



اصل آزمون و هندسه خمش

آزمون EN 1109، مقاومت ورق‌های عایق رطوبتی قیری را در برابر ترک‌خوردگی هنگام قرار گرفتن در معرض خمش کنترل‌شده در دمای پایین تعیین می‌کند.

همان‌طور که در **شکل 1** نشان داده شده است، سیستم خمش از دو استوانه ثابت و غیرچرخان تشکیل می‌شود که در بالای یک سنبه خمشی دارای حرکت عمودی قرار گرفته‌اند. نمونه آزمون در ابتدا به صورت افقی بین این اجزا قرار می‌گیرد و به طور کامل در مایع خنک‌کننده با دمای کنترل‌شده غوطه‌ور می‌شود.

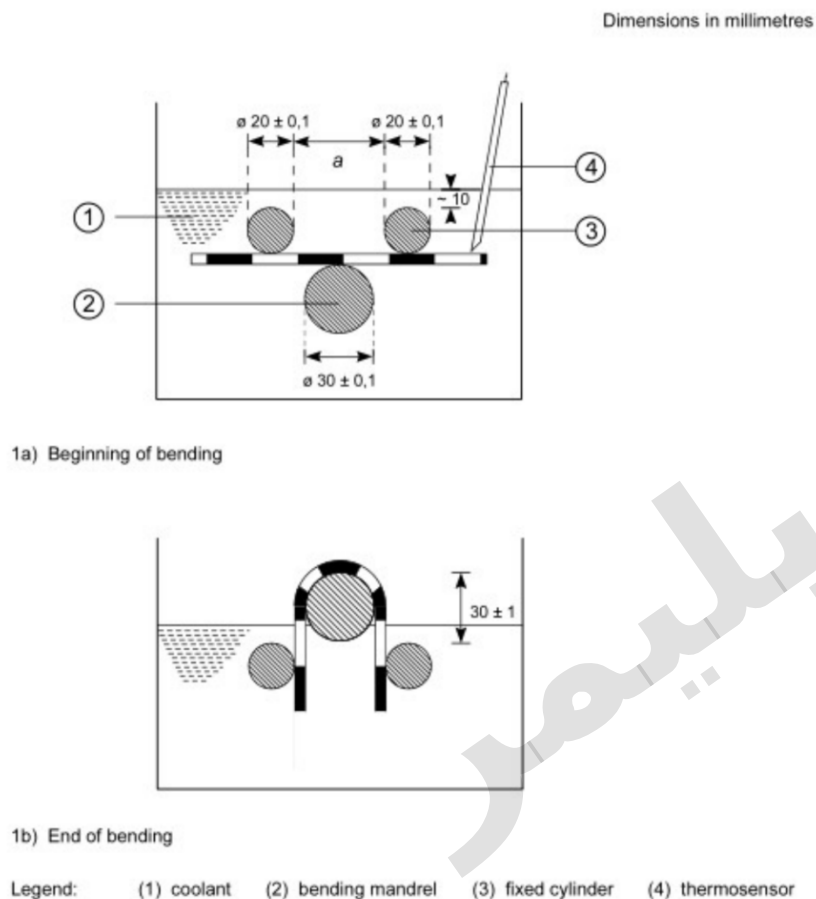


Figure 1: Principle of test apparatus and bending process

اجزای اصلی خمش عبارتند از:

- دو استوانه ثابت: $\varnothing 20 \pm 0.1 \text{ mm}$
- سنبله خمش متحرک: $\varnothing 30 \pm 0.1 \text{ mm}$
- فاصله قابل تنظیم بین استوانه‌های ثابت
- حرکت عمودی سنبله
- حسگر دما که تقریباً در تراز نمونه آزمون قرار گرفته است
- مجموعه کامل خمش غوطه‌ور در مایع خنک‌کننده

در ابتدای آزمون، سنبله خمش در زیر نمونه آزمون قرار دارد. در طول آزمون، سنبله به صورت عمودی به سمت بالا حرکت کرده و با سطح زیرین نمونه آزمون تماس پیدا می‌کند. ادامه حرکت رو به بالا، نمونه آزمون را بین دو استوانه ثابت فشرده کرده و به تدریج آن را به دور سنبله $\varnothing 30 \text{ mm}$ می‌پیچاند.

در پایان حرکت، نمونه آزمون تقریباً به اندازه 180° خم شده است.

