مقاله مروری

فصلنامه علمی
سال هفتم، شماره ۳، پیاپی ۲۷، پاییز ۱۴۰۱
Vol. 7, No. 3, Issue No. 27
Autumn 2022, Quarterly
صفحه ۶۵-۵۳

Iran Polymer Technology: Research and Development

تحلیل و بازنگرشی بر روش‌شناسیِ مدل‌های ریاضی، به‌منظور پیش‌بینی طول‌عمر قطعات لاستیکی به‌ویژه در درزگیرهایِ لوله‌هایِ پلاستیکی

علی عباسیان[1]، سیدحمیدرضا صباغی[2*]

۱ تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، عضو هیئت علمی

۲ تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر

چکیده ...

رویکرد مدل WLF به‌منظور پیش‌بینی طول‌عمر کارایی بسپار، زمانی که بسپار تحت پدیده پیرش (Ageing) فیزیکی-مکانیکی است یا به عبارتی تحلیل فرسایش فیزیکی به علت رخداد فرایندهای گرانروکشسان (Visco-Elastic) مانند واهلش تنش (Stress Relaxation)، بسیار مناسب واقع شده است. در این مدل با استفاده از اصل انطباق زمان-دما و انجام آزمون واهلش تنش، از طریق ضریب جابجایی (Shift Factor) طول‌عمر بسپار پیش‌بینی خواهد شد. اما از آن طرف، هنگامی که فرایندها و سازوکارهای فیزیکی-شیمیایی در بسپار غالب است و هدف آن است که کارایی قطعه در مدت زمان‌های طولانی‌تری بررسی شود، رویکرد مدل Arrhenius به طور گسترده جهت تحلیل و بررسی پیش‌بینی طول‌عمر بسپار با انجام آزمون پیرش شتاب‌یافته (Accelerated Aging Test) صورت می‌پذیرد. در این گزارش جمع‌بندی روش‌های پیش‌بینی طول‌عمر کارایی بسپارها به‌خصوص لاستیک‌ها در کاربرد «درزگیر» با استفاده از دو مدل ریاضی WLF و Arrhenius در آزمون واهلش‌تنش آورده شده است. کاربرد اصلی هدف این گزارش پیش‌بینی طول عمر آب‌بندهای لاستیکی لوله‌های پلاستیکی در کاربردهای مختلف است.

واژه‌های کلیدی:

واهلش تنش،
اصل انطباق زمان-دما،
پدیده‌ی تباهی شیمیایی،
آزمون پیرش شتاب‌یافته،
پیش‌بینی طول عمر

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
hamidrezasab@gmail.com

۱ مقدمه

در تولید قطعات لاستیکی برای کاربردهای صنعتی همیشه این پرسش هست که طول عمر محصولات لاستیکی در کاربردهای موردنظر چقدر دوام خواهند داشت؟ به طورکلی طول‌عمر درزگیرها و واشرهای لاستیکی وابسته به برهم‌کنش بسپار با محیط اطراف (دما، فشار و عوامل شیمیایی، ازون و پرتو فرابنفش) و نیز تغییرات مشخصه‌های ذاتی لاستیک با گذشت زمان است [۱]. انتظار می‌رود که طول عمر لوله‌های پلاستیکی در کاربردهای زیرساختی بیش از ۱۰۰ سال باشد. طبیعتاً درزگیرهای لاستیکی هم که برای آب‌بندی این لوله‌ها در صنعت آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند مطلوب است که چنین عمری داشته باشند یا حداقل تفاوت عمرشان تغییر مهمی در فرایند نگه‌داری لوله به لحاظ هزینه و زمان ایجاد نکند. از این رو لازم است قبل از نصب، همگی درزگیرهای ساخته شده در برابر شرایط محیطی ذکر شده عمر قابل قبولی داشته باشند. قبل از اتصال درزگیر با لوله، طول عمر و کارایی درزگیر باید مطابق با استانداردهای مناسب و دستورالعمل‌های سازنده مشخص شود. با توجه به طیف وسیعی از سازوکارهای وادادگی احتمالی برای مواد لاستیکی باید اطمینان یافت که درزگیرها در طول عمر لوله تحت تأثیر هیچ یک از سازوکارهای وادادگی وا نمی‌دهند. تجربه تا به امروز نشان داده است که، درزگیر لوله‌ها باید طوری طراحی و تولید شوند که بعد از اعمال نیروی فشاری، حداقل تا ۵۰ سال دچار وادادگی نشوند؛ و همچنین نیز انتظار کارایی مفید آن‌ها تا ۱۰۰ سال از ناحیه صنعت‌گر انتظار غیرمعقولی نخواهد بود [۲]. از آن‌جا که کوچکترین نقص در درزگیرها منجر به اختلال در عملکرد و عمر کارایی لوله‌ها می‌شود؛ بنابراین، پیش‌بینی طول‌عمر یک فراورده لاستیکی، در مرحله‌ی طراحی، از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً قطعات لاستیکی در طی مدت‌زمان کارایی و خدمات‌دهی‌شان، در معرض یک یا حتی چندین عامل تخریب و وادادگی قرار می‌گیرند. در جدول ۱ به شماری از این عوامل به تفکیک اشاره شده است.

به طورکلی بحث ماندگاری درزگیرهای لاستیکی توسط بسیاری از استانداردهای مختلف بررسی شده است و به عنوان نمونه در گزارشی که در پیش‌گفتار استاندارد استرالیا AS1646-2007، حلقه‌های اتصال لاستیکی برای کاربردهای تأمین آب، فاضلاب و زه‌کشی آمده است داریم:

"سوابق موجود نشان می‌دهد تعداد زیادی از درزگیرهای لاستیکی مورد استفاده در تأسیسات آب‌رسانی تا ۱۰۰ سال خدمات عالی ارائه داده‌اند. با این حال، عمر برخی از حلقه‌های لاستیکی در خطوط لوله و فاضلاب به‌خاطر حمله‌های میکروبی و باکتریایی به میزان کمتری گزارش شده است. (به طورکلی درزگیر لوله‌های آب و فاضلاب در معرض حملات میکروبی و عوامل میکروب‌شناختی هستند، درزگیرهای NR بیشتر در معرض این حملات هستند و این عوامل از عمر کارایی این لاستیک‌ها می‌کاهند و باعث تخریب آن‌ها خواهند شد. مشاهدات نشان می‌دهد که این اتفاق پس از مهاجرت پاداکسنده‌ها اتفاق می‌افتد. استاندارد ISO 846 مقاومت پلاستیک‌ها را در برابر باکتری‌ها و میکروب‌ها بررسی می‌کند و می‌توان این استاندارد را به لاستیک‌ها هم تعمیم داد. اما استاندارد انگلیسی BS 7874، تخریب میکروبی لاستیک‌های حلقه‌ای (O-ring) اتصالات لوله را بررسی کرده است. اما در کل بررسی عوامل میکروب‌شناختی روی قطعات بسپاری در بلندمدت کار آسانی نیست [۱].) بنابراین باید تشخیص داده شود هنگامی که حلقه‌های لاستیکی یا درزگیرها برای استفاده در جایی که حملات ریزجانداران (Micro-organism) بسیار است در نظر گرفته می‌شوند، روش پیش‌بینی خاصی ممکن است لازم باشد تا بتوان عدم تاثیر این باکتری‌ها بر لاستیک را تضمین کند. تحقیقات بعدی نشان داد که حملات زیست‌شناختی فقط در درزگیرهای لاستیک طبیعی NR مشاهده شده است و بیشتر این وادادگی‌ها پس از مهاجرت و تخلیه پاداکسنده‌ها اتفاق می‌افتد. به همین خاطر از سال ۱۹۷۰، غلظت حداقلی از ترکیب به‌خصوص پاداکسنده‌ها برای خدمات‌دهی بهتر درزگیرهای آب و فاضلاب مشخص شده است تا درزگیرهای NR ساخته شده با ترکیب غلظتی پاداکسنده‌ها بتوانند در برابر حملات زیست‌شناختی ماندگار باشند. همچنین شواهد نشان می‌دهند که با اعمال این مهم طول عمر مورد انتظار درزگیرها مانند آنچه که در استاندارد سال ۲۰۰۷ آمده است (۱۰۰ سال) همچنان معتبر است.

با توجه به موارد جدول ۱ عوامل موثر بر عمر قطعات لاستیکی و تخریب آن‌ها شناخته شده است، در این مقاله پیش از ورود به مبحث چگونگی پیش‌بینی طول‌عمر و کارایی مورد انتظار درزگیرها، به احتمالات و موارد مختلف که منجر به وادادگی (Failure) درزگیرهای لاستیکی می‌شوند، در بخش ۱-۱ اشاره خواهد شد. اما نتیجه‌ای که از جدول ۱ برای کاربرد درزگیر لاستیکی لوله‌های آب می‌توان گرفت به شرح زیر است:

– تأثیر ریزجانداران: بررسی درازمدت ممکن نیست و در کوتاه مدت فقط برای کائوچوی طبیعی تأثیر دارد.

