

# ارزیابی کارایی لوله‌های پلاستیکی تقویت شده در سامانه حديد چرخان

## Evaluation of Reinforced Plastic Pipes Efficiency in Rotating Die System

مهرداد کوكبی<sup>\*</sup>، فاطمه هادی<sup>۱</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۲</sup>

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، ۱- بخش مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

۲- بخش مهندسی مکانیک، گروه مهندسی طراحی کاربردی، صندوق پستی ۱۴۱۱۵/۱۴۳

دریافت: ۸۴/۶/۳۰، پذیرش: ۸۴/۱۲/۹

### چکیده

تولید و کاربرد لوله‌های پلیمری همگام با پیشرفت علوم و مهندسی پلیمر، روز به روز در حال گسترش است. تولید لوله با استفاده از اکستروژن و با حديد ثابت به علت آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری در راستای محوری و وجود آمدن خط جوش ناشی از وجود بازوهای نگهدارنده کاری غیرعلمی است. لوله‌های تولیدی فاقد استحکام لازم در جهت محیطی هستند. برای کاهش اثر خط جوش و تولید لوله‌های مقاوم در جهت محیطی می‌توان از چرخش حديد استفاده کرد. در این پژوهش، تغییر خواص مکانیکی لوله‌ها با تغییر دور چرخش حديد بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که استحکام در جهت محیطی برای نمونه پلی اتیلن سنگین در حدود ۲۰ درصد، برای پلی پروپیلن حدود ۲۵ درصد و برای نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ۲۰ درصد وزنی الیاف شیشه در حدود ۳۴ درصد، در دور چرخش ۲۰ rpm عضو داخلی، افزایش یافته است. همچنین، نتایج آزمون هیدروستاتیک نشان می‌دهد لوله‌هایی که با سامانه حديد چرخان تولید شده‌اند، قدرت تحمل بار بیشتر و طول عمر مطلوب دارند. در این حالت، مقدار افزایش خروجی از اکستروژر در دور چرخش ۳۰ rpm عضو داخلی در حدود ۱۳ درصد است. همچنین، برای لوله‌های ساخته شده از پلی اتیلن سنگین در دور چرخش ۱۰ rpm و برای لوله‌های پلی پروپیلن در دور چرخش ۴ rpm خواص همگن بدست می‌آید. با بررسی نتایج حاصل از تفرق پرتو X مشخص شد که بلورینگی در حدود ۲۰ درصد در دور چرخش ۲۰ rpm عضو داخلی افزایش یافته است. در این سامانه نه تنها پدیده تورم حديد رخ نمی‌دهد، بلکه پدیده ضد تورم (جمع شدگی) مشاهده می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

حديد چرخان، استحکام محیطی، آرایش یافتگی الیاف، خط جوش، لوله پلاستیکی،

### مقدمه

ضربه و تنشهای خارجی، مقاومت در برابر زنگ زدگی، سهولت جوشکاری پلاستیک، سهولت نصب، سبکی وزن، حمل و نقل آسان، سهولت شکل پذیری، طول عمر زیاد و ارزانی محصول است. تولید لوله با استفاده از اکستروژن و با حديد ثابت به دلیل وجود بازوهای

امروزه تولید و استفاده از لوله‌های پلیمری بسیار متداول شده است. همگام با پیشرفت در علوم و مهندسی پلیمر، تولید لوله‌های پلاستیکی روز به روز در حال گسترش است. از سال ۱۹۵۰ تولید این نوع لوله‌ها رو به افزایش است. مهمترین مزایای کاربرد این لوله‌ها، مقاومت زیاد در برابر

### Key Words

rotating die, hoop strength, fibers orientation, weld line, plastic pipe

## تجربی

### مواد

در این پژوهش از پلی پروپیلن ۲۰۰ PPR (ساخت هیوسانگ کره)، پلی اتیلن سنگین با نام تجاری HD ۰۰۳۵ و EX ۳ (ساخت ایران) و پلی پروپیلن تقویت شده با ۲۰ درصد وزنی الیاف شیشه به طول ۳/۵ mm (ساخت نیرومند پلیمر) استفاده شده است.

