

فوم انعطاف پذیر پلی یورتان

(ارزیابی، آزمون و الزامات)

انجمن تولیدکنندگان
پلی یورتان ایران
شرکت آراین پلی یورتان
تأسیس ۱۴۰۵

چکیده

فوم‌های انعطاف‌پذیر پلی‌یورتان به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر راحتی، انعطاف‌پذیری، جذب انرژی و دوام مناسب، در طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله مبلمان، تشک، صنایع خودروسازی، حمل‌ونقل عمومی، تجهیزات پزشکی و بسیاری از محصولات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به تنوع زیاد این محصولات، وجود یک نظام استاندارد برای طبقه‌بندی، ارزیابی کیفیت و تعیین محدوده عملکرد آن‌ها ضروری است.

استاندارد ISO 5999 و استاندارد ملی متناظر آن INSO 8135:2026، چارچوب جامعی برای طبقه‌بندی فوم‌های انعطاف‌پذیر پلی‌یورتان ارائه می‌کنند. در این استاندارد، فوم‌ها ابتدا بر اساس نوع و فرآیند تولید به سه نوع اصلی شامل فوم‌های اسلب‌استاک (Type I)، فوم‌های قالبی (Type II) و فوم‌های بازسازی‌شده یا پیوند داده‌شده (Type III) تقسیم می‌شوند. هر یک از این گروه‌ها نیز با توجه به میزان جهندگی و ساختار فوم، به زیرگروه‌هایی مانند LB، MB، HB، LM، MM، HM و RE تفکیک می‌شوند که هر یک برای کاربردهای خاصی طراحی شده‌اند.

پس از تعیین نوع فوم، عملکرد آن از طریق آزمون خستگی با بار ثابت (Constant-Load Pounding Fatigue Test) مطابق استاندارد ISO 3385 ارزیابی می‌شود. در این آزمون، نمونه فوم تحت سیکل‌های متوالی بارگذاری قرار گرفته و میزان کاهش سختی آن پس از پایان آزمون اندازه‌گیری می‌شود. نسبت افت سختی، معیاری برای سنجش دوام و حفظ خواص مکانیکی فوم در استفاده طولانی‌مدت بوده و بر همین اساس، فوم‌ها در پنج رده A، S، V، X، و L طبقه‌بندی می‌شوند. هرچه افت سختی کمتر باشد، مقاومت فوم در برابر خستگی بیشتر بوده و برای شرایط کاری سخت‌تر مناسب‌تر خواهد بود. یکی دیگر از معیارهای مهم معرفی‌شده در این استاندارد، شاخص سختی (Indentation Force Deflection یا IFD) است که میزان نیروی لازم برای ایجاد فرورفتگی مشخص در فوم را نشان می‌دهد. این شاخص، معیار اصلی بیان سختی اولیه فوم بوده و گریدهای مختلف فوم بر اساس آن تعریف می‌شوند. در نتیجه، کدگذاری کامل فوم‌ها از سه بخش نوع، رده و گرید تشکیل شده است؛ برای مثال، کد HB-V-170(I) بیانگر یک فوم اسلب‌استاک با جهندگی بالا، مناسب برای کاربردهای بسیار سنگین و دارای سختی اولیه ۱۷۰ نیوتن است. این شیوه نام‌گذاری، انتخاب فوم مناسب برای کاربردهای مختلف را ساده‌تر و دقیق‌تر می‌کند.

استاندارد ISO 5999 علاوه بر معرفی سیستم طبقه‌بندی، برای هر نوع و رده فوم، حداقل الزامات خواص فیزیکی شامل مقاومت کششی، ازدیاد طول تا پارگی، مانایی فشاری، استحکام پس از پیرشدگی حرارتی و رطوبتی، درصد تغییر استحکام و سایر ویژگی‌های مرتبط را نیز مشخص می‌کند. این الزامات تضمین می‌کنند که فوم تولیدشده علاوه بر داشتن سختی مناسب، از دوام کافی در شرایط بهره‌برداری نیز برخوردار باشد.

در نهایت، باید توجه داشت که انتخاب فوم مناسب تنها بر اساس یک پارامتر امکان‌پذیر نیست. نوع فوم، رده عملکردی، گرید سختی، خواص فیزیکی، شرایط واقعی بهره‌برداری و الزامات هر کاربرد باید به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. رعایت الزامات استانداردهای بین‌المللی نظیر ISO 5999 ضمن تضمین کیفیت و دوام محصول، امکان انتخاب صحیح فوم برای کاربردهای مختلف و مقایسه عملکرد محصولات تولیدکنندگان گوناگون را نیز فراهم می‌سازد. بدین ترتیب، این استانداردها نقش مهمی در طراحی، تولید، کنترل کیفیت و توسعه فوم‌های انعطاف‌پذیر پلی‌یورتان ایفا می‌کنند.

۱- مقدمه



شکل ۱- تصویری از فوم تحت بار

در مراحل توسعه محصول، خواص فیزیکی فوم به منظور شناسایی ویژگی‌های مواد اولیه و تعیین مناسب بودن آن برای کاربردهای موردنظر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین در تولید صنعتی فوم، اندازه‌گیری خواص فیزیکی کلیدی نقش مهمی در کنترل کیفیت محصول ایفا می‌کند.

در این مقاله، آزمون‌های مربوط به ارزیابی خواص فیزیکی پایه و دوام فوم معرفی و تشریح شده‌اند.

۲- خواص فیزیکی پایه

استاندارد ASTM D3574 روش‌های استاندارد آماده‌سازی نمونه‌های فوم و همچنین روش‌های انجام آزمون‌های خواص فیزیکی پایه و دوام فوم را ارائه می‌کند. معادل مستقیمی برای این استاندارد در مجموعه استانداردهای ISO وجود ندارد؛ با این حال، برخی از روش‌های آزمون معرفی شده در آن دارای استانداردهای متناظر یا معادل در ISO هستند. در این مقاله برای معرفی روش‌های آزمون، در هر بخش از استانداردهای متناظر ISO استفاده شده است. در ادامه، هفت آزمون اصلی خواص فیزیکی پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد که عبارت‌اند از:

- دانسیته (Density)
- نیروی فرورفتگی در کرنش ثابت (Indentation Force Deflection, IFD)
- نیروی فشاری در کرنش ثابت (Compression Force Deflection, CFD)
- مانایی فشاری در تغییر شکل ثابت (Constant Deflection Compression Set)
- استحکام کششی (Tensile Strength)
- مقاومت پارگی (Tear Resistance)
- خاصیت جهندگی (Resilience)

۲-۱- آماده سازی نمونه

بر اساس استانداردهای ISO، آزمون فوم باید ۷۲ ساعت پس از تولید انجام شود. همچنین، پیش از انجام آزمون، نمونه فوم که فاقد هرگونه تغییر شکل باشد، باید حداقل به مدت ۱۶ ساعت در شرایط محیطی کنترل شده شامل دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 50 ± 5 درصد (یا دمای 27 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 65 ± 5 درصد) نگهداری شود. این دوره نگهداری می‌تواند بخش پایانی دوره زمانی پس از تولید فوم را نیز شامل شود.

