



www.iranbitumen.co

آزمون‌های مکانیکی و خواص قیر

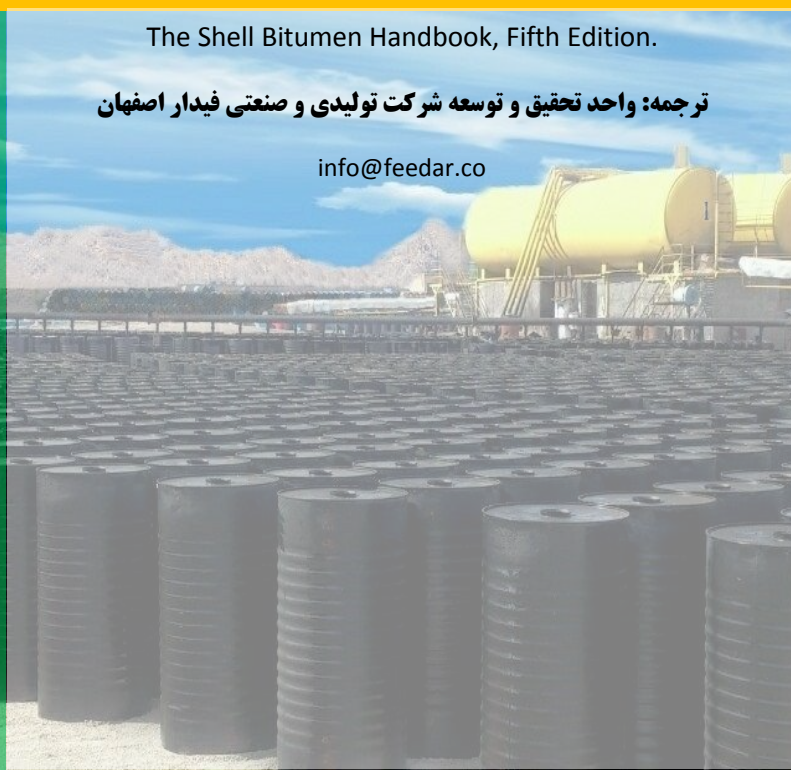


شرکت تولیدی و صنعتی فیدار اصفهان

The Shell Bitumen Handbook, Fifth Edition.

ترجمه: واحد تحقیق و توسعه شرکت تولیدی و صنعتی فیدار اصفهان

info@feedar.co



فهرست مطالب

۱	مقدمه	۱
۲	آزمون درجه نفوذ قیر	۱
۳	آزمون نقطه نرمی قیر	۲
۵	آزمون نقطه شکست فراس	۳
۶	ویسکوزیته	۴
۷	ویسکومتر صفحه‌ای	۷
۷	ویسکومتر مووین	۷
۹	ویسکومتر چرخشی	۹
۱۰	ویسکومتر کاپ	۱۰
۱۱	نمودار اطلاعات آزمون قیر	۵
۱۳	قیرهای کلاس S	۱۳
۱۳	قیرهای کلاس B	۱۳
۱۵	قیرهای کلاس W	۱۵
۱۵	حساسیت دمایی_ شاخص نفوذ (PI)	۱۵
۱۸	خواص مهندسی قیر	۷
۱۹	مفهوم سختی	۸
۲۱	تشخیص مدول سختی قیر	۹
۲۵	اندازه‌گیری مدول سختی: رئومتر برشی دینامیک	۲۵
۲۷	پیش‌بینی مدول سختی	۲۷
۲۷	استحکام کششی قیر	۱۰
۲۹	استحکام خستگی قیر	۱۱
۲۹	سایر آزمون‌های قیر	۱۲
۲۹	آزمون کشش (انعطاف‌پذیری)	۲۹
۳۰	آزمون قدرت کشش	۳۰
۳۰	آزمون چقرمگی و سختی	۳۰
۳۳	پیوستگی Vialit	۳۳

فهرست شکل‌ها

۲	شکل ۱: دستگاه آزمون نفوذپذیری قیر
---	-----------------------------------

- شکل ۲: دستگاه اندازه‌گیری نقطه نرمی قیر ۴
- شکل ۳: دستگاه آزمون شکست فراس ۶
- شکل ۴: ویسکومتر U شکل لوله‌ای جریان معکوس ۸
- شکل ۵: ویسکومتر سینماتیک ۸
- شکل ۶: ویسکومتر چرخشی ۹
- شکل ۷: ویسکومتر تار استاندارد ۱۰
- شکل ۸: نمودار اطلاعات آزمون قیر، قیرهای با نفوذ متفاوت تولیدشده از یک نفت خام ۱۲
- شکل ۹: تعیین ویسکوزیته قیر ایدئال برای مخلوط کردن و متراکم کردن بهینه قیر ماکدام ۱۲
- شکل ۱۰: نمودار اطلاعات آزمون مقایسه چندین قیر با نفوذ ۱۰۰ تهیه‌شده از منابع مختلف ۱۴
- شکل ۱۱: نمودار اطلاعات آزمون مقایسه قیرهای کلاس S, B و W ۱۴
- شکل ۱۲: نمودار شاخص نفوذ (sp/pen) ۱۷
- شکل ۱۳: نمودار شاخص نفوذ (pen/pen) ۱۸
- شکل ۱۴: تأثیر دما و زمان بارگذاری روی سختی قیر با PI کم ۲۰
- شکل ۱۵: تأثیر دما و زمان بارگذاری روی سختی قیر ۱۱۵/۱۵ ۲۱
- شکل ۱۶: تأثیر دما و زمان بارگذاری روی سختی قیر با پن ۱۰۰ ۲۱
- شکل ۱۷: آزمون خزش در برش ۲۲
- شکل ۱۸: یک آزمون دینامیک در برش ۲۳
- شکل ۱۹: مدول‌های سختی به‌عنوان تابعی از زمان بارگذاری با فرکانس ۲۴
- شکل ۲۰: مدول سختی به‌عنوان تابعی از زمان بارگذاری در دماهای مختلف ۲۴
- شکل ۲۱: شماتیک DSR در حالت آزمون ۲۵
- شکل ۲۲: شکل دستگاه رئومتر برشی دینامیک ۲۵
- شکل ۲۳: رابطه بین G^* , G' , G'' و δ ۲۶
- شکل ۲۴: نمودار برای تشخیص مدول سختی قیر ۲۷
- شکل ۲۵: کشش در نقطه شکست به‌عنوان تابعی از مدول‌های سختی و شاخص نفوذ ۲۸
- شکل ۲۶: نمودار برای تشخیص کشش در نقطه شکست قیر ۲۹
- شکل ۲۷: مقاومت خستگی به‌عنوان تابعی از مدول سختی ۳۱
- شکل ۲۸: آزمون کشش قیر ۳۱
- شکل ۲۹: منحنی نیرو-کشش برای a: قیر نفوذی و b: قیر اصلاح‌شده با پلیمر ۳۲
- شکل ۳۰: آزمایش پاندول Vialit ۳۳
- شکل ۳۱: مقایسه منحنی‌های پیوستگی برای قیر نفوذی و قیر اصلاح‌شده با پلیمر ۳۴

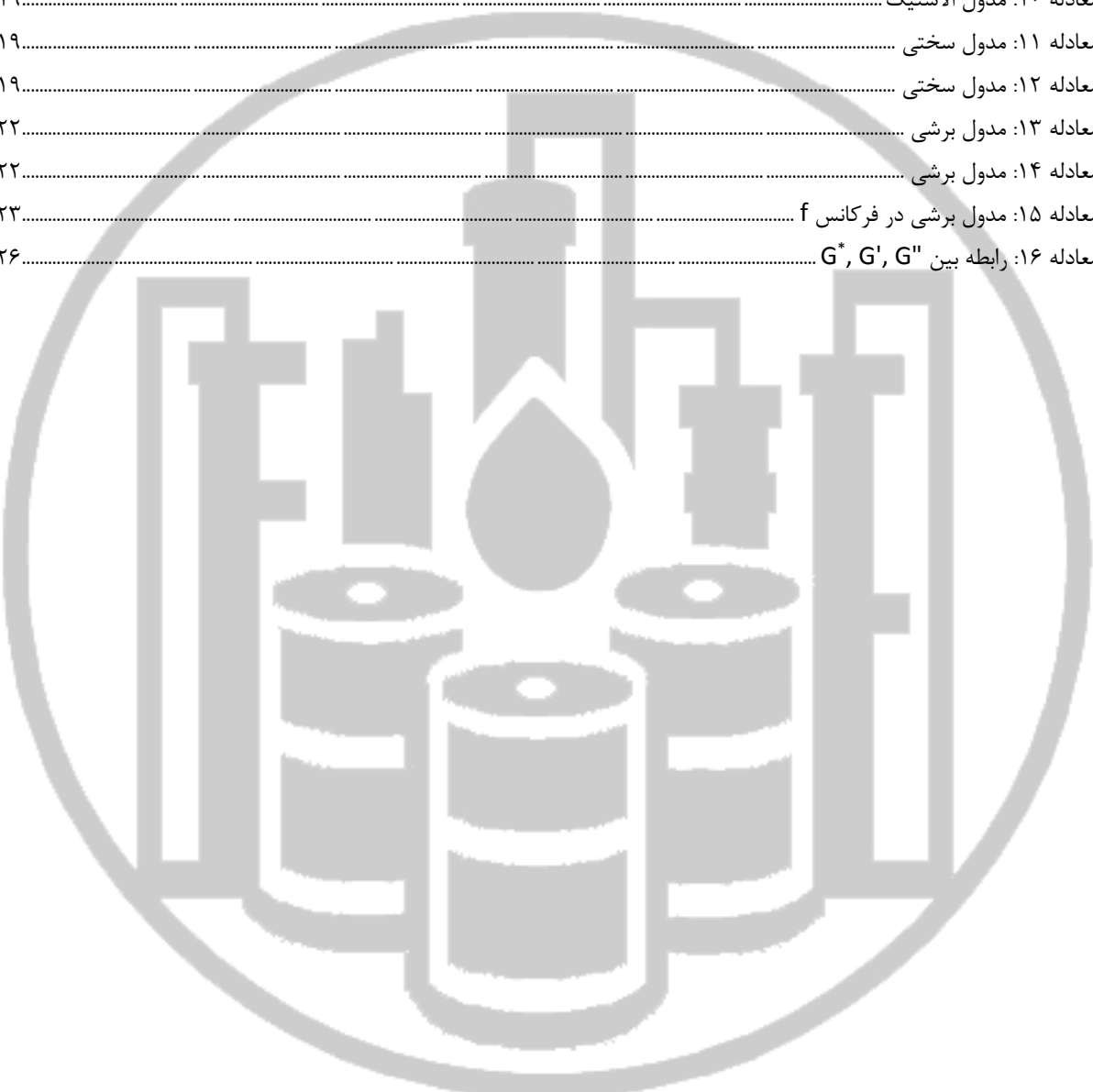
فهرست جدول‌ها

- جدول ۱: ثابت‌های مربوط به ویسکومترهای کاپ مختلف ۱۱

فهرست معادله‌ها

- معادله ۱: تبدیل ویسکوزیته سینماتیک به دینامیک ۷
- معادله ۲: محاسبه ویسکوزیته مطلق ۱۱
- معادله ۳: محاسبه ویسکوزیته سینماتیک بر حسب mm^2/s ۱۱
- معادله ۴: رابطه نفوذ و دما ۱۵

معادله ۵: شاخص نفوذ.....	۱۵
معادله ۶: شاخص نفوذ.....	۱۵
معادله ۷: حساسیت دمایی.....	۱۵
معادله ۸: رابطه حساسیت دمایی و نقطه نرمی.....	۱۶
معادله ۹: شاخص نفوذ.....	۱۶
معادله ۱۰: مدول الاستیک.....	۱۹
معادله ۱۱: مدول سختی.....	۱۹
معادله ۱۲: مدول سختی.....	۱۹
معادله ۱۳: مدول برشی.....	۲۲
معادله ۱۴: مدول برشی.....	۲۲
معادله ۱۵: مدول برشی در فرکانس f	۲۳
معادله ۱۶: رابطه بین G^* , G' , G''	۲۶



www.iranbitumen.co

۱. مقدمه

قیر یک ماده پیچیده است و نسبت به تنش یک واکنش پیچیده نشان می‌دهد. پاسخ قیر به یک تنش، به دما و مدت زمانی که این تنش وارد می‌شود بستگی دارد؛ بنابراین، طبیعت هر آزمون قیر و آنچه به خواص قیر اشاره دارد باید متناسب با طبیعت مواد تفسیر شود.

طیف وسیعی از آزمون‌ها شامل آزمون‌های تعیین خواص تا آزمون‌های بسیار بنیادی رئولوژیک و آزمون‌های مکانیکی روی قیرها انجام شده است. در این کتاب به دسته‌بندی آزمون‌های قیر و معرفی خواص مهم قیرها می‌پردازیم. از آنجایی که طیف گسترده‌ای از قیرها تولید می‌شود، داشتن آزمون‌هایی برای مشخص کردن گریدهای مختلف ضروری است. آزمون‌های نفوذ و نقطه نرمی دو آزمونی هستند که برای مشخص کردن گریدهای مختلف قیر استفاده می‌شود. اگرچه این دو آزمون‌های تجربی، دلخواه هستند، با استفاده از نتایج آن‌ها ممکن است خواص مهندسی مهمی مانند ویسکوزیته دمای بالا و سختی در دمای پایین را تخمین زد. استفاده از آزمون نفوذ برای مشخص کردن انسجام قیر به اواخر قرن نوزدهم بازمی‌گردد.

همان‌طور که آزمون‌های نفوذ و نقطه نرمی تجربی هستند، ضروری است که همیشه در شرایط یکسانی انجام شوند. موسسه نفت (IP)، انجمن آزمون و مواد آمریکا (ASTM) و موسسه استاندارد انگلیس (BS) برای قیر آزمون‌های استاندارد تعریف کرده‌اند. در بسیاری از موارد روش‌ها یکسان است و بنابراین به صورت مشترک منتشر شده‌اند. به هر حال برخی روش‌ها مانند روش نقطه نرمی در IP و ASTM در جزئیات باهم تفاوت دارند و به همین دلیل برای مربوط کردن نتایج این دو روش از فاکتور تصحیح استفاده می‌کنند.

اکثر روش‌ها محدودیت‌هایی برای ارزیابی قابل قبول بودن نتایج آزمون‌ها بیان می‌کنند. محدودیت تنوع نتایج به دست آمده به وسیله یک کاربر (Repeatability) و به وسیله کاربران مختلف در آزمایشگاه‌های مختلف (Reproducibility) مشخص شده است؛ بنابراین، تلورانس (Tolerance) اجازه تفاوت بین کاربرها و تجهیزات در آزمایشگاه‌های مختلف را داده است.

www.iranbitumen.co

۱. آزمون درجه نفوذ قیر

قوام قیر پن گرید یا قیرهای اکسیدی به وسیله آزمون درجه نفوذ اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمون، یک سوزن با قطر مشخص با وزن ۱۰۰ گرم در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد در زمان ۵ ثانیه در یک نمونه قیر نفوذ می‌کند. دستگاه مورد استفاده در این آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱: دستگاه آزمون نفوذپذیری قیر



مقدار حرکت سوزن در داخل قیر به عنوان درجه نفوذ تعریف می‌شود و بر اساس دهم میلی‌متر گزارش می‌شود. قیرهای سخت دارای درجه نفوذ کم و قیرهای نرم دارای درجه نفوذ زیاد هستند. این آزمون بر این اساس است که قیرهای درجه نفوذی در محدوده‌های نفوذ استاندارد طبقه‌بندی شده است.

ضروری است که روش‌های آزمون نفوذ دقیقاً انجام شود زیرا حتی یک انحراف کوچک می‌تواند تفاوت بزرگی در نتایج ایجاد کند. خطاهای بیشتر متداول به شرح زیر است:

- نمونه‌برداری و آماده‌سازی ضعیف نمونه

- نگهداری بد دستگاه‌ها و سوزن

- دما و زمان نادرست

کنترل دما بحرانی بوده و کنترل با دقت $\pm 0,1$ درجه سانتی‌گراد ضروری است. سوزن‌ها باید به‌طور منظم از نظر صاف بودن، صحت مشخصات و پاکیزگی بررسی شوند. استفاده از دستگاه زمان خودکار برای اطمینان از دقت نیاز است و باید به‌طور منظم چک شود. اندازه‌گیری نفوذ کمتر از ۲ دسی میلی‌متر و بیشتر از ۵۰۰ دسی میلی‌متر دقت لازم را ندارد.

برای هر آزمون باید سه بار اندازه‌گیری انجام و میانگین این سه اندازه‌گیری به‌عنوان نزدیک‌ترین نتیجه ثبت شود. اگر اختلاف بین اندازه‌گیری‌های منفرد از یک حد مجاز بیشتر نبود می‌توان نتیجه را گزارش کرد.