### دستگاهها

اکسترودر مورد استفاده در این پژوهش، اکسترودری تک پیچ (قطر خارجی ۶۷ mm و طول ۹۰ cm) با سر متقاطع به انضمام اندازه کننده مجهز به حمام خلأ و قسمت کشنده است. قطر قسمت اندازه کننده با قطر خارجی حدیده برابر است. برای تماس بهتر پلیمر مذاب و اندازه کننده، هوای فشرده با فشار ۱۲ Psi داخل لوله دمیده می شود. سرعت واحد کشنده متناسب با سرعت پیچ تنظیم می شود. ابعاد حدیده مورد استفاده  $R_i = 20 \text{ mmm}$ ،  $R_o = 22/5 \text{ mm}$  و  $L = 245 \text{ mm}$  است. اکسترودر از سه ناحیه و حدیده از دو ناحیه گرمایی تشکیل شده است. دمای هر ناحیه به طور دقیق کنترل می شود. حدیده ساخته شده به شکل استوانه با عضو داخلی و خارجی چرخان است، که عضو داخلی در خلاف جهت عقربه ساعت و عضو خارجی در جهت عقربه ساعت می چرخد. شکل ۱ نمایی از این حدیده را نشان می دهد. آزمون XRD با دستگاه تفرق سنج مدل XPD-X Petr ساخت شرکت Philips انجام شد.

### روشها

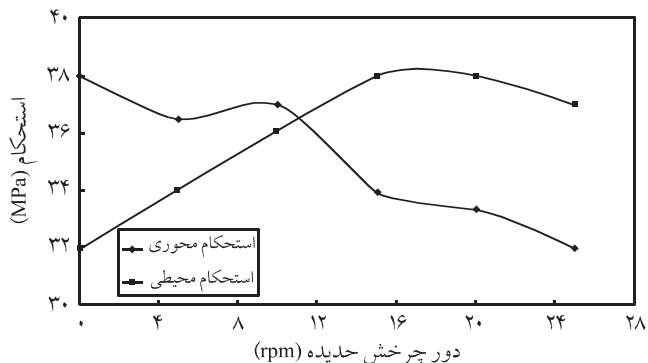
آزمون کشش برای حداقل ۴ نمونه با دستگاه کشش ساخت شرکت پارس پیگیر، مطابق با استاندارد ASTM D ۶۳۸ برای اندازه گیری استحکام محوری انجام شد، میانگین نتایج به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. برای تهیه نمونه های دمبلی شکل ابتدا قطعه ای از لوله بریده و از وسط به دو نیم می شود، سپس با دستگاه برش مناسبی که می تواند کاملاً منطبق با انحنا لوله قرار گیرد در جهت محوری بریده می شود. آزمون فشار ترکیدن طبق استاندارد ASTM D ۱۵۹۹ برای حداقل ۴ نمونه در شرکت PFP اصفهان انجام شد. در این آزمون استحکام پارگی لوله (استحکام محیطی) در فشار به مدت ۴۰ تا ۶۰ s معین شد. طول لوله مورد استفاده در این آزمون ۵۰۰ mm و دمای آب نیز ۲۰°C انتخاب شد. آزمون فشار هیدروستاتیک قابل تحمل برای حداقل ۳ نمونه طبق استاندارد ASTM D ۱۵۹۸ انجام شد. آزمون XRD با دستگاه تفرق سنج به منظور بررسی اثر چرخش حدیده روی ساختار بلوری پلیمر انجام شد.

نگهدارنده جریان مذاب پس از عبور از این بازوها به چند جریان تقسیم می شود. تعداد این خطوط جریان بستگی به تعداد بازوهای نگهدارنده دارد. این جریانها بعد از طی بازوی نگهدارنده مجدداً به هم می رسند، ولی امکان اختلاط کامل و جوش خوردن را در ادامه جریان پیدا نمی کنند، به این ترتیب به ازای هر بازوی نگهدارنده خط جوشی روی دیواره در عمق ضخامت لوله تشکیل می شود. این خط یا خطوط جوش باعث ایجاد سطح ضعیف در لوله پلیمری و کاهش استحکام محیطی آن به ویژه در مقابل فشار داخلی می شود [۱-۳].

برای انتقال سیالات معمولاً از لوله هایی با استحکام زیاد استفاده می شود. هنگامی که سیال از درون لوله عبور می کند، در اثر فشار داخلی، تنش محیطی که بزرگتر از تنش محوری است در لوله ایجاد می شود. بنابراین، استحکام محیطی لوله ها باید بیشتر از استحکام محوری باشد. از طرف دیگر، در حدیده ثابت چون زنجیرهای پلیمر مذاب در راستای خروج از دستگاه آرایش می یابند، مقاومت مکانیکی لوله های تولیدی در جهت محوری بیشتر از محیطی است که نقض غرض است. بنابراین، در لوله های تولیدی به روش سنتی نمی توان از خواص پلیمر در جهت خاص و مطلوب استفاده کرد. امروزه برای برطرف کردن معایب ذکر شده و همین طور افزایش خواص پلیمرها در جهت خاص تلاشهایی انجام شده است که عبارت است از: چرخش حدیده، ایجاد اصلاحاتی روی حدیده برای حذف خط جوش و آثار ناشی از آرایش یافتگی ناخواسته، برطرف کردن معایب لوله بعد از پایان فرایند از طریق کشش حدیده و شکل دهی جریان و استفاده از حدیده مرعش [۴-۹].

