

# مهندسی معکوس برای ساخت یک قطعه درزبند لاستیکی

پژوهش‌نفت

سال بیست و چهارم  
شماره ۷۷

صفحه، ۱۵-۲۵ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۶/۱۸

احمد نعلبندی\* و همایون حسین‌خانلی

پژوهشکده علوم و فناوری پلیمر، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

babanalbandia@ripi.ir

## مقدمه

عموماً در مجتمع‌های صنعتی جهت صرفه جویی در انرژی از مبدل‌های حرارتی استفاده می‌نمایند. یکی از انواع آنها، مبدل صفحه‌ای<sup>۱</sup> می‌باشد که از تعداد زیادی صفحات فلزی تشکیل شده است. در بین هر دو صفحه یک درزبند لاستیکی قرار می‌گیرد. حضور درزبندهای لاستیکی بین صفحات فلزی، مسیرهای مناسب برای عبور جریان‌های سرد و گرم را فراهم می‌آورد، به طوری که هر مسیر حاوی جریان گرم با دو مسیر از جریان‌های سرد در دو سمت، تماس حرارتی دارد. به همین دلیل راندمان تبادل گرمایی بالایی در مبدل حرارتی صفحه‌ای حاصل می‌گردد [۱]. لازم است درزبندها نسبت به سیال‌های گرم و سرد عبوری از مبدل حرارتی کاملاً مقاوم باشند. زیرا در غیر این صورت به دلیل نفوذ سیال به داخل آنها متورم گشته و متعاقباً منجر به نشت سیال می‌گردد. منظور از مهندسی معکوس یک قطعه لاستیکی، ساخت قطعه‌ای مشابه از لحاظ خواص و کارایی می‌باشد [۲]. از آنجایی که خواص و کارایی هر قطعه بستگی به نوع مواد تشکیل دهنده، ترکیب درصد اجزاء و فرآیند ساخت آن دارد، در مهندسی معکوس قطعات پلیمری نظیر لاستیک‌ها، تجزیه کمی و کیفی نمونه مرجع بسیار مهم است [۲].

## چکیده

در این تحقیق درزبندی لاستیکی به ابعاد  $1500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  به کمک تکنیک مهندسی معکوس و استفاده از یک درزبند به عنوان مرجع، ساخته شد. به منظور شناسایی اجزاء به کار رفته در نمونه مرجع از تکنیک‌های پیرولیز، استخراج با حلال، ثقل سنجی گرمایی و نیز دستگاه‌های تجزیه و تحلیل مواد نظیر FTIR، اشعه ایکس فلورسنت (EDAX) و دیفرانکتومتر (XRD) استفاده گردید. همچنین دستگاه‌های تجزیه و تحلیل حرارتی DSC و TGA به منظور بررسی خواص حرارتی قطعه مرجع و قطعات ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت. پس از اطمینان از تطابق خواص نمونه ساخته شده در آزمایشگاه با نمونه مرجع، تعدادی درزبند به کمک قالب‌های صنعتی در ابعاد واقعی تولید گردید و به منظور ارزیابی کارایی، به مدت ۳۵ روز همراه با درزبند مرجع در مبدل حرارتی و در معرض آمین داغ قرار داده شد. درزبندهای ساخته شده و درزبند مرجع پس از خارج شدن از محلول آمین تحت آزمایشات سختی سنجی و کشش قرار گرفتند. نتایج نشان داد تغییر خواص درزبندهای ساخته شده مشابه نمونه مرجع می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: درزبند لاستیکی، مهندسی معکوس، کپی‌سازی، مبدل حرارتی صفحه‌ای و EPDM

فیلم پلیمری استفاده می‌شود. خواص مطلوب این لاستیک آن را برای ساخت درزبند و اورینگ‌های صنعتی، شیلنگ‌های دستگاه و تجهیزات آزمایشگاهی و وسایل خانگی، نوار دور درب و شیشه و نیز برف پاک کن اتومبیل، قطعات لاستیکی لرزش‌گیر و همچنین در فرمولاسیون سپر و سائل نقلیه موتوری، مناسب ساخته است. به علاوه از این لاستیک در فرمولاسیون بعضی ترموپلاستیک‌ها جهت افزایش خواص ضربه‌پذیری و نیز در فرمولاسیون برخی روغن‌های اتومبیل به منظور بهبود گرانشی استفاده می‌شود. هدف از تحقیق حاضر، ساخت یک قطعه درزبند لاستیکی می‌باشد که قرار است در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای حاوی جریان‌های سرد و گرم (دمای  $125^{\circ}\text{C}$ ) ماده شیمیایی منو اتانول آمین سرویس دهد.

### مواد، تجهیزات و آزمایشات

لاستیک EPDM گریدهای KEP-B، KEP-P، Suprene S552 و Vistalon 7500 با مونی ویسکوزیته‌های ۶۸، ۷۰، ۸۲ و ۸۴ از بازار خریداری شد. دوده گرید N550 از شرکت دوده پارس فراهم گردید. پلاستی سایزر (روغن پایه آلیفاتیک) از شرکت نفت پارس خریداری شد. دی کیومیل پراکساید، اکسید روی، اسید استتاریک، استئارات روی و سیلیس رسوبی<sup>۱</sup> از شرکت Merck Chemical فراهم گردید.

در این پژوهش یک دستگاه طیف نگار مادون قرمز (FTIR) ساخت شرکت Bruker مدل IFS-88 مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از یک دستگاه سختی سنج با مقیاس shore A ساخت شرکت Zwick استفاده شد. دستگاه ثقل سنجی گرمایی (TGA) به کار رفته، ساخت شرکت Mettler بوده است. وسیله مورد استفاده برای اندازه‌گیری مانایی فشاری (طبق استاندارد ASTM D395) از دو صفحه فلزی مربع شکل حاوی چهار سوراخ در گوشه‌ها تشکیل شده است که امکان تنظیم فاصله بین ۲ صفحه توسط چهار میله حاوی مهره مستقر در چهار سوراخ فراهم شده است. تجهیزات فوق قابلیت ایجاد تغییر شکل‌های ثابت در دراز مدت بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل از قطعات

بر این اساس، نخستین اقدام در مهندسی معکوس درزبند مرجع، شناخت اجزاء به کار رفته در آن و آگاهی یافتن از نحوه ساخت درزبند مورد نظر می‌باشد. تجزیه اجزاء درزبند در بخش آزمایشات توضیح داده شده است. در خصوص نحوه ساخت قطعه می‌توان گفت که پس از اختلاط مواد اولیه که حاوی یک نوع الاستومر می‌باشد، مخلوط حاصل که اصطلاحاً به آن آمیزه گفته می‌شود، در قالبی به شکل درزبند ریخته شده و عمل پخت یا شکل‌دهی لاستیک تحت دما و فشار قالب صورت می‌گیرد.