در برخی از آزمون‌ها، به منظور دستیابی به نتایجی که تا حد امکان بیانگر عملکرد واقعی محصول در شرایط بهره‌برداری باشند، از شرایطدهی مکانیکی (Mechanical Conditioning) نیز استفاده می‌شود.

۲-۲- دانسیته



شکل ۲ - اندازه‌گیری دانسیته

اندازه‌گیری دانسیته، همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، بیانگر دانسیته ظاهری (Apparent Density) یا دانسیته حجمی (Bulk Density) فوم است، نه دانسیته واقعی پلیمر. این ویژگی فیزیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا ارتباط مستقیمی با هزینه تولید و ظرفیت تحمل بار دارد. به‌طور کلی، افزایش دانسیته موجب افزایش هزینه تولید می‌شود، اما در مقابل، خواص مکانیکی و ظرفیت تحمل بار فوم را نیز بهبود می‌بخشد.

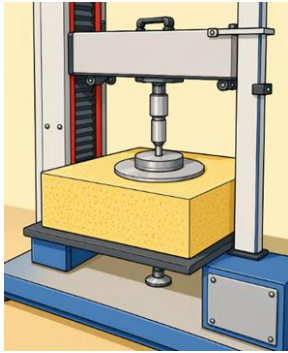
مطابق استاندارد ISO 845، دانسیته فوم به دو صورت تعیین و گزارش می‌شود. در روش اول، دانسیته ظاهری هسته فوم (Apparent Core Density) اندازه‌گیری می‌شود که در آن، تمامی لایه‌های پوسته‌ای (Skin) ایجادشده در فرآیند قالب‌گیری از نمونه حذف شده و سپس دانسیته بخش هسته فوم تعیین می‌شود. در روش دوم، دانسیته ظاهری کل فوم (Apparent Overall Density) گزارش می‌شود که در آن، دانسیته نمونه بدون حذف پوسته‌ها و با احتساب تمامی لایه‌های پوسته‌ای تشکیل‌شده در حین قالب‌گیری اندازه‌گیری می‌شود.

در این آزمون، ابتدا یک نمونه نماینده از فوم با دقت ابعادبرداری شده و سپس وزن آن به‌طور دقیق اندازه‌گیری می‌شود. دانسیته که معمولاً بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3) گزارش می‌شود، از تقسیم جرم نمونه بر حجم آن به دست می‌آید.

۲-۳- نیروی فرورفتگی در کرنش ثابت (Indentation Force Deflection, IFD)

آزمون IFD روشی برای اندازه‌گیری خواص تحمل بار (Load-bearing Properties) یک فوم است. در این آزمون، نیروی لازم برای فرو بردن یک صفحه دایره‌ای در داخل فوم اندازه‌گیری می‌شود که به این ضریب شاخص سختی فوم نیز گفته می‌شود. تجربه نشان داده است که نتایج این اندازه‌گیری‌ها می‌توانند بسته به دما و رطوبت نسبی محیطی که فوم در آن ساخته، عمل‌آوری (Cure) و آزمون شده است، تغییر کنند.

بر اساس استاندارد ISO 2439، روش A، نمونه فوم روی یک صفحه نگهدارنده دارای سوراخ‌هایی با قابلیت عبور هوا قرار می‌گیرد. سپس یک صفحه دایره‌ای با قطر ۲۰ سانتی‌متر روی سطح فوم قرار داده

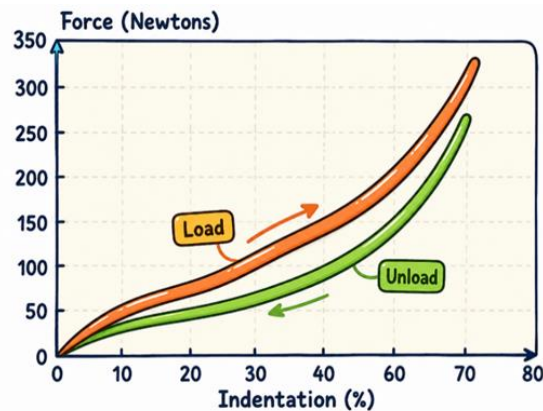


شکل ۳- اندازه گیری سختی در کرنش ثابت

می شود (شکل ۲). در ادامه، نمونه برای آماده سازی اولیه (شرایط دهی مکانیکی)، سه بار تا ۷۰ درصد ضخامت خود فشرده می شود. بلافاصله پس از سومین مرحله باربرداری، نمونه آزمون را به میزان ۴۰ درصد از ضخامت آن تحت فرورفتگی قرار دهید. این میزان فرورفتگی را به مدت ۳۰ ثانیه حفظ کنید، سپس نیروی متناظر را بر حسب نیوتن ثبت کرده و بار را آزاد کنید. در این آزمون، نیروی اعمالی و میزان فرورفتگی به طور همزمان ثبت می شوند.

نتایج این آزمون را می توان همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، به صورت نمودار نمایش داد. توجه کنید که هنگام برداشتن بار (Unload)، نیروی اندازه گیری شده برای یک میزان فرورفتگی مشخص، کمتر از نیروی لازم در هنگام اعمال بار (Load) است. این اختلاف هیستریزیس (Hysteresis) نامیده می شود و به صورت درصدی از نیروی اعمالی گزارش می گردد.

هیستریزیس معیاری از میزان انرژی جذب شده توسط فوم در هنگام تغییر شکل است. فوم هایی که هیستریزیس بالایی دارند، جهندگی (Resilience) کمتری از خود نشان می دهند و معمولاً برای بازگشت به شکل اولیه به زمان بیشتری نیاز دارند.



شکل ۴- نمودار نیرو-کرنش حاصل از تست IFD

مقادیر IFD را می توان در سطوح مختلف تغییر شکل، شامل ۲۵، ۵۰ و ۶۵ درصد ضخامت اولیه فوم، اندازه گیری و گزارش کرد. همچنین، مقادیر IFD برگشتی (Unload) معمولاً در سطوح ۲۵ و ۵۰ درصد تغییر شکل ثبت می شوند. بر اساس این مقادیر، می توان شاخص ها و اطلاعات فنی مختلفی را درباره رفتار مکانیکی و ویژگی های تحمل بار فوم استخراج کرد که مهم ترین آن ها در ادامه ارائه شده اند.