پیکربندی نشان داده شده در شکل 1 استاندارد اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا آزمون صرفاً یک آزمون خمش آزاد نیست. قطرهای مشخص شده برای استوانه‌ها و سنبله، فاصله، میزان جابه‌جایی و سرعت، هندسه‌ای تکرارپذیر برای خمش ایجاد می‌کنند و بنابراین بخشی از شرایط کنترل شده آزمون هستند.

تنظیم مجموعه خمش

پیش از آغاز یک سری آزمون، فاصله بین دو استوانه ثابت باید متناسب با ضخامت واقعی نمونه آزمون تنظیم شود.

طبق EN 1109، فاصله **a** نشان داده شده در شکل 1 تقریباً به مقدار زیر تنظیم می‌شود:

+ 32 mm a ضخامت نمونه آزمون

این تنظیم اهمیت دارد، زیرا نمونه‌های آزمون با ضخامت‌های مختلف برای حفظ هندسه موردنظر خمش، به فاصله‌های متفاوتی بین استوانه‌ها نیاز دارند. پس از تنظیم، مکانیزم کامل خمش در حمام مبرد قرار می‌گیرد. قسمت بالایی استوانه‌های ثابت باید تقریباً در موقعیت زیر قرار داشته باشد:

10 mm پایین‌تر از سطح مایع خنک‌کننده

پیش از قرار دادن نمونه آزمون برای آزمون، سنبه خمش باید در **پایین‌ترین موقعیت** خود قرار داشته باشد.



کنترل دما در محل نمونه آزمون

کل فرایند خمش در حالی انجام می‌شود که نمونه آزمون و مکانیزم خمش در مایع خنک‌کننده غوطه‌ور هستند.
حمام ترموستاتیک باید قابلیت کار در محدوده زیر را داشته باشد:

40°C- تا 20°C+

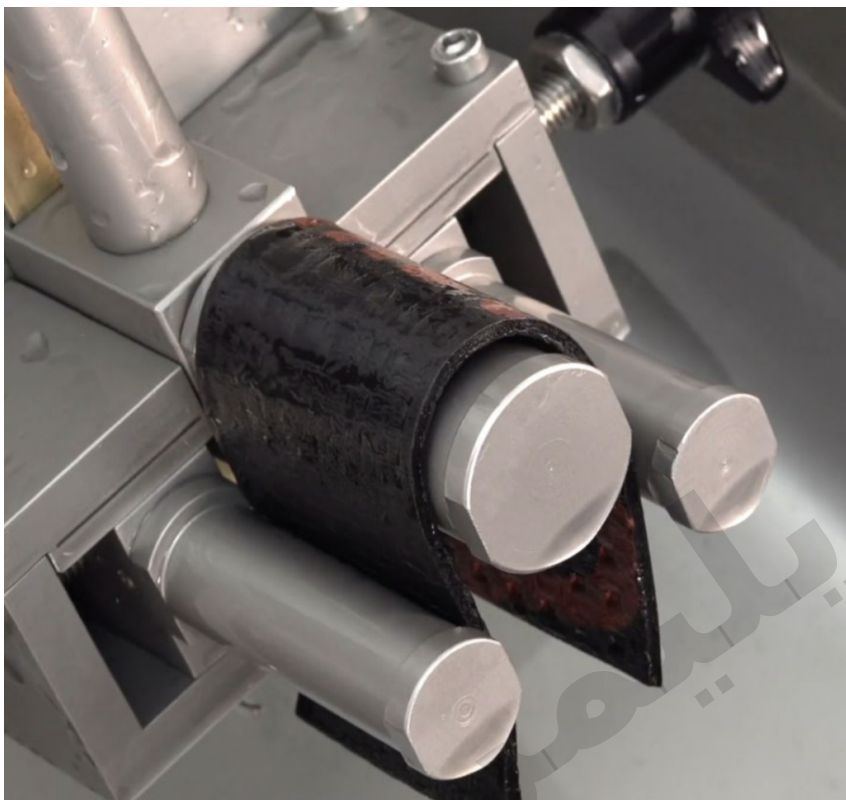
با کنترل دما تا نزدیکترین مقدار:

0.5°C

EN 1109 همچنین به یک دستگاه اندازه‌گیری دمای مجزا نیاز دارد که قابلیت اندازه‌گیری با دقت **0.5°C** را داشته باشد.