آگاهی از سیستم پخت مناسب برای لاستیک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. عموماً پخت لاستیک‌ها با یکی از دو سیستم گوگردی یا پراکسیدی صورت می‌پذیرد. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد لاستیک‌های صنعتی که به هنگام سرویس‌دهی در معرض مواد شیمیایی و دماهای بالا (بیش از  $130^{\circ}\text{C}$ ) قرار دارند، با سیستم پراکسیدی پخت می‌شوند. آزمایشات کشش انجام شده بر روی قطعه مرجع و نتایج درصد افزایش طول در نقطه پارگی مشخص نمود که این لاستیک با سیستم پراکسیدی پخت شده است.

پس از شناسایی قطعه درزبند لاستیکی (جزئیات در بخش آزمایشات) و مشخص شدن اجزاء اصلی، اقدام به سفارش و خرید مواد جهت تهیه فرمولاسیون‌های اولیه به منظور ساخت قطعات لاستیکی مشابه گردید. به دلیل عدم اطلاع از جرم ملکولی و میزان مونی ویسکوزیته [Mooney Viscosity, ML(1+4) at  $125^{\circ}\text{C}$ ] الاستومر به کار رفته در ساخت درزبند مرجع، چهار گرید از لاستیک اتیلن پروپیلن دی ان منومر (الاستومر پایه درزبند) با مونی ویسکوزیته‌های مختلف برای خرید انتخاب شد.

اتیلن پروپیلن دی ان منومر یک ترپلیمر الاستومری است که خواص مطلوب متعددی دارد. ویژگی‌های مهم آن نظیر مقاومت ازونی بالا، خواص عایق رطوبتی عالی، عمر طولانی سرویس‌دهی در محیط‌های مخرب، قابلیت حفظ انعطاف‌پذیری در شرایط سخت و قابلیت زیاد پرکن‌پذیری در آمیزه باعث شده که کاربردهای آن در صنایع متنوع باشد [۳]. از این الاستومر در بسیاری از کشورهای اروپایی به عنوان عایق رطوبتی در پشت بام‌ها و استخرهای آب، به صورت پوشش و

1. Precipitated silica

سپس تعدادی از آنها را پس از اندازه‌گیری دقیق ضخامت، بین صفحات فلزی قرار داده و با اعمال ۲۵٪ فشرده‌گی در آنها (از طریق سفت کردن مهره‌های نصب شده روی صفحات) به مدت ۲۲ ساعت در دمای ۱۲۵ °C نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها از آون خارج شده و پس از ۳۰ دقیقه باقی ماندن در محیط، ضخامت آنها مجدداً اندازه‌گیری و ثبت گردید. شرایط آزمون تعیین دانسیته درزبند مرجع نیز طبق استاندارد ASTM D792 انجام گرفت. بدین صورت که جرم یک قطعه بریده شده (با وزن تقریبی ۳-۲ gr) از درزبند مرجع در دو حالت خشک و غوطه‌ور در آب دیونیزه (با دمای ۲۳ °C) به وسیله یک ترازوی مخصوص آزمایشگاهی با قابلیت سنجش میلی‌گرم، اندازه‌گیری گردید. سپس با داشتن جرم خشک و جرم حالت غوطه‌ور نمونه و استفاده از رابطه زیر دانسیته درزبند محاسبه شد:

$$D = (m_1/m_2) \times D_{sol} \quad (1)$$

در این جا  $m_1$  و  $m_2$  به ترتیب جرم قطعه در حالت خشک و غوطه‌ور در آب دیونیزه بوده و  $D_{sol}$  دانسیته آب دیونیزه در دمای ۲۳ °C، مساوی  $1 \text{ g/cm}^3$  می‌باشد.

دستگاه ثقل سنجی گرمایی با شرایط آزمون زیر به کار گرفته شد. کلیه آزمون‌ها از دمای محیط تا ۸۰۰ °C و با سرعت حرارت دهی  $20 \text{ }^\circ\text{C/min}$  به اجرا درآمد. ابتدا نمونه‌هایی به وزن چند میلی‌گرم در ظروف فلزی مخصوص قرار داده شد. پس از استقرار ظرف حاوی نمونه در دستگاه، دمای نمونه در شرایطی که جریان آرامی از گاز ازت در اتمسفر نمونه وجود داشت، از دمای محیط تا ۵۵۰ °C گرم گردید. سپس نمونه‌ها تا ۳۰۰ °C کاهش دما یافته و مجدداً از ۳۰۰ °C تا ۸۰۰ °C در محیط اکسیژن حرارت داده شدند. شرایط آزمون کشش بسته به شکل نمونه‌ها به دو صورت تنظیم گردید. نمونه‌هایی که به شکل درزبند بودند، نظیر درزبند مرجع با ابعاد طولی ۱۰ cm بریده شده و عرض و ضخامت آنها عرض و ضخامت طبیعی درزبند بود. این نمونه‌ها با سرعت کشش ۵۰۰ mm/min آزمایش شدند. نمونه‌هایی که به صورت دمبلی شکل از صفحات لاستیکی پخت شده برش داده شده بودند، طبق استاندارد

لاستیکی را دارا بود. همچنین در این تحقیق از یک دستگاه غلطک<sup>۱</sup> ساخت شرکت Yamato Scientific ژاپن، استفاده گردید. غلطک مذکور دارای دو سیلندر به قطر ۶ اینچ بوده و مجهز به سیستم گردش آب سرد جهت کنترل دمای آمیزه در حین اختلاط و سیستم‌های نشان‌دهنده دمای سطح غلطک و تنظیم سرعت چرخش سیلندرها بود. از دستگاه سنجش ویسکوزیته مونی لاستیک ساخت شرکت Shimadzu ژاپن نیز استفاده شد. به منظور بررسی سینتیک پخت لاستیک‌های فرموله شده در این پژوهش، دستگاه سنجش رئومتر پخت (Rheometer 100) ساخت شرکت Monsanto ژاپن به کار گرفته شد. به منظور قالب‌گیری و پخت قطعات لاستیکی، از یک دستگاه پرس گرم ساخت شرکت Yamato Scientific ژاپن استفاده گردید. همچنین خواص کششی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق توسط دستگاه کشش شرکت Zwick/Roell مدل 0Z30 کشور آلمان تعیین شد.

