

يُعد اختبار رغوة البولي يوريثان المرنة خطوة مهمة لتقييم جودة الرغوات المرنة وخصائصها الفيزيائية ومتانتها. تستعرض هذه المقالة الطرق القياسية لقياس الكثافة، وقوة الانغراز عند تشوه محدد (IFD)، وقوة الضغط عند تشوه محدد (CFD)، ومقاومة الشد، ومقاومة التمزق، والارتدادية، وتعب الرغوة. كما توضح متطلبات تصنيف الرغوات المرنة وتقييم أدائها وفق المعيار ISO 5999.

الملخص

تُستخدم رغوات البولي يوريثان المرنة في تطبيقات واسعة، تشمل الأثاث والمراتب وصناعة السيارات والنقل العام والمعدات الطبية ومنتجات صناعية عديدة، لما تتمتع به من راحة ومرونة وقدرة على امتصاص الطاقة ومثانة مناسبة. ونظراً إلى تنوع هذه المنتجات، تبرز الحاجة إلى نظام معياري لتصنيفها وتقييم جودتها وتحديد حدود أدائها. يوفر ISO 5999 والمعيار الوطني الإيراني المناظر له INSO 8135:2026 إطاراً شاملاً لتصنيف رغوات البولي يوريثان المرنة. ووفقاً لهذا المعيار، تُقسّم الرغوات أولاً بحسب النوع وعملية الإنتاج إلى ثلاثة أنواع رئيسية: الرغوات المنتجة على هيئة كتل (Type I)، والرغوات المقولبة (Type II)، والرغوات المعاد تكوينها أو المترابطة (Type III). وينقسم كل نوع بدوره وفق الارتدادية والبنية الخلوية إلى فئات فرعية مثل LB و MB و HB و LM و MM و HM و RE، صُممت كل منها لتطبيقات محددة.

بعد تحديد نوع الرغوة، يُقَيّم أداؤها باختبار التعب بالطرق تحت حمل ثابت وفق ISO 3385 وتتعرض العينة في هذا الاختبار لدورات تحميل متكررة، ثم يُقاس انخفاض صلابتها بعد انتهاء الاختبار. وتُعد نسبة فقدان الصلابة مؤشراً إلى المثانة والقدرة على الاحتفاظ بالخواص الميكانيكية أثناء الاستخدام طويل الأمد. وعلى هذا الأساس تُصنّف الرغوات إلى خمس فئات X و V و S و A و L. وكلما قل فقدان الصلابة زادت مقاومة الرغوة للتعب وأصبحت أنسب لظروف الخدمة الأكثر شدة. ومن المعايير المهمة الأخرى قوة الانغراز عند تشوه محدد (IFD)، وهي القوة اللازمة لإحداث انغراز معلوم في الرغوة. وتمثل المقياس الأساسي لصلابتها الابتدائية، وتُحدد الدرجات المختلفة بناءً عليها. لذلك يتكون الرمز الكامل للرغوة من النوع والفئة والدرجة. فعلى سبيل المثال، يشير الرمز HB-V-170 (I) إلى رغوة كثلية عالية الارتدادية، مناسبة للاستخدامات الشديدة جداً، بصلابة ابتدائية مقدارها ١٧٠ نيوتن. ويساعد هذا النظام على اختيار الرغوة الملائمة للتطبيقات المختلفة بدقة وسهولة أكبر.

وبالإضافة إلى نظام التصنيف، يحدد ISO 5999 الحد الأدنى لمتطلبات الخواص الفيزيائية لكل نوع وفئة، ومنها مقاومة الشد والاستطالة عند القطع والتشوه الدائم بالضغط والمقاومة بعد التعتيق الحراري والرطوبي ونسب تغير المقاومة وغيرها من الخواص ذات الصلة. وتضمن هذه المتطلبات أن تتمتع الرغوة بمثانة كافية أثناء الخدمة إلى جانب الصلابة المناسبة. وأخيراً، لا يمكن اختيار الرغوة المناسبة اعتماداً على معامل واحد فقط؛ بل ينبغي النظر معاً في نوع الرغوة وفئة أدائها ودرجة صلابتها وخواصها الفيزيائية وظروف استخدامها الفعلية ومتطلبات التطبيق. ويسهم الالتزام بالمعايير الدولية مثل ISO 5999 في ضمان الجودة والمثانة، وفي الاختيار الصحيح للتطبيقات المختلفة ومقارنة منتجات المصنعين. وهكذا تؤدي هذه المعايير دوراً مهماً في تصميم رغوات البولي يوريثان المرنة وإنتاجها وضبط جودتها وتطويرها.

١ - المقدمة

أثناء تطوير المنتج، تُقَيّم الخواص الفيزيائية للرغوة لتحديد خصائص المواد الأولية ومدى ملاءمتها للتطبيقات المقصودة. وفي الإنتاج الصناعي للرغوات، يؤدي قياس الخواص الفيزيائية الأساسية دوراً مهماً في ضبط جودة المنتج.

تقدم هذه المقالة الاختبارات المستخدمة لتقييم الخواص الفيزيائية الأساسية ومثانة الرغوة وتشرحها.



الشكل ١ - رغبة تحت الحمل

٢- الخواص الفيزيائية الأساسية

يقدم المعيار ASTM D3574 إجراءات قياسية لتهيئة عينات الرغبة واختبار خواصها الفيزيائية الأساسية ومثانتها. ولا يوجد معيار ISO واحد مكافئ له بصورة مباشرة؛ ومع ذلك، توجد معايير ISO مناظرة أو مكافئة لبعض طرق الاختبار الواردة فيه. وتعتمد هذه المقالة المعايير المناظرة من ISO عند شرح كل اختبار. وفيما يلي الاختبارات السبعة الرئيسية للخواص الفيزيائية الأساسية:

الكثافة (Density)
 قوة الانغراز عند تشوه محدد ((IFD)
 قوة الضغط عند تشوه محدد ((CFD)
 التشوه الدائم بالضغط عند تشوه ثابت
 مقاومة الشد
 مقاومة التمزق
 الارتدادية

٢-١- تحضير العينة

وفقاً لمعايير ISO، ينبغي إجراء اختبار الرغبة بعد ٧٢ ساعة من إنتاجها. وقبل الاختبار، يجب تهيئة عينة الرغبة غير المشوهة لمدة لا تقل عن ١٦ ساعة في بيئة مضبوطة عند درجة حرارة 23 ± 2 درجة مئوية ورطوبة نسبية $50 \pm 5\%$ (أو عند 27 ± 2 درجة مئوية ورطوبة نسبية $65 \pm 5\%$). ويمكن أن تتداخل فترة التهيئة هذه مع الجزء الأخير من المدة التي تلي الإنتاج.

وفي بعض الاختبارات تُستخدم التهيئة الميكانيكية أيضاً للحصول على نتائج تمثل أداء المنتج في ظروف الخدمة الفعلية بأكبر قدر ممكن.

٢-٢- الكثافة

يُقاس اختبار الكثافة، كما هو موضح في الشكل ٢، الكثافة الظاهرية أو الكثافة الحجمية للرغبة، وليس الكثافة الحقيقية للبوليمر. وتكتسب هذه الخاصية أهمية خاصة لارتباطها المباشر بتكلفة الإنتاج وقدرة تحمل الأحمال. وعموماً، تؤدي زيادة الكثافة إلى ارتفاع تكلفة الإنتاج، لكنها تحسن أيضاً الخواص الميكانيكية للرغبة وقدرتها على تحمل الأحمال.