حسگر دما نباید به صورت تصادفی در حمام قرار گیرد. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، این حسگر در محیط آزمون و تقریباً در **همان تراز عمودی نمونه آزمون** قرار می‌گیرد.

این آرایش امکان بررسی دمای واقعی مایع خنک‌کننده در ناحیه بلافاصله آزمون را فراهم می‌کند و از اتکا به دمای نمایش داده‌شده توسط کنترلر سیستم سرمایش جلوگیری می‌کند.



آماده سازی نمونه آزمون

نمونه آزمون استاندارد دارای ابعاد زیر است:

$$1 \text{ mm} \times 50 \pm 1 \text{ mm} \pm 140$$

نمونه های آزمون به صورت یکنواخت از عرض ورق عایق رطوبتی برداشته می شوند و جهت طولی هر نمونه آزمون با جهت تولید ورق مطابقت دارد. نمونه های آزمون نباید از فاصله تقریباً زیر نسبت به لبه های ورق برداشته شوند:

150 mm از لبه های ورق

هر نمونه آزمون به صورت متوالی و از یک لبه ورق شروع شده، شماره گذاری می شود و **سطوح رویی و زیرین** آن مشخص می شوند.

در صورت وجود فیلم محافظ جداسازی، این فیلم باید پیش از آزمون و بدون آسیب رساندن به پوشش قیری جدا شود.

استاندارد، جدا کردن فیلم را با استفاده از نوار چسب و پس از سرد کردن نمونه آزمون شرح می دهد. در روش جایگزین می توان از هوای فشرده با مشخصات تقریبی زیر استفاده کرد:

- حداکثر فشار: **5 bar**
- قطر نازل: تقریباً **0.5 mm**

اگر این روش ها قادر به جدا کردن فیلم نباشند، می توان از شعله گاز فقط برای حداقل زمان لازم جهت از بین بردن فیلم استفاده کرد؛ به گونه ای که نمونه آزمون از جهات دیگر آسیب نبیند.

پیش‌شرطی‌سازی پیش از قرارگیری در دمای پایین

پس از آماده‌سازی، نمونه‌های آزمون حداقل به مدت زیر شرطی می‌شوند:

4 hours at 23 ± 2°C

نمونه‌های آزمون روی یک تکیه‌گاه صاف قرار می‌گیرند و نباید با یکدیگر تماس داشته باشند. همچنین نباید به سطح تکیه‌گاه بچسبند. در صورت نیاز می‌توان بین نمونه آزمون و تکیه‌گاه از کاغذ سیلیکونیزه استفاده کرد. دانه‌های شل سطحی باید پیش از آزمون با دست و با دقت جدا شوند.

شرطی‌سازی در حمام سرمایش

پیش از وارد کردن نمونه‌های آزمون، دمای مایع خنک‌کننده به دمای موردنیاز آزمون رسانده می‌شود.

پس از رسیدن دما به مقدار مشخص شده با دقت **0.5°C**، نمونه‌های آزمون در نگهدارنده‌های مناسب و تقریباً هم‌ارتفاع با استوانه‌های ثابت قرار داده می‌شوند.

نگهدارنده‌ها باید:

- نمونه‌های آزمون را صاف نگه دارند؛
- غوطه‌وری کامل را حفظ کنند؛

- از تماس غیرضروری بین نمونه‌های آزمون جلوگیری کنند؛
- امکان گردش آزاد مایع خنک‌کننده در اطراف نمونه‌های آزمون را فراهم کنند.

وارد کردن نمونه‌های آزمون می‌تواند به‌طور موقت دمای حمام را افزایش دهد. بنابراین زمان شرطی‌سازی تعیین‌شده، **صرفاً بلافاصله پس از وارد کردن نمونه آزمون آغاز نمی‌شود.**

نمونه‌های آزمون به مدت زیر شرطی می‌شوند:

1 h ± 5 min

این زمان از لحظه‌ای محاسبه می‌شود که دمای مایع خنک‌کننده به **دمای مشخص‌شده آزمون بازگشته باشد.** این جزئیات برای تکرارپذیری اهمیت دارد، زیرا همه نمونه‌های آزمون باید پیش از خمش، اساساً شرایط حرارتی یکسانی را تجربه کنند.

آزمون سطوح رویی و زیرین

آزمون انعطاف‌پذیری برای دو سطح ورق عایق رطوبتی به‌صورت جداگانه انجام می‌شود.