### شرایط آزمون‌ها

برای تهیه طیف‌های مادون قرمز از مواد محلول در حلال، ابتدا لایه بسیار نازکی از محلول را بر روی سل KBr کشیده و پس از تبخیر نمودن حلال، سل در داخل دستگاه و در معرض اشعه مادون قرمز قرار داده شد. بدین ترتیب طیف ماده روی سل در محدوده فرکانس  $4000-500 \text{ cm}^{-1}$  ترسیم گردید. برای ترسیم طیف خاکستر درزبند، مقدار کمی از خاکستر را به پودر KBr به نسبت یک قسمت خاکستر به ۱۰ قسمت پودر KBr اضافه کرده و پودر حاصل با یک دستگاه مخلوط کن لرزشی کاملاً مخلوط گردید. از این پودر توسط یک دستگاه پرس آزمایشگاهی قرص‌های نازک به قطر حدود ۱ cm تهیه شد. با قرار دادن قرص در دستگاه اسپکتروسکوپ، طیف مادون قرمز خاکستر درزبند تهیه گردید. شرایط آزمایش سختی سنجی که طبق استاندارد ASTM D2240 صورت گرفت، شامل اعمال وزن ۸۲۱ gr بر روی سوزن دستگاه به شکل مخروط ناقص<sup>۲</sup>، در لحظه اندازه‌گیری سختی می‌باشد. در آزمایش تعیین مانایی فشاری که طبق استاندارد ASTM D395 صورت گرفت، قطعات پخت شده از لاستیک به شکل استوانه به قطر ۱۳ mm و ضخامت ۶ mm تهیه شد.

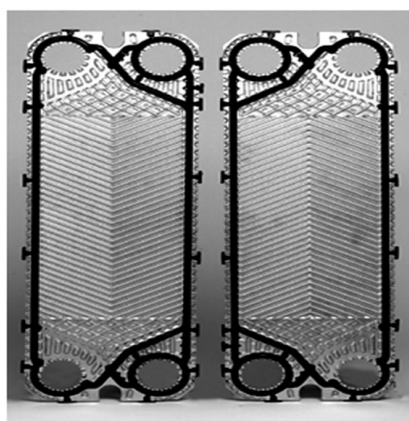
1. Two roll mill

2. Frustum cone

پخت اندازه‌گیری گردید. ابتدا دمای محفظه نمونه در  $^{\circ}\text{C}$   $170$  تنظیم شد. مقدار  $10-9$  gr از آمیزه لاستیکی حاوی مواد پخت توزین گردید. سپس محفظه نمونه دستگاه که با هوای فشرده کار می‌کرد، باز شد و نمونه آمیزه خام در آن استقرار یافت. درب محفظه بسته شد و روتور دستگاه با فشردن دکمه آغاز آزمون، شروع به حرکت چرخشی به صورت رفت و برگشتی (اسیلاسیون) نمود. پس از زمان  $30$  min، مانیتور دستگاه منحنی S شکلی ترسیم نمود و چاپ‌گر، اطلاعات مربوط به مشخصات پخت نمونه را روی کاغذ چاپ کرد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه مرجع

جرم (gr)	دانسیته ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	سختی متوسط (shore A)	افزایش طول در نقطه پارگی (%)
۲۱۸	۱/۱	۷۵ - ۷۶	۱۶۰



شکل ۱- تصویر درزبند لاستیکی (نوار مشکی)، نصب شده روی صفحات فلزی مبدل حرارتی

### مشخصات درزبند مرجع

به منظور ثبت مشخصات درزبند مرجع، پارامترهایی نظیر دانسیته، سختی و درصد افزایش طول و جرم درزبند اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین تصویری از این نوع درزبند در شکل ۱ نمایش داده شده است. درصد افزایش طول درزبند مرجع در آزمایش کشش ( $160\%$ ) نشان داد که این قطعه با سیستم پراکسیدی پخت شده است. چنانچه از سیستم پخت گوگردی استفاده می‌شد، با توجه به اینکه الاستومر به کار رفته در ساخت قطعه مرجع EPDM است (جدول ۲)، درصد افزایش طول در نقطه پارگی حداقل دو برابر مقدار آن در جدول ۱ ثبت می‌گردید.

ASTM D412 (با طول  $115\text{mm}$ ، ضخامت  $2\text{mm}$  و عرض در قسمت وسط  $6\text{mm}$ )، با سرعت کشش  $500\text{mm}/\text{min}$  آزمایش شدند. مقدار خاکستر درزبند به کمک یک دستگاه ترازوی آزمایشگاهی با دقت اندازه‌گیری  $1\text{mg}$  و نیز با استفاده از یک آون که تا دمای  $650^{\circ}\text{C}$  گرم می‌شد، اندازه‌گیری گردید. ابتدا نمونه‌ای در حد  $1\text{gr}$  از درزبند در داخل یک کروسیل چینی تمیز و خشک که قبلاً جرم آن اندازه‌گیری و ثبت شده بود، با دقت  $1\text{mg}$  توزین گردید. سپس کروسیل حاوی نمونه روی شعله یک مشعل گاز آزمایشگاهی قرار داده شد تا اجزاء آلی آن به آرامی سوخته شوند. پس از  $15\text{min}$  کروسیل به کمک یک انبرک به داخل آونی که در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  کار می‌کرد، منتقل گردید و مدت  $4$  ساعت در آنجا باقی ماند. پس از سپری شدن این مدت، کروسیل با انبرک به داخل یک دسیکاتور انتقال داده شد تا سرد گردد. بعد از آنکه دمای کروسیل کاملاً به دمای محیط رسید، مجدداً جرم آن اندازه‌گیری و ثبت گردید. تفاوت جرم کروسیل حاوی خاکستر نمونه از جرم کروسیل خالی اولیه، مقدار خاکستر نمونه را مشخص می‌نماید. شرایط آزمون مونی ویسکوزیته لاستیک‌های خام بدین صورت بود که ابتدا  $300-250\text{gr}$  از لاستیک خام،  $10$  مرتبه از بین سیلندرها دستگاه غلطک با دمای سطح  $50^{\circ}\text{C}$  عبور داده شد و سپس یک نمونه به وزن  $27\text{gr}$  از آن مخلوط تهیه گردید. این نمونه به دو تکه با وزن مساوی ( $13/5\text{gr}$ ) تقسیم شد. دستگاه مونی ویسکوزیته که دمای محفظه نمونه و روتورهای آن  $125^{\circ}\text{C}$  انتخاب شده بود، مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا محفظه نمونه باز شد. این محفظه دارای دو حفره در قسمت پایین و بالا بود. تکه لاستیک‌های به وزن  $13/5\text{gr}$  گرم در حفره پایینی و بالایی دستگاه قرار داده شد و درب محفظه نمونه بسته شد. شرایط تنظیم شده دستگاه عبارت است از:  $1$  دقیقه پیش گرم کردن و  $4$  دقیقه ماساژ دادن نمونه که از طریق چرخش روتورهای دستگاه (با سرعت خطی  $2\text{m}/\text{min}$ ) در دمای  $125^{\circ}\text{C}$  حاصل گردید. در انتهای آزمون، چاپ‌گر دستگاه مقدار مونی ویسکوزیته نمونه لاستیک را بر روی کاغذ چاپ نمود. مشخصات پخت فرمولاسیون‌های لاستیکی تهیه شده در این تحقیق توسط دستگاه رئومتر