تکرارپذیری و تجدید پذیری (repeatability and reproducibility) قابل قبول در BS ۱۴۲۶:۲۰۰۰ برای آزمون درجه نفوذ به شرح زیر است:

• تکرارپذیری

- اگر درجه نفوذ کمتر از ۵۰ باشد: ۲ دسی میلی‌متر
- اگر درجه نفوذ بزرگ‌تر، مساوی ۵۰ باشد: ۴٪ از میانگین دو نتیجه

• تجدید پذیری

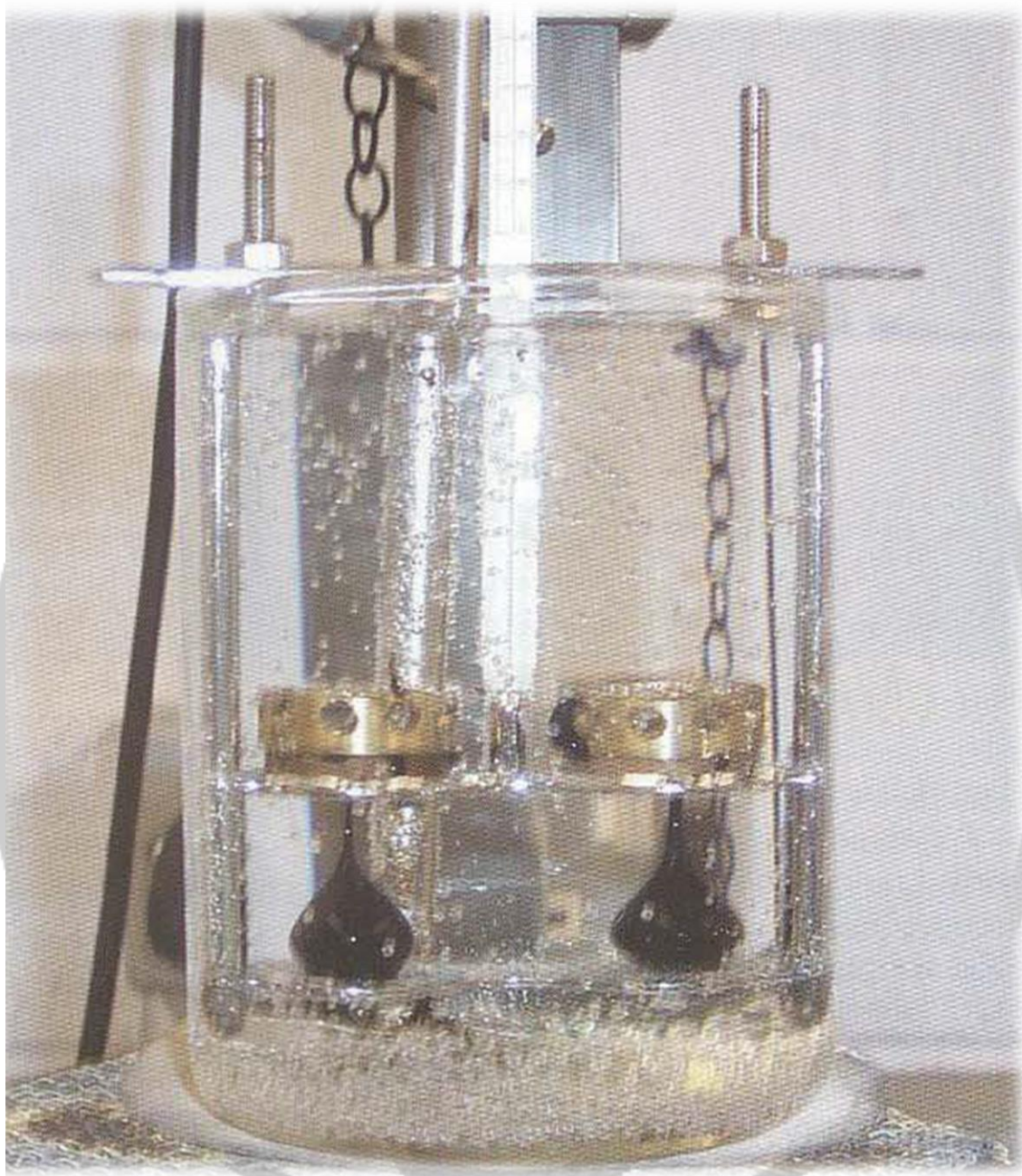
- اگر درجه نفوذ کمتر از ۵۰ باشد: ۴ دسی میلی‌متر
- اگر درجه نفوذ بزرگ‌تر، مساوی ۵۰ باشد: ۸٪ از میانگین دو نتیجه

۲. آزمون نقطه نرمی قیر

استحکام قیرهای اکسیدی و پن‌گرید را با اندازه‌گیری نقطه نرمی هم می‌توان تشخیص داد. در این آزمون، یک گوی فولادی به وزن ۳,۵ گرم روی یک نمونه قیر موجود در یک حلقه برنجی قرار می‌گیرد که سپس در یک حمام آب یا گلیسیرین معلق می‌شود. دستگاه آزمون نقطه نرمی در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای قیرهای با نقطه نرمی کمتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد از حمام آب و برای قیرهای با نقطه نرمی بیشتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد از حمام گلیسیرین استفاده می‌شود. دمای حمام با نرخ ۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش می‌یابد، قیر نرم می‌شود و در نهایت به آرامی توسط گوی در میان حلقه تغییر شکل می‌دهد. در زمانی که قیر و گوی فولادی صفحه‌ای در فاصله ۲۵ میلی‌متری از حلقه را لمس کنند دمای حمام را باید یادداشت کرد. آزمون مجدداً انجام می‌شود و میانگین دو دمای اندازه‌گیری شده گزارش می‌شود. نقطه نرمی برای قیر پن‌گرید با دقت ۰,۲ و برای قیر اکسیدی با دقت ۰,۵ گزارش می‌شود. اگر اختلاف دو دمای اندازه‌گیری شده بیشتر از ۱ درجه سانتی‌گراد باشد، آزمون را باید تکرار کرد. دمای گزارش شده نقطه نرمی قیر را مشخص می‌کند و دمای ویسکوزیته مناسب جهت کار (equi-viscous) را ارائه می‌دهد.

شکل ۲: دستگاه اندازه‌گیری نقطه نرمی قیر



در روش ASTM برای اندازه‌گیری نقطه نرمی نیازی نیست حمام به هم زده شود در صورتی که در روش IP برای اندازه‌گیری نقطه نرمی باید حمام را هم زد؛ بنابراین نقطه نرمی اندازه‌گیری شده با این دو روش با یکدیگر متفاوت است. به‌طور کلی اعداد به دست آمده با روش ASTM، ۱٫۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از روش IP یا BS است.

همانند آزمون تعیین نفوذ قیر برای به دست آوردن نقطه نرمی هم باید با دقت و طبق دستورالعمل آزمایش را انجام داد تا بتوان نتایج دقیقی به دست آورد. آماده‌سازی نمونه، سرعت گرم کردن و دقت

اندازه‌گیری دما همگی مهم هستند. به عنوان مثال، نشان داده شده است که با تغییر نرخ افزایش دما از ۴,۵ به ۵,۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه طبق تلورانس مورد قبول روش IP ۵۸ می‌توان نتایجی با اختلاف ۱,۶ درجه سانتی‌گراد در اندازه‌گیری نقطه نرمی داشت. دستگاه اندازه‌گیری نقطه نرمی خودکار وجود دارد که به صورت مطمئن دما را کنترل و نتایج نهایی را ثبت می‌کند.

محدوده تکرارپذیری و تجدید پذیری قابل قبول برای آزمون اندازه‌گیری نقطه نرمی طبق استاندارد BS EN ۱۴۲۷:۲۰۰۰ به شرح زیر است:

تکرارپذیری

__ برای قیر اصلاح نشده در آب: ۱,۰ درجه سانتی‌گراد

__ برای قیر اصلاح شده در آب: ۱,۵ درجه سانتی‌گراد

__ برای قیر اکسیدی در گلیسرول ۱,۵ درجه سانتی‌گراد

تجدید پذیری

__ برای قیر اصلاح نشده در آب: ۲,۰ درجه سانتی‌گراد

__ برای قیر اصلاح شده در آب: ۳,۵ درجه سانتی‌گراد

__ برای قیر اکسیدی در گلیسرول ۵,۵ درجه سانتی‌گراد

استحکام قیر در دمای نقطه نرمی به وسیله Pfeiffer و Van Doormaal به عنوان مقدار نفوذ اندازه‌گیری شده است. آن‌ها به وسیله یک سوزن بسیار بزرگ و مخصوص، مقدار پن ۸۰۰ را برای بیشتر قیرها و نه همه آن‌ها به دست آوردند. مشخص شد مقدار دقیق به شاخص نفوذ و مقدار واکس بستگی دارد. همچنین به وسیله اندازه‌گیری‌های مستقیم مشخص شد که ویسکوزیته در دمای نقطه نرمی برای بیشتر قیرها ۱۲۰۰ pa s است. (۱۲۰۰۰ poise)

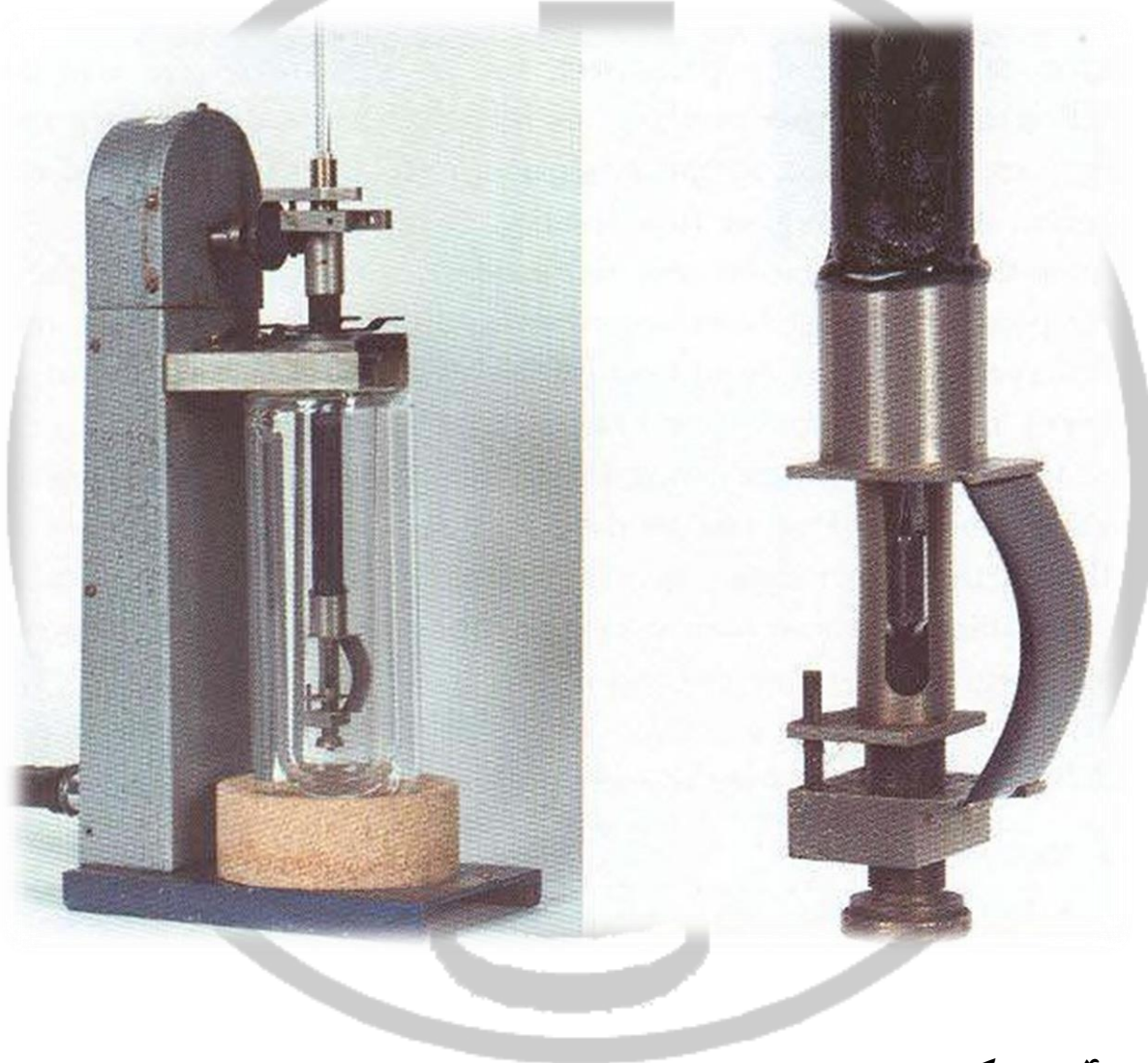
۳. آزمون نقطه شکست فراس

آزمون نقطه شکست فراس (Frass) یکی از معدود آزمون‌هایی است که می‌تواند برای توصیف رفتار قیر در دماهای خیلی پایین (کمتر از ۳۰- درجه سانتی‌گراد) استفاده شود. این آزمون در سال ۱۹۳۷ به وسیله فراس توسعه یافت. در اصل یک وسیله تحقیقاتی است که برای مشخص کردن دمایی که در آن قیر به یک سختی بحرانی می‌رسد و می‌شکند استفاده می‌شود. تعدادی از کشورهای با زمستان‌های خیلی سرد مانند، کانادا، فنلاند، نروژ و سوئد برای گریدهای قیرشان ماکزیمم فراس ممکن را دارند.

در آزمون فراس نشان داده شده در شکل ۳ یک پلاک فولادی با ابعاد ۲۰×۴۱ میلی‌متر که با ۰,۵ میلی‌متر قیر پوشش داده شده به آهستگی خم شده و رها می‌شود. دما با نرخ ۱ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد تا

قیر به سختی بحرانی رسیده و ترک بخورد. دمایی که در آن نمونه ترک بخورد نقطه شکست نامیده می شود و یک دمای $equi-viscous$ یا $equi-stiffness$ را ارائه می دهد. نشان داده شده است که در نقطه شکست سختی قیر $12,1 \times 10^9$ Pa است که به ماکزیمم سختی $2,7 \times 10^9$ Pa نزدیک است. با استفاده از نقطه نرمی و درجه نفوذ می توان نقطه فراس را پیش بینی کرد، زیرا معادل دمایی است که قیر دارای نفوذ ۱,۲۵ می شود.

شکل ۳: دستگاه آزمون شکست فراس



۴. ویسکوزیته

ویسکوزیته یک خاصیت بنیادی قیر است که مشخص می کند مواد در یک دمای مشخص و یا یک محدوده دمایی چه رفتاری دارند. واحد اصلی ویسکوزیته پاسکال ثانیه (Pa s) است. ویسکوزیته مطلق و یا دینامیک قیر که برحسب پاسکال ثانیه اندازه گیری شده عبارت است از تنش برشی اعمال شده به نمونه برحسب پاسکال تقسیم بر نرخ برش بر ثانیه ($1 \text{ Pa} = 10 \text{ Poise}$). ویسکوزیته مطلق قیر را می توان به وسیله ویسکومتر sliding plate اندازه گرفت.

همچنین می‌توان ویسکوزیته را با واحد مترمربع بر ثانیه یا با واحد مرسوم‌تر میلی‌متر مربع بر ثانیه بیان کرد که یک میلی‌متر مربع بر ثانیه برابر یک سانتی استوک است. این واحدها مربوط به ویسکوزیته سینماتیک است. ویسکوزیته سینماتیک به وسیله ویسکومتر لوله موئین اندازه‌گیری می‌شود. به وسیله معادله ۱ می‌توان ویسکوزیته سینماتیک را به ویسکوزیته دینامیک مربوط ساخت:

$$\text{معادله ۱: تبدیل ویسکوزیته سینماتیک به دینامیک} \quad \eta = \frac{\text{ویسکوزیته دینامیک}}{\text{دانسیته}} = \text{ویسکوزیته سینماتیک}$$

برای بسیاری از اهداف، تشخیص ویسکوزیته قیر به وسیله اندازه‌گیری زمان موردنیاز برای عبور مقدار مشخصی از ماده از اوریفیس استاندارد متداول است. این روش‌ها به منظور تعیین و مقایسه مناسب است و اگر نیاز باشد نتایج را می‌توان به واحدهای بنیادی‌تر ویسکوزیته تبدیل کرد.