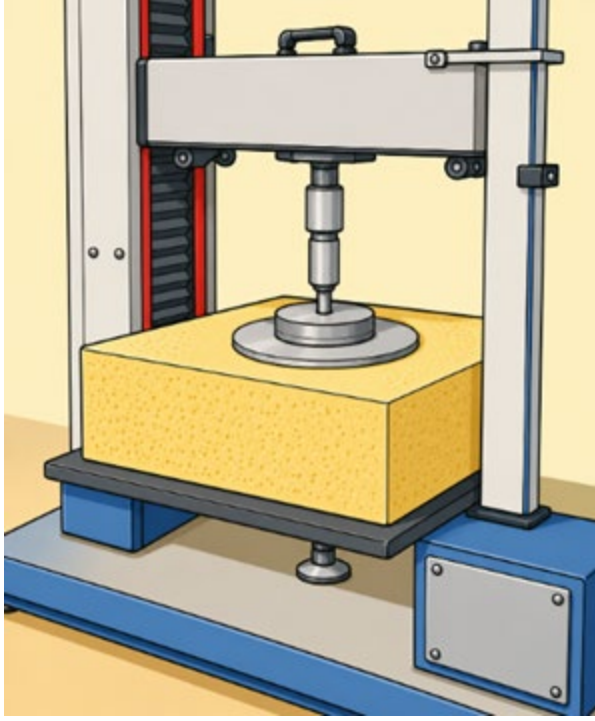
وفق ISO 845، تُحدد كثافة الرغوة ويُبلغ عنها بطريقتين. الأولى هي الكثافة الظاهرية للقلب ((Apparent Core Density، حيث تُزال جميع طبقات القشرة المتكونة أثناء القولبة قبل قياس كثافة قلب الرغوة. والثانية هي الكثافة الظاهرية الكلية ((Apparent Overall Density، حيث تُقاس العينة مع الاحتفاظ بالقشور وجميع الطبقات المتكونة أثناء القولبة. وفي هذا الاختبار تُقاس أبعاد عينة ممثلة بدقة ثم تُقاس كتلتها. وتُحسب الكثافة، التي يُعبر عنها عادة بالكيلوغرام لكل متر مكعب (kg/m^3)، بقسمة كتلة العينة على حجمها.



الشكل ٢ – قياس كثافة الرغوة

٢-٣- قوة الانغراز عند تشوه محدد ((IFD

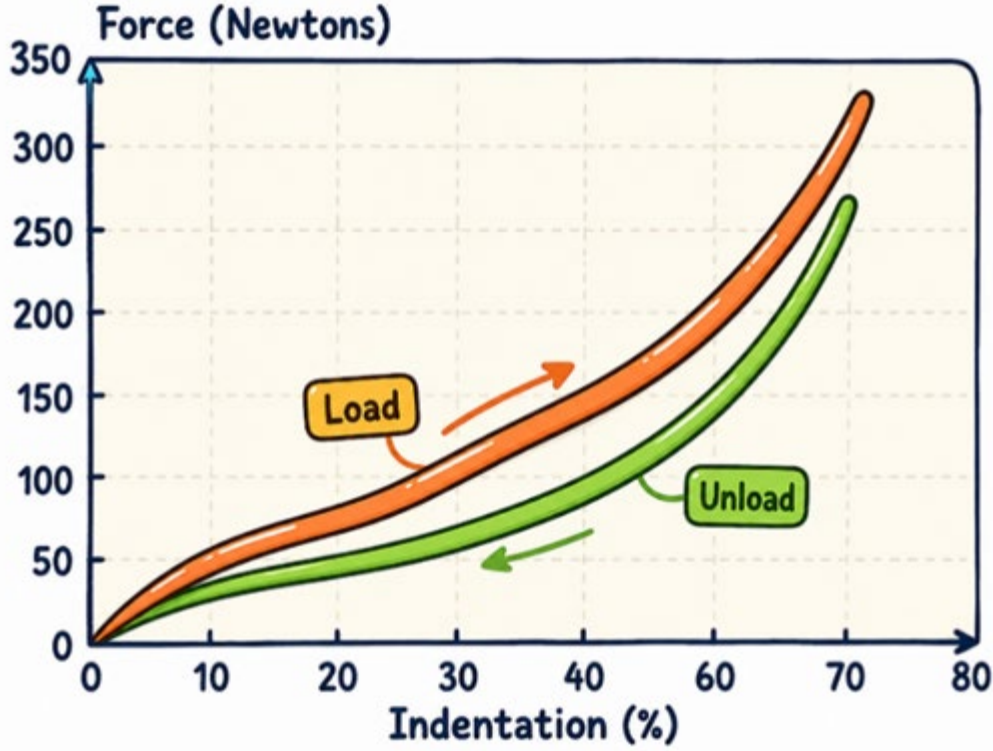
يقيس اختبار IFD خواص تحمل الأحمال في الرغوة؛ إذ يحدد القوة اللازمة لدفع صفيحة دائرية داخل الرغوة، وتُستخدم هذه القيمة أيضاً مؤشراً إلى صلابة الرغوة. وقد أظهرت التجربة أن النتائج تتغير تبعاً لدرجة الحرارة والرطوبة النسبية للبيئة التي أُنتجت فيها الرغوة وعولجت واختُبرت. وفق ISO 2439، الطريقة A، توضع العينة على صفيحة دعم مثقبة تسمح بمرور الهواء، ثم توضع صفيحة دائرية قطرها ٢٠ سم على سطح الرغوة (الشكل ٣). وللتهيئة الميكانيكية الأولية تُضغط العينة ثلاث مرات إلى ٧٠% من سمكها. ومباشرة بعد إزالة الحمل للمرة الثالثة، تُحدث إزاحة انغراز مقدارها ٤٠% من سمك العينة. يُحافظ على هذا الانغراز لمدة ٣٠ ثانية، ثم تُسجل القوة المقابلة بالنيوتن ويُرفع الحمل. وتُسجل القوة المطبقة ومقدار الانغراز في الوقت نفسه.



الشكل ٣ – قياس الصلابة عند انفعال ثابت

يمكن تمثيل النتائج بيانياً كما في الشكل ٤. فعند مقدار انغراز محدد تكون القوة المقاسة أثناء إزالة الحمل أقل من القوة اللازمة أثناء تطبيقه. ويسمى هذا الفرق بالتباطؤ الهستيري ((Hysteresis، ويُعبّر عنه كنسبة مئوية من القوة المطبقة.

يقيس التباطؤ الهستيري الطاقة التي تمتصها الرغوة أثناء التشوه. وتُظهر الرغوات ذات التباطؤ الهستيري المرتفع ارتدادية أقل، وتحتاج عادة إلى وقت أطول للعودة إلى شكلها الأصلي.



الشكل ٤ – منحنى القوة والانفعال الناتج عن اختبار IFD

يمكن قياس قيم IFD والإبلاغ عنها عند مستويات مختلفة من التشوه، منها ٢٥% و ٥٠% و ٦٥% من السمك الابتدائي للرغوة. كما تُسجل عادة قيم IFD أثناء إزالة الحمل عند تشوه ٢٥% و ٥٠%. وتتيح هذه القياسات اشتقاق مؤشرات ومعلومات فنية عن السلوك الميكانيكي للرغوة وخواص تحمل الأحمال، وأهمها موضح أدناه.

- (1/Hysteresis) ، أو مقلوب التباطؤ الهستيريزي (Recovery) الاسترداد

$$\text{Recovery} = (\text{Unload 25\% IFD}) / (\text{Load 25\% IFD}) \times 100\%$$

تُفضّل قيم الاسترداد المرتفعة في تطبيقات الراحة والتوسيد، بينما تكون القيم المنخفضة أنسب لامتصاص الصدمات. وتسمى الرغوات منخفضة الاسترداد أحياناً «الرغوة الميتة» (Dead Foam).

- (Support Factor) أو معامل الدعم (Sag Factor) معامل الترهل

$$\text{Sag Factor} = (65\% \text{ IFD}) / (25\% \text{ IFD})$$

كلما ارتفع معامل الترهل أو الدعم، تحسن أداء الرغوة في الدعم والجلوس. أما الرغوات ذات المعامل المنخفض فتتضغط عادة بسرعة حتى القاعدة تحت الحمل، ويكون أداؤها غير مرغوب فيه.