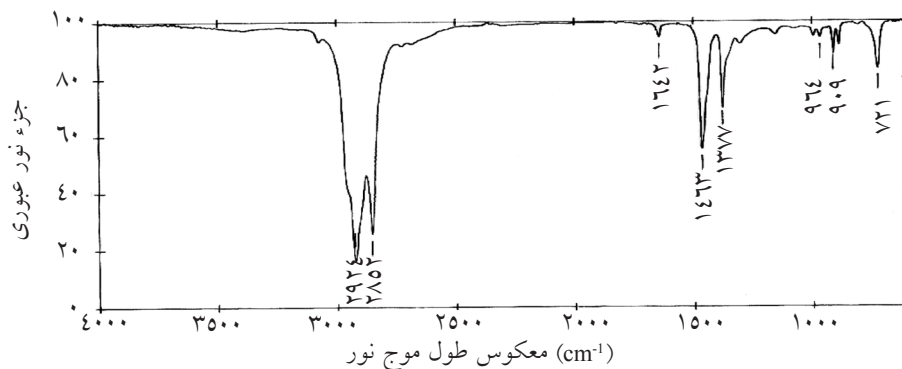
جدول ۲ - نتایج آنالیز و شناسایی نمونه مرجع

پایه الاستومر	درصد الاستومر و سایر مواد آلی	درصد دوده	ماده معدنی	درصد مواد معدنی
EPDM	۵۹ - ۶۰	۳۶	سیلیس رسوبی	۴

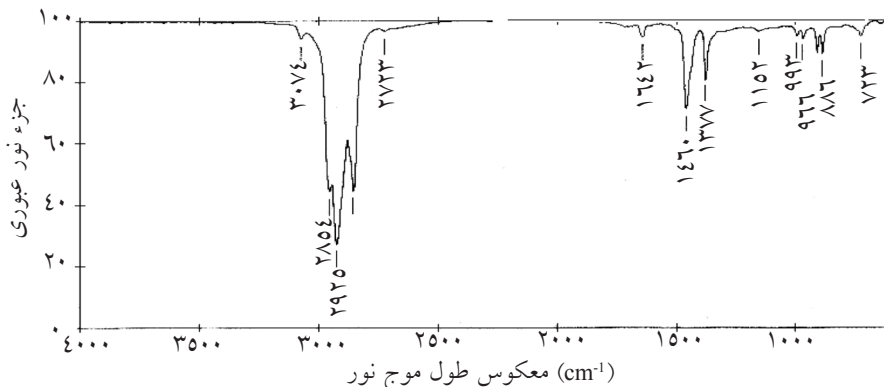
### آنالیز درزبند مرجع

به منظور شناسایی اجزاء نمونه و درصد آنها، تکنیک‌های مختلفی شامل استخراج با حلال، طیف سنجی مادون قرمز<sup>۱</sup>، تعیین مقدار خاکستر<sup>۲</sup>، کروماتوگرافی صفحه‌ای<sup>۳</sup> و آزمون ثقل سنجی گرمایی (TGA) به کار گرفته شد و نهایتاً پایه الاستومر به کار رفته و درصد آن، جنس ماده معدنی و درصد آن و نیز میزان دوده مصرف شده تعیین گردید. شکل‌های ۲ و ۳ طیف مادون قرمز محلول‌های تغلیظ شده از آزمایش‌های استخراج با حلال نمونه درزبند و یک نمونه EPDM تجارتي را نشان می‌دهد. پیک‌های موجود در این دو شکل از نظر موقعیت مکانی<sup>۴</sup> و شکل ظاهری بسیار شبیه یکدیگر است که مشخص می‌کند الاستومر به کار رفته در ساخت نمونه مرجع EPDM می‌باشد. شکل ۴ به‌طور شماتیک تصویر سه نوع طیف حاصل

از آزمون ثقل سنجی گرمایی گرمایی قطعات لاستیکی را نشان می‌دهد. تصویر الف مربوط به قطعه‌ای است که از پلیمر، دوده و ماده معدنی تشکیل یافته، تصویر ب رفتار حرارتی ماده‌ای است که از روغن پایه با ویسکوزیته پایین، پلیمر، دوده و ماده معدنی تشکیل شده و تصویر ج مربوط به نمونه‌ای است که از روغن پایه با ویسکوزیته بالا، پلیمر، دوده و ماده معدنی ساخته شده است. آزمون ثقل سنجی گرمایی درزبند مرجع سه بار، با استفاده از یک برنامه حرارتی مشابه از دمای محیط تا ۸۰۰ °C به اجرا درآمد. در هر بار، ابتدا نمونه تحت جریان گاز ازت از دمای محیط تا دمای ۵۵۰ °C با سرعت ۲۰ °C / min حرارت داده شد و پس از یک سرد کردن مختصر (از ۵۵۰ °C تا ۳۰۰ °C)، مجدداً نمونه تحت گاز اکسیژن از دمای ۳۰۰ °C تا ۸۰۰ °C با سرعت ۲۰ °C / min گرم گردید.