ویسکومتر صفحه‌ای

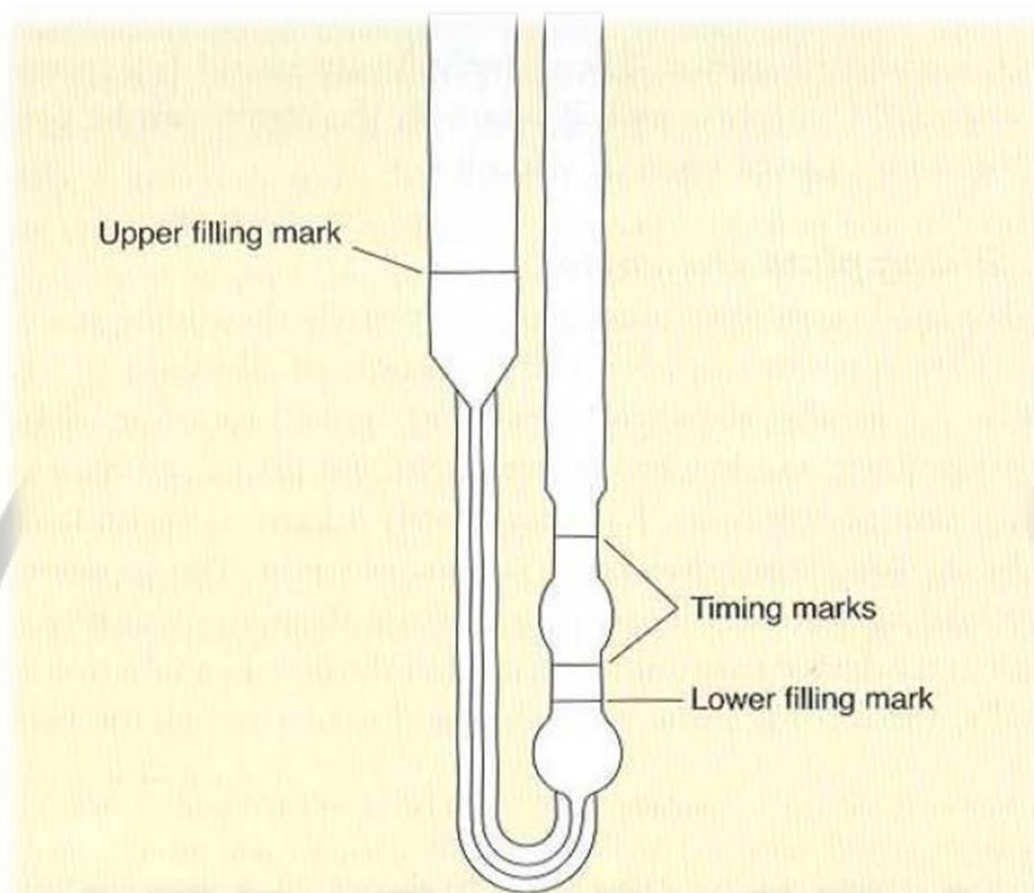
یک روش بنیادی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته استفاده از ویسکومتر صفحه‌ای است. این وسیله برای مشخص کردن ویسکوزیته مطلق و یا دینامیک استفاده می‌شود. به عنوان مثال، این دستگاه تنش برشی اعمال شده روی فیلم قیر به ضخامت ۵ تا ۵۰ میکرومتر ساندویچ شده بین دو صفحه را می‌گیرد و نرخ کشش (rate of strain) ایجاد شده را برحسب S^{-1} اندازه‌گیری می‌کند. ویسکوزیته برحسب پاسکال ثانیه (Pa s) به وسیله تقسیم تنش برشی بر نرخ تنش به دست می‌آید. دستگاه شامل یک سیستم بارگذاری که یک تنش برشی یکسان را در طول اندازه‌گیری اعمال می‌کند و یک وسیله برای ثبت جریان به عنوان تابعی از زمان است. به طور کلی، نتایج به شکل یک منحنی شبیه انگشت خمیده است این امر به دلیل رفتار ویسکو-الاستیک در حال عبور به یک فرم خطی است که شیب به طور مستقیم ویسکوزیته را نشان می‌دهد.

بر اساس بار و اندازه گونه‌ها، ویسکوزیته می‌تواند در رنج 10^5 تا 10^9 پاسکال ثانیه اندازه‌گیری شود. یک ویژگی خاص این است که تنش برشی در سراسر نمونه یکسان است و در نتیجه این وسیله به طور ویژه برای بررسی وابستگی پدیده به تنش برشی مناسب است. تنش برشی وابسته به تغییر ویسکوزیته اندازه‌گیری شده با مقدار تنش برشی اعمال شده است.

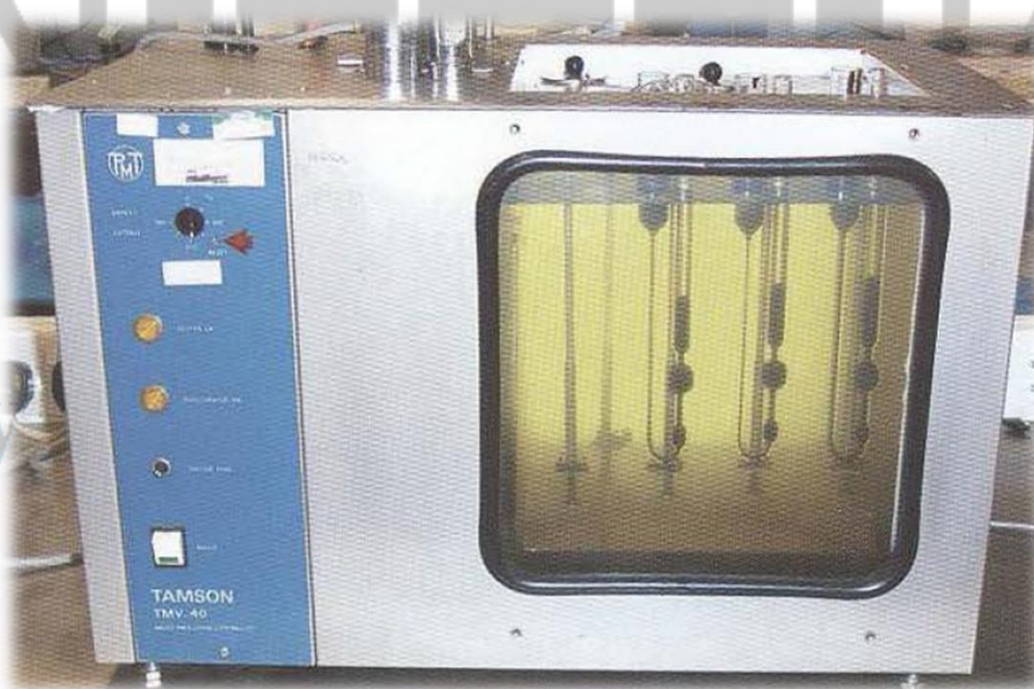
ویسکومتر موئین

ویسکومترهای موئین اساساً لوله‌های شیشه‌ای باریک هستند که قیر در آن جریان دارد. لوله دارای قسمت‌های باریک و پهن است و همان طور که در شکل ۴ و شکل ۵ دیده می‌شود، دو یا تعداد بیشتری علامت به منظور نشان دادن حجم‌ها یا جریان‌های ویژه دارد.

شکل ۴: ویسکومتر U شکل لوله‌ای جریان معکوس



شکل ۵: ویسکومتر سینماتیک



مقدار ویسکوزیته سینماتیک به وسیله زمان جریان قیر از ویسکومتر لوله موئین در دمای مشخص اندازه‌گیری می‌شود. هر ویسکومتر کالیبره شده است و زمان عبور را می‌دهد و فاکتور کالیبراسیون ویسکومتر ویسکوزیته سینماتیک را برحسب mm^2/s می‌دهد. منحنی دما-ویسکوزیته به وسیله اندازه‌گیری ویسکوزیته سینماتیک در تعدادی دمای متفاوت به دست می‌آید و رسم کردن ویسکوزیته به شکل لگاریتم برحسب دما یک مقیاس خطی می‌دهد.

ویسکومتر چرخشی

معمولاً از ویسکومتر چرخشی برای اندازه‌گیری و در برخی مواقع برای تشخیص ویسکوزیته قیر در دمای کاربرد استفاده می‌شود. یک نمونه از ویسکومتر چرخشی Bookfield و Thermocel در شکل ۶ نشان داده شده است.

شکل ۶: ویسکومتر چرخشی



اساساً این دستگاه شامل یک محفظه شامل نمونه قیر داغ است که به وسیله ترموستات کنترل می‌شود.

اسپیندل وارد قیر شده و شروع به چرخیدن می‌کند. گشتاور موردنیاز برای چرخاندن اسپیندل در یک نرخ برش از پیش تعیین شده اندازه‌گیری می‌شود و به ویسکوزیته قیر تبدیل می‌گردد؛ و صفحه‌نمایش

دستگاه ویسکوزیته را به شکل پاسکال ثانیه نمایش می‌دهد. معمولاً ویسکوزیته چرخشی قیر در ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تعیین می‌گردد اما با این نوع دستگاه‌ها می‌توان ویسکوزیته را در رنج نسبتاً وسیعی از نرخ برش و دماهای بین ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تعیین کرد.

ویسکومتر کاپ

قیر کات بک و امولسیون‌ها هر دو به وسیله ویسکوزیته مشخص می‌شوند. قیرهای کات بک به وسیله ویسکومتر تار استاندارد (STV) شکل ۷ مشخص می‌شود.

شکل ۷: ویسکومتر تار استاندارد



ویسکوزیته قیر امولسیون‌ها به وسیله ویسکومتر Egler یا Redwood II اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمون‌ها یک کاپ فلزی با قیر امولسیون‌ها یا کات بک در دمای استاندارد پر می‌شود و زمانی که طول می‌کشید یک حجم استاندارد قیر از ته کاپ به وسیله اوریفیس تخلیه شود ثبت می‌گردد.

چندین ویسکومتر کاپ وجود دارد که از نظر اندازه قسمت باز مربوط به خروج قیر با یکدیگر تفاوت دارند. از آنجایی که فشار به وسیله گرانش ایجاد می‌شود، ویسکوزیته مطلق η برحسب پاسکال با استفاده از معادله ۲ به دست می‌آید:

معادله ۲: محاسبه ویسکوزیته مطلق

$$\eta = \text{مقدار ثابت} \times \left(\frac{\text{gr}}{\text{ml}}\right) \times \text{دانسیتة} (s) \times \text{زمان جریان}$$

در معادله ۲ مقدار ثابت به نوع و سیله مورد استفاده بستگی دارد، این مقدار در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ثابت‌های مربوط به ویسکومترهای کاپ مختلف

Viscometer	Constant
Saybolt Universal	0.000 218
Redwood I	0.000 247
Saybolt Furol	0.002 18
Redwood II	0.002 47
Engler	0.007 58
Standard tar viscometer (4 mm)	0.013 2
Standard tar viscometer (10 mm)	0.400

همچنین نتایج را می‌توان بر اساس ویسکوزیته سینماتیک (v) برحسب m^2/s و یا واحد متداول تر mm^2/s طبق معادله ۳ تعریف کرد.

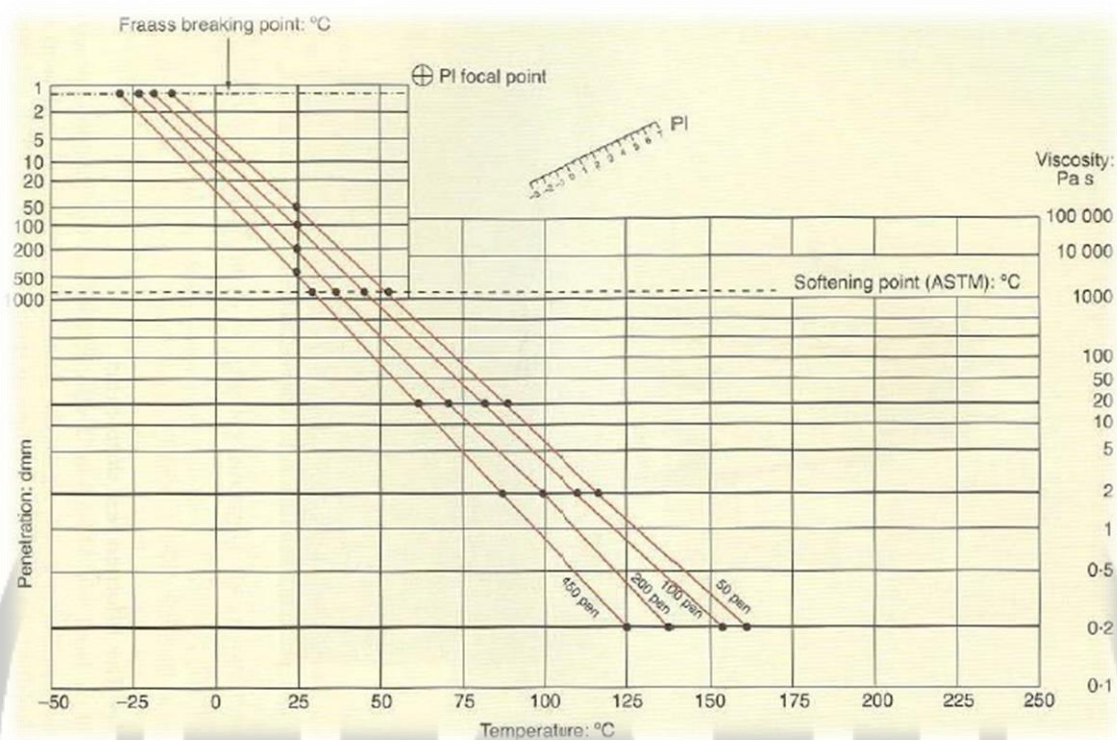
$$\text{معادله ۳: محاسبه ویسکوزیته سینماتیک برحسب } \text{mm}^2/\text{s} \quad \text{مقدار ثابت} \times \text{زمان جریان} = v$$

۵. نمودار اطلاعات آزمون قیر

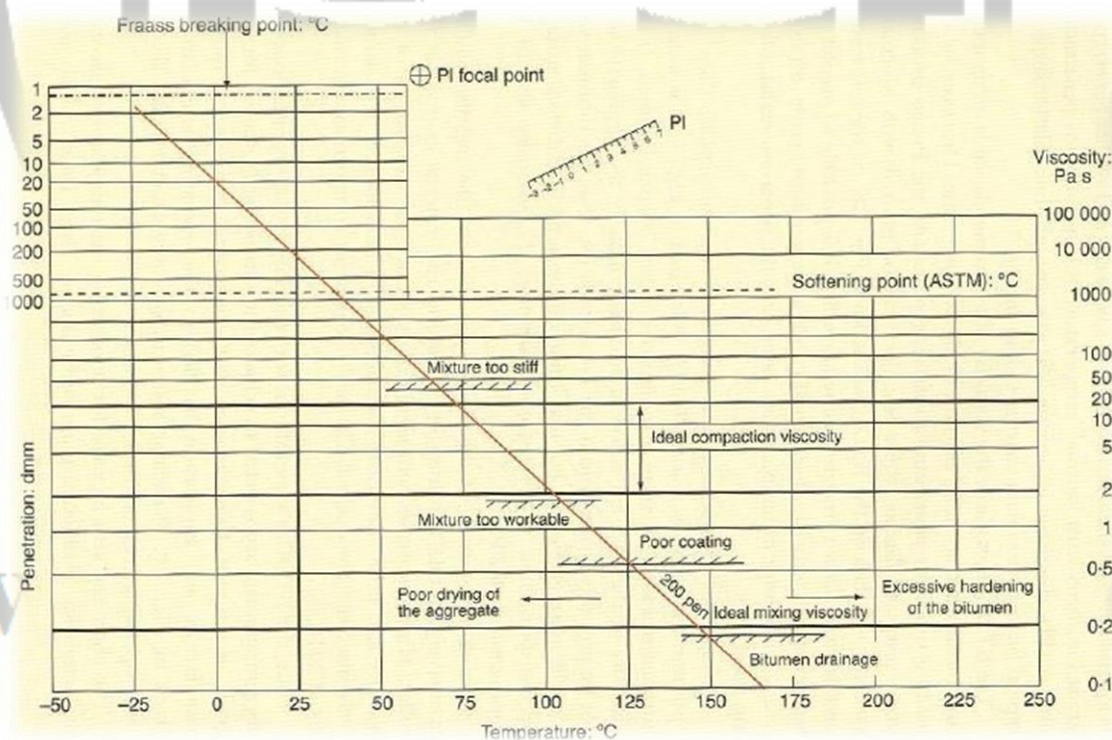
در اواخر سال‌های ۱۹۶۰، Heukelom سیستمی را توسعه داد که این سیستم اجازه داد اطلاعات نفوذ، نقطه نرمی، نقطه شکست فراس و ویسکوزیته به‌عنوان تابعی از دما روی یک نمودار تو صیف شوند؛ که به‌عنوان نمودار اطلاعات آزمون قیر (BTDC) شناخته می‌شود. نمودار شامل یک مقیاس افقی برای دما و دو مقیاس عمودی برای نفوذ و ویسکوزیته است. مقیاس دما خطی، مقیاس نفوذ لگاریتمی و مقیاس ویسکوزیته ابداع شده است به‌طوری‌که قیرهای نفوذی با حساسیت دمایی نرمال یا شاخص نفوذ رابطه خطی مستقیم بدهد. یک نمودار اطلاعات آزمون متداول قیر در شکل ۸ نشان داده شده است.