- ، أو مقلوب معامل الصلابة الابتدائية (Comfort Factor) معامل الراحة

$$\text{Comfort Factor} = (25\% \text{ IFD}) / (5\% \text{ IFD})$$

يصف معامل الراحة الإحساس الأولي الذي يشعر به المستخدم عند ملامسة سطح الرغوة. وتشير القيم الأعلى إلى سطح يبدو أكثر ليونة، بينما تدل القيم الأقل على سطح أشد صلابة.

- المعامل الإرشادي (Guide Factor)

$$\text{Guide Factor} = (25\% \text{ IFD}) / \text{Density} \% ٢٥$$

$$\text{Guide Factor} = (65\% \text{ IFD}) / \text{Density} \% ٦٥$$

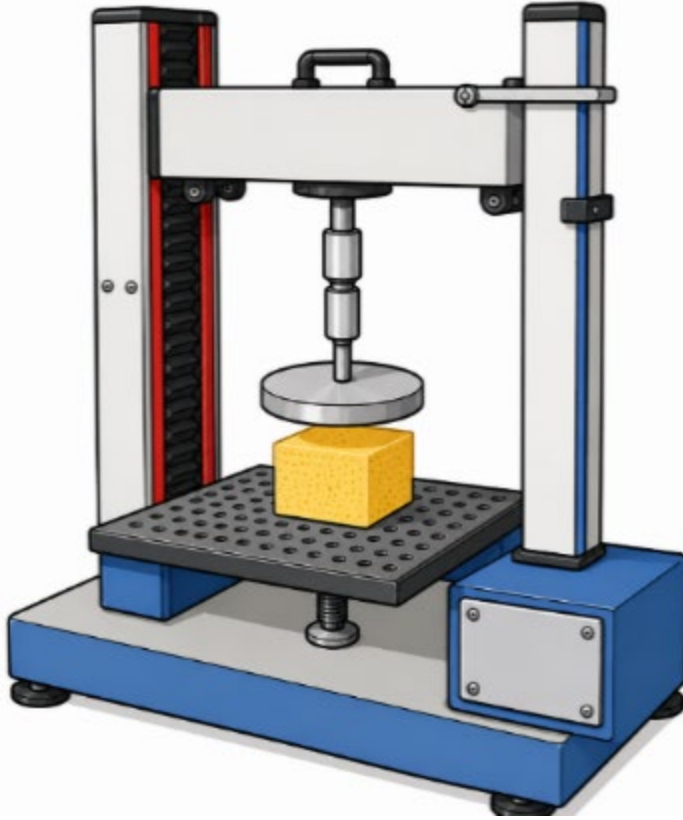
تكون الرغوات ذات المعامل الإرشادي الأعلى عادة أكثر اقتصادية من حيث استهلاك المواد الأولية وتكلفة التصنيع؛ غير أن هذه الميزة لا تعني بالضرورة أداءً أفضل.

٢-٤- قوة الضغط عند تشوه محدد (CFD))

يتبع اختبار CFD مبادئ قياس مشابهة لاختبار IFD، لكنه يقيس ويُبلغ عن القوة اللازمة لضغط الرغوة إلى مقدار محدد من التشوه. وتُستخدم فيه صفيحة ضغط كبيرة بما يكفي لتوزيع القوة بانتظام على السطح العلوي الكامل للعينة.

وفق ISO 3386، توضع العينة على صفيحة دعم مثقبة للسماح بمرور الهواء أثناء الضغط. توضع العينة في مركز الجهاز (الشكل ٥)، وتُضغط بالصفيحة بسرعة ١٠٠ مم/دقيقة حتى ينخفض سمكها إلى ٧٠% من قيمته الابتدائية. ثم تُرفع صفيحة الضغط بالسرعة نفسها لتعود العينة إلى سمكها الأصلي. وتكرر العملية ثلاث مرات للتهيئة الميكانيكية. وفي المرة الرابعة تُقاس وتُسجل قيمة الضغط اللازمة للوصول إلى التشوه المحدد بوحدة kPa.

يمكن إجراء تغييرات في طريقة اختبار CFD، مثل تغيير أبعاد العينة (ومنها سمك الرغوة) ومساحة صفيحة الضغط. وقد تؤثر هذه التغييرات في النتائج والقيم المقاسة.



الشكل ٥ - قياس قوة الضغط عند انفعال ثابت

٥-٢- التشوه الدائم بالضغط عند تشوه ثابت

في اختبار التشوه الدائم بالضغط ((Compression Set)، توضع ثلاث عينات رغوية ذات أبعاد دقيقة بين صفيحتين معدنيتين وتُضغط إلى تشوه مقداره ٥٠% أو ٧٥% أو ٩٠% نسبةً إلى السمك الابتدائي. وتُحفظ العينات تحت هذا الضغط لمدة ٢٢ ساعة عند ٧٠ درجة مئوية. ثم تُخرج من الجهاز وتترك لمدة ٣٠ دقيقة لتستعيد شكلها الأصلي قدر الإمكان. وأخيراً يُقاس سمكها مرة أخرى ويُحسب مقدار التشوه الدائم.

$$C_t = (t_0 - t_f) / t_0 \times 100$$

C_t : التشوه الدائم بالضغط، كنسبة مئوية من السمك الابتدائي للعينة؛

t_0 : السمك الابتدائي للعينة قبل تطبيق الحمل؛

t_f : السمك النهائي للعينة بعد الاختبار وفترة الاسترداد.

ما دام السمك الابتدائي للعينة أقل من طولها أو عرضها، فإن قيمة التشوه الدائم بالضغط تكون مستقلة عن سمك العينة. أما إذا تجاوز السمك الطول أو العرض، فقد تتعرض العينة للانبعاج (Buckling) أثناء التحميل، مما يضعف قابلية تكرار نتائج الاختبار. لذلك توضع العينات عادة بحيث يُقاس التشوه الدائم بالضغط في اتجاه نمو الرغوة. وتكون القيم المقاسة في عينات مقطوعة عمودياً على اتجاه نمو الرغوة أقل عادةً.

وبالإضافة إلى ذلك، تشترط بعض شركات السيارات اختبار التشوه الدائم بالضغط في ظروف رطبة (Wet Compression)

Set) وفي إحدى الطرق الشائعة، تُختبر عينة مقطوعة مع قشرة القالب، كما في طريقة شركة Renault، تحت ضغط ٥٠% لمدة ٢٢ ساعة عند ٥٠ درجة مئوية ورطوبة نسبية ٩٥%.

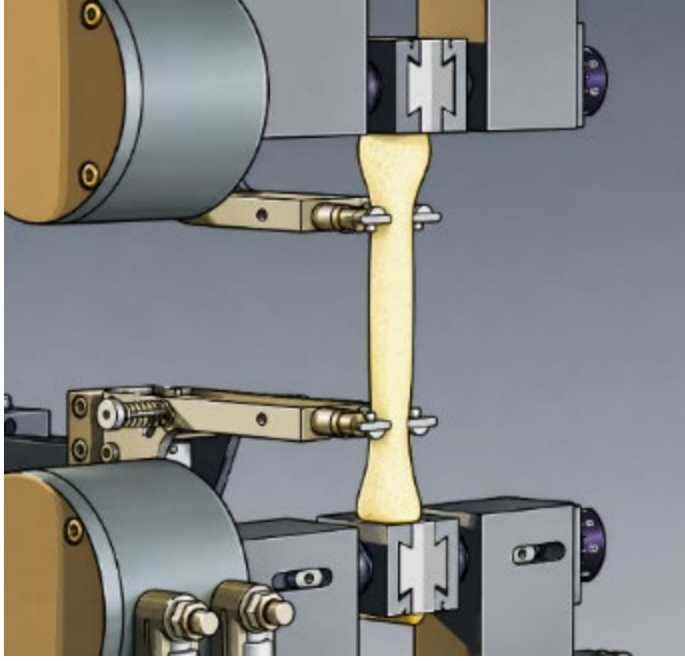


الشكل ٦ - اختبار التشوه الدائم بالضغط

٦-٢ - مقاومة الشد

يقيس اختبار الشد مقاومة الرغوة لقوة الشد ويقدم معلومات عن مرونتها وسلوكها المطاطي. وتُقطع العينات عادة على شكل دمبل أو عظم وفق الأبعاد المحددة في المعيار المستخدم. وأثناء الاختبار تُشد العينة بسرعة ثابتة (٥٠٠ مم/دقيقة وفق ISO 1798) حتى تنقطع. وتُسجل القوة عند لحظة القطع باعتبارها مقاومة الشد للرغوة، ويُعبّر عنها بالكيلوباسكال (kPa).