تأثیر رطوبت: برای کائوچوهای غیرقطبی متداول تأثیرگذار نیست.

– عوامل شیمیایی: از آن‌جا که لاستیک‌ها، بسپارهایی هستند که توسط افزودنی‌های شیمیایی پخت می‌شوند و از طریق

جدول ۱ عوامل تخریب احتمالی قطعات لاستیکی که در کاربردهای مختلف مشاهده شده است [۲].

عوامل	تأثیر یا طریقه‌ی پیرش	توضیح
دما	گرما-اکسایش، مهاجرت افزودنی‌ها، اتصالات‌عرضی	دمای کم (زیر دمای‌محیط) به معنای واقعی، عامل تخریب محسوب نمی‌شود و تنها اثرات فیزیکی موقتی را روی خواصی نظیر سفتی، شکنندگی، و بازیابی از کرنش نشان می‌دهد. اما دمای زیاد تخریب اکسایشی و شیمیایی لاستیک را به همراه خواهد داشت.
حمله ازون	عامل محیطی	بسیاری از لاستیک‌ها در معرض حمله ازون قرار دارند اگرچه برخی مانند EPDM از خود مقاومتی نشان می‌دهند. آزمون مقاومت ازونی درزگیرها تحت استاندارد AS1646 می‌تواند بررسی شود. درزگیر لوله‌های نصب شده، به ویژه آن‌هایی که در کاربردهای زیرزمینی هستند در معرض حملات ازونی نیستند.
نور	اکسایش-نوری	نور شامل تابش فراتر از محدوده‌ی مرئی، به ویژه در بازه‌ی فرابنفش UV است. موج کوتاه UV مضرترین عامل نوری برای بسپارها است، اما طول‌موج‌های بلندتر ممکن است بر رنگ‌دانه‌ها تاثیر بگذارد و منجر به افزایش دما شود.
تابش یونشی (Ionising Radiation)	اکسایش-رادیویی، اتصالات عرضی	تابش و پرتوهای یونشی شامل اشعه‌های X، گاما و ذرات مختلف زیراتمی دیگر است. معمولا این عامل فقط در کاربردهای خاص و ویژه مشاهده می‌شود.
رطوبت	آب‌کافت (Hydrolysis، به فرایند گسسته شدن یک مولکول در واکنش با آب گفته می‌شود.)	رطوبت می‌تواند در بسیاری از مواد منجر به آب‌کافت و در نتیجه نرم‌شدگی ماده شود.
سیال‌ها (گازها، مایعات، بخارها)	تخریب شیمیایی، تورم، خروج افزودنی‌ها، ترک‌خوردگی	سیال‌ها طیف وسیعی از مواد شیمیایی را در حالت گاز یا مایع شامل می‌شوند و از طرق مختلف با لاستیک در تماس هستند. سیال‌ها ممکن است جذب یا استخراج شوند و منجر به تورم و یا تأثیرات شیمیایی شوند.
ریز-جانداران	تجزیه، حمله‌ی مکانیکی	آسیب‌های ناشی از ریزجانداران به طورکلی ناچیز است، اما درزگیرهای لاستیکی لوله‌های فاضلاب مستعد حملات اینچنینی بوده و باید مقاومت آن‌ها بررسی شود.
تنش مکانیکی	خستگی، خزش، واهلش تنش، مانایی، سایش، وادادگی چسبی	تمامی موارد بالا در قالب عوامل محیطی بوده و عموما در خواص فیزیکی لاستیک تاثیرگذارند. اما این عواملِ حاضر که همگی یک تنش در آن‌ها اعمال شده است، افت خواص فیزیکی را در گذشت زمان تسریع می‌کنند.
تنش الکتریکی	گسیختگی موضعی	در کاربردهای مخصوص برقی، اختلاف ولتاژ منجر به بروز تنش‌های الکتریکی در داخل ماده عایق می‌شود.

عوامل پخت در بین زنجیره‌های آن‌ها اتصالات عرضی شکل می‌گیرد، با گذشت زمان در اثر عوامل محیطی زنجیره‌های بسپار می‌شکنند. در اثر این عوامل زنجیره‌های بسپار دچار پدیده‌ی واهلش می‌شوند که این پدیده می‌تواند مستقیماً بر روی خواص مکانیکی لاستیک اثر منفی بگذارد. لاستیک‌ها به طور کلی مقاومت خوبی در برابر طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی نشان می‌دهند اما برخی از لاستیک‌ها ممکن است به‌خاطر کاربردهای فاضلابی مستعد حمله برخی مواد شیمیایی باشند و در برابر این مواد آسیب‌پذیر باشند. با این حال، از آن جا که مساحتِ سطحی از درزگیرها که به لوله متصل است بسیار کوچک است تأثیرات این عوامل می‌تواند حداقل باشد. تا این لحظه گزارشی در مقالات که مستقیماً لاستیک به‌خاطر عوامل شیمیایی دچار وادادگی شده باشد موجود نیست (بجز کاربردهای فاضلاب) [۲]. در مورد لوله‌های آب و فاضلاب نصب‌شده در زمین آلوده احتمال وادادگی درزگیر ممکن است و باید به‌منظور جلوگیری از آن ناحیه اتصال درزگیر با لوله را با پوششی محافظت کرد.

– جذب روغن: لاستیک‌ها در تمامی انواع مختلفشان، طیف گسترده‌ای از پاسخ به روغن‌ها را نشان می‌دهند. ارزیابی پاسخ و واکنش یک پلیمر به روغن، کاملاً به خود بستر پلیمر و افزودنی‌های مورد استفاده در آمیزه و نوع روغن بستگی دارد. معمولاً در بیشتر موارد بسپار با جذب روغن از خود واکنش نشان می‌دهد، این جذب منجر می‌شود که لاستیک (بسپار)

متورم شده و خواص مکانیکی آن افت کند. انتظار نمی‌رود که درزگیر لوله‌های آب که در معرض روغن هستند از طریق سازوکار تورم دچار وادادگی شوند، اما درزگیر لوله‌های فاضلاب نمی‌توانند طولانی مدت در معرض روغن باشند. به‌طورکلی برای کاربردهایی که مقاومت در برابر جذب روغن بسیار مهم است و درزگیر لوله باید کاملاً نسبت به روغن مقاوم باشد؛ درزگیر لاستیکی از جنس نیتریل می‌تواند مفید واقع شود و البته بهتر است که روی درزگیر با پوششی ضدروغن باز پوشانده شود که روغن نفوذ نکند؛ وگرنه از عمر درزگیر به شدت می‌کاهد [۳].

– تأثیر جریان الکتریکی و تابش یونشی که برای لوله‌های آب و فاضلاب تأثیرگذار نیست.

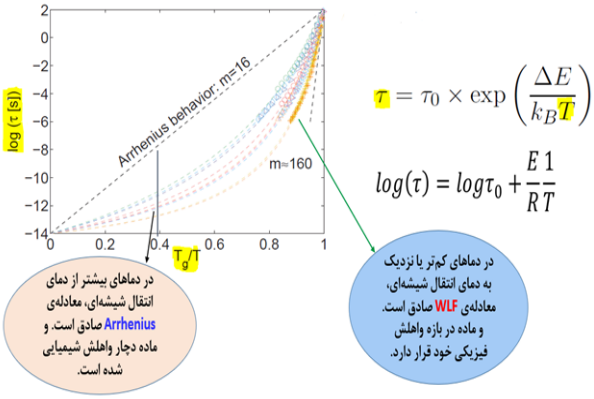
از این رو مطالعه‌ی حاضر با توجه به اهمیت تنش‌های مکانیکی و دما و نور، با معرفی دو مدل پیش‌بینی طول‌عمر فراورده‌های لاستیکی (مدل آرنیوسی–مدل WLF) به بررسی عمر کارآمد آن‌ها خواهد پرداخت. در ادامه جهت پیش‌بینی طول‌عمر درزگیرهای لاستیکی در بخش ۱–۲ به این مهم اشاره می‌شود که در کاربرد درزگیرهای لاستیکی مهم‌ترین عامل در جهت وادادگی لاستیک‌ها پدیده گرانروکشسان «واهلش تنش» است. اصل انطباق زمان–دما به کمک معادله WLF جهت واهلش فیزیکی، و رویکرد آرنیوسی به کمک معادله Arrhe-nius جهت واهلش شیمیایی است (موضوع واهلش فیزیکی یا شیمیایی در بخش ۱–۲ و ۱–۶ بحث شده است).