همان طور که ذکر شد یکی از راههای تغییر آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری از جهت محوری به محیطی استفاده از سامانه حدیده چرخان است. مطالعات زیادی روی تولید لوله با استفاده از حدیده چرخان انجام شده است. نتایج مطالعات نشان می دهد که با این سامانه کاهش فشار به طور عینی مشهود است و حجم خروجی با افزایش سرعت گردش عضو داخلی افزایش می یابد. بدین ترتیب استحکام در جهت محیطی بهبود یافته، خط جوش در مقطع لوله توزیع یا حذف می شود. بنابراین، امکان تولید لوله با ضخامت کمتر و استحکامی در حد لوله های معمولی، تغییر حالت شکست از حالت بسیار شکننده به حالت ملایمتری نسبت به لوله های آرایش نیافته به خصوص برای لوله های ساخته شده از uPVC و نیز عدم تورم لوله از مزایای این سامانه است [۵،۸].

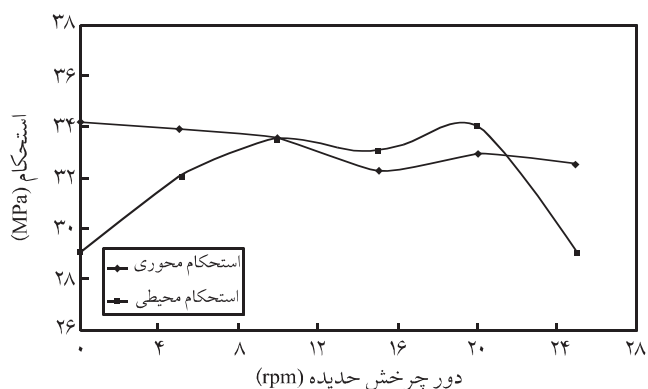
در این پژوهش، کارایی لوله های پلیمری و کامپوزیتی تولیدی در شرایط سامانه حدیده چرخان (طراحی و ساخته شده) مطالعه، ارزیابی و مقایسه شده است.



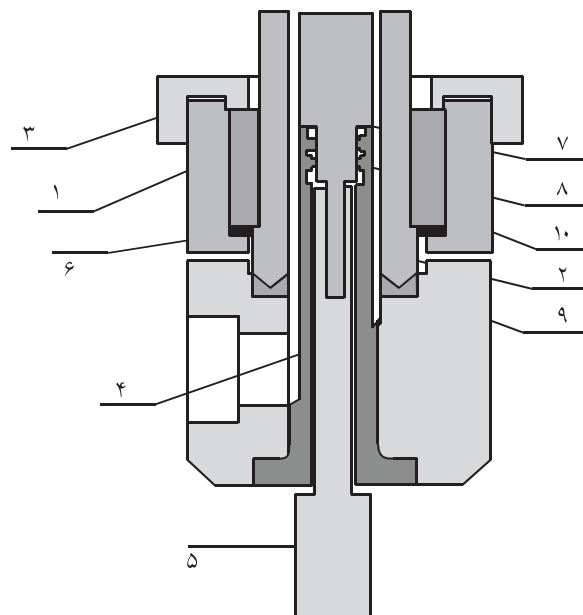
شکل ۲ نمودار تغییر استحکام محیطی و محوری در لوله‌های HD 0035 تولید شده با حدیده چرخان.

مشخص است که با افزایش دور چرخش حدیده تا 20 rpm، استحکام محیطی افزایش می‌یابد، چون زنجیرهای پلیمری و الیاف در جهت محیطی آرایش یافته‌اند. اما، از 20 rpm به بعد استحکام محیطی کاهش می‌یابد، چون در اثر نیروی برشی زیادی که در اثر چرخش حدیده به زنجیرهای مولکولی وارد می‌شود گره‌های زنجیری بین مولکولها پاره شده استحکام کاهش می‌یابد. سرعت زیاد چرخش حدیده (بیشتر از 30 rpm) باعث می‌شود محصول شکل نهایی خود را از دست بدهد.