BTDC نشان می‌دهد که چطور ویسکوزیته قیر به دما بستگی دارد اما زمان بارگذاری را به حساب نمی‌آورد. به‌هر حال همان‌طور که زمان بارگذاری برای آزمون‌های نفوذ، نقطه نرمی و نقطه شکست فراس یکسان هستند، این اطلاعات می‌تواند با اطلاعات آزمون ویسکوزیته سینماتیک روی BTDC مانند شکل ۸ رسم شود. از آنجایی که نتایج در نمودار باهم رابطه خطی دارند می‌توان مشخصات دما-ویسکوزیته قیر نفوذی را در یک طیف وسیعی از دما با داشتن فقط نفوذ و نقطه نرمی به دست آورد. در طول فرآیند تولید و مخلوط کردن آسفالت ویسکوزیته‌های بهینه برای قیر وجود دارد. این در شکل ۹ برای یک مخلوط قیر ماکادام (Macadam) متراکم، ساخته شده به وسیله قیر با نفوذ ۲۰۰ نشان داده شده است.

شکل ۸: نمودار اطلاعات آزمون قیر، قیرهای با نفوذ متفاوت تولیدشده از یک نفت خام



شکل ۹: تعیین ویسکوزیته قیر ایدئال برای مخلوط کردن و متراکم کردن بهینه قیر ماکادام



اگر ویسکوزیته قیر در هنگام مخلوط کردن خیلی بالا باشد، سنگ‌دانه‌ها به خوبی پوشش داده نخواهند شد و اگر ویسکوزیته خیلی پایین باشد قیر به راحتی دانه‌ها را پوشش می‌دهد اما ممکن است دانه‌ها در طول انبارداری و حمل و نقل چکه کنند. برای به دست آوردن پوشش قابل قبول ویسکوزیته باید تقریباً ۰,۲ پاسکال ثانیه باشد.

در زمان فشرده سازی، اگر ویسکوزیته خیلی کم باشد، مخلوط بیش از حد حرکت خواهد داشت، در نتیجه باعث حرکت مواد از جلوی غلتک می‌شود. ویسکوزیته زیاد به طور عمده باعث کاهش توانایی کار کردن با مخلوط می‌شود و مقدار کمی تراکم اضافی به دست خواهد آمد. به طور وسیع مشخص شده که ویسکوزیته قیر بهینه برای متراکم کردن بین ۲ تا ۲۰ پاسکال ثانیه است.

بنابراین BTDC وسیله مفیدی است که با استفاده از آن می‌توان مطمئن شد که دماهای کار مناسب برای رسیدن به ویسکوزیته مناسب هر گرید قیر انتخاب شده است. در نظر گرفتن ویسکوزیته مورد نیاز در طول تولید و کاربرد باعث دماهای کاربرد شکل ۹ خواهد شد. مخلوط‌ها و شرایط ویژه ممکن است دماهای کاربرد دیگری را دیکته کنند.

همچنین این نمودار می‌تواند برای مقایسه مشخصات دما / ویسکوزیته انواع مختلف قیر استفاده شود. سه کلاس از قیر به طور مجزا به وسیله BTDC می‌تواند مشخص شود: کلاس S، کلاس B و کلاس W.

قیرهای کلاس S

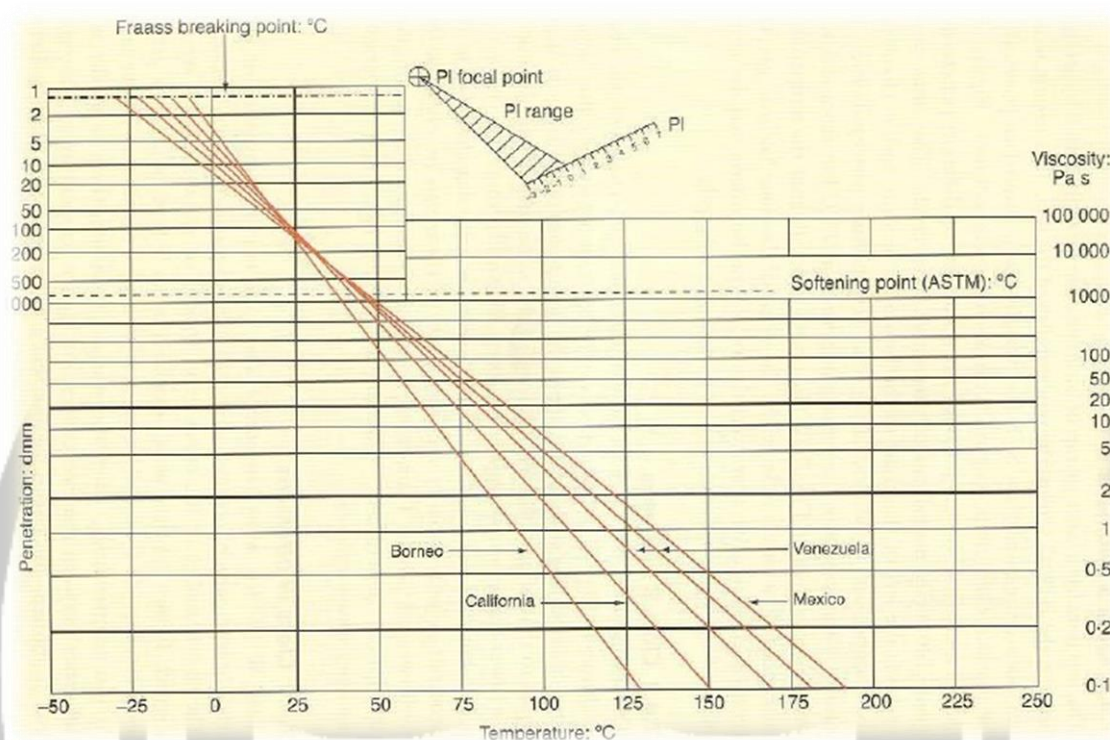
اطلاعات آزمون برای گروه بزرگی از قیرها می‌تواند با تکرارپذیری آزمون به صورت خطوط مستقیم روی BTDC باشد. این گروه که کلاس S (S for Straight line) را طراحی کرده‌اند شامل قیرهای نفوذی با منبع مختلف و مقدار واکس محدود است. شکل ۸ یک نمودار با خطوط مستقیم را برای تعدادی از قیرهای پن گرید ساخته شده از یک منبع نشان می‌دهد. هرچه قیر نرم‌تر می‌شود خطوط به سمت چپ نمودار حرکت می‌کند. به هر حال شیب ثابت است و این نشان می‌دهد حساسیت دمایی یکسان است. قیرهای با نفوذ یکسان ولی با منابع مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تفاوت در منبع نفت خام می‌تواند بر حساسیت دمایی تأثیرگذار باشد و این اثر به وسیله شیب خطوط منعکس می‌شود. بر این اساس، مشخصات دمای ویسکوزیته قیرهای نوع S ممکن است به وسیله تنها نفوذ و نقطه نرمی آن‌ها تشخیص داده شود.

قیرهای کلاس B

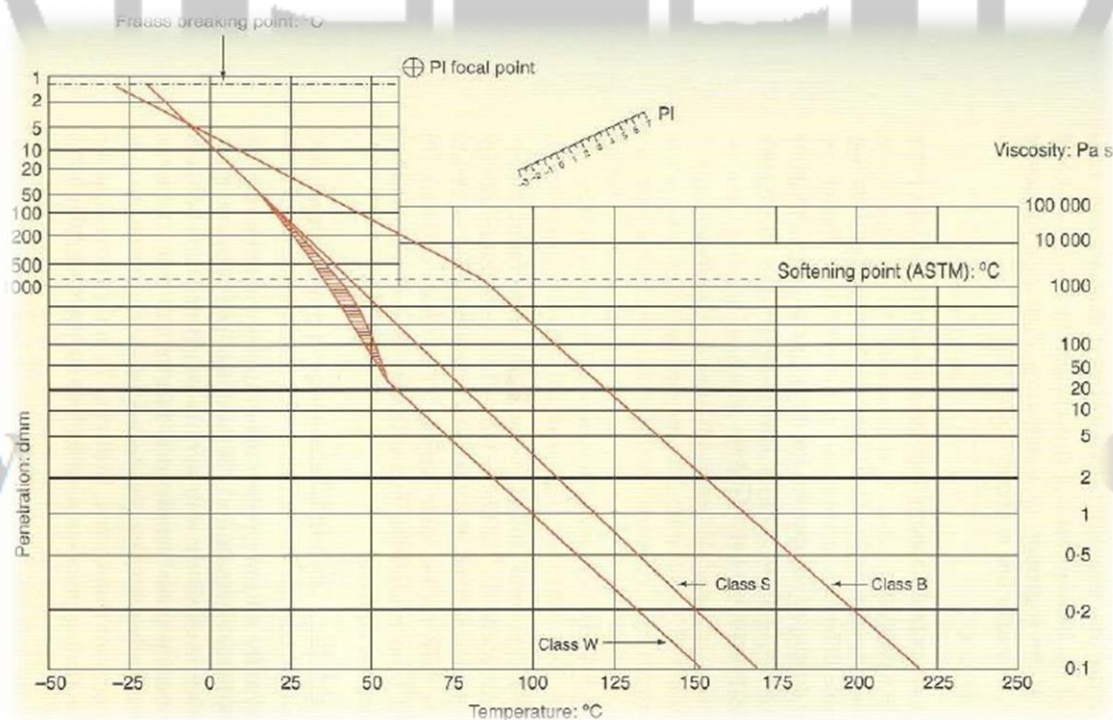
اطلاعات آزمون برای قیرهای کلاس B (B for Blown) همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است به صورت منحنی است. منحنی‌ها را می‌توان به وسیله دو خط مستقیم متقاطع ارائه کرد. شیب خط در محدوده دمایی بالا تقریباً با قیر دمیده نشده از یک منبع یکسان است، اما خط در محدوده دماهای پایین دارای شیب تند است. به طور فیزیکی نقطه انتقالی وجود ندارد اما بسیار مطلوب است که آن‌ها در ناحیه‌های ویسکوزیته و نفوذ به شکل خط‌های مستقیم باقی بمانند. هر یک از آن‌ها می‌تواند به وسیله دو

مقدار آزمون مشخص شود؛ بنابراین درمجموع، چهار آزمون برای توصیف کامل نیاز است، نفوذ، نقطه نرمی و دو اندازه‌گیری ویسکوزیته دمایی بالا.

شکل ۱۰: نمودار اطلاعات آزمون مقایسه چندین قیر با نفوذ ۱۰۰ تهیه شده از منابع مختلف



شکل ۱۱: نمودار اطلاعات آزمون مقایسه قیرهای کلاس S, B و W



قیرهای کلاس W

قیرهای کلاس W (W for Waxy) منحنی‌هایی می‌دهند شامل دو خط راست که به‌هر حال شبیه منحنی‌های قیرهای دمیده نیست. دو شاخه منحنی دارای شیب‌های یکسان است ولی هم‌راستا نیستند. شکل ۱۱ یک مثال از یک قیر نوع S به همراه یک منحنی برای قیر مشابه با مقدار واکس ۱۲ درصد را نشان می‌دهد. در دماهای پایین وقتی واکس بلوره‌ای می‌شود به‌سختی هرگونه تفاوتی بین دو منحنی وجود دارد. در دماهای بالاتر که واکس ذوب‌شده است منحنی مربوط به قیر واکسی به‌طور قابل‌توجهی روی نمودار پایین می‌آید. بین دو شاخه مستقیم یک محدوده انتقال وجود دارد که در آن داده‌های آزمون پراکنده می‌شوند زیرا پیشینه حرارتی نمونه بر روی نتایج ویسکوزیته به‌دست‌آمده در این رنج دمایی تأثیر می‌گذارد.

۶. حساسیت دمایی - شاخص نفوذ (PI)

همه قیرها از خود خواص ترموپلاستیک نشان می‌دهند، یعنی در اثر حرارت نرم و در اثر سرما سخت می‌شوند. چندین معادله وجود دارد که نشان می‌دهد ویسکوزیته (از سجام) چگونه با دما تغییر می‌کند. یکی از این معادلات که از همه مشهورتر است توسط Pfeiffer و Van Doormaal تعریف شده است. اگر لگاریتم نفوذ P در مقابل دما T، رسم شود خط راستی به دست می‌آید، معادله ۴.

$$\text{Log } P = AT + K \quad \text{معادله ۴: رابطه نفوذ و دما}$$

که A حساسیت دمایی لگاریتم نفوذ و K یک مقدار ثابت است. مقدار A از ۰٫۱۵ تا ۰٫۰۶ متغیر است و نشان می‌دهد که ممکن است تفاوت قابل‌توجهی بین حساسیت دمایی باشد. Pfeiffer و Van Doormaal معادله‌ای را برای حساسیت دمایی توسعه دادند که در آن مقدار حساسیت دمایی برای قیر جاده‌ای حدود صفر در نظر گرفته شده است. به همین دلیل آن‌ها شاخص نفوذ (PI) را تعریف کرده‌اند:

$$\frac{20 - PI}{10 + PI} = 50A \quad \text{معادله ۵: شاخص نفوذ}$$

یا به‌طور صریح:

$$PI = \frac{20(1 - 25A)}{1 + 50A} \quad \text{معادله ۶: شاخص نفوذ}$$

مقدار PI از حدود ۳- برای قیرهای با حساسیت دمایی بالا تا حدود ۷+ برای قیرهای به‌شدت دمیده با حساسیت دمایی پایین (PI بالا) است. PI به‌طور صریح تابعی از A است و بنابراین ممکن است باهدف مشابهی استفاده شود. مقادیر A و PI می‌تواند از اندازه‌گیری نفوذ در دو دما T_1 و T_2 به‌وسیله معادله ۷ به دست آید:

$$A = \frac{\log \text{pen at } T_1 - \log \text{pen at } T_2}{T_1 - T_2} \quad \text{معادله ۷: حساسیت دمایی}$$

ثبات در نقطه نرمی به دو طریق به عنوان نفوذ بیان شده است، روش اول برون‌یابی خطی لگاریتم نفوذ در مقابل دما و روش دوم، اندازه‌گیری مستقیم به وسیله یک سوزن نفوذ بلندتر در دمای نقطه نرمی استاندارد ASTM. Van Doormaal و Pfeiffer کشف کردند که بیشتر قیرها در نقطه نرمی ASTM نفوذی برابر با ۸۰۰ دسی میلی‌متر دارند. با جایگزینی T_2 در معادله ۷ به وسیله دمای نقطه نرمی ASTM و نفوذ در دمای T_2 با ۸۰۰ معادله ۸ را به دست آوردند:

$$A = \frac{\log pen T_1 - \log 800}{T_1 - \text{ASTM softening point}} \quad \text{معادله ۸: رابطه حساسیت دمایی و نقطه نرمی}$$

جایگزینی این معادله در معادله PI و فرض دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای نفوذ معادله ۹ را می‌دهد:

$$PI = \frac{1952 - 500 \log pen - 2SP}{50 \log pen - SP - 120} \quad \text{معادله ۹: شاخص نفوذ}$$

فرض نفوذ ۸۰۰ در نقطه نرمی برای همه قیرها صادق نیست؛ بنابراین توصیه می‌شود حساسیت دمایی به وسیله اندازه‌گیری نفوذ در دو دمای T_1 و T_2 محاسبه شود.