برای یک دمای آزمون مشخص، دو سری نمونه آماده می‌شود:

5 نمونه آزمون برای سطح رویی + 5 نمونه آزمون برای سطح زیرین

بنابراین، ارزیابی کامل در یک دمای مشخص معمولاً شامل **10 نمونه آزمون** است.

در هر آزمون، نمونه آزمون به صورت متوالی بین سنبه خمش و دو استوانه ثابت قرار می‌گیرد؛ به گونه‌ای که **سطح مورد ارزیابی رو به بالا** باشد. این جهت‌گیری ضروری است، زیرا سطوح رویی و زیرین ورق قیری ممکن است دارای پوشش‌ها، پرداخت‌های سطحی یا آرایش‌های ساختاری متفاوتی باشند و در نتیجه رفتار خمشی متفاوتی در دمای پایین نشان دهند.

توالی خمش کنترل شده

پس از قرارگیری صحیح نمونه آزمون شرطی شده، چرخه خمش آغاز می‌شود. سنبه 30 mm Ø از زیر نمونه آزمون و با سرعت اسمی زیر به سمت بالا حرکت می‌کند:

360 mm/min

در سراسر عملیات خمش، سرعت واقعی حرکت باید در محدوده زیر باقی بماند:

40 mm/min ± 360

سنبه در حال حرکت ابتدا با سطح زیرین نمونه آزمون تماس پیدا می‌کند و سپس نمونه آزمون را بین دو استوانه ثابت 20 mm Ø به سمت بالا می‌راند. با ادامه حرکت سنبه به سمت بالا، نمونه آزمون به تدریج با سطح استوانه‌ای سنبه منطبق می‌شود.

حرکت تا رسیدن سنبه به موقعیت زیر ادامه می‌یابد:

30 ± 1 mm بالاتر از استوانه‌های ثابت

در این موقعیت، نمونه آزمون تقریباً به اندازه **180°** خم شده و به پیکربندی نهایی نشان داده شده در شکل 1(b) استاندارد EN 1109 می‌رسد. برای محدود کردن حرکت و ایجاد موقعیت نهایی تکرارپذیر خمش، استفاده از کلیدهای محدودکننده مناسب ضروری است.

سطح مایع خنک‌کننده هنگام خمش

نمونه آزمون باید در تمام طول آزمون به درستی غوطه‌ور باقی بماند.

هنگام حرکت سنبه به سمت بالا، جابه‌جایی نمونه آزمون و مکانیزم می‌تواند بر سطح مایع خنک‌کننده اثر بگذارد. بنابراین EN 1109 الزام می‌کند که سطح نمونه آزمون به اندازه کافی پایین‌تر از سطح مایع خنک‌کننده باقی بماند.

در صورت نیاز، سطح مایع باید متناسب با آن تنظیم شود.

این کار تضمین می‌کند که نمونه آزمون در حین عملیات واقعی خمش، ناخواسته در معرض هوای گرم‌تر محیط قرار نگیرد.

زمان بین خمش و بازرسی ترک

پس از تکمیل چرخه خمش، بازرسی باید به سرعت انجام شود.

نمونه آزمون باید در زمان زیر بررسی شود:

حداکثر 10 ثانیه پس از تکمیل خمش

این فاصله زمانی کوتاه، تغییرات وضعیت نمونه آزمون ناشی از گرم شدن پس از خارج شدن از محیط دمای پایین را به حداقل می‌رساند. نمونه آزمون در برابر یک منبع نور مناسب و با استفاده از **چشم غیرمسلح** بررسی می‌شود. در صورت نیاز می‌توان از ابزارهای نوری کمکی نیز استفاده کرد.

تعریف شکست / ترک

تصمیم‌گیری درباره پذیرش بر اساس وجود یا عدم وجود ترک در پوشش آزمون‌شده انجام می‌شود. در مورد **ورق قیری مسلح**، زمانی ترک وجود دارد که یک یا چند شکاف در پوشش تا محل مسلح‌کننده امتداد پیدا کند. در مورد **ورق غیرمسلح**، شکاف باید به‌طور کامل از ضخامت ورق عبور کند. بنابراین، آثار سطحی جزئی که با تعریف ترک در استاندارد مطابقت ندارند، نباید به‌طور خودکار به‌عنوان شکست طبقه‌بندی شوند.