- برگشت پذیری (Recovery) یا عکس هیستریزیس (1/Hysteresis)

$$\%Recovery = \frac{\text{Unload 25\% IFD}}{\text{Load 25\% IFD}} \times 100$$

قادیر بالای برگشت پذیری (Recovery) برای کاربردهای راحتی و نشیمن (Cushioning) مطلوب هستند، در حالی که مقادیر پایین برگشت پذیری برای کاربردهای جذب ضربه (Shock-Absorbing) مناسب ترند. فوم هایی که برگشت پذیری پایینی دارند، گاهی با عنوان «فوم مرده» (Dead Foam) شناخته می شوند.

- ضریب ساگ (Sag Factor) یا ضریب تکیه گاهی (Support Factor)

$$\text{Sag Factor} = \frac{65\% \text{ IFD}}{25\% \text{ IFD}}$$

هرچه Sag Factor یا ضریب تکیه گاهی (Support Factor) بیشتر باشد، کیفیت تکیه گاهی و نشیمن فوم نیز بهتر خواهد بود. فوم هایی که ضریب سگ پایینی دارند، معمولاً در اثر اعمال بار به سرعت تا کف فشرده می شوند و عملکرد نامطلوبی از خود نشان می دهند.

- ضریب راحتی (Comfort Factor) یا عکس ضریب سختی اولیه (1/The initial hardness Factor)

$$\text{Comfort Factor} = \frac{25\% \text{ IFD}}{5\% \text{ IFD}}$$

ضریب راحتی، بیانگر احساس اولیه ای است که هنگام تماس با سطح فوم به مصرف کننده منتقل می شود. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، سطح فوم نرم تر احساس می شود؛ در مقابل، مقادیر پایین تر نشان دهنده سطحی سفت تر و سخت تر هستند.

- ضریب راهنما (Guide Factor)

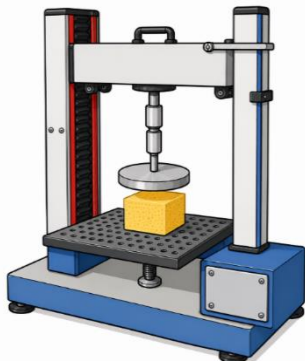
$$25\% \text{ Guide Factor} = \frac{25\% \text{ IFD}}{\text{Density}}$$

$$65\% \text{ Guide Factor} = \frac{65\% \text{ IFD}}{\text{Density}}$$

فوم هایی که ضریب راهنمای (Guide Factor) بالاتری دارند، معمولاً از نظر هزینه تولید و مصرف مواد اولیه مقرون به صرفه تر هستند، اما این مزیت لزوماً به معنای عملکرد بهتر آنها نیست.

۴-۲- نیروی فشاری در کرنش ثابت

(Compression Force Deflection, CFD)



شکل ۵ - اندازه گیری نیروی فشاری در کرنش ثابت

آزمون CFD از نظر اصول اندازه گیری مشابه آزمون IFD است؛ با این تفاوت که در این آزمون، نیروی لازم برای فشرده کردن فوم تا یک میزان تغییر شکل مشخص اندازه گیری و گزارش می شود. در آزمون CFD از یک صفحه فشاری استفاده می شود که ابعاد آن به اندازه ای است که بتواند نیرو را به طور یکنواخت بر تمام سطح فوقانی نمونه فوم اعمال کند.

بر اساس استاندارد ISO 3386، نمونه روی یک صفحه نگهدارنده سوراخ دار قرار می گیرد تا جریان هوا در حین فشرده سازی امکان پذیر باشد. نمونه را در مرکز دستگاه قرار دهید (شکل ۵) و با استفاده از صفحه فشاری، آن را با سرعت ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه فشرده کنید تا ضخامت آن به ۷۰ درصد مقدار اولیه کاهش یابد. سپس صفحه فشاری را با همان سرعت بالا ببرید تا نمونه به ضخامت اولیه خود بازگردد. این عمل را سه بار تکرار کنید (شرایط دهی مکانیکی). در بار چهارم، فشار لازم برای فشرده کردن نمونه تا مقدار تغییر شکل تعیین شده را بر حسب KPa اندازه گیری و ثبت کنید.

در آزمون CFD، تغییراتی در روش اجرا از جمله تغییر ابعاد نمونه (از جمله ضخامت فوم) و تغییر سطح صفحه فشاری قابل اعمال است. این تغییرات می توانند بر نتایج آزمون و مقادیر اندازه گیری شده تأثیر بگذارند.

۵-۲- مانایی فشاری در تغییر شکل ثابت

(Constant Deflection Compression Set)



شکل ۶ - آزمون مانایی فشاری

در آزمون مانایی فشاری (Compression Set)، سه نمونه فوم با ابعاد دقیق بین دو صفحه فلزی قرار داده شده و تا ۵۰، ۷۵ یا ۹۰ درصد تغییر شکل نسبت به ضخامت اولیه فشرده می شوند.

نمونه ها در حالی که تحت این میزان فشردگی قرار دارند، به مدت ۲۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد نگهداری می شوند. سپس از دستگاه خارج شده و ۳۰ دقیقه فرصت داده می شود تا تا حد امکان به حالت اولیه خود بازگردند. در پایان، ضخامت نمونه ها دوباره اندازه گیری شده و میزان تغییر شکل دائمی آن ها محاسبه می شود.

$$C_t = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100$$

C_t : مانایی فشاری، بر حسب درصد ضخامت اولیه نمونه؛

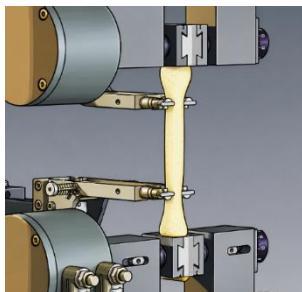
t_0 : ضخامت اولیه نمونه پیش از اعمال بار؛

t_f : ضخامت نهایی نمونه پس از پایان آزمون و دوره بازیابی.

تا زمانی که ضخامت اولیه نمونه کمتر از طول یا عرض آن باشد، مقدار مانایی فشاری مستقل از ضخامت نمونه خواهد بود. اما اگر ضخامت نمونه از طول یا عرض آن بیشتر شود، ممکن است نمونه در هنگام اعمال بار دچار کمناش (Buckling) شود و در نتیجه، نتایج آزمون از تکرارپذیری مناسبی برخوردار نباشند. بنابراین، نمونه‌ها معمولاً به گونه‌ای در دستگاه قرار داده می‌شوند که اندازه‌گیری مانایی فشاری در راستای جهت رشد فوم انجام شود. مقادیر مانایی فشاری اندازه‌گیری شده در نمونه‌هایی که عمود بر جهت رشد فوم تهیه شده‌اند، معمولاً کمتر است.

علاوه بر این، برخی از خودروسازان انجام آزمون مانایی فشاری در شرایط مرطوب (Wet Compression Set) را نیز الزامی می‌دانند. در یک روش متداول، نمونه برش خورده (به همراه پوسته قالب، همانند روش مورد استفاده شرکت Renault) تحت ۵۰ درصد فشردگی، به مدت ۲۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۵ درصد مورد آزمون قرار می‌گیرد.