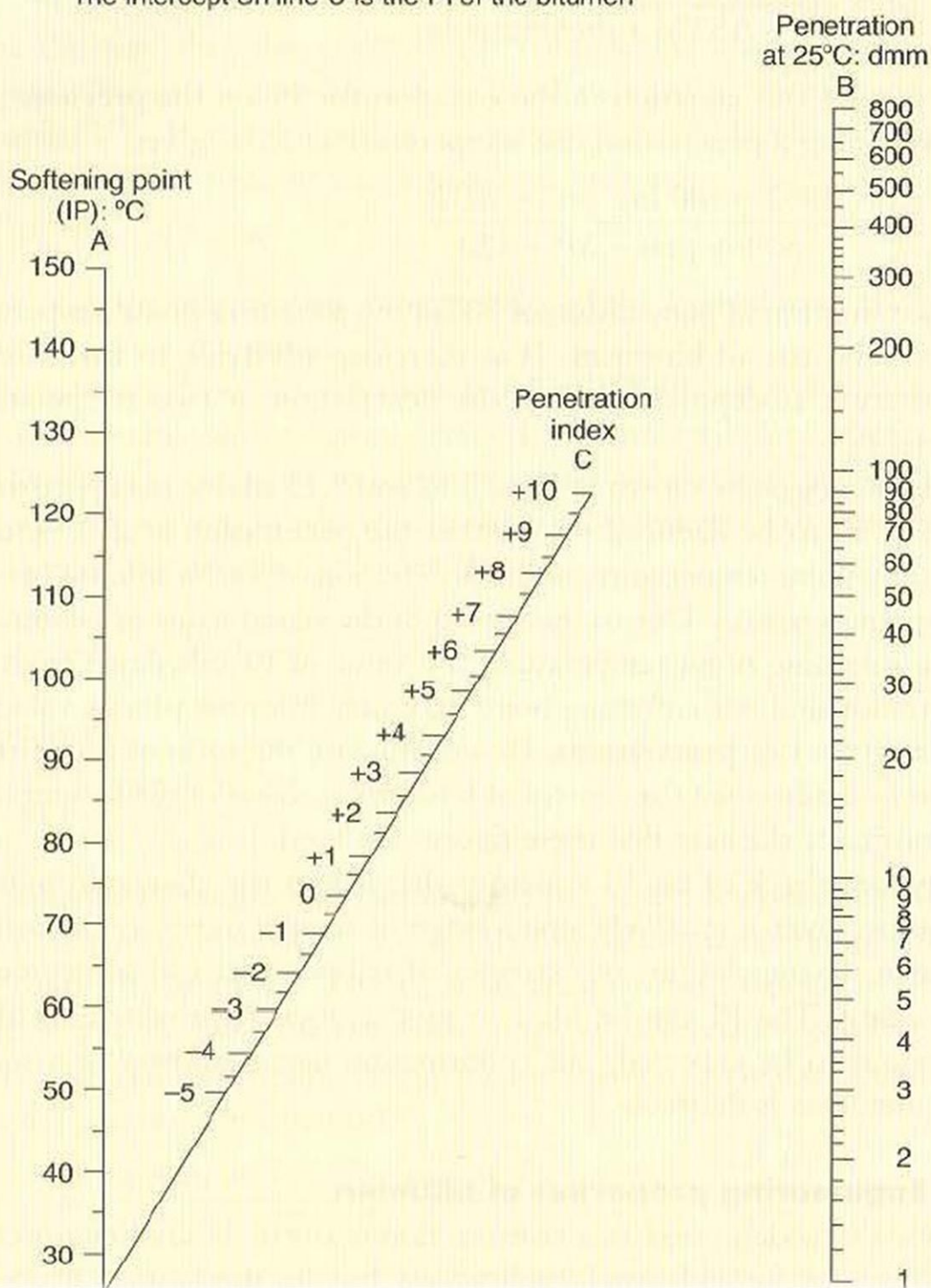
نموگراف‌های (nomograph) نشان داده‌شده در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ می‌تواند مقدار تقریبی PI را با استفاده از نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد و دمای نقطه نرمی و یا به وسیله نفوذ قیر در دو دمای مختلف نشان دهد. به دلیل گسترده بودن مقدار واقعی نفوذ در دمای نقطه نرمی، مقدار PI اندازه‌گیری شده به وسیله یک نفوذ و یک نقطه نرمی ممکن است متفاوت از مقدار دقیق محاسبه‌شده از دو نفوذ باشد. به هر حال، از آنجا که به طور کلی شکل خواص برای کنترل قیر به نام مشخصات تشخیص داده می‌شود، استفاده از این شکل‌ها متداول است.

یک مشکل شاخص نفوذ PI این است که از تغییر در خواص قیر در یک محدوده کوچک دمایی برای مشخص کردن قیر استفاده می‌کند. در برخی موارد برون‌یابی سایر دماها ممکن است باعث خطا شود. PI می‌تواند برای به دست آوردن یک تقریب خوب از رفتار مورد انتظار قیر استفاده شود اما تأیید به وسیله اندازه‌گیری‌های سختی و ویسکوزیته نیاز است.

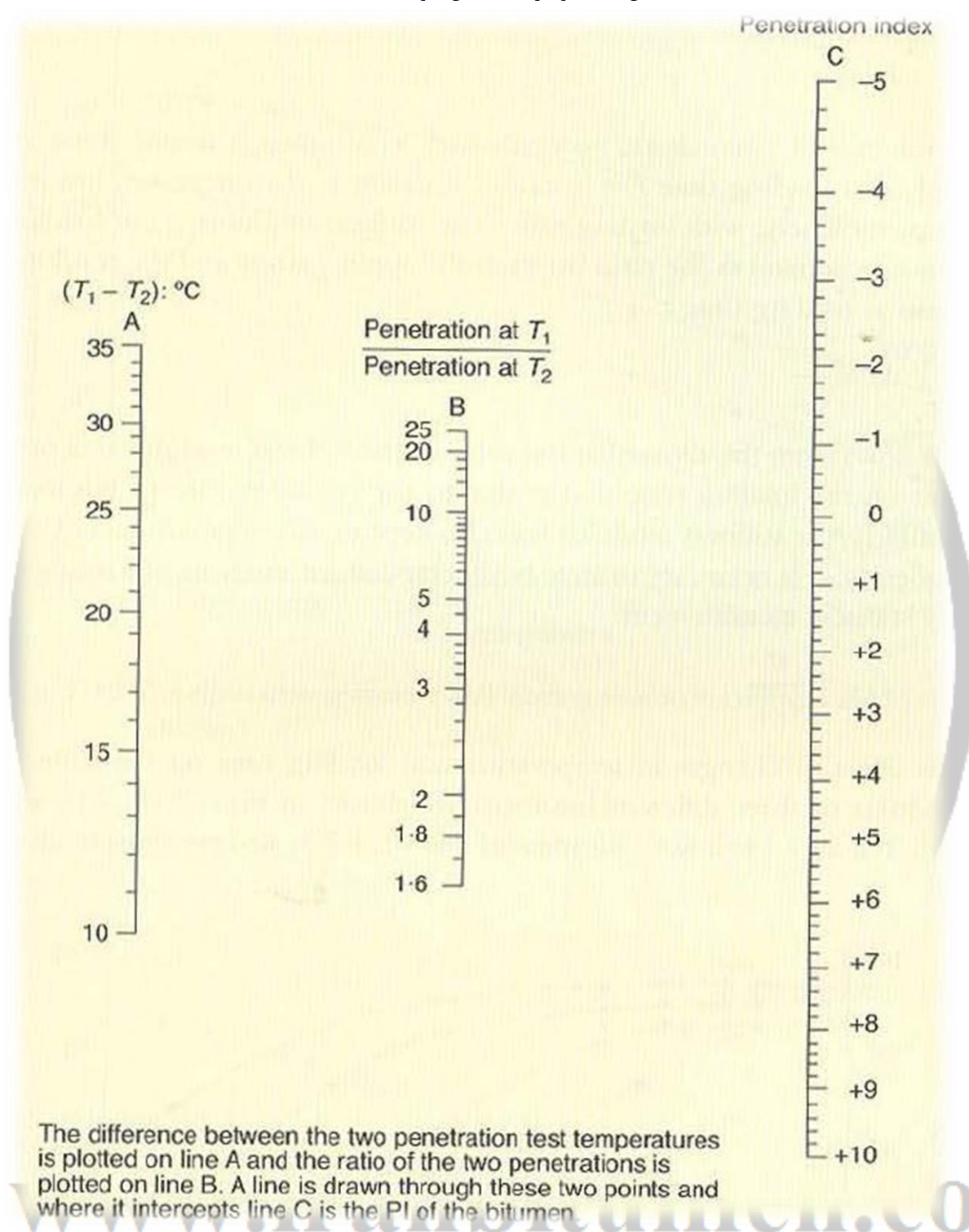
www.iranbitumen.co

شکل ۱۲: نمودار شاخص نفوذ (sp/pen)

Draw a line between the softening point (line A)
and penetration (line B) values.
The intercept on line C is the PI of the bitumen



شکل ۱۳: نمودار شاخص نفوذ (pen/pen)



۷. خواص مهندسی قیر

در مهندسی شهری از قیر به‌طور وسیع به‌عنوان یک ماده برای ساخت و ساز استفاده می‌شود. قیر در ساختمان‌سازی و کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود ولی خواص مکانیکی آن بسیار پیچیده‌تر از استیل

یا بتن است. به هر حال خواص مکانیکی قیرها که برای مهندسی شهری و استفاده صنعتی قیر مهم هستند، می‌تواند در شرایطی شبیه مدول الاستیسیته مواد جامد تعریف شود.

۸. مفهوم سختی

یک ماده ویسکوز در طبیعت که رفتار نیمه سیال دارد، وقتی تحت تنش قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد یا گرایش به تغییر شکل پیدا می‌کند و هر تغییر شکلی با حذف تنش غیرقابل بازگشت است. همچنین وقتی مواد الاستیک تحت تنش قرار می‌گیرند، تغییر شکل می‌دهند یا تمایل به تغییر شکل پیدا می‌کنند به هر حال وقتی فشار برداشته شود هر تغییر شکلی به طور کامل برطرف خواهد شد. قیرها مواد ویسکو-الاستیک هستند. درجه‌ای که قیرها رفتار ویسکوز-الاستیک از خود نشان می‌دهند تابعی از دما و زمان بارگذاری است. در دماهای بالا یا زمان‌های بارگذاری طولانی قیر رفتار مایع‌های ویسکوز را دارد در حالی که در دماهای خیلی پایین یا زمان بارگذاری کم رفتار جامدهای شکننده الاستیک دارند. محدوده متوسط دما و زمان بارگذاری در بیشتر شرایط سرویس باعث رفتار ویسکو-الاستیک می‌شود. به منظور تعریف خواص ویسکو-الاستیک Van der Poel در سال ۱۹۵۴ مفهوم مدول سختی را به عنوان پارامتر بنیادی برای توصیف خواص مکانیکی قیرها به وسیله تشابه با مدول‌های جامدهای الاستیک تعریف کرد. اگر تنش کششی σ در زمان بارگذاری $t=0$ به کار برده شود، یک فشار ε فوراً به دست می‌آید که با زمان بارگذاری افزایش نمی‌یابد. مدول‌های الاستیک E مواد به وسیله قانون هوک (Hooke) بیان می‌شود:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_t} \quad \text{معادله ۱۰: مدول الاستیک}$$

در مورد مواد ویسکو-الاستیک مانند قیر یک تنش کششی σ در زمان بارگذاری $t=0$ باعث یک فشار ε می‌شود که نامتناسب با زمان بارگذاری افزایش می‌یابد. مدول‌های سختی S_t در زمان بارگذاری t به عنوان نسبت بین فشار به کار برده شده و فشار ایجاد شده در زمان بارگذاری t تعریف می‌شود:

$$S_t = \frac{\sigma}{\varepsilon_t} \quad \text{معادله ۱۱: مدول سختی}$$

طبق معادله ۱۱ مقدار مدول سختی وابسته به زمان بارگذاری و این مربوط به طبیعت ویژه قیر است. به طور مشابه مدول سختی وابسته به دما T خواهد بود؛ بنابراین لازم است دما و زمان بارگذاری برای هر اندازه گیری سختی در نظر گرفته شود:

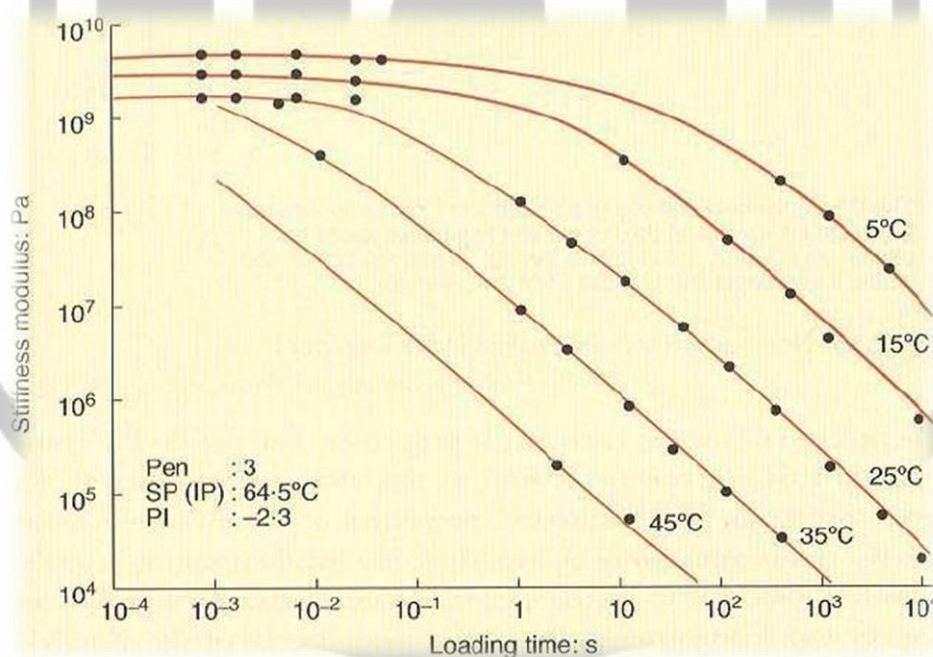
$$S_{t,T} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{t,T}} \quad \text{معادله ۱۲: مدول سختی}$$

تأثیر دما و زمان بارگذاری روی مدول سختی سه نوع مختلف قیر در شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان داده شده است. شکل ۱۴ یک قیر با شاخص نفوذ کم ۲،۳- را نشان می‌دهد. در زمان بارگذاری خیلی کوتاه مدول سختی تقریباً ثابت است، تقریباً به سمت ۲،۵ تا $3,0 \times 10^9$ پاسکال و در این ناحیه مستقل از دما و زمان بارگذاری است یعنی $S=E$. تأثیر PI به خوبی توسط شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نشان داده شده است. قیر با PI بیشتر (+۵) (شکل ۱۵) در دما و زمان بارگذاری بیشتر به شکل قابل توجهی سخت‌تر است، یعنی حساسیت دمایی کمتری دارد.

شکل ۱۶ ارتباط را برای قیر با پن ۱۰۰ نشان می‌دهد. در یک‌زمان بارگذاری ۰,۰۲ ثانیه (معادل وسیله نقلیه با سرعت حدود ۵۰ کیلومتر بر ساعت) مدول سختی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً 10^7 پاسکال و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً 5×10^4 پاسکال است. در دماهای پایین مدول سختی بالاست و بنابراین تغییر شکل‌های دائمی اتفاق نمی‌افتد. به‌هرحال در دمای بالا یا زمان بارگذاری طولانی (ترافیک ساکن) مدول سختی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و در این شرایط، احتمالاً تغییر شکل دائمی سطح جاده خیلی بیشتر است.

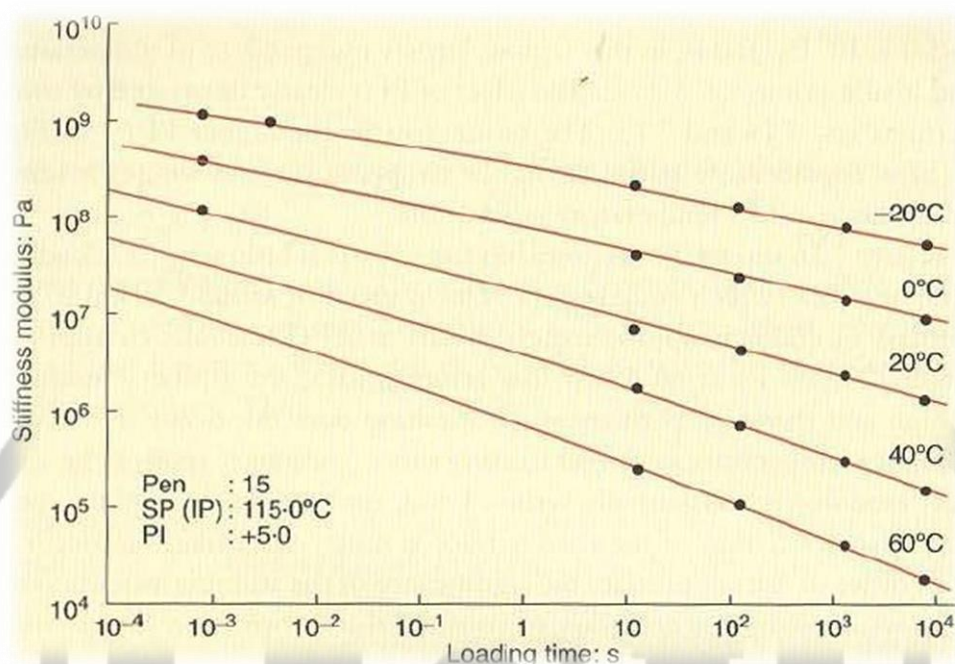
به‌منظور درک کامل اهمیت مدول سختی و اندازه‌گیری آن، لازم است تغییر شکل نمونه‌های جامد و مایع تحت فشار در نظر گرفته شود. سپس رفتار تغییر شکل مواد ویسکوز-الاستیک به دست خواهد آمد.