یکی دیگر از روش‌های ریاضی برای پیش‌بینی طول‌عمر قطعات بسپاری، حل معادلات گرانروکشسان در لاستیک‌ها است که برپایه‌ی مدل‌های پدیده گرانروکشسان (Viscoelastic Phenomena) بنا شده‌اند [۴]؛ از جمله پرکاربردترین روش‌ها برای حل این نوع معادلات استفاده از روش اجزای محدود یا FEM است. پدیده گرانروکشسانی یا Viscoelasticity (ویژگی یا خاصیت ذاتی مواد لاستیکی و پلاستیکی است که زنجیره‌های بسپار، تحت اعمال نیرو دچار تغییرشکل (Deformation) و حرکت می‌شوند.) رفتار وابسته–به زمان (Rate-Dependent) است که در مواد بسپاری بیشتر در دو نوع پدیده‌ی «واهلش تنش Stress Relaxation» و «خزش Creep» خود را نشان می‌دهد. واهلش تنش عبارت است از افت تنش اعمالی با گذشت زمان تحت کرنش ثابت در حالی که خزش، ناشی از افزایش کرنش قطعه بسپاری تحت تنش ثابت است. هر دو نوع این پدیده‌ها در کاربردهای مختلف مواد بسپاری می‌توانند در میزان کارایی و خدمت‌دهی قطعه اثرگذار باشند؛ آزمون واهلش تنش فشاری می‌تواند طول‌عمر پیرش درزگیرهای لاستیکی را بررسی کند، در حالی که خزش در تغییر شکل درزگیر و به تبع آن توزیع تنش در درون درزگیر اثرگذار است [۵]. یکی از روش‌های پرکاربرد به‌منظور تخمین طول‌عمر درزگیرهای لاستیکی روش یا تحلیل اجزای محدود غیرخطی با استفاده از معادلات گرانروکشسان [۵] از طریق نرم‌افزارهایی مانند Abaqus است. تحلیل اجزای محدود مدل‌سازی یا به عبارت دقیق‌تر شبیه‌سازی سطح‌مقطع‌های ساده و حتی پیچیده درزگیر را فراهم می‌آورد و از همین رو برای برآورد و پیش‌بینی تغییرات توزیع تنش در درون هندسه پیچیده درزگیر و تأثیر این نیروها بر کارایی درزگیر کاملاً مفید واقع شده است. در مدل‌های اجزای محدود سطح درزگیر و تمامی وجه‌های آن باید کاملاً صاف و بدون اعوجاج فرض شود و مهم‌ترین ویژگی یا مشخصه کلیدی به‌منظور مدل‌سازی دقیق طول‌عمر درزگیر ایستا (Static Seal) داده‌های موادی (Material Data) لاستیک است [۵]. اگرچه که بسیاری از کارشناسان در عمل اجزاهای به‌خصوصی را بر روی درزگیر مدل کرده‌اند، اما هنوز هیچ‌کس نتوانسته است که مدل اجزای محدود یکپارچه و همگون بر روی هندسه درزگیر اعمال کند تا کاملاً بتواند عمر درزگیر را شبیه‌سازی کند از همین رو این روش تاکنون استفاده‌ی صنعتی برای پیش‌بینی طول عمر ندارد.

۱–۱ فرایندهای واهلش

هنگامی که کرنشی ثابت به نمونه‌ای لاستیکی تحمیل می‌شود، نیرویی که برای نگه‌داشتن لاستیک در آن کرنش مشخص اعمال شده است با گذشت زمان کاهش می‌یابد و این پدیده واهلش تنش نام دارد. به طور کلی علت پدیده واهلش تنش می‌تواند ایجاد فرایندهای فیزیکی یا شیمیایی در بستر لاستیک باشد و حتی گاهی در شرایط معمول هر دو این فرایندها به‌صورت هم‌زمان مشاهده شده است. با این وجود، همان‌طور که بعداً مشخص خواهد شد (شکل ۱) در دماهای کم یا بازه‌های زمانی کوتاه (منظور زمان کار نمونه است و با زمان واهلش اشتباه نشود!)، فرایندهای فیزیکی بیشتر بر پدیده‌ی واهلش تنش غالب است؛ در حالی که در بازه‌های زمانی بلندمدت یا دماهای زیاد فرایندهای شیمیایی بر پدیده‌ی واهلش تنش تأثیرگذار است [۶]. پدیده‌ی واهلش تنش می‌تواند در سه آزمون مختلف اعم از فشاری، کششی و برشی بررسی شود که از این بین، آزمون فشاری بیشترین اهمیت را در تخمین طول‌عمر واشرها و درزگیرهای لاستیکی در صنعت لوله و اتصالات دارا است. برای شفاف شدن بروز واهلش شیمیایی و فیزیکی در پدیده‌ی واهلش تنش هر دو این فرایندها به‌صورت مجزا بحث خواهد شد:

الف) فرایند واهلش فیزیکی: واهلش فیزیکی دربردارنده‌ی



شکل ۱ با توجه به شکل، صادق بودن مدل WLF و Arrhenius براساس دمای انتقال شیشه‌ای نشان داده شده است [۴].

بازجهت‌یافتگی (Reorientation) مولکول‌های لاستیک تحت کرنش، همراه با بازآرایی گوریدگی‌های (Entanglements) زنجیر تحت نیرو است که این بازیابی و مقاومت زنجیره‌ها در برابر کرنش اعمال شده جهت حفظ حالت اولیه خود، به‌صورت حرکت‌های زنجیره آزاد نمایان خواهد شد. بعلاوه، در لاستیک‌های پرشده این واهلش به‌صورت شکستن پیوندها بخاطر نیروهای واندروالس بین ذره‌های پرکننده (شبکه پرکننده)، یا شکستن پیوندها بین زنجیر و پرکننده (برهم‌کنش بسپار–پرکننده) مشاهده شده است. واهلش فیزیکی به دمای مورد استفاده و تحرک زنجیرها وابسته است. نزدیکی دمای کار (Service Temperature) به دمای انتقال شیشه‌ای لاستیک، معمولاً مهم‌ترین عامل برای غالب بودن یا نبودن واهلش فیزیکی است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. همچنین چگالی اتصالات عرضی لاستیک بر آهنگ واهلش تأثیرگذار است و هرچه میزان اتصالات عرضی لاستیک بیشتر باشد واهلش فیزیکی دیرتر رخ خواهد داد.

ب) واهلش شیمیایی: در دماهای زیاد و بازه‌های زمانی بلندمدت، فرایند واهلش شیمیایی کاملاً بر واهلش فیزیکی غالب است؛ چه سازوکارهایی که منجر به واهلش شیمیایی می‌شود عبارتند از واکنش‌های گرمایی و گرما–اکسایشی زنجیره‌های بسپار که در واقع گسستگی اتصالات لاستیک را در پی دارد. گسستگی زنجیره‌ها، چگالی رشته‌های شبکه (Network Strands) را کاهش می‌دهد و این مهم منجر به ایجاد زنجیره‌های جدید با انتهای آزاد مختلف خواهد شد [۶] که خروجی آن افت تنش ذخیره شده درون ماده است که در نهایت منجر به وادادن قطعه‌ی ساخته شده می‌شود.

۱–۲ بررسی احتمال و پتانسیل وادادگی لاستیک‌ها

ترک‌زایی تنشی محیطی: مواد بسپاری معمولاً هنگامی که تحت تنش کششی ثابت هستند، در مجاورت مواد شیمیایی دچار ترک‌خوردگی می‌شوند. ترکیب عوامل محیطی–شیمیایی و تنش کششی منجر به ترک‌زایی در لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها خواهد شد. از آن‌جایی که درزگیر لوله‌های پلاستیکی اغلب اوقات تحت تنش فشاری هستند تا کششی (موارد ۷ و ۸)، بنابراین این پدیده رخ نخواهد داد.

مانایی فشاری: مانایی فشاری مشخصه‌ای از لاستیک‌ها است و عبارت است از میزان کرنش دائمی باقی‌مانده در نمونه پس از حذف نیرو. هنگامی که لاستیک برای مدت زمانی مشخص بین دو صفحه موازی فشرده می‌شود، پس از حذف اعمال فشار مقدار بازیابی آن ارزیابی خواهد شد. این آزمون نسبتاً کوتاه‌مدتی است (نمونه معمولاً به‌مدت ۳ روز تحت فشار قرار می‌گیرد) و می‌تواند در شرایط محیطی مختلف انجام شود. مانایی فشاری مانند آزمون واهلش تنش نیست؛ چراکه در آزمون مانایی فشاری لاستیک به میزان بسیار بیشتری نسبت به نیروی اولیه‌اش فشرده می‌شود، در حالی که در آزمون واهلش تنش این طور نیست؛ البته اگر تمام خواص دیگر بدون تغییر باشند [۷]. به همین دلیل باید این نکته را خاطرنشان کرد که در کاربردِ درزگیرِ لاستیکیِ لوله‌هایِ پلاستیکی، از آن‌جا که درزگیرها برای اتصال با لوله هیچ‌گاه در مقادیر زیاد فشرده نمی‌شوند (بیشتر از ۶۰ درصد) و همچنین میزان افت نیرو در پدیده‌ی واهلش تنش بسیار کندتر از پدیده‌ی مانایی فشاری است؛ از همین رو آزمون مانایی فشاری جهت تحلیل وادادگی درزگیرها در کاربرد لوله‌های پلاستیکی مناسب نبوده و نیاز به تحلیل آزمون واهلش تنش است [۸] [۶]. اما در کل هرچه میزان جهندگی لاستیک زیاد باشد یا به عبارتی مانایی فشاری آن کم باشد، برای کاربردهای درزگیری و اتصالات لوله بسیار مناسب است و دیرتر منجر به وادادگی لاستیک خواهد شد.