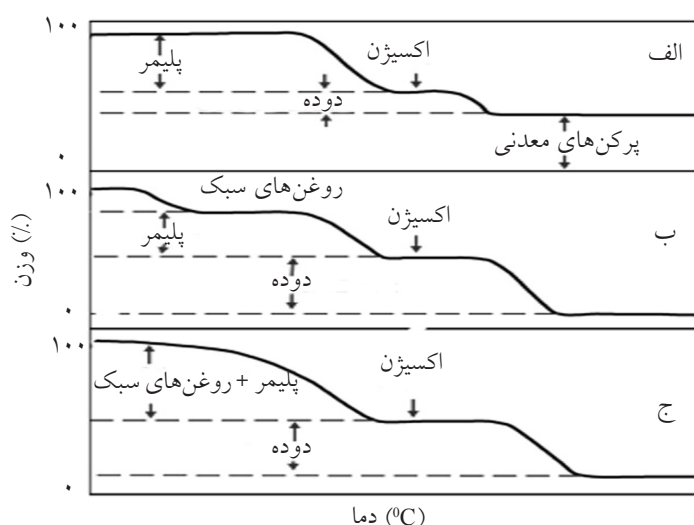


شکل ۲- طیف مادون قرمز محلول تغلیظ شده از استخراج با حلال نمونه EPDM تجارتي



شکل ۳- طیف مادون قرمز محلول تغلیظ شده از استخراج با حلال درزبند مرجع

1. FTIR Spectroscopy
2. Ash Content
3. Thin Layer Chromatography
4. Wavenumber



شکل ۴- تصاویر شماتیک از طیف‌های حاصل از آزمون ثقل سنجی گرمایی قطعات لاستیکی [۴]

قرمز سیلیس رسوبی در شکل ۷ ارائه گردید [۵]. پیک‌های موجود در شکل‌های ۶ و ۷ از نظر موقعیت مکانی و شکل ظاهری بسیار شبیه می‌باشند که مشخص می‌نماید سیلیس رسوبی (بی‌شکل) در نمونه درزبند به‌کار رفته است. جهت اطمینان از صحت نتیجه آنالیز ماده معدنی در درزبند، آزمون‌های اشعه ایکس فلورسنت و دیفراکتومتر نیز بر روی خاکستر درزبند انجام گرفت. از طیف دیفراکتومتر اشعه ایکس خاکستر کسکت که نمودار تپ‌های شکل آن حاوی یک قله کوتاه و پهن در ناحیه  $2\theta = 23^\circ$  می‌باشد، مشخص گردید که ماده معدنی  $\text{SiO}_2$  رسوبی (آمورف) در آن حضور دارد [۵].

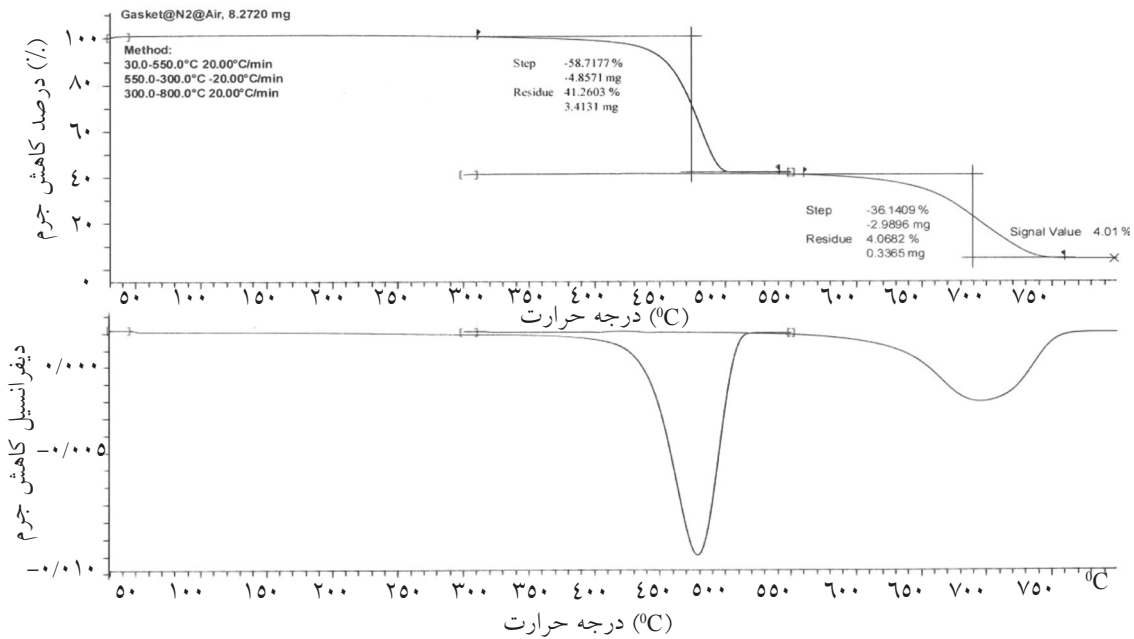
#### آمیزه‌سازی و اختلاط مواد

پس از توزین مواد اصلی مطابق جدول ۲ شامل الاستومر EPDM، دوده و سیلیس، مقادیر سایر اجزاء لازم نظیر پلاستی سایزر، اکسید روی، اسید استئاریک و دی‌کیومیل پراکساید از منابع علمی مرتبط استخراج و به‌کار گرفته شد [۶-۹].