شکل ۱۴: تأثیر دما و زمان بارگذاری روی سختی قیر با PI کم

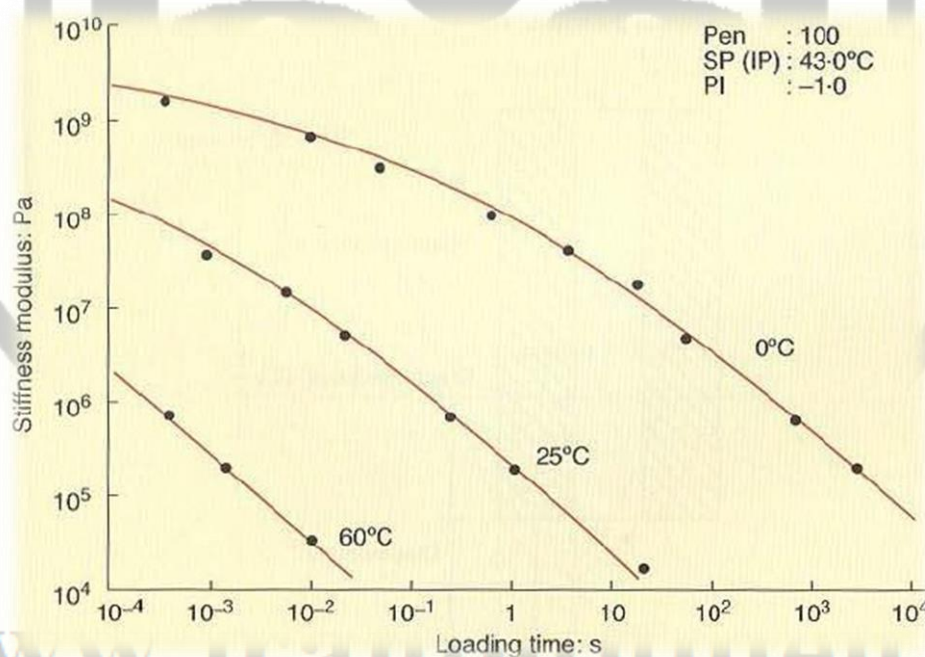


www.iranbitumen.co

شکل ۱۵: تأثیر دما و زمان بارگذاری روی سختی قیر ۱۱۵/۱۵



شکل ۱۶: تأثیر دما و زمان بارگذاری روی سختی قیر با پن ۱۰۰



۹. تشخیص مدول سختی قیر

همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است روش‌های استفاده شده برای اندازه‌گیری مدول سختی قیر بر اساس تغییر شکل برشی هستند. مقاومت به برش به عنوان مدول برشی G طبق معادله ۱۳ بیان می‌شود.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\text{shear stress}}{\text{shear strain}}$$

معادله ۱۳: مدول برشی

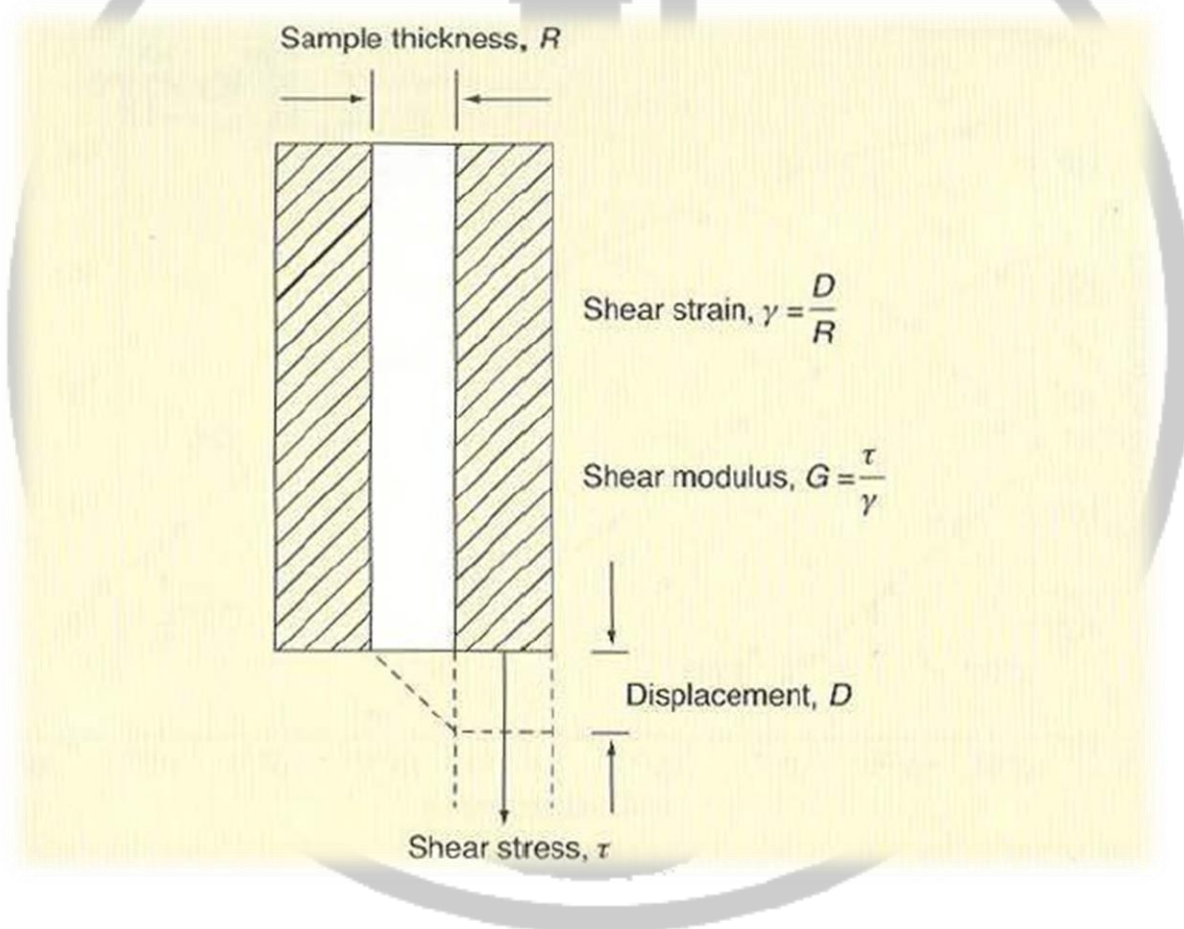
مدول الاستیک و مدول برشی به وسیله معادله ۱۴ با یکدیگر ارتباط دارند.

$$E = 2(1 + \mu)G$$

معادله ۱۴: مدول برشی

که μ برابر است با نسبت پواسون (Poisson's ratio). مقدار μ بستگی به تراکم پذیری مواد دارد و ممکن است برای قیرهای خالص تقریباً غیرتراکم پذیر برابر با ۰٫۵ فرض شود در صورتی که برای مخلوط‌های آسفالت باید مقدار کمتر از ۰٫۵ در نظر گرفته شود؛ بنابراین: $E \approx 3G$

شکل ۱۷: آزمون خزش در برش



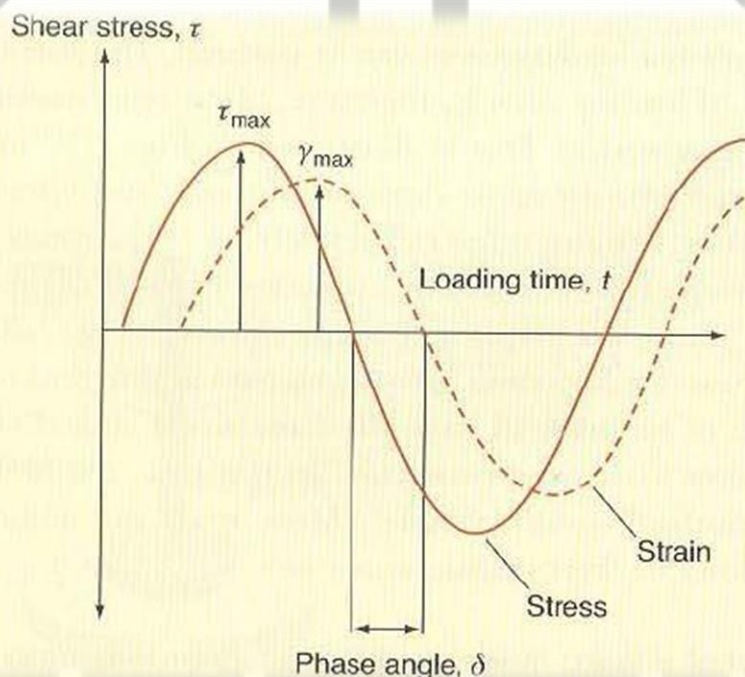
تنش برشی را می‌توان به صورت استاتیک در آزمون خزش و یا به صورت دینامیک به وسیله بکار بردن یک بار سینوسی تشخیص داد. در یک آزمون خزش، تنش برشی از ابتدای آزمون به کار برده می‌شود. تغییر شکل در زمان بارگذاری از حدود ۱ تا ۱۰^۵ ثانیه یا بیشتر می‌تواند اندازه گیری شود. در آزمون‌های دینامیک معمولاً تنش برشی به عنوان یک فشار متغیر سینوسی با دامنه و فرکانس ثابت به کار برده می‌شود. همچنین تغییر شکل مواد تحت آزمون به شکل سینوسی با فرکانس مشابه با فشار به کار رفته

تغییر می‌کند. این پدیده در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مدول‌های برش G_f در فرکانس f با استفاده از نسبت دامنه تنش برشی τ و کشش برشی γ به شکل معادله ۱۵ تعریف می‌شود:

$$G_f = \left(\frac{\tau}{\gamma} \right)_f \quad \text{معادله ۱۵: مدول برشی در فرکانس } f$$

در نتیجه مدول سختی تحت شرایط دینامیک می‌شود: $S_f = 3G_f$

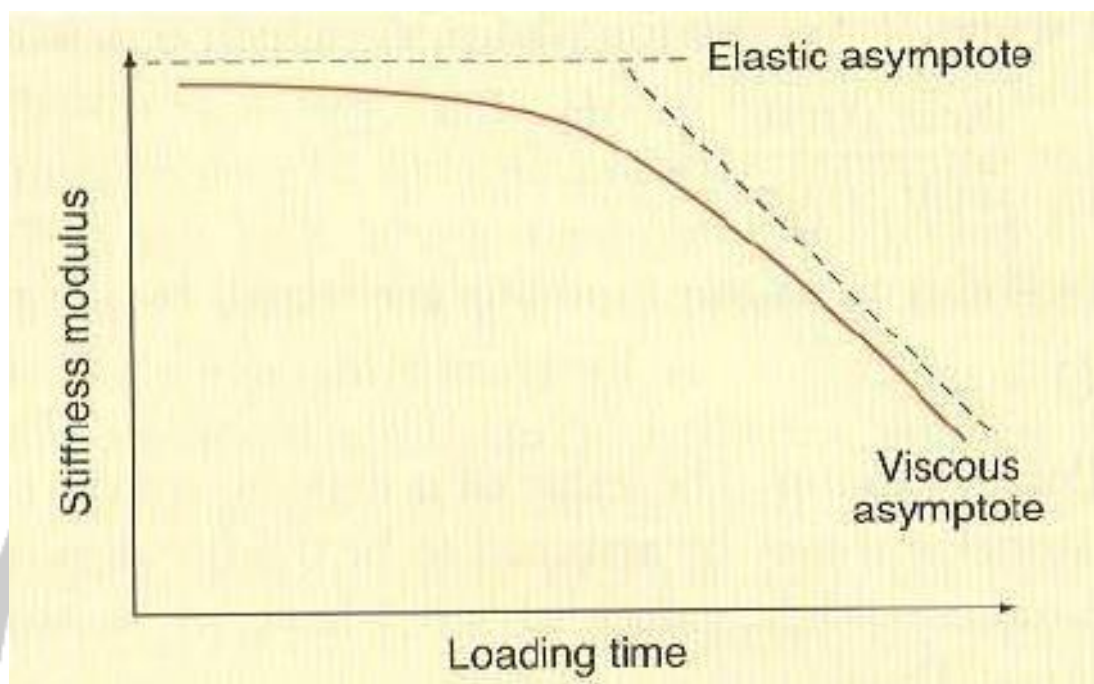
شکل ۱۸: یک آزمون دینامیک در برش



شکل ۱۸ زاویه فاز δ بین تنش برشی و کشش برشی را نشان می‌دهد. این زاویه فاز اندازه‌ای از درجه الاستیسیته قیر در شرایط آزمون ۱ است. موادی که به‌طور خالص الاستیک هستند هیچ تفاوت فازی بین برش و کشش نشان نمی‌دهند، در مقایسه با زاویه فاز ۹۰ درجه یا یک‌چهارم دایره برای مواد کاملاً ویسکوز. با یک ماده ویسکو-الاستیک مانند قیر زاویه فاز بین برش و کشش بین ۰ تا ۹۰ درجه است که به نوع و درجه قیر، دما و فرکانس بستگی دارد. درجه فاز کوچک در دماهای پایین و فرکانس بالا یافت می‌شود و برعکس، این مشاهدات اشاره دارد که تحت این شرایط قیر به ترتیب با رفتار الاستیک و ویسکوز تخمین زده می‌شود.

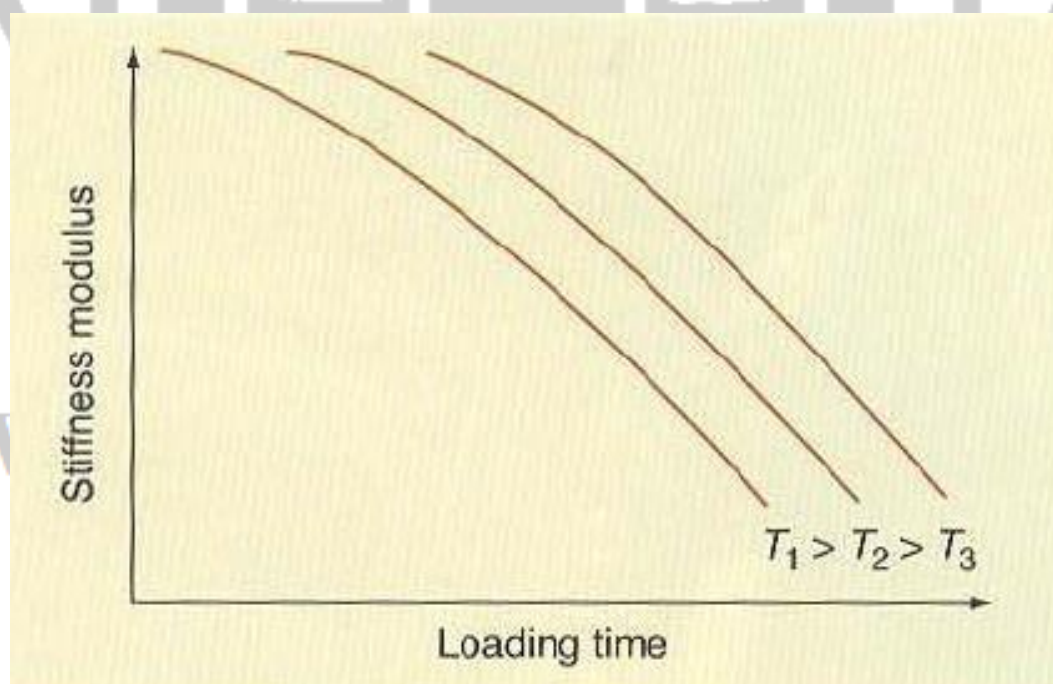
به وسیله ترکیب کردن آزمون‌های خزش و دینامیک یک محدوده قابل توجه از مدول و زمان بارگذاری به دست خواهد آمد. مدول‌های سختی به‌عنوان تابعی از زمان بارگذاری است بنابراین معمولاً در یک گراف با مقیاس لگاریتمی ارائه می‌شود. این امر در شکل ۱۹ نشان داده شده است که خطوط مماس تقریبی از پاسخ الاستیک و ویسکوزیته را به ترتیب در زمان بارگذاری کوتاه و بلند نشان می‌دهد.

شکل ۱۹: مدول‌های سختی به‌عنوان تابعی از زمان بارگذاری یا فرکانس



اندازه‌گیری سختی به‌عنوان تابعی از زمان بارگذاری در دماهای مختلف نموداری مانند شکل ۲۰ را نشان می‌دهد. ظاهراً منحنی‌های سختی بر اساس زمان بارگذاری به‌دست‌آمده در دماهای مختلف برای یک نوع قیر همگی شکل یکسان دارند و اگر در جهت نمودار زمان بارگذاری حرکت کند بر روی یکدیگر منطبق خواهد شد. در این شرایط گفته می‌شود قیر ترمورئولوژیکی ساده (thermorheologically simple) است. بیشتر قیرهای جاده و صنعتی از این دسته هستند.