۲-۶- استحکام کششی (Tensile Strength)



شکل ۷ - اندازه‌گیری استحکام کششی

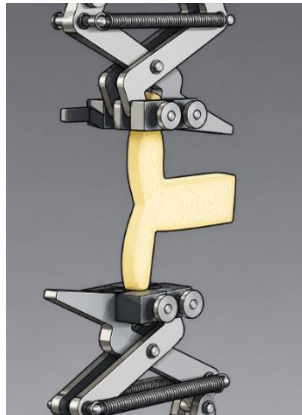
آزمون کشش (Tensile Test)، استحکام فوم را در برابر نیروی کششی اندازه‌گیری کرده و اطلاعاتی درباره انعطاف‌پذیری و رفتار الاستیکی فوم ارائه می‌دهد. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمون معمولاً به شکل دمبلی یا استخوانی طبق ابعاد مشخص شده در استاندارد مورد استفاده برش داده می‌شوند. در طول آزمون، نمونه با سرعت ثابت (طبق استاندارد ISO 1798 با سرعت ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) کشیده می‌شود تا زمانی که شکست اتفاق بیفتد. نیروی ثبت شده در لحظه شکست، به عنوان استحکام کششی فوم گزارش می‌شود که معمولاً بر حسب کیلوپاسکال (kPa) بیان می‌گردد.

حداکثر افزایش طول نمونه به صورت درصدی از طول اولیه آن، ازدیاد طول در نقطه شکست (Elongation at Break) نامیده می‌شود. این مقدار معمولاً به صورت دستی یا با استفاده از اکستنسومتر (Extensometer) اندازه‌گیری می‌شود. در گذشته، استفاده از اکستنسومترها به دلیل تماس مستقیم با نمونه، باعث ایجاد خطاهایی در نتایج می‌شد؛ زیرا ممکن بود باعث تغییر شکل نمونه یا ایجاد تمرکز تنش در محل تماس شوند. امروزه اکستنسومترهای غیرتماسی مبتنی بر فناوری لیزر برای انجام اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر در دسترس هستند.

مدول الاستیسیته (Modulus of Elasticity) از طریق رسم نمودار تنش در برابر کرنش (Stress-Strain Curve) در آزمون کشش به دست می‌آید. این مدول برابر با شیب اولیه منحنی تنش-کرنش در ناحیه‌ای است که رفتار ماده کاملاً الاستیک بوده و قانون هوک برقرار است. بیشتر فوم‌های پلی یورتان دارای یک نقطه تسلیم (Yield Point) هستند؛ یعنی نقطه‌ای که پس از آن، تغییر شکل ایجاد شده دیگر کاملاً برگشت‌پذیر نیست و تغییر شکل دائمی و غیرالاستیک آغاز می‌شود. این رفتار برگشت‌ناپذیر ممکن است ناشی از پارگی استرات‌ها (Struts) در ساختار سلولی فوم، شکست

دیواره‌های سلولی (Cell Windows) یا لغزش زنجیره‌های پلیمری باشد. تنش‌ی که در نقطه تسلیم ایجاد می‌شود، استحکام تسلیم (Yield Strength) نامیده می‌شود.

۷-۲- مقاومت پارگی (Tear Resistance)



شکل ۸ - اندازه‌گیری مقاومت پارگی

یکی دیگر از معیارهای مهم برای ارزیابی استحکام مکانیکی فوم، مقاومت پارگی (Tear Strength) است. در این آزمون، همان‌گونه که به‌صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است، نمونه‌ای با ابعاد مشخص‌شده در استاندارد (ISO 8067) که دارای یک شکاف اولیه است، تحت نیروی کششی قرار می‌گیرد. با اعمال نیروی کششی، پارگی از محل شکاف اولیه گسترش یافته و نیروی موردنیاز برای ادامه گسترش پارگی اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت پارگی از تقسیم حداکثر نیروی ثبت‌شده یا میانگین آن بر ضخامت نمونه محاسبه شده و معمولاً بر حسب نیوتن بر میلی‌متر (N/mm) گزارش می‌شود. هرچه مقدار مقاومت پارگی بیشتر باشد، فوم در برابر گسترش ترک یا پارگی ناشی از تنش‌های مکانیکی مقاومت بیشتری خواهد داشت.

نتایج این آزمون به میزان قابل‌توجهی به استحکام پارگی فوم وابسته است، اما لزوماً با استحکام کششی آن همبستگی مستقیم ندارد. در این آزمون، پارگی از یک شکاف از پیش ایجادشده آغاز می‌شود و معیار اصلی، مقاومت فوم در برابر ادامه گسترش پارگی است، نه نیروی لازم برای ایجاد پارگی اولیه. به همین دلیل، کیفیت و تیزی ابزار برش می‌تواند بر نتایج اندازه‌گیری اثرگذار باشد.

۸-۲- خاصیت جهندگی (Resilience)



شکل ۹ - آزمون جهندگی فوم

خاصیت جهندگی (Resilience) فوم با استفاده از آزمون بازگشت توپ (Ball Rebound Test)، مطابق شکل زیر اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمون، یک توپ فولادی از ارتفاع مشخصی بر روی نمونه فوم رها شده و ارتفاع بازگشت آن اندازه‌گیری می‌شود. جزئیات روش انجام آزمون و تجهیزات موردنیاز در استاندارد ISO 8307 ارائه شده است. نتایج این آزمون ارتباط مناسبی با میزان راحتی نشیمن (Cushion Comfort) فوم نشان داده و به‌عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی این ویژگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- آزمون دوام فوم (Durability)

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری مقاومت خستگی (Fatigue) در فوم‌های انعطاف‌پذیر در مقیاس آزمایشگاهی وجود دارد. با این حال، اغلب این روش‌ها در دو دسته اصلی قرار می‌گیرند: آزمون‌های

خستگی استاتیکی (Static Fatigue Tests) و آزمون‌های خستگی دینامیکی (Dynamic Fatigue Tests).

در هر یک از این دو دسته، روش‌های مختلف آزمون از نظر میزان بارگذاری یا تغییر شکل اعمال شده، استفاده از فرورونده (Indenter) یا اعمال تغییر شکل کامل، وجود یا عدم وجود نیروی برشی، ضخامت نمونه، تعداد سیکل‌های بارگذاری، نرخ اعمال و بازیابی تغییر شکل و همچنین مدت زمان استراحت نمونه پس از هر سیکل یا پس از پایان آزمون، با یکدیگر تفاوت دارند. علاوه بر این، شاخص‌های اندازه‌گیری شده نیز بسته به نوع آزمون متفاوت هستند و می‌توانند شامل افت ارتفاع (Height Loss)، افت سختی (Hardness Loss)، تغییرات ظاهری یا کاهش سایر خواص فیزیکی فوم باشند.