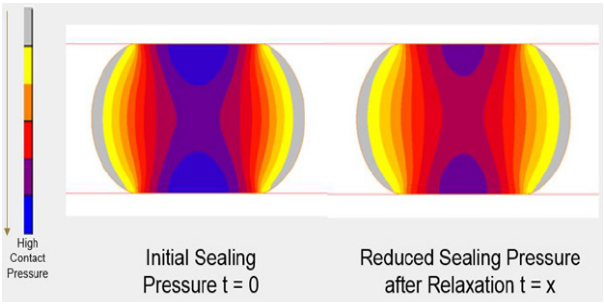
واهلش تنش Stress Relaxation: از بین موارد گفته‌شده یکی از مهم‌ترین عوامل در بررسی زمان کارایی قطعات لاستیکی آزمون واهلش تنش است، در این جا به توضیح و بررسی نحوه پیش‌بینی طول‌عمر درزگیرها توسط آزمون واهلش تنش خواهیم پرداخت.

الف) توصیف: هنگامی که لاستیکی بین دو سطح فشرده می‌شود مانند آن چیزی که در اتصالات لوله است، لاستیک در برابر دو سطح از خود مقاومت نیرویی بروز می‌دهد. حال لاستیک به‌خاطر خصوصیات گرانروکشسانی‌اش (Viscoelasticity) کاهش این نیرو با گذشت زمان را نشان خواهد داد.

ب) پتانسیل وادادگی: واهلش تنش لاستیک یا به عبارتی این پدیده گرانروکشسان که وابسته به زمان است (Rate Dependent)، نباید باعث ایجاد مشکل در ناحیه اتصالات درزگیرها در لوله‌های فشاری شود. طراحی اتصالاتِ لوله‌هایِ پلاستیکی به‌شکلی است که فشار آب در داخل لولهِ باعث افزایش فشار فصل‌مشترک بین لوله و درزگیر خواهد شد. همچنین فشار خود آب در درون لوله به ایجاد آب‌بندی کمک می‌کند. اما در مورد اتصالات لوله‌های غیرفشاری، نحوه طراحی اتصال و انتخاب ماده هم مهم است و بر خصوصیات واهلش تنش لاستیک تأثیرگذار است. به همین علت در کاربرد لوله‌های غیرفشاری، باید از آمیزه‌های لاستیکی‌ای استفاده شود که از میزان قابل قبولی واهلش تنش برخوردار باشند؛ و همچنین فشار اولیه‌ی زیادی بین درزگیر و لوله وجود داشته باشد و این فشار در کوتاه‌مدت بسیار سریع افت پیدا نکند. اگرچه پدیده‌ی واهلش به مرور رخ می‌دهد اما به‌خاطر زیاد بودن فشار اولیه این پدیده کندتر رخ خواهد داد. دو روش مهم برای پیش‌بینی طول‌عمر درزگیرها با استفاده از آزمون واهلش تنش روش Arrhenius و WLF است.

همان‌طور که مشاهدات نشان داده است به طورکلی در کاربرد درزگیرهای لوله‌های پلاستیکی، هنگامی که نیروی آب‌بندی (Sealing Force) بر واحد سطح (که به آن فشار تماسی (Contact Pressure) هم اطلاق می‌شود) از فشار سامانه در ابتدا آب‌بندی درزگیر کمتر باشد (نیروی فشاری اولیه به میزان ۶۰ درصد افت پیدا کند)، عموماً شاهد نشتی از درزگیر لوله پلاستیکی خواهیم بود [۵]. شبیه‌سازی و اعمال مدل‌هایی نظیر WLF و Arrhenius، برآورد و تخمین بسیار خوبی برای پیش‌بینی این موضوع که درزگیر در کاربرد موردنظر در چه زمانی به میزان افت نیروی آب‌بندی اولیه‌اش به میزان ۶۰ درصد خواهد رسید و دچار نشتی و وادادگی خواهد شد، می‌دهد. درنتیجه برای کاربرد درزگیرهای ایستا (Static Seals) لوله‌های پلاستیکی مهم‌ترین پدیده تأثیرگذار در بحث نشتی و خرابی درزگیر، واهلش فشاری یا Compressive Relaxation است که عموماً دلیل اصلی وادادگی درزگیرها محسوب خواهد شد. این مهم در شکل ۲ و همچنین شکل ۳ قابل مشاهده است.

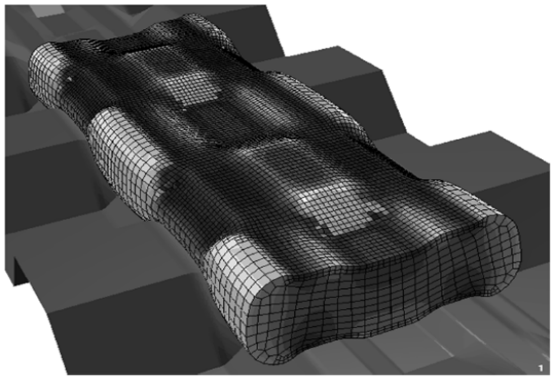
معمولاً برای انجام آزمون واهلش تنش، این آزمون تحت حالت فشاری و پیوسته صورت می‌پذیرد (Continuous Compression Stress Relaxation). به‌عنوان نمونه دستگاه لازم در آزمون واهلش پیوسته فشاری با نام «Elastocon- EB 02 Relaxation Tester» است که در شکل ۴ قابل مشاهده است. این دستگاه نیروی وارد از نمونه را به‌طور پیوسته اندازه‌گیری



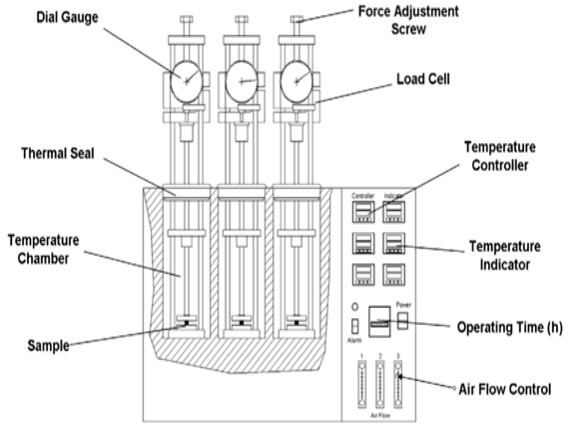
شکل ۲ این نمودار توسط تحلیل اجزای محدود ابرکشسان دوبعدی (2-D hyperelastic FEA) برای درزگیر حلقوی به‌دست آمده است. سمت چپ درزگیر در حالت ابتدایی نصب قرار دارد و دارای بیشترین میزان فشار تماسی یا همان نیروی آب‌بندی است، و درزگیر سمت راست بعد از گذشت زمان به‌خاطر پدیده‌ی واهلش تنش دچار افت فشار تماسی شده است [۷].

می‌کند. نمونه بین دو صفحه‌ی پهن فلزی (Platen) قرار گرفته و تا میزان کرنش ثابت فشرده می‌شود. صفحه‌ی فلزی بالایی به یک باطری بار (Load Cell) متصل است که میزان بار را بر روی رایانه نشان می‌دهد [۹].

مدل آرنیوسی برپایه برون‌یابی نتیجه‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از پیرشدگی شتاب‌یافته فراورده استوار است. در ابتدا براساس استانداردهای ISO-188 [۱۰] و ASTM-D573 به پیرش شتاب‌یافته لاستیک پرداخته و سپس، روند پیرشدگی آهنگ فروکاهی خواص به‌صورت تابعی از زمان و شرایط پیرسازی تعیین خواهد شد. درنهایت، با توسعه‌ی مدل ریاضی بر پایه‌ی مدل Arrhenius، به تخمین مدت زمان مورد نیاز به‌منظور دستیابی به درصد مشخصی از پیرشدگی در شرایط تعدیل یافته نسبت به شرایط واقعی پرداخته خواهد شد. قبل از وارد شدن به این مهم، ابتدا فرایندهای واهلش (Relaxation



شکل ۳ نمودار توزیع تنش تحلیل اجزای محدود ابرکشسان ۳ بعدی برای یک قطعه واشر (Gasket) [۵].



شکل۴ دستگاه Elastocon EB ۰۲، مورد استفاده در آزمون واهلش تنش فشاری پیوسته یا CSR [۹].

Process) توضیح داده خواهد شد؛ چرا که دانستن فرایندهای واهلش و تفکیک سازوکار وادادگی آن‌ها به‌طور مشخص از اهمیت بسزایی در جهت تخمین و پیش‌بینی طول‌عمر لاستیک خواهد داشت.