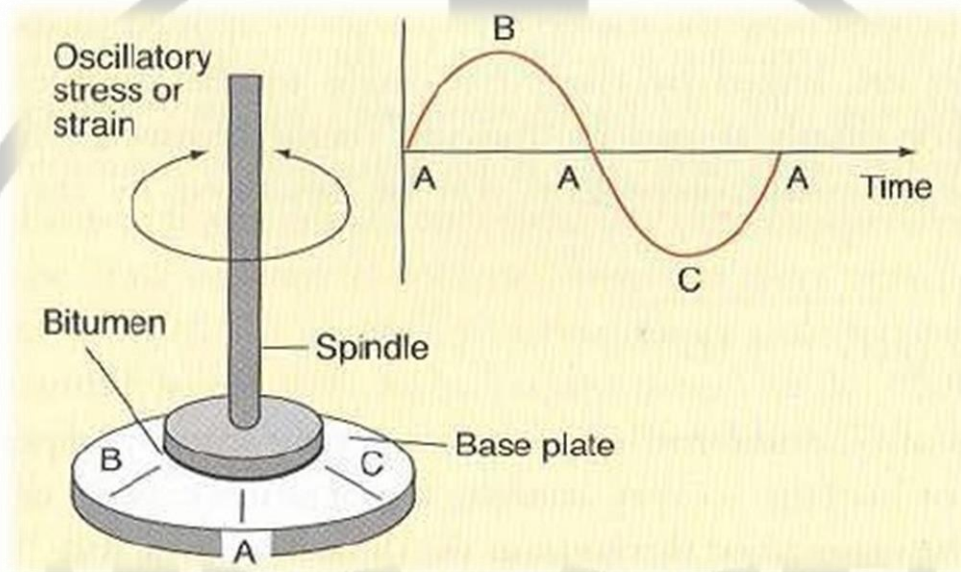
شکل ۲۰: مدول سختی به‌عنوان تابعی از زمان بارگذاری در دماهای مختلف



اندازه‌گیری مدول سختی: رئومتر برشی دینامیک

این آزمون یک نیروی برشی نوسانی را به نمونه قیر ساندویچ شده بین دو صفحه موازی وارد می‌کند. یک چیدمان معمول از رئومتر برشی دینامیک (DSRs) یک صفحه ثابت زیرین و یک صفحه بالایی نوسان کننده است که نیروی برشی را مطابق شکل ۲۱ به نمونه وارد می‌کند. (دستگاه در شکل ۲۲ نشان داده شده است).

شکل ۲۱: شماتیک DSR در حالت آزمون



شکل ۲۲: شکل دستگاه رئومتر برشی دینامیک

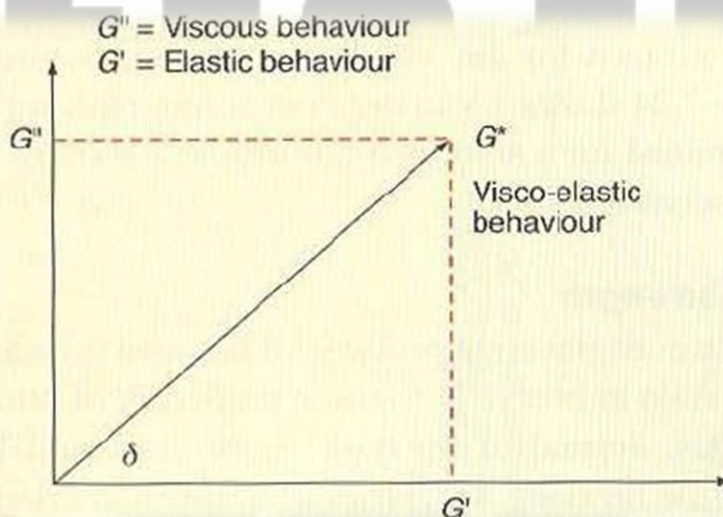


خط مرکزی صفحه بالایی که در شکل ۲۱ به وسیله نقطه A توصیف شده است به نقطه B حرکت می‌کند و سپس از طریق نقطه A به نقطه C رفته و مجدداً به نقطه A بازمی‌گردد، این حرکت یک سیکل می‌شود و این سیکل در طول آزمون تکرار می‌شود.

دو نوع دستگاه DSR فشار و کشش کنترل شده وجود دارد. در یک چیدمان فشار کنترل شده، به منظور ایجاد حرکت نوسانی بین نقاط B و C یک گشتاور ثابت به صفحه بالایی وارد می‌شود. چون سطح فشار بکار رفته ثابت است، فاصله حرکت صفحه در مسیر نوسانی خودش بین سیکل‌ها می‌تواند بسیار متفاوت باشد. در آزمون کشش کنترل شده، صفحه بالایی دقیقاً بین حداکثر دامنه فرکانس مشخص شده حرکت می‌کند و گشتاور لازم برای حفظ نوسان اندازه‌گیری می‌شود.

رئوترهای برشی دینامیک می‌توانند برای مشخص کردن هر دو رفتار الاستیک و ویسکوز قیر به وسیله اندازه‌گیری مدول برشی پیچیده G^* و زاویه فاز δ به دست آمده از یک آزمایش، استفاده شود. برای مواد ویسکو-الاستیک مانند قیر مدول برشی از یک قسمت Loss modulus (جزء ویسکوز G'') و یک قسمت storage modulus (جزء الاستیک G') تشکیل شده است. اندازه نسبی هر کدام تعیین می‌کند که مواد چگونه به بارهای بکار رفته پاسخ بدهد. دو قسمت به وسیله زاویه فاز به مدول پیچیده مرتبط می‌شوند که به سادگی به وسیله کشیدن پیکان در شکل ۲۳ می‌تواند نشان داده شود.

شکل ۲۳: رابطه بین G^* , G' , G'' و δ



از این رو اجزا مختلف می‌توانند به وسیله معادله ۱۶ توصیف شوند:

$$G^* = \sqrt{(G'')^2 + (G')^2} \quad \text{معادله ۱۶: رابطه بین } G^*, G', G''$$

مقدار G^* و δ برای قیر به دما و فرکانس بارگذاری وابسته است، بنابراین در طول آزمون نیاز است دمای نمونه به دقت کنترل شود. برای کنترل دما معمولاً از یک حمام سیال سیرکوله استفاده می‌کنند که از هرگونه افت دمایی ناشی از گسترش نمونه جلوگیری می‌کند.

در شرایط ترافیک و دمای نرمال جاده، قیر هر دو رفتار ویسکوز و الاستیک را نشان می‌دهد و نسبت پاسخ هر کدام با تغییر شرایط متفاوت خواهد بود. با مشخص کردن محدوده خطی ویسکو-الاستیک قیر می‌توان کارایی فرکانس رفت و برگشت در

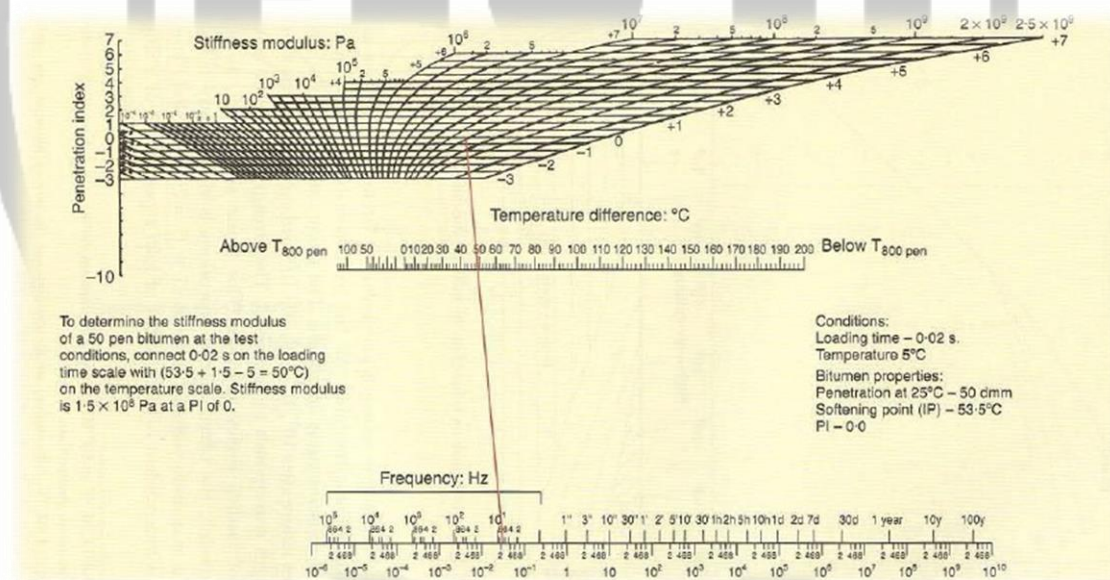
یک سری از دماهای مختلف برای ساختن منحنی کلی قیر مورد آزمون را بهبود داد. منحنی کلی G^* و δ را نشان می‌دهد و یک پروفیل رئولوژیک کامل از رفتار قیر در محدوده دمایی وسیعی را نشان می‌دهد.

آزمون DSR اطلاعات بنیادی از خصوصیات قیر را تهیه می‌کند که از چنین اطلاعاتی می‌توان به‌عنوان راهنما برای کارایی قیر در شرایط آزمون استفاده کرد.

پیش‌بینی مدول سختی

اگرچه اندازه‌گیری مستقیم مدول سختی امکان‌پذیر نیست، می‌توان آن را به‌وسیله نمودار Van der Poel پیش‌بینی کرد. Van der Poel نشان داد که دو قیر با PI مشابه در زمان بارگذاری یکسان، در دماهایی که با نقطه نرمی به یک مقدار متفاوت است، سختی برابری دارند. برای ۴۰ نمونه قیری که آزمایش شد، PI ها در بسیاری از دماها و فرکانس‌ها به‌وسیله آزمون دینامیک و خزشی از $+۶,۳$ تا $-۲,۳$ متغیر بود. با توجه به اطلاعات آزمون Van der Poel یک نمودار را تهیه کرد که فقط از نفوذ و نقطه نرمی استفاده می‌کند و می‌تواند مدول سختی قیر را برای هر شرایط دمایی و زمان بارگذاری با ضریب ۲ پیش‌بینی کند. شکل ۲۴ یک نمودار Van der Poel را نشان می‌دهد که مدول سختی را برای قیر $۶۰/۴۰$ در زمان بارگذاری $۰,۰۲$ ثانیه و دمای ۵ درجه سانتی‌گراد تشخیص می‌دهد.

شکل ۲۴: نمودار برای تشخیص مدول سختی قیر



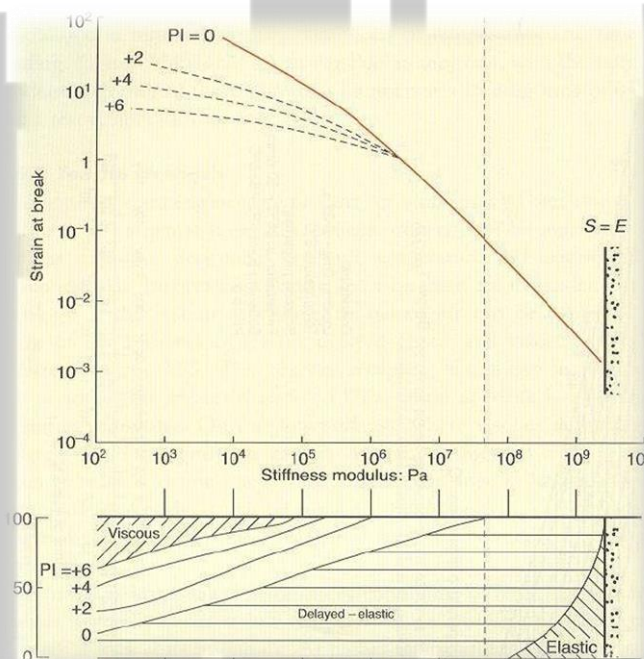
۱۰. استحکام کششی قیر

یکی دیگر از خواص مهم مهندسی قیر فشار شکست یا استحکام کششی قیر در هنگام شکست است. خواص کششی قیر مانند مدول‌های سختی به دما و زمان بارگذاری بستگی دارد. فرض می‌شود خواص شکست قیر به رئولوژی آن در شکست سریع وابسته است. خواص آن‌ها می‌تواند به لحاظ مقادیر الاستیک، الاستیک تأخیری و مقاومت ویسکوز به صورتی که در شکل ۲۵ نشان داده شده است بیان شود.

این فرض بالا را تأیید می‌کند که در سختی بیشتر از 5×10^5 پاسکال، کشش در نقطه شکست تابعی از مدول‌های سختی است. فقط در سختی‌های کم، جایی که تغییر شکل ویسکوز زیاد است شاخص نفوذ یک عامل مهم است. در سختی زیاد $S=E$ است. همان‌طور که کشش در نقطه شکست به‌عنوان نسبت بین تغییر در طول و طول هم‌زمان است، می‌تواند با کشیدگی برابر باشد؛ یعنی تا زمانی که افزایش در طول کم باشد، افزایش در طول به‌وسیله طول اولیه مشتق شده است.

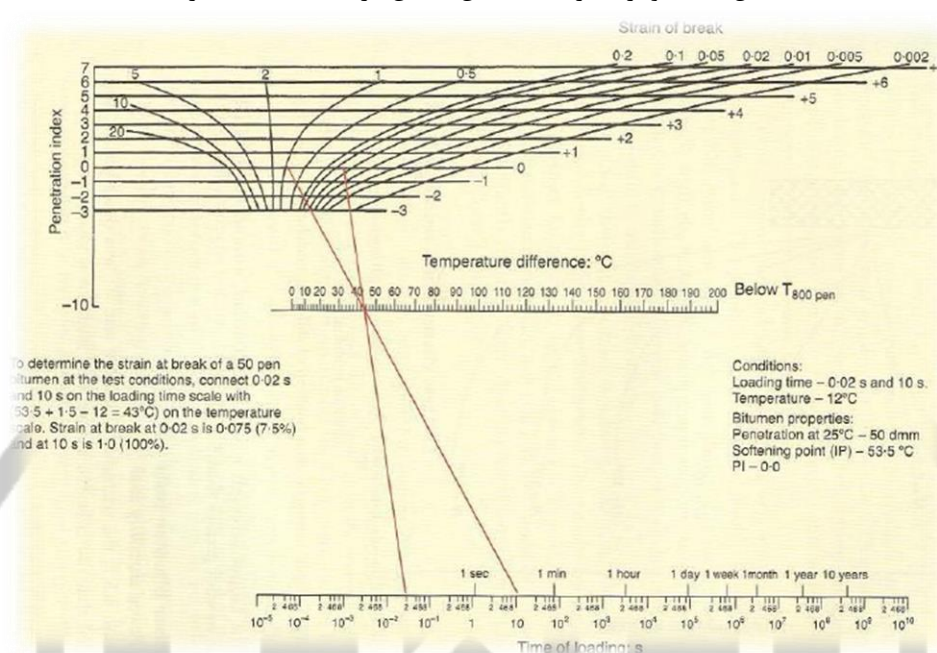
در عمل، شکست در شرایط فشار زیاد اتفاق می‌افتد. به‌طور معمول فشار زیاد در دمای پایین اتفاق می‌افتد، یعنی در سختی زیاد. سپس کشش بعد از شکست در حداقل خودش است. در دماهای بالا، یعنی مدول سختی کم در حضور بار مشابه شکست مشاهده نمی‌شود ولی تغییر شکل اتفاق می‌افتد.

شکل ۲۵: کشش در نقطه شکست به‌عنوان تابعی از مدول‌های سختی و شاخص نفوذ



کشش در نقطه شکست می‌تواند به‌وسیله نمودار Heukelom شکل ۲۶ پیش‌بینی شود که از نمودار Van der Poel مشتق شده است. در مثال، کشش در نقطه شکست قیر با یک نقطه نرمی (PI) ۵۳٫۵ درجه سانتی‌گراد و شاخص نفوذ (PI) صفر در ۱۲ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. در زمان بارگذاری ۰٫۰۲ ثانیه، کشش در نقطه شکست ۷٫۵ درصد است و در زمان بارگذاری ۱۰ ثانیه صد درصد است.

شکل ۲۶: نمودار برای تشخیص کشش در نقطه شکست قیر



۱۱. استحکام خستگی قیر

مانند بسیاری دیگر از مواد، استحکام قیر می‌تواند با تکرار بارگذاری کاهش یابد، یعنی خسته شود. این پدیده در شکل ۲۷ نشان داده شده است، جایی که منحنی استحکام خستگی و استحکام شکست به صورت تابعی از مدول‌های سختی نشان داده شده است. همه آزمون‌ها به وسیله خمش در دامنه فشار ثابت انجام شده است. استحکام خستگی فشاری است که بعد از 10^3 ، 10^4 ، 10^5 و 10^6 سیکل بارگذاری باعث شکست می‌شود در صورتی که مقاومت شکست مربوط به یک سیکل است. استحکام با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری کاهش می‌یابد. این شکل نشان می‌دهد که در مدول سختی زیاد اثر تکرار بارگذاری به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و در مدول سختی ماکزیمم ($S = E = 2.7 \times 10^9 \text{ pa}$) مقاومت خستگی مستقل از تعداد تکرار بارگذاری است. برای یک خم تک، مقاومت خستگی تقریباً ثابت و حدود 4×10^6 پاسکال برای مدول سختی بزرگ‌تر از 5×10^7 پاسکال است.

۱۲. سایر آزمون‌های قیر

آزمون کشش (انعطاف پذیری)

قدرت انسجام قیر به وسیله انعطاف پذیری (Ductility) آن در دمای پایین مطابق شکل ۲۸ مشخص می‌شود. در این آزمون قیر در حمام آب غوطه‌ور می‌شود و با یک سرعت ثابت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه کشیده می‌شود تا شکافته شود. فاصله‌ای که نمونه‌ها قبل از شکافته شدن کشیده می‌شوند را تحت عنوان انعطاف پذیری (Ductility) گزارش می‌کنند. دمای این آزمون بر اساس درجه نفوذ قیر مورد آزمایش تنظیم می‌شود. به عنوان مثال ۱۰ درجه سانتی‌گراد برای قیر ۸۰/۱۰۰ و ۱۳ درجه سانتی‌گراد برای قیر

۶۰/۷۰ و ۱۷ درجه سانتی‌گراد برای قیر ۴۰/۵۰ تحت این شرایط آزمون برای قیرهای با قدرت پیوستگی متفاوت، کاربرد دارد.