در ادامه، شرح مختصری از برخی روش‌های استاندارد و پرکاربرد آزمایشگاهی برای ارزیابی خستگی فوم ارائه شده است. با پیشرفت تحقیقات، روش‌های جدید آزمون خستگی با سرعت فزاینده‌ای معرفی می‌شوند که بسیاری از آن‌ها همبستگی بهتری با عملکرد واقعی محصول داشته و امکان پیش‌بینی دقیق‌تر دوام و عملکرد فوم را فراهم می‌کنند.

۳-۱- آزمون‌های خستگی استاتیکی (Static Fatigue Tests)

به‌طور کلی، دو نوع آزمون خستگی استاتیکی بیشترین کاربرد را دارند:

- آزمون مانایی فشاری با تغییر شکل ثابت
(Constant Deflection Compression Set)
- آزمون خزش تحت بار ثابت (Constant-Load Creep Test)

۳-۱-۱- آزمون مانایی فشاری با تغییر شکل ثابت (Constant Deflection Compression Set)

رایج‌ترین آزمون خستگی استاتیکی، آزمون مانایی فشاری با تغییر شکل ثابت است که از نظر روش اجرا شباهت زیادی به آزمون ساده مانایی فشاری شرح داده شده در بخش ۲-۵ دارد. این آزمون مطابق با استاندارد ASTM 3574، روش ۱، انجام می‌شود. در این روش، معمولاً از نمونه‌ای با ابعاد 380×380 میلی‌متر استفاده می‌شود. استاندارد معادل ایزو برای این آزمون وجود ندارد.



شکل ۱۰- آزمون مانایی فشاری
برای سنجش خستگی استاتیکی

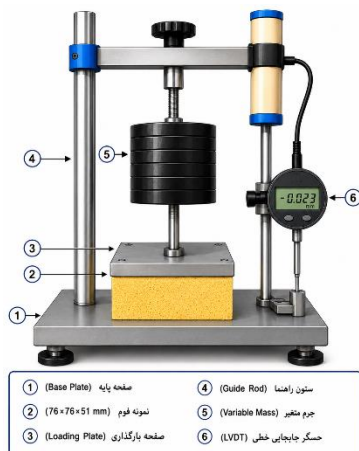
نمونه فوم در یک دستگاه ساده، مطابق شکل ۱۰، تا میزان مشخصی فشرده شده و برای مدت زمان معینی تحت همان تغییر شکل نگه داشته می‌شود. پس از پایان زمان فشرده‌گی، نمونه از دستگاه خارج

شده و فرصت بازیابی پیدا می کند. سپس ارتفاع نمونه اندازه گیری شده و نتایج به صورت درصدی از ارتفاع اولیه گزارش می شوند.

مقادیر به دست آمده از آزمون مانایی فشاری، همبستگی مناسبی با کاهش ضخامت بالشتک در شرایط واقعی استفاده و همچنین تغییرات سختی فوم دارند. با این حال، پایین بودن مقدار مانایی فشاری در آزمون های خستگی استاتیکی، لزوماً تضمین کننده عملکرد مطلوب محصول در شرایط واقعی نیست.

به همین دلیل، در توسعه محصولات جدید، آزمون های مانایی فشاری معمولاً تنها به عنوان شاخصی تقریبی برای ارزیابی قابلیت بازیابی فوم پس از اعمال بار مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین این آزمون ها به طور گسترده به عنوان آزمون کنترل کیفیت در فرآیند تولید فوم به کار گرفته می شوند.

۳-۱-۲- آزمون خزش تحت بار ثابت (Constant-Load Creep Test)



شکل ۱۱- تصویری ساده از دستگاه آزمون خزش تحت بار ثابت

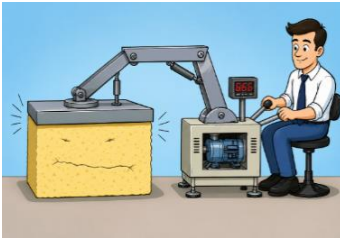
خزش (Creep) به تغییر شکل وابسته به زمان یک نمونه تحت اثر بار ثابت و مداوم گفته می شود که پس از برداشتن بار، به طور کامل یا تا حد زیادی قابل بازیابی است. یک دستگاه متداول برای انجام این آزمون در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این روش، یک نمونه فوم با ابعاد تقریباً $76 \times 76 \times 51$ میلی متر در زیر صفحه اعمال بار قرار می گیرد. سپس صفحه تا جرم مورد نظر بارگذاری شده و بر روی نمونه قرار داده می شود. تغییر شکل عمودی (خزش) نمونه طی مدت ۱۰ دقیقه اندازه گیری می شود.

نتایج آزمون به صورت درصد تغییر شکل بر حسب زمان ترسیم می شوند و از شیب این منحنی، نرخ خزش (Creep Rate) محاسبه می شود. مقدار نرخ خزش با درصد نفوذ یا میزان فشردگی اولیه نمونه ارتباط دارد؛ به طوری که هرچه میزان فشردگی بیشتر باشد، نرخ خزش نیز افزایش می یابد. به طور کلی، نرخ خزش بالا نشان دهنده تمایل بیشتر فوم به کاهش ضخامت و افت عملکرد در طول زمان است.

همانند سایر آزمون های خستگی استاتیکی، آزمون خزش نیز به تنهایی شدت کافی برای شبیه سازی شرایط واقعی استفاده را ندارد؛ بنابراین، نتایج آن معمولاً برای پیش بینی دقیق عملکرد بلندمدت فوم در شرایط سرویس کافی نبوده و بیشتر به عنوان یک آزمون مقایسه ای و کنترل کیفیت مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۲- آزمون های خستگی دینامیکی (Dynamic Fatigue Tests)

آزمون های خستگی دینامیکی به منظور شبیه سازی بارهای متناوب طراحی شده اند که بالشتک های نشیمن در شرایط واقعی استفاده با آن ها مواجه می شوند. به طور کلی، دو نوع اصلی از این آزمون ها مورد استفاده قرار گرفته است:



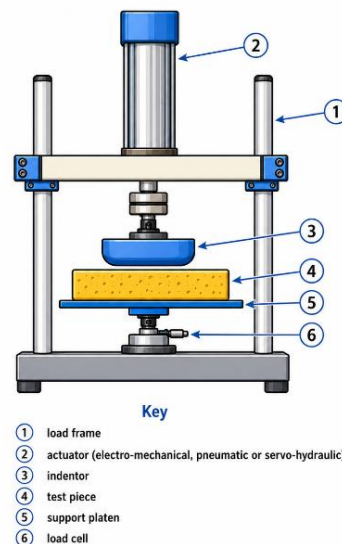
شکل ۱۲ - تصویری کارتونی از تست خستگی فوم

- آزمون‌هایی که در آن‌ها بالشتک فومی توسط یک فرورونده نوسانی (Oscillating Indenter) تا درصد ثابتی از ضخامت خود فشرده می‌شود.
- آزمون‌هایی که در آن‌ها نمونه به‌طور مکرر تحت بارگذاری و باربرداری قرار می‌گیرد و فرورونده در هر سیکل بار ثابتی را به نمونه اعمال می‌کند.