توالی آزمون در یک دمای مشخص

برای هر سطح، هر پنج نمونه آزمون باید به‌صورت متوالی و تحت شرایط کنترل‌شده یکسان آزمون شوند. در صورت امکان و با توجه به ابعاد دستگاه، EN 1109 اجازه می‌دهد چند نمونه آزمون به‌طور هم‌زمان آزمون شوند. این توالی را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

1. آماده سازی نمونه های آزمون → 2. پیش شرطی سازی در $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$. پایداری مایع خنک کننده → 4. غوطه ور کردن نمونه های آزمون → 5. شرطی سازی به مدت $1 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ پس از بازیابی دما → 6. قرار دادن نمونه آزمون → 7. خمش با سرعت $40 \text{ mm/min} \rightarrow 8 \pm 360$. توقف در $1 \text{ mm} \pm 30$ بالاتر از استوانه ها → 9. بازرسی حداکثر در $10 \text{ s} \rightarrow 10$. ثبت نتیجه ترک دار/بدون ترک

معیارهای پذیرش

در یک دمای مشخص، آزمون یک سطح زمانی قبول شده محسوب می شود که:

حداقل 4 نمونه از 5 نمونه آزمون بدون ترک باشند.

نتایج سطوح رویی و زیرین به صورت مستقل ارزیابی و گزارش می شوند.

در نتیجه، یک محصول ممکن است در دو سطح خود رفتار انعطاف پذیری متفاوتی در دمای پایین نشان دهد.

تعیین دمای خمش سرد

EN 1109 همچنین روشی نظام مند برای تعیین دمای حدی خمش سرد، در شرایطی که این مقدار از پیش مشخص نیست، ارائه می دهد.

مرحله 1 - محدوده اولیه دما

ابتدا محدوده تقریبی دما با استفاده از نمونه‌های آزمون منفرد تعیین می‌شود.

آزمون در فواصل دمایی زیر انجام می‌شود:

6°C

و از دمای خمش سرد مورد انتظار آغاز می‌شود.

بنابراین دماهای انتخاب‌شده برای آزمون، مضرب‌هایی از 6°C هستند؛ برای مثال:

-24°C، -18°C، 12°C و غیره

این مرحله اولیه، محدوده دمایی‌ای را مشخص می‌کند که در آن گذار از رفتار خمشی قابل قبول به رفتار غیرقابل قبول رخ می‌دهد.

مرحله 2 - تعیین دقیق

پس از تعیین محدوده تقریبی، تعیین دقیق‌تر با استفاده از **سری‌های پنج‌تایی نمونه آزمون** انجام می‌شود.

آزمون از بالاترین دما در محدوده شناسایی‌شده آغاز می‌شود.

سپس دما با گام‌های زیر کاهش می‌یابد:

2°C

در هر دما، یک سری جدید آزمون می‌شود.

این کاهش مرحله به مرحله ادامه می‌یابد تا نخستین دمایی که در آن شرایط زیر حاصل شود، به دست آید:

دو نمونه آزمون یا بیشتر از پنج نمونه، ترک نشان دهند.

گام دمایی قبلی، یعنی دمای 2°C بالاتر که در آن حداقل چهار نمونه آزمون بدون ترک بودند، به عنوان دمای خمش سرد تعیین می‌شود.

نمونه‌ای از منطق ارزیابی

اگر نتایج به صورت زیر باشند:

5/5 → 18°C بدون ترک

4/5 → 20°C بدون ترک

3/5 → 22°C بدون ترک

دمای خمش سرد گزارش شده برابر خواهد بود با:

20°C-

زیرا 22°C- نخستین دمایی است که در آن حداقل دو نمونه آزمون مردود می‌شوند، در حالی که در دمای قبلی، حداقل چهار نمونه از پنج نمونه آزمون با موفقیت قبول شده‌اند.

سطوح رویی و زیرین به صورت جداگانه ارزیابی می‌شوند و بنابراین ممکن است دماهای خمش سرد گزارش شده متفاوتی داشته باشند.