آزمون قدرت کشش

آزمون سنتی کشش (ductility test) بیان می‌کند که قدرت چسبندگی قیر به وسیله کشش در دمای پایین مشخص می‌شود. یک نمونه آزمون اروپایی به نام آزمون قدرت کشش (force ductility test) گسترش داده شده است.

فرآیند بسیار شبیه روش سنتی است. نمونه‌های قیر تحت آزمون به شکل دمبل درآمده و در حمام آب غوطه‌ور می‌شوند و با یک نرخ ثابت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه کشیده می‌شوند تا شکافته بشوند. فاصله‌ای که نمونه‌ها قبل از شکافته شدن طی می‌کنند به عنوان کشش گزارش می‌شود. دمای آزمون با توجه به نفوذ قیر تحت آزمون تعیین می‌شود. در چنین شرایطی آزمون بین قیرهای با قدرت چسبندگی متفاوت تبعیض قائل می‌شود.

به هر حال، بعضی قیرهای استاندارد در مقادیر زیاد کشش رشته‌های باریکی را تشکیل می‌دهند. این باعث ایجاد انحراف در نتایج آزمون می‌شود از آنجایی که قدرت چسبندگی در واقع صفر است. نشان داده شده است که اصلاح قیر با الاستومرها باعث ایجاد رشته‌های نازک‌تری در آزمون کشش می‌شود و اشاره به چسبندگی بیشتر در این بایندها در مقایسه با قیرهای اصلاح نشده دارد.

برای تعیین مقدار این اثر، نیروی مورد نیاز برای کشیدن نمونه قیر در فاز اندازه‌گیری ثبت می‌شود. محاسبه مساحت زیر تابع نیرو-فاصله انرژی چسبندگی را بیان می‌کند. مطابق شکل ۲۹ قیرهای نفوذی و اصلاح شده با پلیمر منحنی‌های نیرو-کشش کاملاً متفاوتی را ارائه می‌دهد.

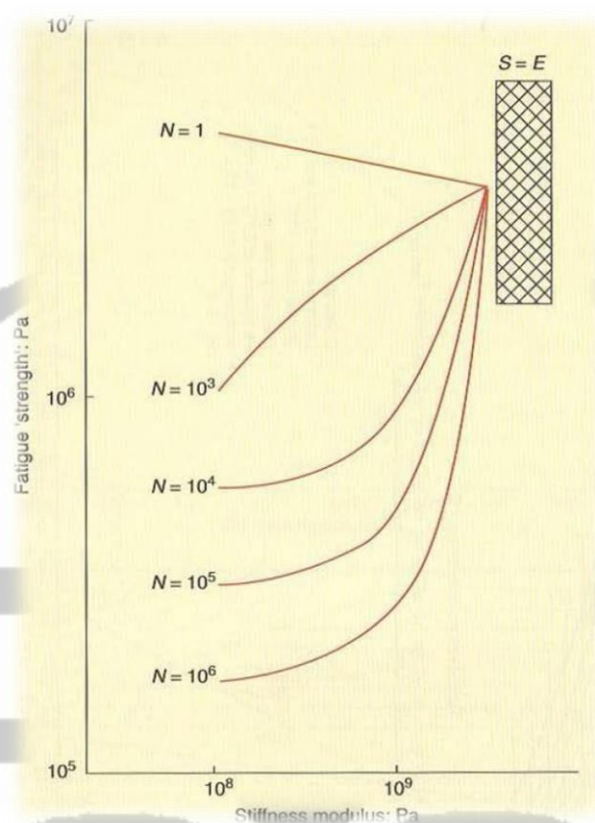
آزمون چقرمگی و سختی

امولسیون‌های قیر پلیمری اصلاح شده برای پوشش دهی سطح در سال‌های ۱۹۸۰ و اوایل ۱۹۹۰ کاربردهای مهمی در انگلستان پیدا کردند. در آن زمان، روش‌های آزمایشگاهی کمی برای پیش‌بینی کارایی احتمالی این بایندها در محل استفاده وجود داشت.

توسعه آزمون چقرمگی و سختی (toughness and tenacity) صنایع را قادر ساخت تا نه تنها تمایز کمی بین قیرهای اصلاح شده پلیمری و قیر اصلاح شده را به دست آورند، بلکه تمایز کمی بین قیرهای با سطوح و نوع اصلاح کننده متفاوت را نیز محاسبه کنند؛ بنابراین این آزمون یکی از اولین آزمون‌های مهم در اسناد مناقصه برنامه‌های پوشش دهی اولیه سطح است.

یک آزمون شامل فرآیند کشیدن یک قطعه با سر کروی نیمه غوطه‌ور درون نمونه قیر از پیش آماده شده که می‌تواند قیر بازیافت شده از امولسیون و یا نمونه قبل امولسیون باشد در سرعت و دمای ثابت توسعه یافته و با استفاده از آن یک نمودار بارگذاری-گسترش ثبت شده است که به وسیله ناحیه‌های زیر این نمودار کار انجام شده محاسبه می‌شود.

شکل ۲۷: مقاومت خستگی به عنوان تابعی از مدول سختی



شکل ۲۸: آزمون کشش قیر

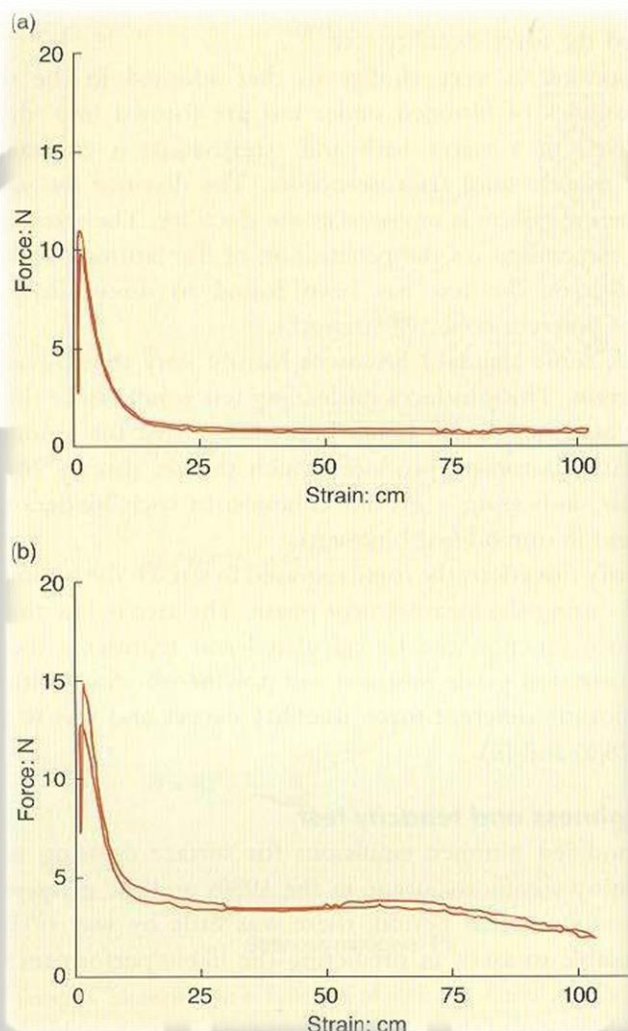


www.iranbitumen.co

در اصل، منحنی به دو قسمت تقسیم می‌شود که دو حالت از رفتار قیر را تعریف می‌کند. پیک اولیه نتیجه قرارگیری قیر تحت تأثیر نیروی کشش را نشان می‌دهد. این قسمت از منحنی ابتدا مربوط به رفتار قیر پایه است و در نواحی کمی زیر منحنی نتیجه می‌دهد. قسمت دوم نمودار رفتار الاستومری قیر را منعکس می‌کند و به سطح و نوع اصلاح‌کننده پلیمری بستگی دارد. این سهم منحنی ممکن است یک افزایش

ثانویه در نیرو روی یک گسترش طولانی را نشان دهد، به‌طور کلی افزایش گسترش اولیه به‌منظور شکست، باعث افزایش ناحیه زیر منحنی می‌شود.

شکل ۲۹: منحنی نیرو-کشش برای a: قیر نفوذی و b: قیر اصلاح‌شده با پلیمر



چقرمگی به‌عنوان ناحیه زیر کل منحنی تعریف می‌شود یعنی کل کار انجام‌شده در حذف قسمت آزمون از نمونه، درحالی‌که سختی به‌وسیله ناحیه زیر منحنی بعد از اینکه سهم قیر حذف شد ارائه می‌شود.

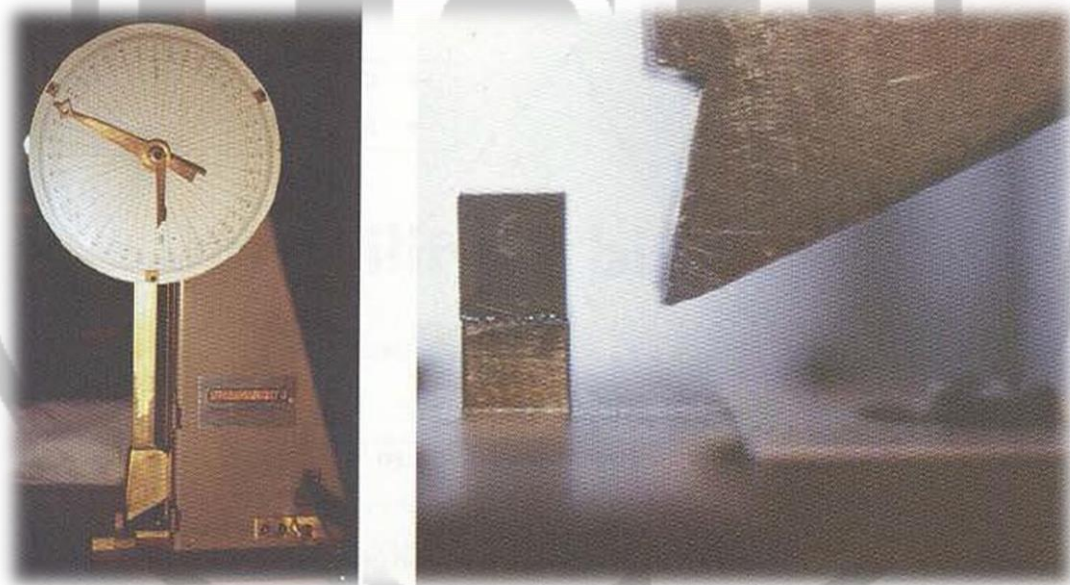
در سال ۱۹۹۴ این روش به شکل رسمی وارد انجمن نفت (روش‌های استاندارد برای آنالیز و آزمون نفت و محصولات وابسته) شد و به‌عنوان یک روش پیشنهادی PM/BQ۹۴ در آن سطح باقی ماند. این روش محبوبیت خود را در اواخر سال‌های ۱۹۹۰ به دو دلیل عمده در بین طیف وسیع صنایع میانی از دست داد: اول، ارتباط بین کارایی واقعی و پیش‌بینی‌شده برای بایندره‌های پوشش سطح اثبات نشد و دوم، به‌سختی می‌شد نتایج تجدید پذیر (reproducibility) بین آزمایشگاه‌های مختلف به دست آورد. آزمون‌های دیگر مانند پیوستگی Vialit و DSR محبوبیت پیدا کردند. در نتیجه آزمون چقرمگی و سختی از اسناد مناقصه‌ها در اواخر ۱۹۹۰ حذف شد.

پیوستگی Vialit

آزمون پاندول Vialit درجه چسبندگی بین یک دانه و قیر را وقتی تحت تأثیر ضربه شدید قرار می‌گیرند بررسی می‌کند. و سیله موردنیاز برای انجام دادن این آزمون در شکل ۳۰ نشان داده شده است. فرایند شامل قرار دادن لایه نازکی از قیر بین دو مکعب و اندازه‌گیری نیروی موردنیاز برای حذف مکعب بالایی است. در مواقعی که دانه به‌طور مستقیم در تماس فشار ترافیک است برای مثال در پوشش دهی سطح و چپینگ در سطوح آسفالت داغ این آزمون بسیار مهم است. بیشترین انرژی ضربه معمولاً به‌طور قابل توجهی به‌وسیله اصلاح با پلیمر افزایش می‌یابد. همانطور که بیشترین انرژی در محدوده دمایی مختلف در شکل ۳۱ نشان داده شده است.

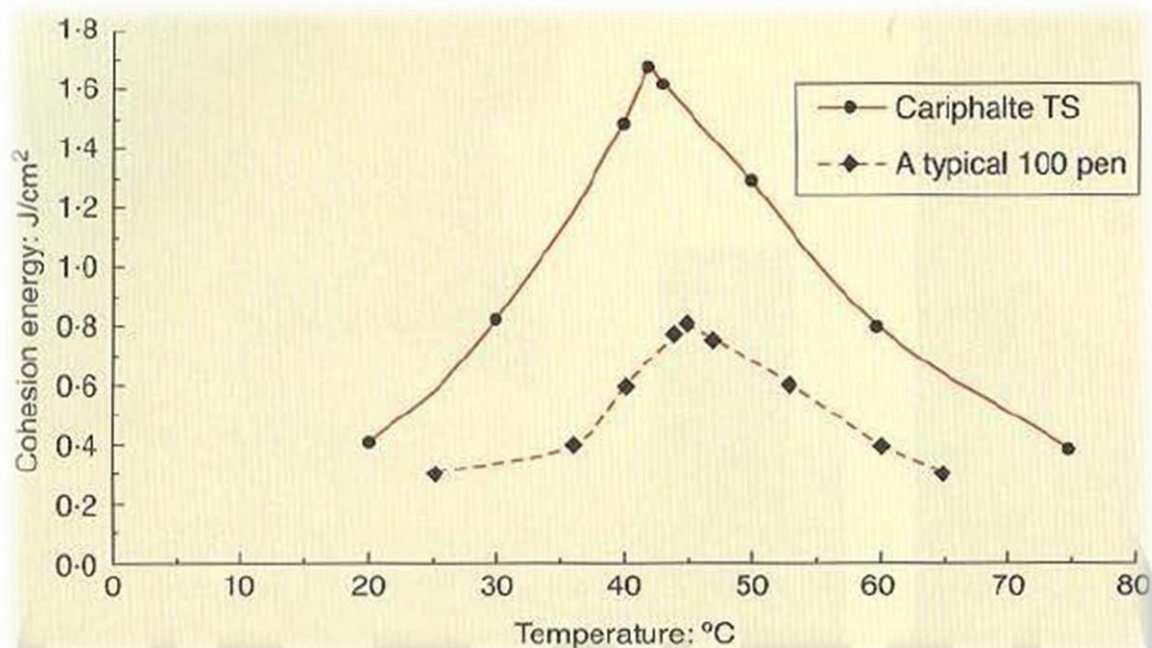
به‌علاوه این آزمون می‌تواند برای بررسی تأثیر متغیرهای مختلف در درجه پیوستگی مانند مقدار و نوع غبار، رطوبت، نوع بایندر، عوامل چسبندگی و غیره.

شکل ۳۰: آزمایش پاندول Vialit



www.iranbitumen.co

شکل ۳۱: مقایسه منحنی‌های پیوستگی برای قیر نفوذی و قیر اصلاح‌شده با پلیمر



www.iranbitumen.co

شرکت فیدار یکی از اعضای اتحادیه صادرکنندگان نفت، گاز و مواد پتروشیمی است و تحت نظارت اتاق بازرگانی ایران فعالیت می‌نماید. گروه فیدار در ابتدا فعالیت خود را از سال هزار و سیصد و هفتاد و هفت و تحت عنوان شرکت فیدار ثنا شروع کرد و در طی سال‌های گذشته و با کسب تجربیات فراوان متخصصین گروه فیدار گام‌های بلندی در زمینه صادرات قیر به سراسر جهان برداشتند؛ و گروه فیدار به وسیله استفاده از امکانات مدرن بسته‌بندی قیر موجود در کارخانه فیدار اصفهان توانسته به یکی از بزرگ‌ترین و مطرح‌ترین صادرکنندگان قیر ایران در عرصه بین‌الملل تبدیل بشود. ارائه خدمات متنوع در زمینه صادرات مواد نفتی و بخصوص قیر از جمله استفاده از بسته‌بندی بشکه فلزی و پلی‌بگ و همچنین اظهار کالا در گمرکات باعث شده تا نام فیدار به عنوان یک نام معتبر در بازار بین‌المللی تلقی گردد.



آدرس: دفتر مرکزی تهران - خیابان آفریقا نرسیده به مدرسه مجتمع اداری الهیه پلاک ۲۴۴ طبقه هفتم واحد ۷۰۸

تلفن: ۹-۲۶۲۱۳۰۶۸ - ۷-۲۶۲۱۲۹۳۶