گزارش شده است که آزمون‌های خستگی دینامیکی، از جمله آزمون بارکوبی با بار ثابت (Constant-Load Pounding Test) که در آن با نرم‌تر شدن فوم، میزان نفوذ فرورونده در طول آزمون به تدریج افزایش می‌یابد، همبستگی بالایی با کاهش ارتفاع (Height Loss) فوم و تا حدودی نیز با افت سختی (Hardness Loss) آن در شرایط واقعی بهره‌برداری دارند. یکی از روش‌های استاندارد برای انجام آزمون بارکوبی با بار ثابت، استاندارد ISO 3385 است که به‌عنوان یک روش متداول توسط بسیاری از تولیدکنندگان فوم در صنایع مبلمان و خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

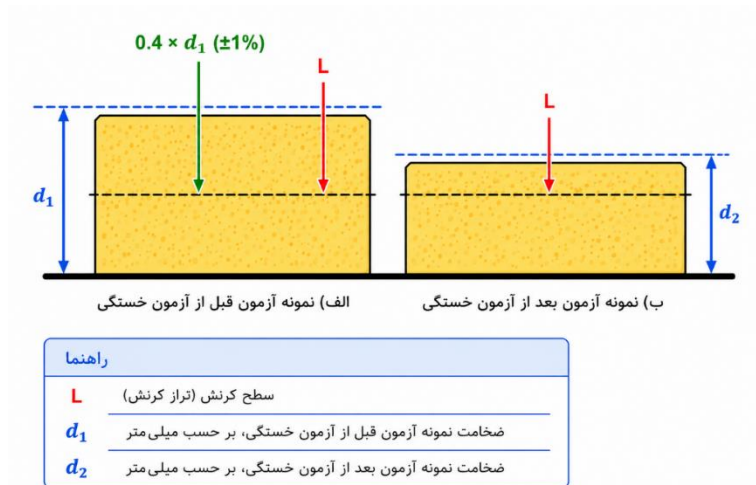
۳-۲-۱- آزمون‌های خستگی با بار ثابت (Constant-Load Pounding Fatigue Test)

استاندارد بین‌المللی ISO 3385، روش استاندارد انجام آزمون خستگی با بار ثابت را ارائه می‌کند. در این آزمون، یک نمونه فوم با ابعاد $380 \times 50 \times 380$ میلی‌متر به‌طور مکرر توسط یک صفحه دایره‌ای با قطر ۲۵ سانتی‌متر تحت بار ۷۵۰ نیوتن و با نرخ ۷۰ سیکل در دقیقه، در مجموع ۸۰,۰۰۰ سیکل بارگذاری می‌شود. یک نمونه از دستگاه مورد استفاده برای اجرای آزمون خستگی بارکوبی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ - تصویری ساده از دستگاه آزمون خستگی با بار ثابت

ضخامت و سختی نمونه (مقادیر IFD) قبل و بعد از انجام آزمون مطابق استاندارد ISO 2439 اندازه گیری می شوند. سپس نتایج این اندازه گیری ها با یکدیگر مقایسه شده و درصد افت آن ها به عنوان معیاری برای توصیف عملکرد خستگی و دوام فوم گزارش می شود. با این تفاوت که برای اندازه گیری IFD بعد از آزمون خستگی در سطح کرنش ۴۰ درصد بر اساس ضخامت اولیه اندازه گیری شده محاسبه می شود. نحوه اجرای این الزام به صورت شماتیک در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴ - تصویری شماتیک از فرآیند آزمون سختی پس از خستگی فوم

۴- الزامات خواص فیزیکی فوم های انعطاف پذیر پلی یورتان برای کاربردهای تحت بار

فوم ها بر اساس نوع فوم، عملکرد آن ها در آزمون خستگی و شاخص سختی فروروندگی (IFD) که به عنوان مبنایی برای درجه بندی فوم ها به کار می رود، طبقه بندی می شوند. استاندارد ISO 5999 با تکیه بر این طبقه بندی، الزامات مربوط به خواص فیزیکی و مکانیکی فوم ها را تعیین کرده و بر اساس عملکرد آن ها در آزمون های خستگی، کاربردهای توصیه شده هر گروه را مشخص می کند.

۴-۱- طبقه بندی فوم های انعطاف پذیر پلی یورتان

طبق استاندارد ISO 5999 (یا استاندارد ملی ISO 8135:2026) فوم ها به انواع (Type)، رده ها (Class) و گریدهای (Grade) مختلف طبقه بندی می شوند.

۴-۱-۱- نوع (Type)



شکل ۱۵- انواع فوم پلی یورتان

فوم های پلی یورتان انعطاف پذیر بر اساس نوع مواد اولیه، ساختار فوم و فرآیند تولید، در گروه های مختلفی طبقه بندی می شوند. این طبقه بندی که مطابق استاندارد ISO 5999 انجام می شود، مبنای تعیین ویژگی های عملکردی، الزامات فیزیکی و کاربردهای هر نوع فوم است. انواع مختلف این فوم ها در جدول ۱ ارائه شده اند.

جدول ۱- انواع فوم

Type	Code	Description of foam
I	LB	Block foam, slabstock or contour cut [low resilience (known as "viscoelastic")] اسفنج بلوکی، اسلب استاک یا برش خورده (جهندگی کم [ویسکوالاستیک])
	MB	Block foam, slabstock or contour cut (conventional) اسفنج بلوکی، اسلب استاک یا برش خورده (متداول)
	HB	Block foam, slabstock or contour cut (high resilience) اسفنج بلوکی، اسلب استاک یا برش خورده (جهندگی زیاد)
II	LM	Moulded [low resilience (known as "viscoelastic")] اسفنج قالب گیری شده (جهندگی کم [ویسکوالاستیک])
	MM	Moulded (conventional) اسفنج قالب گیری شده (متداول)
	HM	Moulded (high resilience) اسفنج قالب گیری شده (جهندگی زیاد)
III	RE	Reconstituted or bonded اسفنج بازسازی شده یا پیوند داده شده

فوم های معمولی (Conventional) و فوم های با جهندگی بالا (High Resilience یا HR) از نظر خواص فیزیکی، رفتار متفاوتی از خود نشان می دهند. این دو گروه عمدتاً بر اساس درصد جهندگی (Resiliency) و ضریب ساگ (Sag Factor) از یکدیگر متمایز می شوند؛ دو شاخصی که نقش مهمی در راحتی، حمایت از بدن و عملکرد نهایی فوم ایفا می کنند. به طور کلی، فوم های HR دارای جهندگی بیش از ۶۰ درصد و ضریب ساگ بین ۲٫۲ تا ۳٫۰ هستند، در حالی که فوم های معمولی دارای جهندگی کمتر از ۶۰ درصد و ضریب ساگ بین ۱٫۷ تا ۲٫۰ می باشند. ضریب ساگ بالاتر در فوم های HR نشان دهنده توانایی بیشتر این فوم ها در ایجاد نرمی اولیه مطلوب، همراه با حمایت بهتر از بدن در

تغییر شکل های بیشتر است؛ ویژگی ای که موجب افزایش راحتی و دوام آن ها در مقایسه با فوم های معمولی می شود.