از شکلهای ۲ و ۳ مشخص است در دور چرخش 10 rpm لوله‌ای همسانگرد که خواص آن در دو جهت یکسان است، قابل تولید است. همچنین، در شکلهای ۴ و ۵ برای لوله پلی پروپیلن و کامپوزیتی خواص در 4 rpm همگن می‌شود. بدین ترتیب در لوله HD 0035، 15 درصد، در 3 HDEX، 22 درصد، در PP 25 درصد و در نمونه کامپوزیتی 34 درصد افزایش خواص در جهت محیطی ایجاد شده است. افزون بر این، در آزمون فشار تمام نمونه‌ها رفتار شکننده نشان داده‌اند.



شکل ۳ نمودار تغییر استحکام محیطی و محوری در لوله‌های HDEX 3 تولید شده با حدیده چرخان.



شکل ۱ نمایی از حدیده چرخان: (۱) بخش اصلی بدنه حدیده، (۲) استوانه خارجی چرخان، (۳) مهره انتهایی حدیده، (۴) منحرف کننده جریان، (۵) محور گرداننده استوانه داخلی، (۶) بوش برنزی، (۷) استوانه داخلی، (۸) رولر برینگ، (۹) آب بند برنزی استوانه خارجی و (۱۰) بوش استوانه داخلی.

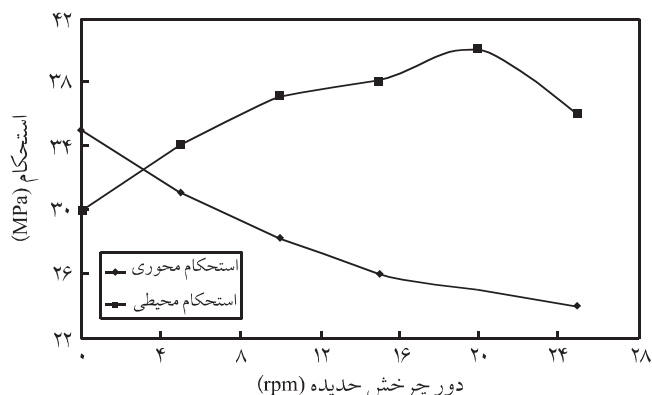
## نتایج و بحث

برای بررسی اثر چرخش حدیده بر خواص مکانیکی نمونه‌ها در جهت محوری، آزمون کشش روی نمونه‌های خالص و کامپوزیتی انجام شد که نتایج آن در شکلهای ۲ تا ۵ آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش دور چرخش حدیده، مقاومت محوری لوله‌های تولیدی کاهش می‌یابد. این کاهش در مورد نمونه کامپوزیتی بارزتر است. علت کاهش خواص نیز آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری و الیاف در جهت محیطی است. برای بررسی اثر چرخش حدیده بر خواص مکانیکی نمونه‌ها در جهت محیطی، آزمون فشار ترکیدن روی نمونه‌های خالص و کامپوزیتی انجام و تنش محیطی در لوله به کمک معادله (۱) محاسبه شد:

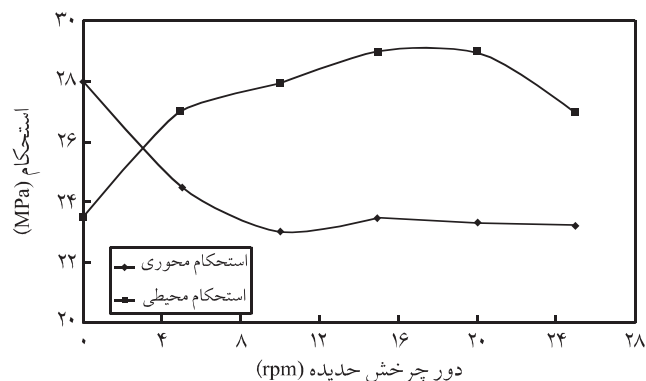
$$\sigma_h = \frac{PD_0}{2t} \quad (1)$$

در این معادله  $D_0$  قطر خارجی لوله،  $P$  فشار داخلی هنگام شکست و  $t$  ضخامت لوله است.

از مقایسه نتایج استحکام محیطی و محوری در شکلهای ۲ تا ۵



شکل ۵ نمودار تغییر استحکام محیطی و محوری در لوله‌های کامپوزیتی تولید شده با جدید چرخان.