۱–۳ استانداردهای لازم برای انتخاب ماده موردنظر و بررسی خواص آنی درزگیرهای لاستیکی:

طبیعتاً قبل از برآورد طول عمر هر قطعه‌ای لازم است در آزمون‌های آنی مشخص کرد که آیا در زمان حاضر درزگیر مورد نظر خواص مورد نظر را دارد یا خیر تا بعد به بررسی خواص آن در دراز مدت پرداخته شود که در ادامه توضیح داده می‌شوند:

یکی از استانداردهای اولیه برای اتصالات حلقه‌های لاستیکی در کاربرد آب و فاضلاب به تاریخ ۱۹۵۵ بازمی‌گردد (BS 2494). استاندارد ASTM F477 به‌طور ویژه برای کاربرد درزگیرها و اتصالات لاستیکی لوله‌های پلاستیکی در تاریخ ۱۹۷۶، و به دنبال آن ISO 4633 در ۱۹۸۴ و EN 681 در ۱۹۹۶ تدوین شده‌اند. همگی این استانداردها دقیقاً به استانداردهای موادی و خواص فیزیکی آنی [۱۱] لاستیک مورد استفاده در صنعت آب و فاضلاب اشاره دارند که چندی از آن‌ها را می‌توان نام برد:

- سختی
- سفتی
- استحکام کششی
- کشامد در نقطه شکست
- مانایی فشاری
- واهلش تنش
- مقاومت ازونی
- تغییرات حجم لاستیک در تماس با آب
- بازیابی لاستیک تحت کرنش
- و...

۱–۴ اساس روش‌شناختی مدل WLF و Arrhenius

قاعده و اساس روش پیش‌بینی طول‌عمر، شامل تسریع در روند تغییر خاصیت فیزیکی (تغییر خواص در بازه کوتاه‌مدت) یا شیمیایی (تغییر خواص در بازه بلندمدت) مواد است. این عمل از طریق افزایش دما برای شبیه‌سازی حالت طولانی‌مدت زمانی (اصل انطباق زمان–دما) به منظور پیش‌بینی کارایی قطعه با اندازه‌گیری خاصیت مربوطه (به‌عنوان مثال میزان آستانه افت نیرو در آزمون واهلش تنش، در حالت گرمایی است [۱۲]. رویه‌های آزمایشی مبتنی بر مدل‌های سینتیکی شناخته‌شده (به‌خصوص معادله‌ی Arrhenius) این امکان را فراهم می‌سازد تا هم‌ارزی مشخصی بین دما و زمان برقرار شود، به عبارت دیگر اساس این دو روش برپایه‌ی این است که تغییر خاصیت مورد نظر را از طریق دو پارامتر مهم یعنی دما و زمان بررسی نمایند. مزیت این دو مدل در این است که می‌تواند تغییرات فیزیکی یا شیمیایی ماده را در بازه‌های زمانی طولانی‌تری از انجام آزمایش‌های عملی و تجربی فراهم سازند [۱۱].

۱–۵ انتخاب روش

هنگامی که پدیده‌های گرانروکشسان فرایند غالب در بسپار است (مانند خزش، واهلش تنش و ...)، ماده در حالت جامد است و از همین رو در ابتدای امر دچار وادادگی فیزیکی می‌شود، و مدل WLF تطابق بسیار عالی برای پیش‌بینی طول‌عمر مواد داشته است. اما در فرسودگی‌های بلندمدت که از هم گسستگی زنجیرهای بسپار اتفاق می‌افتد و علاوه‌بر وادادگی فیزیکی، وادادگی شیمیایی را هم به دنبال خواهد داشت از مدل Arrhenius برای پیش‌بینی پیرش شیمیایی استفاده خواهد شد. زیرا هنگامی که ماده در حالت جامد قرار دارد و در حال سپری کردن واهلش فیزیکی است (همچنان گسستگی زنجیر اتفاق نیفتاده است) از نظر فیزیکِ مولکولیِ بسپارها، دمای کارکرد بسپار در محیط (T) بسیار کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای‌اش (T_g) است؛ یا به عبارتی نسبت T_g به T مطابق معادله زمان واهلش بسپارها به یک نزدیک‌تر است و قطعه به سمت پیرش فیزیکی نزدیک‌تر می‌شود. بر همین اساس هنگامی که بسپار در دمای ثابت و کاربرد مشخص به علت گذشت بیش از حد زمان، دچار گسستگی زنجیر می‌شود، کاملا وا می‌دهد؛ از همین منظر می‌بایست این حالت را مانند حالتی که دمای کارکرد بسپار،

بسیار بیشتر از دمای انتقال شیشه‌ای‌اش است شبیه‌سازی کرد. در نتیجه وقتی $T>>T_g$ است ماده در حال واهلش شیمیایی است و به سمت پیرش شیمیایی می‌رود. برای درک بهتر تفاوت بین پیرش فیزیکی و پیرش شیمیایی به شکل ۱ توجه کنید.

۱-۶ فرایند پیرش (Ageing)، آزمون‌های شتاب‌یافته

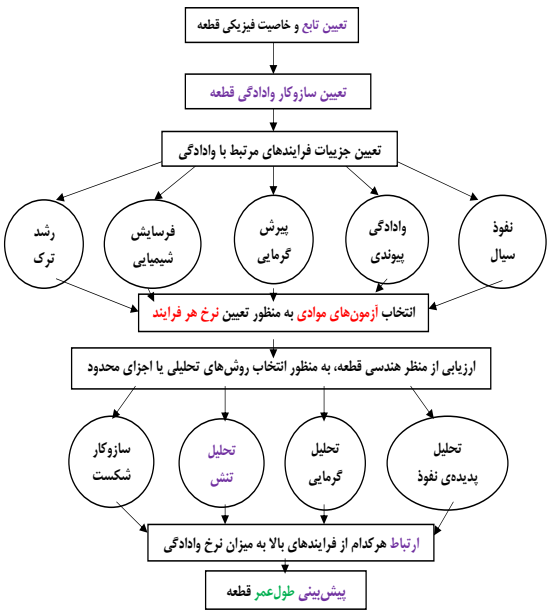
بسیار حائز اهمیت است که در طول عمر کاری، اتصالات لاستیکی مورد استفاده در لوله‌های پلاستیکی کاملاً آب‌بندی شده باشند. عامل اساسی برای دستیابی به این مهم، این است که قطعه لاستیکی بتواند مشخصات فیزیکی خودش را در بازه‌های زمانی بلند مدت کاملاً حفظ کند یا حداقل از سطح قابل انتظار پایین‌تر نیاید. و این‌ها همگی مستلزم آن است که این خواص در بلند مدت پیش‌بینی شود [۱۲].

به طور کلی فرایند پیرشدگی یک قطعه عبارت است از تغییرات مشخصات فیزیکی آن مانند: کشامد در نقطه شکست، سختی، استحکام شکست، افت نیرو، مانایی فشاری و بررسی دمای انتقال شیشه‌ای و ... با گذشت زمان! [۱۳] در عمل هم از منظر هزینه و هم با در نظرگرفتن خود عامل زمان، غیرممکن است که بتوان با فراهم کردن روند عملیاتی آزمون در یک آزمایشگاه، پاسخ این مشخصات فیزیکی را در بلندمدت پیش‌بینی کرد! به همین علت، ابزار ریاضی مورد نیاز است که بتوان با استفاده از آن‌ها این خواص فیزیکی را در بلندمدت پیش‌بینی کرد، به روند انجام چنین آزمون‌هایی با استفاده از ابزار ریاضی آزمون‌های شتاب‌یافته می‌گویند. در ادامه به توضیح بیشتر دو مدلی که برای پیش‌بینی عمر قطعات لاستیکی استفاده می‌شود می‌پردازیم:

- اصل انطباق زمان-دما با استفاده از معادله Williams-Landel-Ferry یا (WLF)
- معادله Arrhenius