تُسمى الزيادة القصوى في طول العينة، معبّراً عنها كنسبة مئوية من طولها الأصلي، الاستطالة عند القطع (Elongation at Break). وتُقاس هذه القيمة يدوياً أو باستخدام مقياس الاستطالة (Extensometer) وفي الماضي كانت مقاييس الاستطالة التلامسية تسبب أخطاء بسبب ملامستها المباشرة للعينة، إذ قد تؤدي إلى تشوهها أو تركيز الإجهاد عند نقطة التلامس. أما اليوم فتتوفر مقاييس استطالة غير تلامسية تعتمد على الليزر لإجراء قياسات أدق. ويُستخرج معامل المرونة (Modulus of Elasticity) من منحنى الإجهاد-الانفعال (Stress-Strain Curve) في اختبار الشد، وهو يساوي الميل الابتدائي للمنحنى في المنطقة المرنة تماماً التي ينطبق فيها قانون هوك. وتُظهر معظم رغوات البولي يوريثان نقطة خضوع (Yield Point)، تبدأ بعدها تشوهات دائمة وغير مرنة لا يمكن استردادها بالكامل. وقد ينشأ هذا السلوك من تمزق الدعامات الخلوية (Struts)، أو تكسر جدران الخلايا (Cell Windows)، أو انزلاق سلاسل البوليمر. ويسمى الإجهاد عند نقطة الخضوع مقاومة الخضوع (Yield Strength). ولمزيد من المعلومات عن تأثير مكونات التركيبة في بنية الرغوة وخواصها الميكانيكية، يُنصح بقراءة مقال دور مُمدّد السلسلة في رغوة البولي يوريثان.

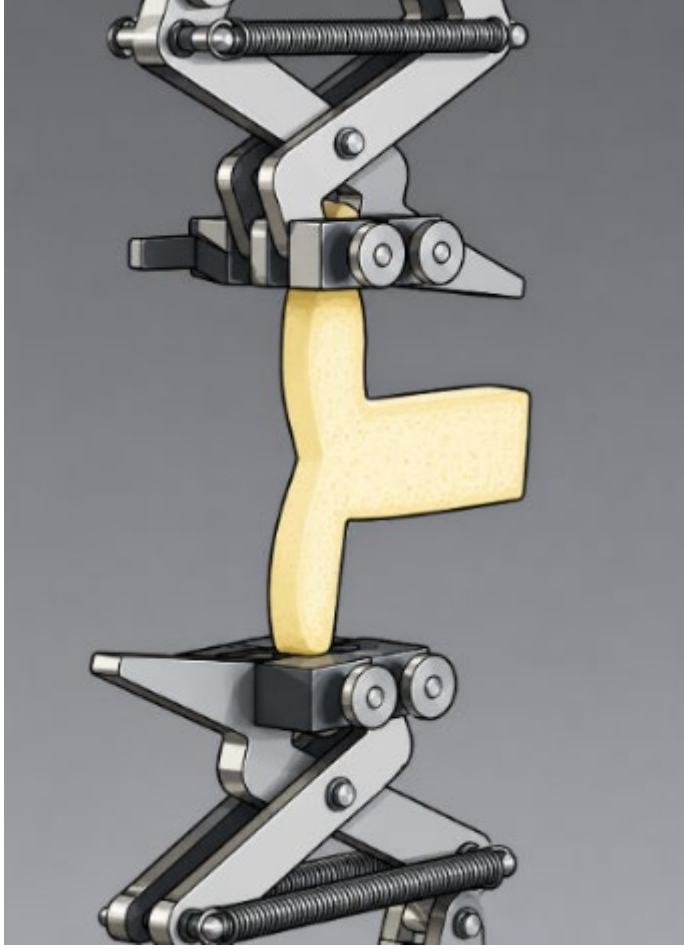


الشكل ٧ - قياس مقاومة الشد

٧-٢- مقاومة التمزق

من المقاييس المهمة الأخرى للقوة الميكانيكية للرغوة مقاومة التمزق (Tear Strength). وكما يوضح الشكل ٨ تخطيطياً، تتعرض عينة ذات أبعاد محددة وفق ISO 8067 وتحتوي على شق ابتدائي لقوة شد. ومع تطبيق القوة يمتد التمزق من الشق الأولي، وتُقاس القوة اللازمة لاستمرار امتداده. وتُحسب مقاومة التمزق بقسمة القوة القصوى المسجلة أو متوسط القوة على سمك العينة، ويُعبّر عنها عادة بالنيوتن لكل مليمتر (N/mm). وكلما ارتفعت القيمة زادت مقاومة الرغوة لامتداد الشقوق والتمزقات الناتجة عن الإجهاد الميكانيكي.

تعتمد نتائج هذا الاختبار بدرجة كبيرة على مقاومة الرغوة للتمزق، لكنها لا ترتبط بالضرورة ارتباطاً مباشراً بمقاومة الشد. إذ يبدأ التمزق من شق مُعد مسبقاً، ويكون المعيار الأساسي مقاومة استمرار امتداده، لا القوة اللازمة لبدء التمزق. ولذلك قد تؤثر جودة أداة القطع وحدتها في النتائج المقاسة.



الشكل ٨ – قياس مقاومة التمزق

٨-٢- الارتدادية

تُقاس ارتدادية الرغوة (Resilience باختبار ارتداد الكرة (Ball Rebound Test)، كما هو موضح في الشكل أدناه. وتُسقط كرة فولاذية من ارتفاع محدد على عينة الرغوة ثم يُقاس ارتفاع ارتدادها. وترد تفاصيل طريقة الاختبار والأجهزة المطلوبة في ISO 8307 وترتبط نتائج الاختبار ارتباطاً مناسباً براحة الجلوس (Cushion Comfort)، ولذلك تُستخدم مؤشراً لتقييم هذه الخاصية.



الشكل ٩ – اختبار ارتدادية الرغوة

٣- اختبار متانة الرغوة

توجد طرق مختبرية عديدة لقياس مقاومة التعب (Fatigue في الرغوات المرنة. ومع ذلك، تدرج معظمها ضمن مجموعتين رئيسيتين: اختبارات التعب الساكن (Static Fatigue Tests واختبارات التعب الديناميكي (Dynamic Fatigue Tests).

تختلف الطرق ضمن هاتين المجموعتين من حيث مقدار الحمل أو التشوه المطبق، واستخدام أداة انغراز أو الضغط الكامل، ووجود قوى قص أو غيابها، وسمك العينة، وعدد دورات التحميل، ومعدل تطبيق التشوه واسترداده، وفترة راحة العينة بعد كل دورة أو بعد انتهاء الاختبار. وتختلف المؤشرات المقاسة كذلك بحسب نوع الاختبار، وقد تشمل فقدان الارتفاع (Height Loss)، وفقدان الصلابة (Hardness Loss)، والتغيرات الشكلية، أو انخفاض خواص فيزيائية أخرى للرغوة.