شکل ۴ نمودار تغییر استحکام محیطی و محوری در لوله‌های PPR 200 تولید شده با جدید چرخان.

جوش در اثر گردش عضو داخلی جدید از راستای محوری به جهت محیطی است.

برای اندازه‌گیری قطر لوله‌های خروجی از اکسترودر، بعد از اینکه لوله تولید شده کاملاً سرد شد قطر خارجی لوله به کمک کولیس اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۱ آمده است.

با افزایش دور چرخش جدید قطر لوله‌های خروجی از اکسترودر کاهش یافته که این کاهش در دور ۲۵ rpm به حداکثر می‌رسد. در این حالت قطر لوله‌های تولیدی به مقدار ۱۲ درصد نسبت به حالت جدید ثابت کاهش داشته است. عموماً وقتی پلیمر از میان جدید عبور می‌کند، قطر پلیمر خروجی از آن با قطر جدید تفاوت دارد. هنگامی که پلیمر در جدید حرکت می‌کند به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک پلیمر مقداری از انرژی کرنشی پلیمر که در اثر حرکت لایه‌های مختلف سیال ایجاد شده تلف و مقداری از آن ذخیره می‌شود. این انرژی ذخیره شده در هنگام خروج سیال از جدید به شکل تورم آزاد می‌شود. هر چه مقدار بیشتری از انرژی کرنشی تلف شود در نتیجه تورم کمتر خواهد بود. هنگامی که جدید ثابت است تنش‌های عمودی ایجاد شده در مذاب

برای تعیین عمر خستگی، لوله‌های تولید شده در شرایط مختلف در فشارهای متفاوت هیدروستاتیک قرار گرفتند.

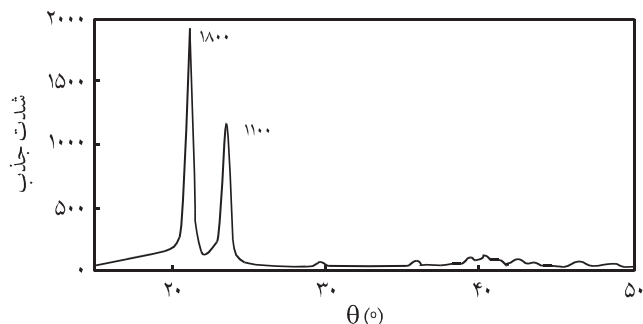
مطابق استاندارد ایران تمام نمونه‌های تولیدی فشار ۲۲ atm را به مدت ۶۰ min در دمای ۲۰°C تحمل کردند، هیچ نقص یا تورم و ساقط شدگی مشاهده نشد. بنابراین، برای مقایسه و تعیین عمر خستگی، آزمون تا زمان ساقط شدگی و با فشارهای متفاوت ادامه یافت که نتایج آن در شکل ۶ آمده است.

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است کاهش اندک مقدار بارگذاری باعث افزایش قابل توجه طول عمر لوله می‌شود. بهترین طول عمر مربوط به لوله‌های ساخته شده با دور چرخش ۲۰ rpm است.

چنانچه به نمونه‌هایی که در اثر فشار داخلی شکسته شده‌اند، دقت شود. مشاهده می‌شود که زاویه خط شکست نسبت به محور لوله در نمونه‌های تولیدی با تغییر دور چرخش استوانه داخلی تغییر می‌کند، به طوری که در جدید معمولی زاویه شکست در راستای محور لوله است و با افزایش سرعت چرخش به طور نسبی افزایش می‌یابد تا اینکه در دور ۲۰ rpm به تقریباً زاویه ۱۵ می‌رسد. این مطلب دلیلی بر تغییر زاویه خط

جدول ۱ قطر خارجی لوله‌های تولید شده (mm) در دورهای متفاوت چرخش عضو داخلی.

قطر خارجی لوله PP	قطر خارجی لوله HD ۰۰۳۵	قطر خارجی لوله HDEX ۳	دور چرخش (rpm)
۴۷	۴۷/۵	۴۶	۰
۴۵	۴۴	۴۴	۵
۴۳/۵	۴۳	۴۳	۱۰
۴۲/۵	۴۲/۵	۴۳/۵	۱۵
۴۲	۴۳	۴۳	۲۰
۴۱	۴۲	۴۲	۲۵



شکل ۸ طیف XRD نمونه HD0035 در حالت بدون چرخش.