۲ روش استفاده از معادلات WLF و Arrhenius برای تخمین رفتار بلندمدت مواد بسپاری

به‌منظور تخمین طول‌عمر لاستیک، استفاده از نوعی روش برون‌یابی برای اندازه‌گیری داده‌های شتاب‌یافته ضروری است. برون‌یابی کمک می‌کند تا داده‌های تجربی افت خواص فیزیکی ماده، به زمان‌های طولانی‌تر تعمیم داده شود و این مهم مستلزم آن است که تابع متغیر با زمان (یا به عبارتی خاصیت فیزیکی که با زمان تغییر پیدا می‌کند) مشخص شود. به عبارتی اولین قدم برای پیش‌بینی طول‌عمر لاستیک، انتخاب تابعی از خاصیت فیزیکی آن است که قاعده‌ی وادادگی را به علت افت این خاصیت نشان دهد. همان‌گونه که پیشتر هم بحث شد، این قاعده‌ی وادادگی به‌خصوص در درزگیرها، منجر به کاهش سفتی و در نتیجه نشتی در ناحیه‌ی اتصال با لوله خواهد شد. بهترین تابع برای شبیه‌سازی با این پیامد منفی در لوله‌های پلاستیکی، تابع افت نیرو از آزمون واهلش تنش فشاری است. می‌توان روند روش‌شناختی پیش‌بینی طول‌عمر لاستیک‌ها را در شکل ۵ مشاهده کرد. برای تخمین طول‌عمر درزگیر در دمای دلخواه (معمولاً دمای محیط معادل ۲۳ درجه‌سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود) و یا بیشینه دمای قابل استفاده درزگیر، با توجه به استاندارد ISO 11346 [۱۴] ابتدا خاصیت فیزیکی را به عنوان متغیری که با زمان افت پیدا می‌کند (که در درزگیرهای لاستیکی همان نیروی آب‌بندی یا فشار تماسی است) انتخاب کرده، و سپس نمودار تغییرات آن با زمان در دماهای مختلف تحت آزمون واهلش تنش فشاری و مطابق با استاندارد ISO 3384 [۱۵] (یا استاندارد ASTM D6147) رسم می‌کنیم. آزمون را در شرایط فشاری ادامه داده تا نیرو به میزان ۵۰ درصد نسبت به نیروی اولیه‌اش کاهش پیدا کند، این مقدار را به عنوان آستانه مقدار افت نیرو در نظر می‌گیریم، زیرا در واقعیت درزگیرهای لاستیکی در میزان ۶۰ تا ۷۰ درصد دچار نشتی می‌شوند [۵] سپس با داشتن نمودار واهلش تنش در حالت فشاری در دماهای مختلف، با استفاده از دو مدل WLF و Arrhenius به تخمین طول‌عمر قطعه لاستیکی خواهیم پرداخت. قبل از توضیح طریقه پیش‌بینی طول‌عمر با توجه به این دو مدل، توضیح کوتاهی



شکل ۵ نقشه‌ی راه روش‌شناختی پیش‌بینی طول‌عمر، با هدف تخمین دوام یک قطعه لاستیک مهندسی [۱۶].

درباره‌ی این دو مدل و ابزار ریاضی خواهیم داشت:

۲-۱ اصل انطباق زمان-دما و معادله WLF

همان‌گونه که پیشتر بحث شد تقریباً می‌توان گفت که تمامی مواد به‌خصوص بسپارها تحت تأثیر دو پارامتر مهم یعنی زمان و دما هستند، به عبارتی خواص فیزیکی بسپارها کاملاً تحت تاثیر زمان و دما است. اصل انطباق زمان-دما مفهومی در فیزیک بسپارها است، این اصل مهم به‌منظور تعیین وابستگی دما-زمان خواص مکانیکیِ مواد گرانروکشسان از طریق خواص مکانیکی یافت‌شده در دمای مرجع است. به بیان ساده‌تر اگر مدول کشسان بسپار را به عنوان خاصیت فیزیکی در دمای محیط در نظر بگیریم، می‌دانیم که مدول کشسان بسپار با زمان و دما کاهش می‌یابد؛ حال فرض کنید که بخواهیم همین تغییرات مدول کشسان بسپار را در دمای محیط برای ۱۰ سال آینده بسنجیم، واضح است که هم از منظر هزینه و هم از منظر وقت قادر نخواهیم بود از طریق آزمون به مدت ۱۰ سال تغییرات مدول بسپار را آزمایش کنیم. اصل انطباق زمان-دما بیان می‌دارد که برای مواد گرانروکشسان، زمان و دما با یکدیگر هم‌ارز بوده و می‌توان با افزایش دما و با استفاده از روابط ریاضی، خاصیت فیزیکی بسپار را در زمان‌های طولانی‌تر پیش‌بینی کرد. یعنی می‌توان تغییرات مدول بسپار را این بار به جای دمای محیط، در چند دمای بالاتر بر حسب زمان اندازه گرفت؛ سپس با استفاده از ضریبی با نام T_a یا عامل جابه‌جایی (Shift Factor)، تمام داده‌های مدول در دمای محیط را (توجه شود که دمای محیط همان دمای مرجع است) به داده‌های مدول در دماهای بالاتر جابه‌جا کرد یا به عبارتی به نموداری با نام منحنی مرجع انتقال داد، و به‌خاطر هم‌ارز بودن این دو پارامتر تغییرات مدول در زمان‌های طولانی‌تر را پیش‌بینی کرد [۴].

حال سوال مهم این است که مقدار عامل جابه‌جایی یا a_T چگونه به‌دست می‌آید؟ Williams-Landel-Ferry رابطه‌ای تجربی برای عامل جابه‌جایی یا ضریب انتقال استنتاج کرده‌اند که این رابطه به‌صورت زیر است:

$$Log(a_T)=(C_1 (T-T_{reference})/(C_2+(T-T_{reference}) \qquad (۱)$$

متغیرهای C_1 و C_2 اعدادی ثابت و T_{ref} دمای مرجع است. برای بسیاری از بسپارها اعداد C_1 و C_2 یکسان بوده و به ترتیب برابر با ۱۷/۴- و ۵۱/۶ است، دمای مرجع هم همان دمای انتقال شیشه‌ای درنظر گرفته می‌شود. برای تقریب دقیق‌تر در دمای محیط به‌خصوص برای لاستیک‌ها به [۸] مراجعه شود.

۲-۲ معادله Arrhenius

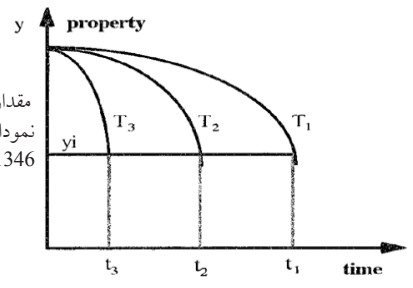
معادله‌ی Arrhenius که در علم شیمی‌فیزیک بسیار مشهور است از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کند:

$$K(T)=B^{*}\exp(-E_a/(R.T) \qquad (۲)$$

که در این رابطه K(T) نرخ سرعت انجام واکنش با واحد B،1/min یک عدد ثابت، E_a انرژی فعال‌سازی R،j/mo ثابت جهانی /گازها (mol.K)/j ۸۳۱۴، و T دمای مطلق بر حسب کلوین است. با استفاده از این معادله می‌توان پیرش گرما-اکسایشی و یا همان تخریب شیمیایی بسپارها را در غیاب تنش مکانیکی اندازه‌گیری کرد. اما همچنین نیز از طریق این معادله می‌توان تغییرات فیزیکی-شیمیایی ماده تحت تنش را تحلیل کرد و در واقع بین خواص گرانروکشسانی بسپار و فرایند پیرش شیمیایی آن پل زد. برای تخمین طول‌عمر قطعات بسپاری با استفاده از معادله Arrhenius، مطابق استاندارد ISO 11346 عمل می‌کنیم؛ اما پیش از بیان روش و نحوه تخمین طول‌عمر نیاز به بیان توضیحاتی است. همان‌گونه که مشخص است می‌توان رابطه‌ی Arrhenius را با استفاده از لگاریتم طبیعی به شکل زیر نوشت:

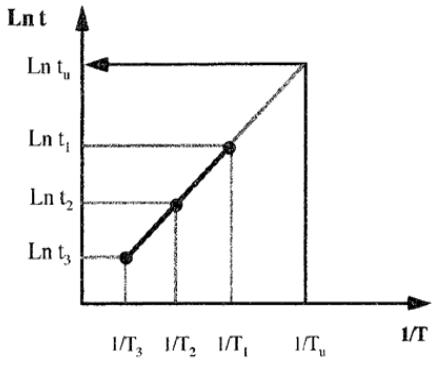
$$\ln K=\ln B-E_a/(R.T) \qquad (۳)$$

به‌منظور پیش‌بینی طول‌عمر لاستیک توسط رابطه‌ی Arrhenius، نیاز به بیان خاصیتی فیزیکی است (شکل ۶ و شکل ۷) تا آن را بتوان با آهنگ تخریب واکنش ارتباط داد و مدت زمان کارایی و عمر لاستیک را پیش‌بینی کرد؛ چون در کاربرد درزگیرها این نیروی آب‌بندی است که با گذشت زمان کاهش می‌یابد ما درصد افت نیروی به‌دست آمده از آزمون واهلش تنش را معادل با سرعت واکنش تخریب یا K در معادله Arrhenius در نظر می‌گیریم. به عبارتی خاصیت انتخابی ما



مقدار سطح آستانه جهت قطع نمودار مطابق با استاندارد ISO 11346، برابر با ۵۰ درصد افت نیرو است.

شکل ۶ تغییر در خاصیت فیزیکی نسبت به زمان در ۳ دمای مختلف. توجه شود که $T_3 > T_2 > T_1$.



شکل۷ نمودار زمان و طول‌عمر lnt قطعه بسپاری بر حسب معکوس دما 1/T قابل رسم است !