تقدم الأقسام التالية وصفاً موجزاً لبعض الطرق المختبرية القياسية والشائعة لتقييم تعب الرغوة. ومع تقدم الأبحاث، تُطرح طرق جديدة بوتيرة متزايدة، ويُظهر كثير منها ارتباطاً أفضل بالأداء الفعلي للمنتج، مما يسمح بالتنبؤ بمتانة الرغوة وأدائها بدقة أكبر.

٣-١- اختبارات التعب الساكن

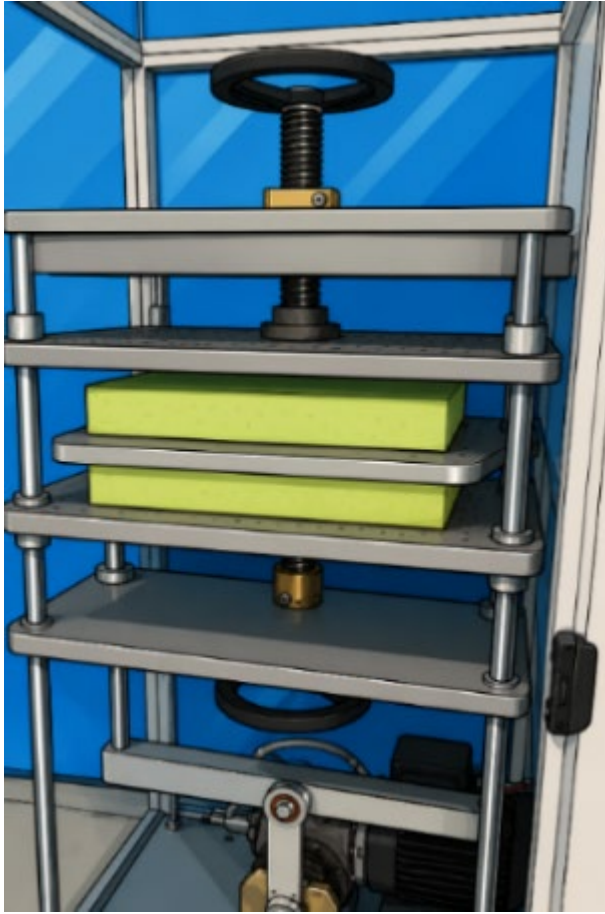
بوجه عام، يوجد نوعان من اختبارات التعب الساكن هما الأكثر استخداماً:

- اختبار التشوه الدائم بالضغط عند تشوه ثابت
- اختبار الزحف تحت حمل ثابت

٣-١-١- اختبار التشوه الدائم بالضغط عند تشوه ثابت

أكثر اختبارات التعب الساكن شيوعاً هو اختبار التشوه الدائم بالضغط عند تشوه ثابت، وتشبه طريقة تنفيذه إلى حد كبير اختبار التشوه الدائم البسيط الموضح في القسم ٢-٥. ويُجرى وفق ASTM D3574، الطريقة I. وتُستخدم فيه عادة عينات بأبعاد $380 \times 380 \times 80$ مم. ولا يوجد معيار ISO مكافئ لهذا الاختبار. وتُضغط عينة الرغوة في جهاز بسيط، كما في الشكل ١٠، إلى مقدار محدد وتُحفظ عند هذا التشوه مدة معينة. وبعد انتهاء فترة الضغط تُخرج العينة ويُسمح لها بالاسترداد. ثم يُقاس ارتفاعها وتُعبّر النتائج كنسبة مئوية من ارتفاعها الابتدائي.

ترتبط نتائج التشوه الدائم بالضغط بدرجة مناسبة بانخفاض سمك الوسادة في ظروف الاستخدام الفعلية وبالتغيرات في صلابة الرغوة. لكن انخفاض قيمة التشوه الدائم في اختبارات التعب الساكن لا يضمن بالضرورة أداءً جيداً في الخدمة. لذلك تُستخدم هذه الاختبارات أثناء تطوير المنتجات الجديدة عادةً كمؤشر تقريبي على قدرة الرغوة على الاسترداد بعد التحميل، كما تُستخدم على نطاق واسع لضبط الجودة أثناء الإنتاج.



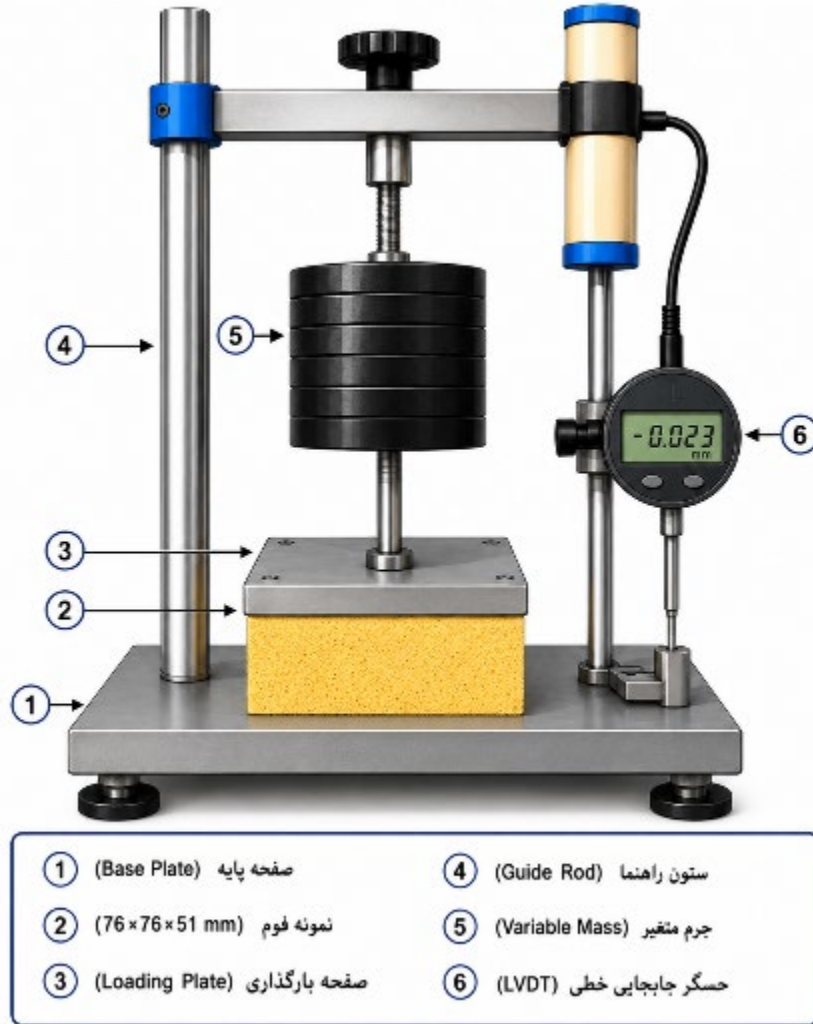
الشكل ١٠ – اختبار التشوه الدائم بالضغط لتقييم التعب الساكن

٣-١-٢- اختبار الزحف تحت حمل ثابت

الزحف (Creep) هو تشوه العينة المعتمد على الزمن تحت تأثير حمل ثابت ومستمر، ويمكن استرداده كلياً أو إلى حد كبير بعد إزالة الحمل. ويوضح الشكل ١١ جهازاً شائعاً لهذا الاختبار. وفي هذه الطريقة توضع عينة رغوية بأبعاد تقارب $76 \times 76 \times 51$ مم تحت صفيحة التحميل، ثم تُحمّل الصفيحة بالكتلة المطلوبة وتوضع على العينة. ويُقاس التشوه الرأسي (الزحف) خلال ١٠ دقائق.