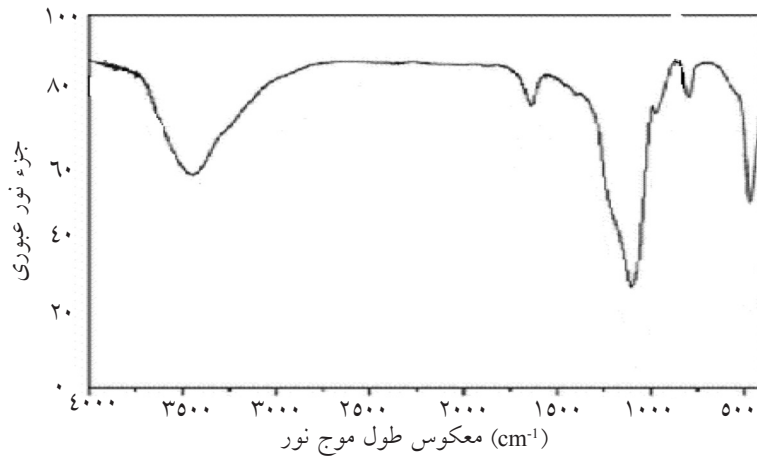
با توجه به تاثیر مستقیم میزان پلاستی سایزر (روغن) بر خواص فیزیکی و مکانیکی نظیر سختی، مانایی فشاری<sup>۱</sup> و درصد افزایش طول (آزمون کشش) نمونه‌های ساخته شده، سعی شد مقدار بهینه روغن در فرمولاسیون از طریق مقایسه خواص فیزیکی نمونه‌های ساخته شده با خواص فیزیکی نمونه مرجع تعیین گردد.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، چند ناحیه در طیف مذکور، تقریباً معادل تعداد اجزاء اصلی تشکیل دهنده نمونه، قابل تشخیص می‌باشد. همچنین تخمین نسبتاً دقیقی از درصد هر جزء را می‌توان از طیف ثقل سنجی گرمایی نمونه به‌دست آورد. نتایج تحلیل‌های انجام شده بر روی طیف ثقل سنجی گرمایی درزبند مرجع شکل ۵ مشخص نمود که این نمونه از روغن، الاستومر، دوده و فیلر معدنی تشکیل شده و درصد هر یک از اجزاء طبق مقادیر جدول ۲ می‌باشد. آزمون ثقل سنجی گرمایی در بسیاری از حالات فقط می‌تواند جمع درصدهای روغن، الاستومر و سایر مواد آلی مصرف شده را تعیین نماید. برای اطلاع از مقدار دقیق روغن به‌کار رفته در نمونه از آزمایش استخراج با حلال‌های سبک نظیر دی‌اتیل اتر و آزمایش کروماتوگرافی صفحه‌ای استفاده گردید و مشخص شد ۵-۴٪ روغن آلیفاتیک در آن مصرف شده است.

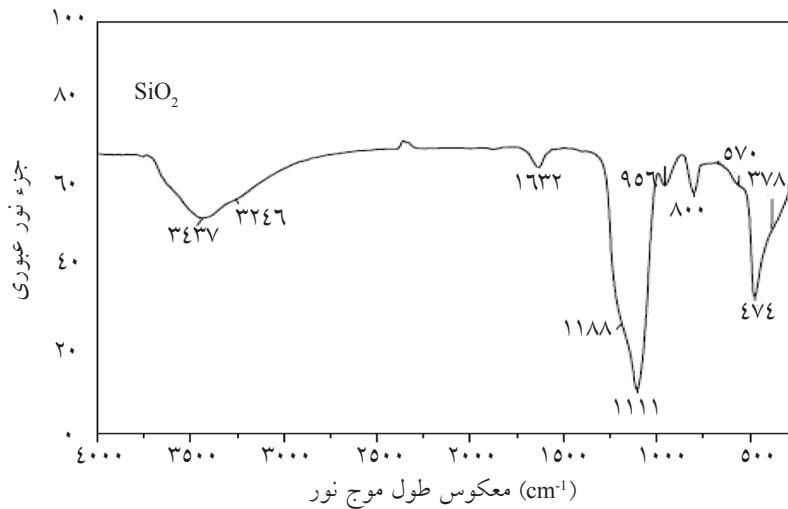
شکل ۶ طیف مادون قرمز خاکستر درزبند مرجع را نشان می‌دهد. این خاکستر پس از قرار دادن نمونه‌ای به جرم تقریبی ۱ g از درزبند در کوره‌ای با دمای  $650^\circ\text{C}$ ، به مدت ۴ ساعت به‌دست آمد. با توجه به دمای کوره و مدت قرار داشتن نمونه در کوره، انتظار می‌رود کلیه مواد آلی آن شامل دوده، روغن، الاستومر و غیره تخریب شده و تنها مواد معدنی آن به‌جا مانده باشد. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که خاکستر نمونه، نوعی سیلیس بی‌شکل به نام سیلیس رسوبی است. جهت مقایسه، طیف مادون



شکل ۵- طیف آزمون ثقل سنجی گرمایی نمونه درزبند که با سرعت 20 °C /min از دمای محیط تا 800 °C حرارت داده شد



شکل ۶- طیف مادون قرمز خاکستر درزبند مرجع



شکل ۷- طیف مادون قرمز سیلیس رسوبی (بی شکل) از مرجع [5]

به کارگیری نسبت‌های مواد در جدول ۲، سختی‌های بیش از ۷۶ حاصل شد، میزان مصرف پلاستی سائز (روغن‌های پایه آلیفاتیک) در فرمولاسیون افزایش داد شد تا مقدار سختی از ۷۶ بیشتر نگردد. همچنین در بهینه‌سازی خواص‌های سختی و درصد افزایش طول، اولویت به سختی داده شد. به طوری که اگر سختی قطعه‌ای ۷۶-۷۵ بود، حتی اگر مقدار ازدیاد طول متفاوت از ۱۶۰٪ می‌شد، تغییری در فرمولاسیون ایجاد نمی‌گردید.

### نتایج و بحث

نتایج آزمایشات کشش (طبق استاندارد ASTM D412) و مانایی فشاری (طبق استاندارد ASTM D395) [۱۲] بر روی قطعات ساخته شده از دو گرید EPDM شامل KEP-P و S552 در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. جدول ۳ نشان می‌دهد که ازدیاد طول در نقطه پارگی نمونه S552 مشابه نمونه مرجع می‌باشد. آزمایش سختی سنجی مشخص نمود که سختی این نمونه Shore A ۷۵ است. گرچه نتایج درصد افزایش طول در نقطه پارگی قطعات ساخته شده از گرید KEP-P (۱۳۱٪) قدری متفاوت از نمونه مرجع (۱۶۰٪) می‌باشد، لیکن به دلیل مشابه بودن سختی آن (۷۵/۵) با درزبند مرجع (۷۶-۷۵) و کم اهمیت تشخیص دادن پارامتر درصد افزایش طول در کاربردهای درز بند، آزمایش و بررسی بر روی فرمولاسیون KEP-P همانند فرمولاسیون S552 ادامه یافت.

جدول ۳- نتایج آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM D412 بر روی نمونه‌های دمبلی شکل از لاستیک EPDM، گریدهای KEP-P و S552 قبل از غوطه‌وری در MEA

گرید لاستیک	تنش در نقطه پارگی MPa		افزایش طول در نقطه پارگی٪	
	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار
KEP-P	۱۲/۱۷	۰/۴۹	۱۳۱/۲	۳/۷۱
S552	۱۵/۵۱	۰/۵۶	۱۵۴/۴	۳/۸۳

توجه: نمونه‌ها در جدول ۳، ابتدا در قالب‌های صفحه‌ای با دمای  $170^{\circ}\text{C}$  برای رسیدن به ۶۰٪ پخت رئومتر، قالب‌گیری شده و سپس به مدت ۲ ساعت در آون پخت تکمیلی را طی نمودند.