درصد افت نیرو با گذشت زمان در آزمون واهلش تنش فشاری است، بنابراین داریم:

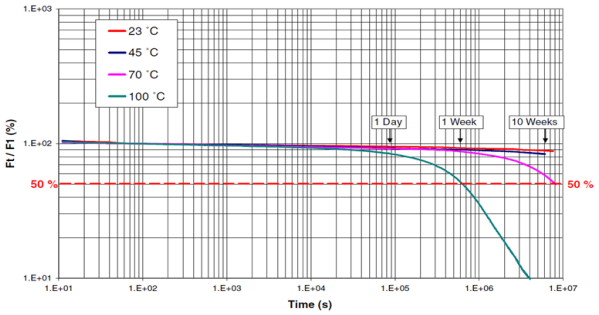
۲-۳ پیش‌بینی طول‌عمر قطعه‌ی لاستیکی با استفاده از معادله‌ی WLF

با توجه به بخش ۲-۱ به تخمین طول‌عمر دو نوع لاستیک یکسان با نحوه پخت متفاوت خواهیم معادله‌ی WLF پرداخت. به جدول ۲ دقت کنید:

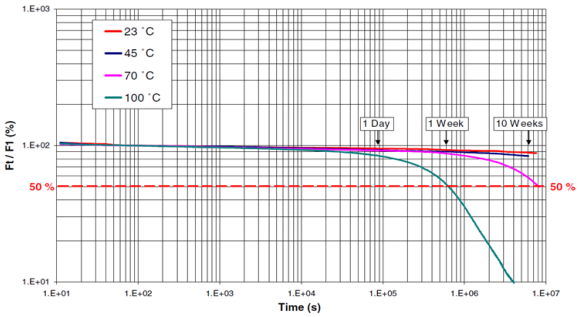
حال با استفاده از آزمون واهلش فشاری و مطابق با استاندارد ISO 3384 نمودار واهلش تنش این دو لاستیک طبیعی در شکل‌های ۸ و ۹ قابل مشاهده است.

اکنون با داشتن نمودارهای واهلش تنش و طبق توضیحات بخش ۱,۲، منحنی‌های مرجع این دو نمودار را از طریق عامل جابه‌جایی و معادله‌ی WLF برای پیش‌بینی طول‌عمر در بازه‌ی زمانی طولانی خواهیم داشت:

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، لاستیک NR 1 CV به علت سامانه پخت قوی‌تر نسبت به NR 2 SEV در مدت ۱۴ سال به میزان آستانه ۵۰ درصد افت تنش رسیده است، این در حالی است که این میزان افت نیرو برای لاستیک طبیعی



شکل ۸ نمودار واهلش تنش فشاری NR 1 CV [۹].



شکل ۹ نمودار واهلش تنش فشاری NR 2 SEV [۹].

SEV در ۱۱ سال رخ داده است. این مهم نشان‌دهنده آن است که سامانه پخت و هم‌چنین چگالی اتصالات عرضی لاستیک، همان‌گونه که پیشتر بحث شد در تعیین طول‌عمر لاستیک در کاربردهای مختلف از اهمیت بسزایی برخوردار است.

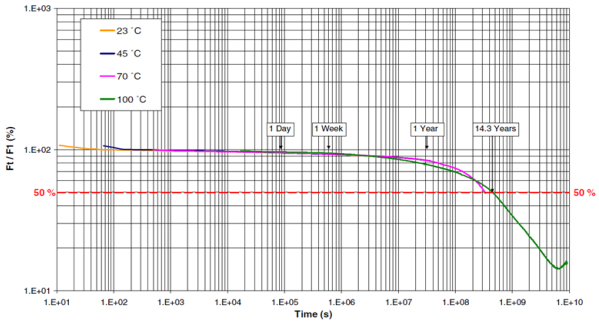
۲-۴ پیش‌بینی طول‌عمر قطعه‌ی لاستیکی با استفاده از معادله‌ی Arrhenius

ابتدا مطابق توضیحات بخش ۲-۲ پیش خواهیم رفت، فقط باید توجه داشت که براساس استاندارد ISO 11346 ما از نمودار Arrhenius دو نکته مهم را استخراج می‌کنیم:

- طول عمر قطعه لاستیکی: با برون‌یابی خطی به دمای

جدول ۲ دو لاستیک طبیعی با نحوه پخت متفاوت ارایه شده است. منظور از CV سامانه پخت Conventional، و SEV سامانه پخت Semi-Efficient می‌باشد [۹].

ماده	میزان گوگرد	شتاب‌دهنده	ساختار اتصالات عرضی	انرژی پیوندی kJ/mol
NR 1 CV	زیاد	کم	S3-S8	۱۵۰
NR 2 SEV	متوسط	متوسط	S1-S2	۲۷۰



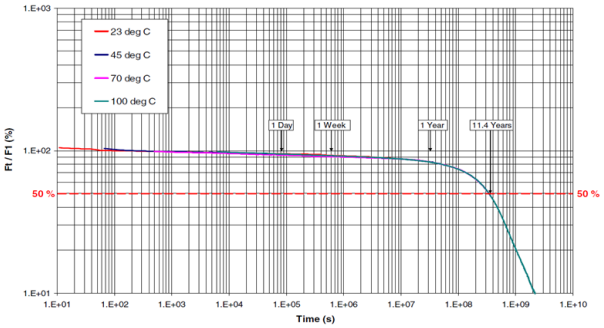
شکل ۱۰ منحنی مرجع NR 1 CV [۹]

موردنظر (دمای محیط خدمات‌دهی) تخمین زده می‌شود.

– دمای بیشینه کارکرد: برای فهمیدن آن که قطعه تا چه میزان از دمای بیشینه را تحمل می‌کند و دوام می‌آورد، با انتخاب زمان ۲۰۰۰۰ ساعت و قطع نمودار میزان دمای بیشینه مشخص خواهد شد. البته بیشینه دمای کارکرد لاستیک‌ها به‌صورت تجربی در جدول ۳ آورده شده است.

قبل از وارد شدن به یک مثال عملی، به تبیین و درک ۲ نکته بالا با ارایه یک مثال نظری خواهیم پرداخت. فرض می‌کنیم که شکل ۱۲، نمودار واهلش تنش یک قطعه بسپار در ۳ دمای متفاوت مطابق آنچه در شکل ۶ توضیح داده شد باشد:

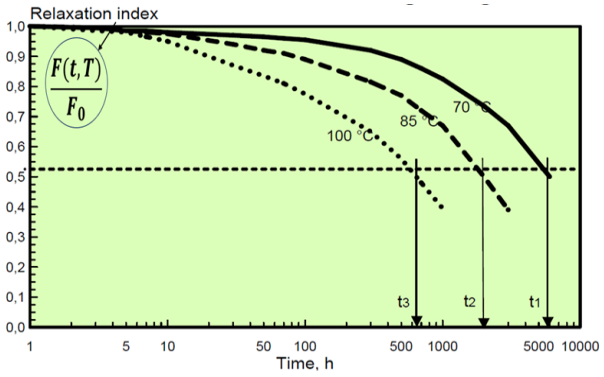
مشابه آن چه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، این نمودار در میزان ۵۰ درصد افت نیرو قطع می‌شود. سپس نقاط قطع‌شده را به‌صورت عمودی امتداد داده تا نمودار افقی (زمان) قطع شود. حال با توجه به توضیحات بخش ۲-۲ و شکل۷ نمودار شکل ۱۳ استخراج می‌شود. در انتها با برون‌یابی خطی به دمای موردنظر (دمای محیط) طول‌عمر قطعه مشخص خواهد شد. همچنین می‌توان با انتخاب زمان ۲۰۰۰۰ ساعت از روی نمودار عمودی، خط برون‌یاب را قطع کرده و بیشینه دمایی را که می‌توان دوام داشته باشد تخمین زده خواهد شد. حال به یک مثال دیگری از لاستیک EPDM در شکل ۱۴ می‌پردازیم.



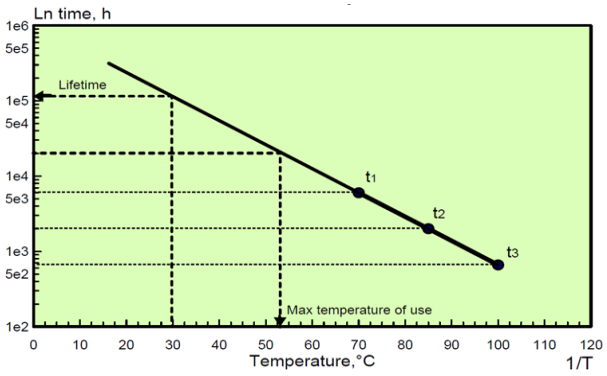
شکل ۱۱ منحنی مرجع NR 2 SEV [۹].

جدول ۳ بیشینه دمای خدمت‌دهی تعدادی از لاستیک‌ها [۱].