۴-۱-۲- گرید (Grade)

گرید فوم های پلی یورتان بر اساس شاخص سختی فرورفتگی (IFD)، که با روش A استاندارد ISO 2439 تعیین می شود، مطابق با جدول ۲ درجه بندی می شوند.

جدول ۲- گرید بندی فوم از طریق سختی اولیه

Grade	Indentation hardness index (N)
30	25 to 40
50	41 to 60
70	61 to 85
100	86 to 110
130	115 to 150
170	155 to 190
210	195 to 235
270	240 to 295
330	300 to 360
400	365 to 425
470	430 to 520
600	525 to 650



شکل ۱۶- سختی فوم (IFD)
معیاری برای سنجش فوم

۴-۱-۳- رده (Class)

به جز فوم های نوع MM و RE، سایر انواع فوم های معرفی شده بر اساس عملکرد در آزمون خستگی با بار ثابت، مطابق استاندارد ISO 3385، در پنج رده طبقه بندی می شوند. هر یک از این رده ها بیانگر میزان دوام و حفظ سختی فوم پس از انجام آزمون خستگی هستند. شرایط کاربری هر رده و محدوده مجاز نسبت افت سختی آن ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- رده بندی فوم و نوع کاربرد متناظر آنها

Class رده	Type of service نوع کاربرد	Hardness loss ratio, P (%) نسبت افت سختی، P : (%)
X	Exceptionally severe بسیار بسیار سنگین	$0 \leq P < 12$
V	Very severe بسیار سنگین	$12 \leq P < 22$
S	Severe سنگین	$22 \leq P < 32$
A	Average متوسط	$32 \leq P < 39$
L	Light سبک	$39 \leq P < 45$



NOTE
توضیح

The hardness loss ratio is calculated from the following formula:

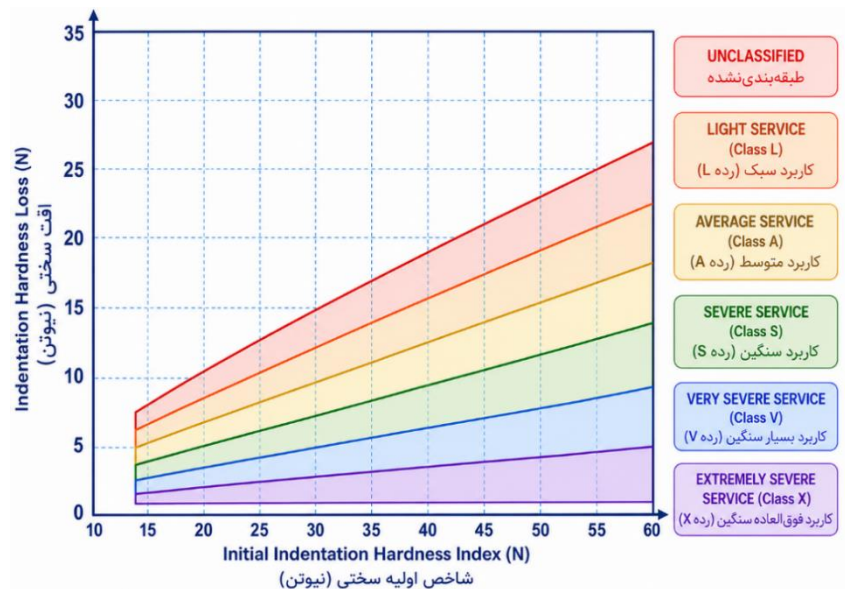
نسبت افت سختی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P = \frac{H - F}{H} \times 100$$

where
که در آن:

- P is the hardness loss ratio (%).
نسبت افت سختی P : (%).
- H is the initial hardness index (N).
 H : شاخص سختی اولیه (نیوتن).
- F is the final hardness index (N).
 F : شاخص سختی نهایی (نیوتن).

علاوه بر جدول ۳، استاندارد ISO 5999 نمودارهایی را برای تعیین رده فوم ارائه کرده است. بخشی از این نمودارها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با استفاده از شاخص سختی اولیه (Initial IFD) و مقدار افت سختی ($H - F$) پس از آزمون خستگی، می توان رده فوم را به صورت گرافیکی تعیین کرد. در این رابطه، H بیانگر شاخص سختی اولیه و F بیانگر شاخص سختی پس از انجام آزمون خستگی است.



شکل ۱۷- رده بندی فوم از طریق سختی اولیه و افت سختی

۴-۲- کاربردهای توصیه شده برای هر رده فوم انعطاف پذیر پلی یورتان

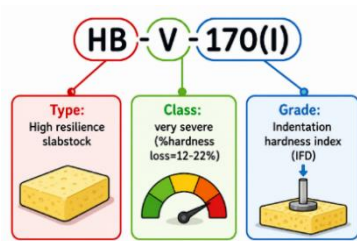
از آنجا که رده بندی فوم های پلی یورتان بر اساس نتایج آزمون خستگی با بار ثابت انجام می شود، هر رده نشان دهنده میزان مقاومت فوم در برابر شرایط مختلف کاربری است. به بیان دیگر، هر چه فوم پس از انجام آزمون خستگی، افت سختی کمتری از خود نشان دهد و در رده های بالاتری قرار گیرد، می تواند در شرایط سخت تر مورد استفاده قرار گیرد و دوام بالاتری داشته باشد. با این حال، رده فوم به تنهایی برای انتخاب فوم مناسب کافی نیست. علاوه بر رده، شاخص اولیه سختی (IFD) و ضخامت فوم نیز باید در نظر گرفته شوند؛ زیرا عملکرد واقعی فوم به ترکیب این سه عامل بستگی دارد. برای مثال، دو فوم ممکن است هر دو در یک رده قرار گیرند، اما به دلیل تفاوت در سختی اولیه یا ضخامت، رفتار متفاوتی در کاربرد نهایی داشته باشند.

پیشنهادهای ارائه شده در جدول ۴ برای کاربردهای متداول هر یک از رده های فوم است (برگرفته از استاندارد ISO 5999 یا استاندارد ملی ISO 8135:2026). رده ای که برای هر کاربرد ذکر شده است، حداقل رده پیشنهادی برای آن کاربرد محسوب می شود. بنابراین، استفاده از فوم هایی با رده بالاتر نیز امکان پذیر بوده و معمولاً موجب افزایش دوام و حفظ بهتر خواص فوم در طول دوره استفاده خواهد شد.