جدول ۴- نتایج آزمون مانایی فشاری لاستیک EPDM تهیه شده از گریدهای KEP-P و S552 پس از ۲۲ ساعت باقی ماندن در دمای  $125^{\circ}\text{C}$

گرید لاستیک	مانایی فشاری٪	
	متوسط	انحراف معیار
KEP-P	۵/۳	۰/۷۱
S552	۶/۰۳	۰/۰۵

شرایط دستگاه هنگام آمیزه‌سازی عبارت بود از: سرعت غلطک‌های کند و تند در عملیات اختلاط ۲۵ و ۳۰ دور بر دقیقه. به عبارت دیگر نسبت سرعت دورانی آنها ۱/۲ تنظیم شد؛ زمان آمیزه‌سازی بدون سیستم پخت ۲۵ min تعیین شد. پس از سپری شدن این زمان، مواد پخت (دی کیومیل پراکسید) به آمیزه روی غلطک اضافه شد و عملیات اختلاط به مدت پنج دقیقه دیگر ادامه یافت. با استفاده از آمیزه حاصل، صفحات لاستیکی به ضخامت ۲ mm و ابعاد  $100 \times 100$  mm توسط پرس گرم تهیه گردید. دمای پخت  $170^{\circ}\text{C}$  و زمان پیش پخت براساس آزمون‌های رئومتری  $3-3/5$  min برای رسیدن به ۶۰٪ پخت نهایی (T60%) تعیین شد. از صفحات مذکور پس از پخت تکمیلی به مدت ۲ ساعت در دمای  $150^{\circ}\text{C}$ ، نمونه‌های دمبل شکل تهیه گردید و خواص کششی آنها طبق استاندارد ASTM D412 اندازه‌گیری شد [۱۰]. همچنین تاثیر بلند مدت محلول آمین بر تعدادی از این دمبل‌ها طبق استاندارد ASTM D471 مورد بررسی قرار گرفت [۱۱].

### بهینه‌سازی فرمولاسیون

نظر به اینکه درزبند مرجع دارای سختی Shore A ۷۵-۷۶ و درصد افزایش طول در نقطه پارگی ۱۶۰٪ می‌باشد، در ابتدا تلاش شد با به کارگیری مواد اصلی طبق جدول ۲ و انتخاب سایر اجزاء به دلخواه، مشخصات مورد نظر در جدول ۱ در قطعه ساخته شده تحقق یابد. هنگامی که با



مؤید این واقعیت است که مقداری آمین در نمونه‌ها نفوذ کرده و باعث پلاستی سایز شدن آنها شده است. این مقدار نفوذ آمین هیچ ضرری برای لاستیک‌های ساخته شده نداشته است. چنانچه متعاقب غوطه‌وری در آمین، تنش در نقطه پارگی نیز کاهش می‌یافت، این احتمال وجود داشت که آمین نفوذ کرده باعث شکسته شدن زنجیره الاستومر و یا شکست اتصالات پراکسیدی بین زنجیره شده باشد. لیکن در وضعیت فعلی، لاستیک‌های ساخته شده در مقابل آمین مقاومت قابل قبولی نشان داده‌اند. آزمایش تعیین سختی بر روی نمونه‌های لاستیکی ساخته شده از دو گرید KEP-P و S552 پس از غوطه‌وری در آمین نیز صورت گرفت. نتایج نشان داد سختی هر دو نمونه به ۶۸ shore A کاهش یافته است. این نتایج، همسو با نتایج درصد افزایش طول در آزمایش کشش، نشان می‌دهد مقداری از حلال آمین به داخل ساختار لاستیک‌ها نفوذ کرده و باعث نرم شدن آنها شده است. نتایج ارائه شده در منابع علمی نشان می‌دهد که لاستیک EPDM به دلیل ساختار غیر قطبی که دارد، می‌تواند در محیط مونواتانول آمین قطبی، تا حداکثر دمای ۱۳۰ °C، در دراز مدت به راحتی سرویس دهد [۱۳]. بنابراین، فرمولاسیون‌های پیشنهاد شده برای درزبند موضوع این تحقیق که براساس مهندسی معکوس به‌دست آمده، چه از نظر نوع الاستومر و چه از نظر خواص محصول مناسب می‌باشد.

#### مقایسه خواص درزبندهای ساخته شده با درزبند مرجع

پس از اطمینان از تطابق خواص نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه با نمونه مرجع، تعدادی درز بند در ابعاد واقعی به کمک قالب‌های صنعتی تولید گردید و به منظور ارزیابی کارایی، همراه با یک نمونه درزبند مرجع در مبدل حرارتی و در معرض آمین داغ قرار داده شد. درزبندها به مدت سی و پنج روز در معرض آمین داغ (۱۳۰ °C) قرار داشتند. پس از این مدت، درزبندها از محلول آمین خارج شده و از هر درزبند پنج قطعه نوار مستطیل شکل به طول ۱۰ cm بریده شد. نمونه‌های بریده شده اگرچه شکل استاندارد (دمبلی) نداشتند، لیکن با توجه به مشابهت شکلی با نمونه مرجع امکان مقایسه خواص کششی آنها وجود داشت.

همچنین، از آنجایی که با استفاده از گریدهای KEP-B و Vistalon 7500 و به کارگیری درصدهای مواد طبق جدول ۲ امکان دسترسی به خواصی مشابه درزبند مرجع ممکن نشد، لذا لاستیک‌های ساخته شده از این دو گرید از ادامه بررسی‌ها کنار گذاشته شدند.

نتایج آزمایش مانایی فشاری در جدول ۴ نشان می‌دهد که این پارامتر برای نمونه‌های ساخته شده از گریدهای KEP-P و S552 تک رقمی است (۶-۵٪)، در حالی که در منابع علمی مقدار مانایی فشاری برای درزبندهای EPDM و در کاربردهای مشابه، حدود ۱۱-۱۳٪ گزارش شده است.