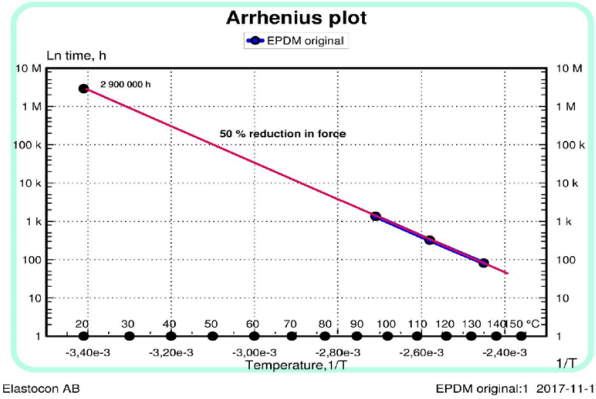
نوع لاستیک	بیشینه دمای کارکرد (خدمات‌دهی)
لاستیک PU	۸۰
لاستیک طبیعی، پلی‌ایزوپرن	۸۰
لاستیک بوتادی‌ان، SBR	۱۰۰
لاستیک نیتریل، پلی‌کلروپرن	۱۲۰
لاستیک بوتیل	۱۳۰
EPR	۱۴۰
لاستیک Chlorosulphonated	۱۵۰
لاستیک Hydrogenated نیتریل	۱۶۰
لاستیک اکریلیک	۱۶۰
لاستیک سیلیکون	۲۲۵
لاستیک فلوئوروکربن یا FKM	۲۵۰



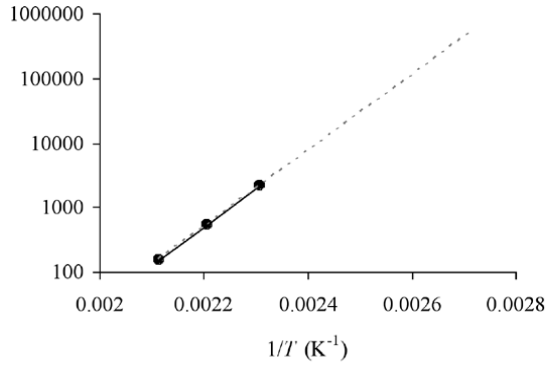
شکل ۱۲ نمودار فرضی واهلش تنش فشاری یک نمونه بسپار مشخص است، این نمودار در آستانه ۵۰ درصد قطع داده شده است [۱۳].



شکل ۱۳ نمودار Arrhenius جهت تخمین طول‌عمر و بیشینه دمای‌کارکرد [۱۳].



شکل۱۴) نمونه‌یی از تخمین طول‌عمر لاستیک EPDM که معادل ۳۳۰ سال است [۱۳].



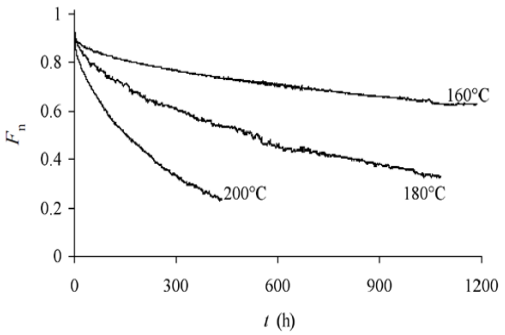
شکل۱۶ نمودار Arrhenius واهلش تنش فشاری لاستیک فلوئوروکربن یا FKM [۵].

مثال پایانی مربوط به لاستیک FKM است که طول‌عمر آن بسیار بیشتر از لاستیک طبیعی و EPDM تخمین زده شده است، نمودار واهلش تنش فشاری لاستیک FKM در شکل ۱۵ آورده شده است:

سپس نمودار Arrhenius شکل ۱۶ جهت تخمین طول‌عمر با استفاده از روش برون‌یابی خطی به‌صورت زیر خواهد بود که در این شکل مشاهده می‌شود برون‌یابی خطی و تخمین طول‌عمر لاستیک FKM در دمای محیط به معنای $1/23^0C+273=0.003379K^{-1}$ است، یعنی زمان بسیار طولانی را نشان خواهد داد. این نتیجه دور از انتظار نیست چرا که در جدول۳ لاستیک FKM، بهترین قابلیت خدمات‌دهی در بیشینه دما را نشان داده بود؛ که این خود نشان‌دهنده مقاومت شیمیایی- فیزیکی بسیار زیاد این لاستیک است.

۳ نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده شد، دو مدل رایج و اساسی در تحلیل



شکل۱۵ آزمون واهلش تنش فشاری لاستیک فلوئوروکربن [۵]

و تخمین طول‌عمر فراورده‌های لاستیکی با استفاده از آزمون واهلش تنش، ۲ مدل Arrhenius و WLF است که به‌صورت زیر جمع‌بندی خواهیم کرد:

- امکان ارزیابی طول‌عمرِ واشرهای لاستیکی با روش اصل انطباق زمان-دما از طریق معادله WLF در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (کمتر از ۴۰ سال)، برای پیش‌بینی واهلش فیزیکی قطعه‌ی لاستیکی وجود دارد. همچنین این مدل برپایه دو مفهوم عامل جابجایی (Shift Factor) و اصل انطباق زمان-دما (Time-Temperature Superposition) توسعه‌یافته است.
- امکان ارزیابی طول‌عمرِ واشرهای لاستیکی با روش برون‌یابی خطی (Extrapolation) از طریق معادله Arrhenius در بازه‌های زمانی بلندمدت (بیش‌تر از ۴۰ سال)، برای پیش‌بینی واهلش شیمیایی درزگیرها وجود داشته و اجرایش برای ارزیابی عملکرد واشرهایی که در صنعت لوله استفاده می شوند بسیار حایز اهمیت است.
- پیرش فراورده‌های لاستیکی هنگام کار، توسط سازوکارهای گرانروکشسان مانند پدیده‌های خزش و واهلش تنش اتفاق می‌افتد؛ بنابراین، با توجه به ماهیت مدل WLF، استفاده از آن در تخمین طول‌عمر عملکردی فراورده مناسب است. در نقطه‌ی روبه‌رو، در پیرش‌های ناشی از وجود فشار زیاد (مانند درزگیرهای لوله‌های پلاستیکی) پدیده‌ی غالب فرسایش شیمیایی است و روش Arrhenius مناسب‌ترین مدل برای بررسی آن خواهد بود.
- با توجه به نمونه محاسبات انجام شده از طریق مدل‌های ارایه شده، لاستیک FKM و کائوچوی EPDM عمر بسیار بیشتری نسبت به کائوچوی طبیعی NR دارند.

مراجع

1. Brown R.P., Practical Guide to the Assessment of the Useful Life of Rubbers, Rapra Technology Limited, USA, **2001**.
2. West J., The Evolution of Elastomeric Joints in Plastic 2. Pipe Systems and the use of Long Term Stress Relaxation Testing to Predict Service Life, *International Plastic Pipe Conference*, Trelleborg Pipe Seals; Lelystad, The Netherlands, **2019**.
3. Industry Guidelines, Expected Service Life oF Elastomeric Pipe Seals, Pipelines Integrity for a Cleaner Environment, Plastic Industry Pipe Association of Australia Limited, ACN 086 511 686, **2004**
4. Montgomery T., William J., MacKnigh T., Introduction to Polymer Viscoelasticity, 3rd Edition; Wiley Inter Sicence, Chapter 4, Hoboken, New Jersey, 2018.
5. Conveney V.A., Elastomer and Components; Service life Prediction–Progress and Challenges, Chapter4, *Woodhead Publishing in Materials*, Cambridge England, **2006**.
6. Ronan S., Alshuth T., Hannover S., Jerrams, Dublin (Ireland), An Approach to the Estimation of Long-Term Stress Relaxation in Elastomers, KGK, 559-563, **2007**.
7. West J., The Evolution of Elastomeric Joints in Plastic Pipe Systems and the use of Long Term Stress Relaxation Testing to Predict Service Life, International Plastic Pipe Conference, Trelleborg Pipe Seals; Lelystad, The Netherlands, **2019**.
8. Alexander D., Rubber physics, Institute of Natural and Humanit Sciences, University of Trencin, Slovakia, 48, **1990**.
9. Ronan S., Alshuth T., Jerrams S., Murphy N., Long-term Stress Relaxation Prediction for Elastomers Using the Time–Temperature Superposition Method; ScienceDirect, *Materials and Design*, 28, 1513-1523, **2007**.
10. International Organization for Standardization, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic–Accelerated Ageing, Heat Resistance Tests, ISO 188, 5th Edition,10-01, **2011**.
11. Huy V., Evrard G., Methodologies for Lifetime of Rubber Using Arrhenius and WLF Models, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 261, 135–142, **1998**.
12. Abraham P., Service Life Prediction of Rubber Component Used in Engineering Applications - A Review, Akron Rubber Development Laboratory, Inc; January 26, **2002**.
13. Spetz G., Ageing and Lifetime Estimation of Rubber Materials by Stress Relaxation, Elastocon AB Sweden, Manchester Polymer Group Seminar, 15, **2017**.
14. International Organization for Standardization, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Estimation of Life-time and Maximum Temperature of use, ISO 11346, 3rd Edition-12-01, **2018**.
15. International Organization for Standardization, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Stress relaxation in Compression–part 1: Testing at Constant Temperature, ISO 3384, First Edition 12-01, **2011**.
16. Gent A.N., Engineering with Rubber – How to Design Rubber Components, 3rd Edition, Hanser Publishers Cincinnati, Chapter7, Munich, **2012**.