تُرسَم نتائج الاختبار كنسبة مئوية للتشوه مقابل الزمن، ويُحسب معدل الزحف (Creep Rate) من ميل المنحنى. ويرتبط معدل الزحف بنسبة الانغراز أو مقدار الضغط الابتدائي؛ فكلما زاد الضغط زاد معدل الزحف. وبوجه عام يشير معدل الزحف المرتفع إلى ميل أكبر للرغوة إلى فقدان السمك وانخفاض الأداء بمرور الزمن.

كما في اختبارات التعب الساكن الأخرى، لا تكون شدة اختبار الزحف وحده كافية لمحاكاة ظروف الاستخدام الفعلية. لذلك لا تكفي نتائجه عادة للتنبؤ الدقيق بأداء الرغوة طويل الأمد في الخدمة، ويُستخدم غالباً للمقارنة وضبط الجودة.



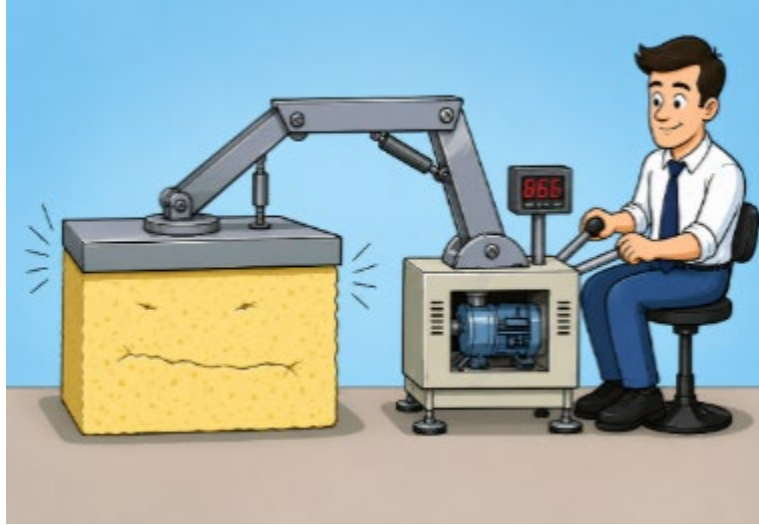
الشكل ١١ – رسم مبسط لجهاز اختبار الزحف تحت حمل ثابت

٣-٢- اختبارات التعب الديناميكي

صُممت اختبارات التعب الديناميكي لمحاكاة الأحمال المتكررة التي تتعرض لها وسائد المقاعد في الاستخدام الفعلي. وبوجه عام، يُستخدم نوعان رئيسيان:

اختبارات تُضغط فيها الوسادة الرغوية بواسطة أداة انغراز متذبذبة (Oscillating Indenter) إلى نسبة ثابتة من سمكها. واختبارات تتعرض فيها العينة للتحميل وإزالة الحمل بصورة متكررة، مع تطبيق أداة الانغراز حملاً ثابتاً في كل دورة.

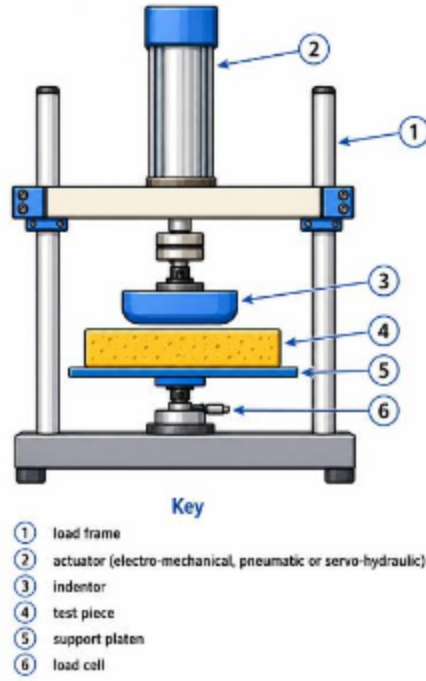
أشير إلى أن اختبارات التعب الديناميكي، ومنها اختبار الطرق بحمل ثابت (Constant-Load Pounder Test) الذي يزداد فيه عمق انغراز الأداة تدريجياً مع انخفاض صلابة الرغوة أثناء الاختبار، ترتبط بدرجة عالية بفقدان ارتفاع الرغوة (Height Loss)، وإلى حد ما بفقدان صلابتها (Hardness Loss) في ظروف الخدمة الفعلية. ويُعد ISO 3385 إحدى الطرق القياسية للطرق بحمل ثابت، ويستخدمه كثير من مصنعي الرغوات في صناعات الأثاث والسيارات.



الشكل ١٢ – رسم توضيحي لاختبار تعب الرغوة

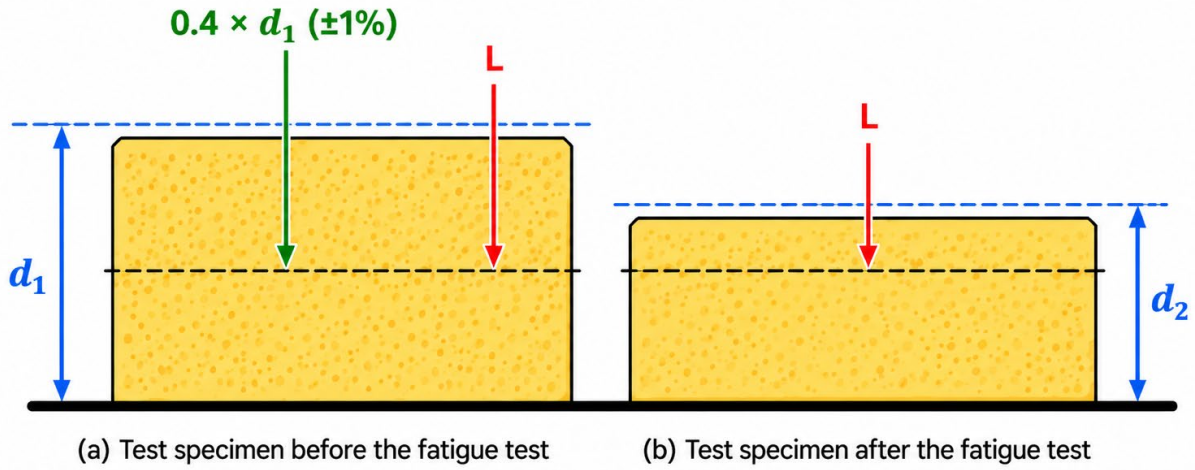
١-٢-٣- اختبار التعب بالطرق تحت حمل ثابت

يحدد ISO 3385 الطريقة القياسية لاختبار التعب بالطرق تحت حمل ثابت. وفيه تتعرض عينة رغوية بأبعاد $380 \times 380 \times 50$ مم لتحميل متكرر بواسطة صفيحة دائرية قطرها ٢٥ سم، تحت حمل مقداره ٧٥٠ نيوتن وبمعدل ٧٠ دورة في الدقيقة، بإجمالي ٨٠,٠٠٠ دورة. ويظهر مثال على جهاز اختبار التعب بالطرق في الشكل ١٣.



الشكل ١٣ – رسم مبسط لجهاز اختبار التعب بحمل ثابت

يُقاس سمك العينة وصلابتها (قيم IFD) قبل الاختبار وبعده وفق ISO 2439، ثم تُقارن القياسات ويُبلغ عن نسب الفقدان بوصفها مؤشرات إلى أداء الرغوة في مقاومة التعب ومتانتها. ومع ذلك، عند قياس IFD بعد اختبار التعب، تُحسب نسبة الانفعال البالغة ٤٠% اعتماداً على السمك الأصلي المقاس قبل الاختبار. ويوضح الشكل ١٤ هذا الشرط تخطيطياً.