پارامترهای بحرانی آزمون

برای انجام قابل اعتماد آزمون طبق EN 1109، پارامترهای زیر مستقیماً بر شرایط آزمون اثر می‌گذارند و بنابراین باید کنترل شوند:

پارامتر	الزام EN 1109
قطر استوانه ثابت	$0.1 \text{ mm} \pm 20$
قطر سنبه خمش	$0.1 \text{ mm} \pm 30$
فاصله استوانه‌ها	تقریباً $32 \text{ mm} +$ ضخامت نمونه آزمون
محدوده حمام سرمایش	$40^{\circ}\text{C} -$ تا $20^{\circ}\text{C} +$
تفکیک پذیری/کنترل دما	0.5°C
ابعاد نمونه آزمون	$1 \text{ mm} \pm 50 \times 1 \pm 140$
پیش شرطی سازی	$2^{\circ}\text{C} \pm 23$ در $4 \text{ h} \leq$
شرطی سازی در دمای پایین	$1 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ پس از بازیابی دما
سرعت حرکت سنبه	$40 \text{ mm/min} \pm 360$
موقعیت نهایی سنبه	$1 \text{ mm} \pm 30$ بالاتر از استوانه‌های ثابت
زاویه تقریبی خمش	180°
زمان بازرسی	حداکثر 10 s پس از خمش
نمونه‌های آزمون برای هر سطح آزمون شده	5

معیار پذیرش	حداقل 4 نمونه از 5 نمونه بدون ترک
فاصله دمایی اولیه	6°C
فاصله تعیین نهایی	2°C

الزامات عملکردی دستگاه آزمون

از دیدگاه طراحی تجهیزات، انطباق با روش آزمون EN 1109 تنها به دستیابی به دمای پایین محدود نمی شود.
دستگاه باید شرایط حرارتی و مکانیکی آزمون مشخص شده را به صورت کنترل شده و تکرارپذیر ایجاد کند.
بنابراین الزامات عملکردی اصلی شامل موارد زیر است:

- سرمایش پایدار در محدوده مورد نیاز $20^{\circ}\text{C}+ \text{ تا } 40^{\circ}\text{C}-$ ؛
- اندازه گیری دمای واقعی مایع خنک کننده در تراز نمونه آزمون؛
- غوطه وری کامل مکانیزم خمش و نمونه های آزمون؛
- هندسه صحیح استوانه های ثابت $\varnothing 20 \text{ mm}$ ؛
- هندسه صحیح سنبه خمش $\varnothing 30 \text{ mm}$ ؛
- فاصله قابل تنظیم استوانه ها برای ضخامت های مختلف ورق؛
- حرکت عمودی کنترل شده سنبه خمش؛
- حفظ سرعت سنبه در مقدار $360 \pm 40 \text{ mm/min}$ ؛
- موقعیت نهایی تکرارپذیر حرکت به اندازه $1 \text{ mm} \pm 30$ ؛
- کلیدهای محدود کننده مناسب برای حرکت؛

- نگهدارنده‌های نمونه آزمون که امکان گردش آزاد مایع خنک‌کننده را فراهم کنند؛
- فضای کاری کافی برای قرارگیری صحیح نمونه آزمون؛
- اجرای قابل‌اعتماد چرخه‌های خمش تکراری تحت شرایط یکسان.

با کنترل این پارامترها، دستگاه امکان تعیین تکرارپذیر هر دو مورد **انعطاف‌پذیری در یک دمای پایین مشخص و دمای خمش سرد** ورق‌های عایق رطوبتی قیری را مطابق EN 1109 فراهم می‌کند.



دستگاه خمش سرد ورق‌های قیری مطابق EN 1109

برای تعیین انعطاف پذیری و مقاومت ورق های قیری در برابر ترک خوردگی در دماهای پایین استفاده می شود. همچنین برای تعیین حداقل دمای خمش در محیط سرد به کار می رود.

- ابعاد نمونه آزمون: 50 x 140 mm
- غلتک خمش پایینی نمونه: ± 0.1 mm Ø 30
- سرعت آزمون: ± 360 mm/min. 10
- ولتاژ کاری: 220 Volt 50 Hz.
- غلتک های بالایی (قابل چرخش): ± 0.1 mm Ø 20
- ورودی هوا: 3 - 6 bar.
- محدوده دما: -20°C تا دمای محیط (محدوده های دیگر به صورت آپشن)
- تنظیم ضخامت نمونه روی غلتک های بالایی
- آزمون در حالت غوطه وری نمونه ها
- سیستم بالابر پنوماتیک برای خارج کردن دستگاه آزمون از مایع و تسهیل مشاهده
- جنس SS304 برای قطعات در تماس با مایع
- شاسی بیرونی با پوشش پودری الکترواستاتیک
- واحد سرمایش included
- ابعاد داخلی حمام: 298 x 200 mm x 327