هرچه مقدار مانایی فشاری کمتر باشد، نشان می‌دهد که لاستیک تمایل دارد پس از حذف تنش‌های اعمال شده به آن (در هنگام سرویس دهی) به ضخامت اولیه خود باز گردد و تغییر ضخامت کمتری به جا بگذارد. در واقع مانایی فشاری کمتر برای درزبندها مطلوب‌تر است. زیرا در غیر این صورت امکان به کارگیری مجدد آنها پس از یک بار نصب در دستگاه به دلیل نشت حلال وجود نخواهد داشت. بر این اساس، نتایج مانایی فشاری لاستیک‌های ساخته شده از گریدهای KEP-P و S552 جهت کاربرد به عنوان درزبند، مناسب تشخیص داده شد. به منظور بررسی چگونگی تغییرات خواص لاستیک‌های ساخته شده پس از غوطه‌وری در حلال آمین، تعداد پنج عدد دمبل از هر فرمولاسیون به مدت ۷۰ ساعت در مونواتانول آمین (MEA) در دمای ۱۲۰ °C قرار داده شد. سپس آزمایشات کشش بر روی آنها صورت گرفت. نتایج آزمون کشش دو نمونه لاستیک KEP-P و S552 متعاقب غوطه‌وری در حلال آمین در جدول ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، غوطه‌وری در حلال آمین داغ نه تنها باعث کاهش در مقاومت کششی نمونه‌ها نشده بلکه تا اندازه‌ای منجر به افزایش آنها نیز شده است. احتمال می‌رود علت این افزایش به دلیل تأثیرات مثبت دمای آمین در تکمیل شدن فرآیند پخت قطعات لاستیکی باشد. همچنین نتایج کشش متعاقب غوطه‌وری در آمین نشان می‌دهد، درصد افزایش طول نمونه‌ها بیشتر شده است که

جدول ۵ - نتیجه آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM D412 بر روی نمونه‌های دمبلی شکل از لاستیک KEP-P، گریدهای KEP-P و S552 بعد از ۷۰ ساعت غوطه‌وری در MEA در دمای ۱۲۰ °C

گریدهای لاستیک	تنش در نقطه پارگی MPa		افزایش طول در نقطه پارگی (%)	
	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار
KEP-P	۱۴/۳۷	۰/۶۳	۲۱۵/۴	۸/۵۵
S552	۱۵/۸۲	۲/۰۹	۱۹۵/۶	۱۶/۵۵

توجه: نمونه‌ها در جدول ۵، ابتدا در قالب‌های صفحه‌ای با دمای ۱۷۰ °C برای رسیدن به ۶۰٪ پخت رئومتر، قالب‌گیری شده و سپس به مدت ۲ ساعت در آون پخت تکمیلی را طی کرده‌اند.

جدول ۶- نتایج آزمون کشش نوارهای بریده شده از درزبند مرجع و درزبندهای ساخته شده پس از غوطه‌وری در محلول آمین

	مدول ۱۰۰٪ MPa		تنش در پارگی MPa		درصد افزایش طول در پارگی %	
	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار
درزبند- مرجع	۳/۱۸	۰/۱۱	۳/۶۴	۰/۱۴	۱۱۳/۶۱	۴/۶۹
درزبند- KEP	۳/۲۶	۰/۱۹	۴/۷۱	۰/۴۸	۱۲۸/۶۹	۸/۴۵
درزبند- S552	۲/۹۴	۰/۰۶	۳/۵۲	۰/۲	۱۲۰/۴۱	۵/۷۳

اصلی قطعه شناسایی شد. در ادامه تلاش گردید تا قطعات لاستیکی مشابه با قطعه مرجع ساخته شده و با آن مقایسه گردد. دو فرمولاسیون برای ساخت درزبند مرجع به دست آمد. خواص قطعات ساخته شده نظیر مانایی فشاری، سختی، تنش و درصد افزایش طول در نقطه پارگی (قبل و پس از غوطه‌وری در محلول آمین داغ) بسیار شبیه با درزبند مرجع تشخیص داده شد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از همکاری شرکت طاهای قالب توس و شرکت پارس مبدل به خاطر در اختیار قرار دادن قالب‌های صنعتی تولید درزبند M15 صمیمانه تشکر نماید.

نتایج آزمون کشش نوارهای بریده شده از درزبند مرجع و درزبندهای ساخته شده، در جدول ۶ ارائه شده است. مقادیر درصد افزایش طول و تنش در نقطه پارگی نوارهای تهیه شده از لاستیک‌های S552 و KEP-P در مقایسه با نوارهای بریده شده از درزبند مرجع تفاوت چندانی نشان نمی‌دهد. بنابراین، نتیجه‌گیری می‌شود که می‌توان از هر یک از فرمولاسیون‌های مذکور برای تولید انبوه درزبندی با خواص مشابه نمونه مرجع استفاده نمود.

### نتیجه‌گیری

با بررسی خواص فیزیکی یک نمونه درزبند مرجع، پارامترهای شاخص و مطرح آن نظیر سختی، درصد افزایش طول در نقطه پارگی و دانسیته اندازه‌گیری و ثبت گردید. با بهره‌گیری از تکنیک‌ها و دستگاه‌های آنالیز مواد، اجزاء

### مراجع

- [1]. Wang L., Sunden B. and Manglik R. M., *Plate Heat exchangers (design, applications and performance)*, WIT Press, Southampton, Boston.
- [2]. Dasgupta S., *Haserti rajasthan, reverse engineering of rubber products: Concepts, Tools and Techniques*, CRC Press, 2013.

- [3]. Van Duin M., Geleen, "Chemistry of EPDM crosslinking", Journal of Elastomers and Plastics of Netherland, Vol 55, No. 4, 2002.
- [4]. Sircar Anil K., "Analysis of elastomer vulcanization composition By TG-DTG techniques", Presented at Rubber Division Meeting, American Chemical Society, Toronto, Canada, May, pp. 21-24, 1991.
- [5]. Music S., Filipovic N. and Sekovanic L., "Precipitation of amorphous SiO<sub>2</sub> particles and their properties", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol 28, No. 1, pp 89-94, 2011.
- [6]. Combs, Valerie, "Elastomeric sealing material selection", Seals and Gaskets Magazine, Vol. 26, 2010.
- [7]. Kojima, Yoshifumi, Yokota, Atsushi, EPDM Composition, European Patent, EP2011823A1, 2009.
- [8]. Ciullo P. A., Hewitt N., Rubber formulary, William Andrew Publishing, 1999.
- [9]. Bart J. C. J., Book: Additives in polymers, Section II, John Wiley & Sons, 2005, ISBN 0-470-85062-0.
- [10]. ASTM D412, Standard test method for tensile properties of rubbers, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [11]. ASTM D417, Standard test method for organic liquid effects on rubbers, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [12]. ASTM D395, Standard test method for compression set in rubbers, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [13]. <http://www.winegrowers.info>, Winegrowers Gasket & Seal Supplier.