Legend	
L	Reference level (strain gauge)
d_1	Thickness of the test specimen before the fatigue test, in millimetres
d_2	Thickness of the test specimen after the fatigue test, in millimetres

الشكل ١٤ - رسم تخطيطي لإجراء قياس الصلابة بعد اختبار تعب الرغوة

٤ - متطلبات الخواص الفيزيائية لرغوات البولي يوريثان المرنة في تطبيقات تحمل الأحمال

تُصنّف الرغوات بحسب نوعها وأدائها في اختبار التعب وقوة الانغراز عند تشوه محدد (IFD) المستخدمة أساساً لتحديد الدرجة. وعلى أساس هذا التصنيف، يحدد ISO 5999 متطلبات الخواص الفيزيائية والميكانيكية ويوصي بتطبيقات لكل مجموعة وفق أدائها في اختبار التعب.

٤-١ - تصنيف رغوات البولي يوريثان المرنة

وفق (ISO 5999 أو المعيار الوطني الإيراني (ISO 8135:2026)، تُصنّف الرغوات حسب النوع والفئة والدرجة.

٤-١-١ - النوع

Slabstock Foam



Molded Foam



Rebonded Foam



الشكل ١٥ – أنواع رغوات البولي يوريثان

تُقسم رغوات البولي يوريثان المرنة إلى مجموعات بحسب نوع المواد الأولية والبنية الخلوية وعملية الإنتاج. ويشكل هذا التصنيف وفق ISO 5999 أساساً لتحديد خصائص الأداء والمتطلبات الفيزيائية وتطبيقات كل نوع، كما يرد في الجدول ١.

Type	Code	Description of foam
I	LB	Block foam, slabstock or contour cut [low resilience (known as “viscoelastic”)] اسفنج بلوكى ، اسلب استاك يا برش خورده (جهندگى كم [ويسكوالاستيك])
	MB	Block foam, slabstock or contour cut (conventional) اسفنج بلوكى ، اسلب استاك يا برش خورده (متداول)
	HB	Block foam, slabstock or contour cut (high resilience) اسفنج بلوكى ، اسلب استاك يا برش خورده (جهندگى زياد)
II	LM	Moulded [low resilience (known as “viscoelastic”)] اسفنج قالبگيرى شده (جهندگى كم [ويسكوالاستيك])
	MM	Moulded (conventional) اسفنج قالبگيرى شده (متداول)
	HM	Moulded (high resilience) اسفنج قالبگيرى شده (جهندگى زياد)
III	RE	Reconstituted or bonded اسفنج بازسازى شده يا پيوند داده شده

الجدول ١ – أنواع الرغوات

تختلف الرغوات التقليدية والرغوات عالية الارتدادية (HR) في سلوك خواصها الفيزيائية. ويكمن الفرق الرئيسي في نسبة الارتدادية ومعامل الترهل، وهما مؤشرين مهمين للراحة ودعم الجسم والأداء العام. وعموماً، تتجاوز ارتدادية رغوات HR نسبة ٦٠% ويتراوح معامل الترهل فيها بين ٢,٢ و ٣,٠، بينما تقل ارتدادية الرغوات التقليدية عن ٦٠% ويتراوح معامل الترهل بين ١,٧ و ٢,٠. ويشير ارتفاع معامل الترهل في رغوات HR إلى قدرتها الأكبر على الجمع بين ليونة ابتدائية مناسبة ودعم أفضل للجسم عند التشوهات الأعلى، مما يحسن الراحة والمتانة مقارنة بالرغوات التقليدية.

٤-١-٢- الدرجة



الشكل ١٦ – صلابة الرغوة ((IFD معياراً للتقييم

تُحدد درجات رغوة البولي يوريثان بقوة الانغراز عند تشوه محدد ((IFD، المقاسة بالطريقة A من ISO 2439، كما هو موضح في الجدول ٢.

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

الجدول ٢ – درجات الرغوة بحسب الصلابة الابتدائية

٤-١-٣- الفئة

باستثناء رغوات MM و RE، تُصنّف الأنواع الأخرى إلى خمس فئات بحسب أدائها في اختبار التعب بالطرق تحت حمل ثابت وفق ISO 3385. وتمثل كل فئة متانة الرغوة وقدرتها على الاحتفاظ بالصلابة بعد اختبار التعب. وترد ظروف الخدمة لكل فئة ونسب فقدان الصلابة المسموح بها في الجدول ٣.

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 می‌شود:

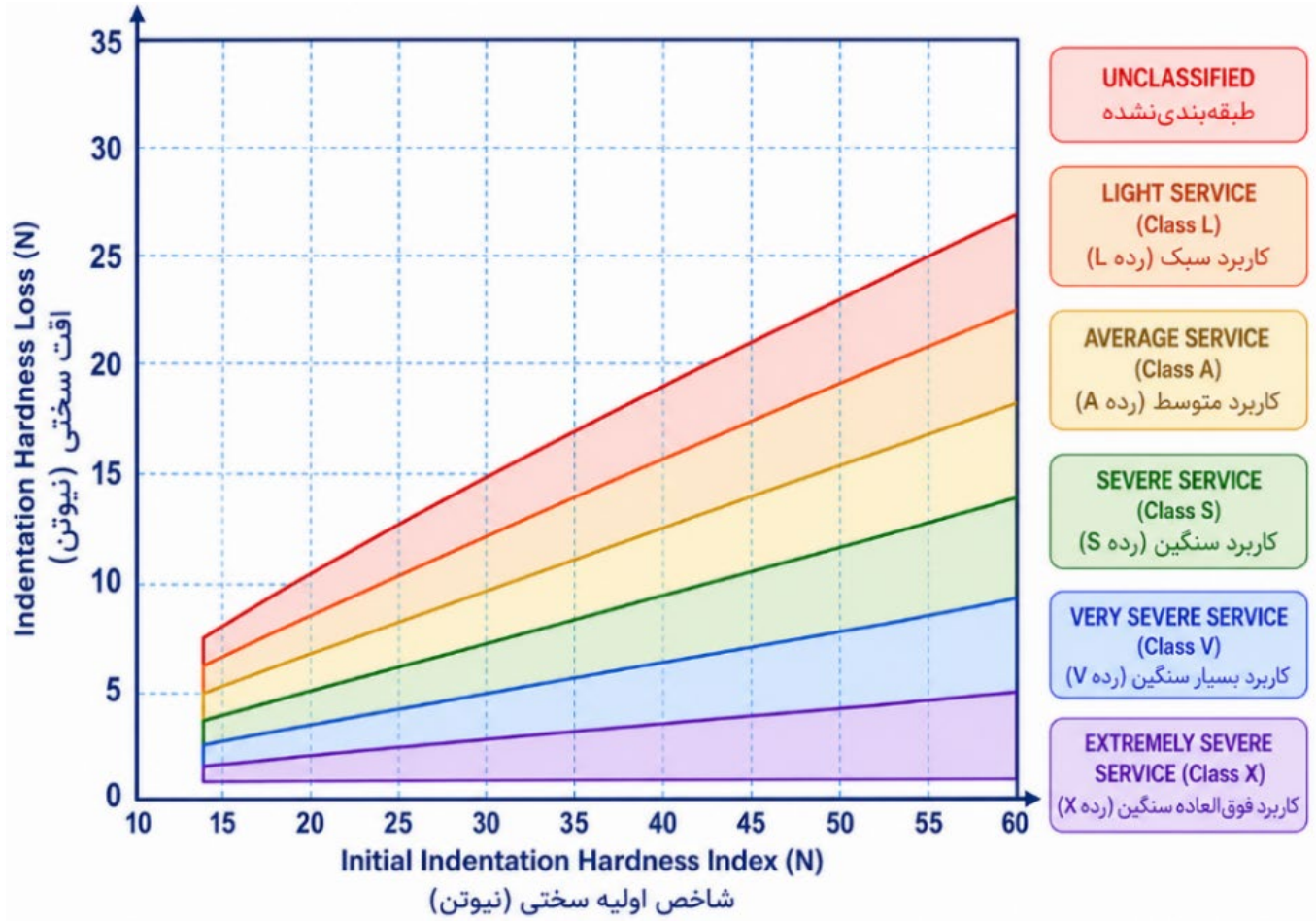
$$P = \frac{H - F}{H} \times 100$$

where
که در آن:

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

الجدول ٣ – فئات الرغوة وأنواع التطبيقات المناظرة

إضافة إلى الجدول ٣، يوفر ISO 5999 رسوماً بيانية لتحديد فئة الرغوة، يظهر بعضها في الشكل ١٧. ويمكن تحديد الفئة بيانياً من مؤشر الصلابة الابتدائية (Initial IFD) وفقدان الصلابة (H - F) بعد اختبار التعب؛ حيث يشير H إلى مؤشر الصلابة الابتدائية و F إلى مؤشر الصلابة بعد الاختبار.