جدول ۴- کاربردهای پیشنهادی

Class	Recommended application	کاربرد توصیه شده
X	- Heavy-duty seats in continuous use by the public (contract furniture) - Heavy-duty public transport seats	نشیمن صندلی میلمان مخصوص کار سنگین در حال استفاده مداوم توسط عموم نشیمن های مخصوص کار سنگین حمل و نقل عمومی
V	- Private and commercial vehicle drivers' seats - Public transport seats - Cinema and theatre seats - Office furniture seats or seats used by the public (contract furniture)	نشیمن صندلی های رانندگان وسایل نقلیه شخصی و تجاری نشیمن صندلی های حمل و نقل عمومی نشیمن صندلی های سینما و تئاتر نشیمن صندلی های میلمان اداری یا صندلی های مورد استفاده عموم (میلمان قراردادی)
S	- Private and commercial vehicle passenger seats - Domestic furniture seats - Public transport seat backs and armrests - Cinema and theatre seat backs and armrests - Contract (commercial) furniture backs and armrests	نشیمن صندلی های مسافری وسایل نقلیه شخصی و تجاری نشیمن صندلی های میلمان خانگی پشتی و دسته صندلی های حمل و نقل عمومی پشتی و دسته صندلی های سینما و تئاتر پشتی و دسته صندلی میلمان قراردادی (تجاری)
A	- Private vehicle seat backs and armrests - Domestic furniture backs and armrests	پشتی و دسته صندلی های وسایل نقلیه شخصی پشتی و دسته صندلی های میلمان خانگی
L	- Padding - Scatter cushions or throw pillows - Other pillows	پدگذاری بالشتک های تزیینی یا کوسن سایر بالش ها

۴-۳- کدگذاری فوم های انعطاف پذیر پلی یورتان



فوم های پلی یورتان انعطاف پذیر را می توان بر اساس نوع، رده و گرید کدگذاری و طبقه بندی کرد. بر اساس این دستورالعمل، در کدگذاری فوم ها ابتدا نوع فوم، سپس رده و در نهایت گرید آن ذکر می شود. برای مثال، فومی با کد HB-V-170(I) به یک فوم اسلب استاک با جهندگی بالا (High Resilience) اشاره دارد که برای استفاده در شرایط کاربری بسیار سخت مناسب بوده و دارای شاخص سختی اولیه ۱۷۰ نیوتن است.

شکل ۱۸- کدگذاری فوم پلی یورتان

۴-۴- الزامات خواص فیزیکی

پس از تعیین نوع، رده و گرید فوم، لازم است خواص فیزیکی آن نیز با الزامات استاندارد مطابقت داشته باشد. بر اساس استاندارد ISO 5999 یا استاندارد ملی ایران INSO 8135:2026، برای هر نوع و رده فوم، محدوده قابل قبولی از خواص فیزیکی تعریف شده است که فوم باید آن ها را برآورده کند. این الزامات، مبنایی برای ارزیابی کیفیت و اطمینان از عملکرد مناسب فوم در کاربردهای مختلف محسوب می شوند. مقادیر مجاز این خواص برای انواع فوم در جدول ۵ ارائه شده اند.

شایان ذکر است که الزامات مربوط به طبقه بندی، کدگذاری و خواص فیزیکی فوم های انعطاف پذیر پلی یورتان اصلاح شده در برابر احتراق، در استاندارد BS 3379 ارائه شده است و به عنوان مرجع اختصاصی این دسته از فوم ها مورد استفاده قرار می گیرد.

جدول ۵- الزامات خواص فیزیکی انواع فوم منعطف پلی یورتان

TYPE I		Class																TYPE III (RE)				
Property	Test method	LB						MB						HB						Property	Test method	V or X
		X	V	S	A	L	X	V	S	A	L	X	V	S	A	L	X	V	S			
Hardness loss ratio, %	ISO 3385	Under 12	12–22	22–32	32–39	39–45	Under 12	12–22	22–32	32–39	39–45	Under 12	12–22	22–32	32–39	39–45	Under 12	12–22	22–32	32–39	39–45	Under 22
	ISO 1856	8	8	12	15	15	— ^b	6	10	10	10	8	8	12	15	15	8	8	12	15	15	
Compression set ^a , % max	ISO 1798	100	90	90	90	90	— ^b	150	150	150	150	100	90	90	90	90	100	90	90	90	90	
Elongation at break, % min	ISO 1798	50	50	50	40	40	— ^b	70	70	70	60	50	50	50	50	50	50	50	50	50	25	
Tensile strength, kPa, min	ISO 2440	35	25	25	15	15	— ^b	55	55	55	50	35	35	35	35	35	35	35	35	35	40	
Tensile strength after humidity ageing ^b , kPa, min	ISO 1798	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
Change in tensile strength after humidity ageing ^b , % max	ISO 2440	35	35	25	35	35	— ^b	55	55	55	50	35	35	35	35	35	35	35	35	35	50	
Tensile strength after heat ageing ^c , kPa, min	ISO 1798	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
Change in tensile strength after heat ageing ^c , % max	ISO 1798	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	— ^b	
Resilience, %	ISO 8307	15 max															— ^e					

TYPE II		Class																TYPE III (RE)				
Property	Test method	LM				MM				HM				Property	Test method	V or X						
		X	V	S	A	L	X	V	S	A	L	X	V				S	A	L			
Hardness loss ratio, %	ISO 3385	Under 12	12–22	22–32	32–39	39–45	Under 12	12–22	22–32	32–39	39–45	Under 12	12–22	22–32	32–39	39–45	Under 12	12–22	22–32	32–39	39–45	30
Compression set ^a , % max	ISO 1856	8	8	12	15	15	— ^b	15	15	15	15	8	8	12	15	15	8	8	12	15	15	
Elongation at break, % min	ISO 1798	100	90	90	90	90	— ^b	90	90	90	90	100	90	90	90	90	100	90	90	90	90	
Tensile strength, kPa, min	ISO 1798	50	50	50	40	40	— ^b	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Tensile strength after humidity ageing ^b , kPa, min	ISO 2440	35	25	25	15	15	— ^b	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	30	
Change in tensile strength after humidity ageing ^b , % max	ISO 1798	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
Tensile strength after heat ageing ^c , kPa, min	ISO 2440	35	35	35	35	35	— ^b	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	— ^b	
Change in tensile strength after heat ageing ^c , % max	ISO 1798	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
Resilience, %	ISO 8307	15 max															— ^f					

a	Not applicable.
b	At 75 % compression for 22 h at 70 °C.
c	Maintaining the test pieces at 105 °C and 100 % relative humidity for 3 h.
d	Maintaining the test pieces at 140 °C for 16 h.
e	Normally resilience of “MB” and “HB” is over 50 %.
f	Normally resilience of “HM” is over 50 %.