, ASTM, West Conshohocken, PA, 2003.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "M.P. Morse, 'Flexibility and Toughness', in Paint and Coating Testing Manual, 14th edition, ed. J.V. Koleske, ASTM, Philadelphia, PA, Chapter 47, 1995.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "ASTM G 13", 'Impact Resistance of Pipeline Coatings (Limestone Drop Test)', in Annual Book of ASTM Standards, V 06.01, ASTM, West Conshohocken, PA, 2003.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "ASTM G 14", 'Impact Resistance of Pipeline Coatings (Falling Weight Test)', in Annual Book of ASTM Standards, V 06.01, ASTM, West Conshohocken, PA, 2003.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "ASTMG17", 'Penetration Resistance of Pipeline Coatings (Blunt Rod)', in Annual Book of ASTM Standards, V 06.01, ASTM, West Conshohocken, PA, 2003.
- V. R. Sastri, [5Plastics in medical devices: properties, requirements and applications: Elsevier, 2010.
- D. Chattopadhyay, K. Raju, "Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications", Progress in Polymer Science, 32(3), 352-418, 2007.
- J. Zhanga, W. Tua, Z. Dai, "Synthesis and characterization of transparent and high impact resistance polyurethane coatings based on polyester polyols and isocyanate trimers", Prog. Org. Coa., 75, 579- 583, 2012.
- S. Gogoi, Sh. Barua, N. Karak, "Biodegradable and thermostable synthetic hyperbranchedpoly (urethane-urea)s as advanced surface coating materials", Prog. Org. Coat., 77, 1418-1427, 2014.
- M. Kathalewar, A. Sabnis, D. D'Melo, "Polyurethane coatings prepared from CNSL based polyols: Synthesis, characterization and properties", Prog. Org. Coat., 77, 616-626, 2014.
- E. A. Ismail, A. M. Motawie, E. M. Sadek, "Synthesis and

- characterization of polyurethane coatings based on soybean oil-polyester polyols", *Egyptian J. Petrol.*, 20, 1-8, **2011**.
23. S. Thakur, N. Kara, "Castor oil-based hyperbranched polyurethanes as advanced surface coating materials", *Prog. Org. Coat.*, 76, 157-164, **2013**.
 24. F. Bao, W. Shi, "Synthesis and properties of hyperbranched polyurethane acrylate used for UV curing coatings", *Prog. Org. Coat.*, 68, 334-339, **2010**.
 25. C. J. Patel, V. Mannari, "Air-drying bio-based polyurethane dispersion from cardanol: Synthesis and characterization of coatings", *Prog. Org. Coat.*, 77, 997-1006, **2014**.
 26. G. M. Wu, Z. Kong, J. Chena, S. Huo, G. Liu, "Preparation and properties of waterborne polyurethane/ epoxy resin composite coating from anionic terpene-based polyol dispersion", *Prog. Org. Coat.*, 77, 315-321, **2014**.
 27. Z. Ge, Y. Luo, "Synthesis and characterization of siloxane-modified two-component waterborne polyurethane", *Prog. Org. Coat.*, 76, 1522-1526, **2013**.
 28. A. Anand, R. D. Kulkarnia, V. V. Gite, "Preparation and properties of eco-friendly two pack PU coatings based on renewable source (sorbitol) and its property improvement by nano ZnO", *Prog. Org. Coat.*, 74, 764-767, **2012**.
 29. M. Kathalewar, A. Sabnis, G. Waghoo, "Effect of incorporation of surface treated zinc oxide on non-isocyanate polyurethane based nano-composite coatings", *Prog. Org. Coat.* 76, 1215-1229, **2013**.
 30. Sh. Ahmad, F. Zafar, E. Sharmin, N. Garg, M. Kashif, "Synthesis and characterization of corrosion protective polyurethanefattyamide/silica hybrid coating material", *Prog. Org. Coat.*, 73, 112-117, **2012**.
 31. D. Akram, E. Sharmin, S. Ahmad, "Linseed polyurethane/tetraethoxyorthosilane /fumed silica hybrid nanocomposite coatings: Physico-mechanical and potentiodynamic polarization measurements studies", *Prog. Org. Coat.*, 77, 957-964, **2014**.