الشكل ١٧ - تصنيف الرغوة حسب الصلابة الابتدائية وفقدان الصلابة

٢-٤- التطبيقات الموصى بها لكل فئة من رغوات البولي يوريثان المرنة

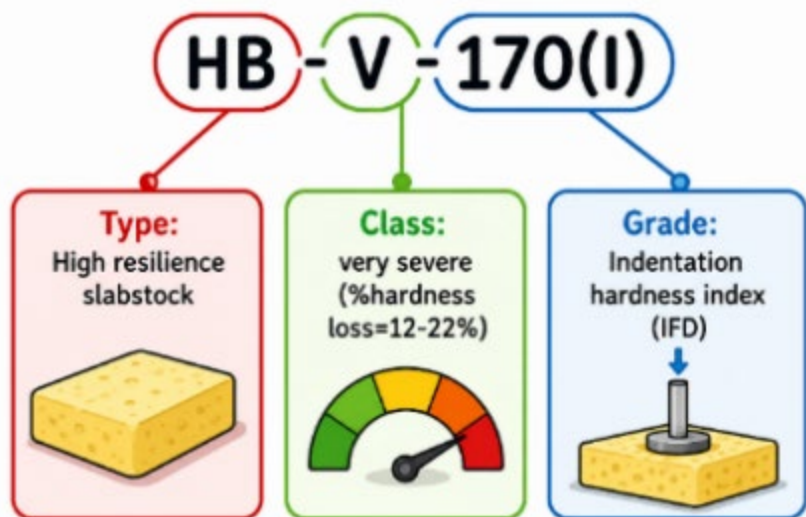
نظراً إلى أن فئات رغوات البولي يوريثان تُحدد بناءً على نتائج اختبار التعب بالطرق تحت حمل ثابت، فإن كل فئة تشير إلى مقاومة الرغوة لظروف خدمة مختلفة. وبعبارة أخرى، يمكن استخدام الرغوة التي تُظهر فقداناً أقل للصلابة بعد اختبار التعب وتُصنّف ضمن فئة أعلى في ظروف أشد، مع متانة أكبر. ومع ذلك، لا تكفي الفئة وحدها لاختيار الرغوة المناسبة؛ إذ ينبغي النظر أيضاً في الصلابة الابتدائية (IFD) وسمك الرغوة، لأن الأداء الفعلي يعتمد على اجتماع هذه العوامل الثلاثة. فعلى سبيل المثال، قد تنتمي رغوتان إلى الفئة نفسها لكن يختلف سلوكهما في التطبيق النهائي بسبب اختلاف صلابتهما الابتدائية أو سمكهما. ويعرض الجدول ٤ توصيات للتطبيقات المعتادة لكل فئة (وفق ISO 5999 أو INSO 8135:2026). والفئة المحددة لكل تطبيق هي الحد الأدنى الموصى به؛ ويمكن استخدام رغوات من فئات أعلى، وهي توفر عموماً متانة أفضل واحتفاظاً أكبر بالخواص طوال مدة الخدمة.

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 مبلمان 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 مبلمان اداری یا صندلی های مورد استفاده عموم (مبلمان 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 مبلمان خانگی پشتی و دسته صندلی های حمل و نقل عمومی پشتی و دسته صندلی های سینما و تئاتر پشتی و دسته صندلی مبلمان 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 مبلمان خانگی
L	- Padding - Scatter cushions or throw pillows - Other pillows	پدگذاری بالشتک های تزئینی یا کوسن سایر بالش ها

الجدول ٤ – التطبيقات الموصى بها

٤-٣- ترميز رغوات البولي يوريثان المرنة

يمكن ترميز رغوات البولي يوريثان المرنة وتصنيفها وفق النوع والفئة والدرجة. وفي هذا النظام يُذكر نوع الرغوة أولاً، ثم فئتها، وأخيراً درجتها. فمثلاً يشير HB-V-170(I) إلى رغوة كتلية عالية الارتدادية مناسبة لظروف الخدمة الشديدة جداً، بمؤشر صلابة ابتدائية يبلغ ١٧٠ نيوتن.



الشكل ١٨ – ترميز رغوة البولي يوريثان

٤-٤-٤ متطلبات الخواص الفيزيائية

بعد تحديد نوع الرغوة وفتتها ودرجتها، يجب أن تستوفي خواصها الفيزيائية متطلبات المعيار. فوق ISO 5999 أو المعيار الوطني الإيراني INSO 8135:2026، يُحدد نطاق مقبول للخواص الفيزيائية لكل نوع وفئة. ويجب أن تفي الرغوة بهذه المتطلبات التي تُعد أساساً لتقييم الجودة وضمان الأداء المناسب في التطبيقات المختلفة. وترد القيم المسموح بها للأنواع المختلفة في الجدول ٥.

تجدر الإشارة إلى أن متطلبات تصنيف رغوات البولي يوريثان المرنة المعدلة لتحسين سلوكها عند الاحتراق وترميزها وخواصها الفيزيائية ترد في المعيار BS 3379.

TYPE I		Class														
Property	Test method	LB					MB					HB				
		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
Compression set ^a , %, max	ISO 1856	8	8	12	15	15	— ^b	6	10	10	10	8	8	12	15	15
Elongation at break, %, min	ISO 1798	100	90	90	90	90	— ^b	150	150	150	150	100	90	90	90	90
Tensile strength, kPa, min	ISO 1798	50	50	50	40	40	— ^b	70	70	70	60	50	50	50	50	50
Tensile strength after humidity ageing ^b , kPa, min	ISO 2440 ISO 1798	35	25	25	15	15	— ^b	55	55	55	50	35	35	35	35	35
Change in tensile strength after humidity ageing ^b , %, max	ISO 2440 ISO 1798	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 ISO 1798	35	35	25	35	35	— ^b	55	55	55	50	35	35	35	35	35
Change in tensile strength after heat ageing ^c , %, max	ISO 2440 ISO 1798	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Resilience, %	ISO 8307	15 max					— ^e					— ^e				

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

^a At 75 % compression for 22 h at 70 °C.

^b Not applicable.

^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 %.

TYPE III (RE)		
Property	Test method	V or X
Hardness loss ratio, %	ISO 3385	Under 22
Compression set ^a , %, max	ISO 1856	25
Elongation at break, %, min	ISO 1798	40
Tensile strength, kPa, min	ISO 1798	50
Tensile strength after humidity ageing ^b , kPa, min	ISO 2440 ISO 1798	— ^b
Change in tensile strength after humidity ageing ^b , %, max	ISO 2440 ISO 1798	30
Tensile strength after heat ageing ^c , kPa, min	ISO 2440 ISO 1798	— ^b
Change in tensile strength after heat ageing ^c , %, max	ISO 2440 ISO 1798	30
Resilience, %	ISO 8307	— ^b

^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 %.

الجدول ٥ – متطلبات الخواص الفيزيائية لأنواع رغوات البولي يوريثان المرنة