سطح چرخنده، نیروی برشی اعمالی روی مذاب کاهش می‌یابد. بنابراین، ساختار بلوری یا آرایش یافتگی نیز کاهش می‌یابد. این ساختار ممکن است ساختار شیش کباب به شکل زنجیرهای کشیده بلوری باشد که در اثر نیروی برشی حاصل شده‌اند. با توجه به سطح زیر پیکها بلورینگی در حالت حدیده متحرک با دور ۲۰ rpm در حدود ۲۰ درصد نسبت به حدیده ساکن افزایش یافته است.

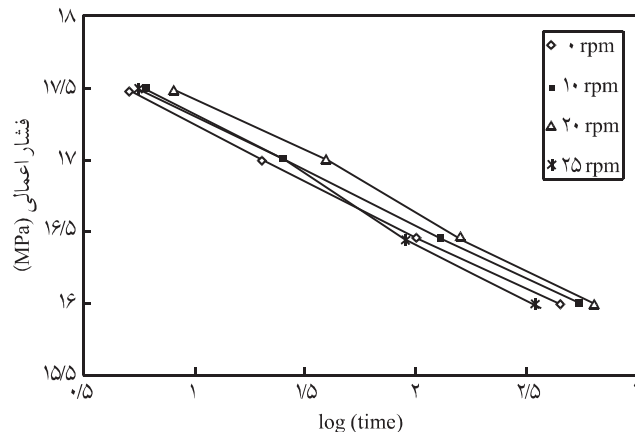
### نتیجه‌گیری

با افزایش دور چرخش حدیده قطر لوله‌های خروجی از اکسترودر کاهش یافته که این کاهش در دور ۲۵ rpm به حداکثر رسیده است. در این حالت قطر لوله‌های تولیدی به مقدار ۱۲ درصد نسبت به حالت حدیده ثابت کاهش داشته است.

- در اثر چرخش حدیده نیروی برشی که روی مذاب اعمال می‌شود باعث تشکیل بلورهایی می‌شود که با دور شدن از سطح چرخنده نیروی برشی که روی مذاب اعمال می‌شود کاهش می‌یابد. بنابراین، ساختار بلوری یا آرایش یافتگی نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از نتایج XRD مشخص شده که با افزایش دور چرخش حدیده تا حدود ۲۰ rpm بلورینگی حدود ۲۰ درصد نسبت به حدیده ساکن افزایش یافته است.

- نتایج بدست آمده از آزمایشهای خواص مکانیکی مبین آن است که با افزایش دور چرخش حدیده مقاومت محیطی در لوله HD0035، ۱۵ درصد، در لوله ۳ HDEX، ۲۲ درصد، در لوله PP ۲۵ درصد و در لوله کامپوزیتی ۳۴ درصد افزایش می‌یابد.

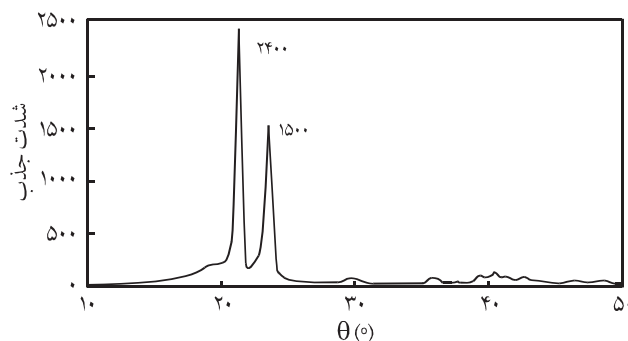
- برای پلی اتیلن سنگین در دور چرخش ۱۰ rpm لوله ای همسانگرد که خواص در دو جهت یکسان است، ایجاد شده است. همچنین، برای لوله پلی پروپیلن و کامپوزیتی خواص در ۴ rpm همگن می‌شود. - افزایش مقاومت محیطی همزمان با افزایش دور چرخش حدیده باعث



شکل ۶ مقایسه طول عمر لوله‌های تولیدی در دورهای چرخشی متفاوت.

جهتشان به سمت بیرون است و هنگامی که پلیمر از حدیده خارج می‌شود متورم می‌شود. اما، هنگامی که حدیده می‌چرخد تنشهای عمودی ایجاد می‌شود که جهت آن به سمت داخل است. بنابراین، پلیمر خارج شده از حدیده دو تنش با جهت مخالف را تحمل می‌کند. بسته به جهت برابند تنشها، قطر ماده خارج شده کمتر یا بیشتر خواهد شد. در این حالت چون قطر ماده خارج شده کمتر از قطر حدیده است، بنظر می‌رسد که تنشهای عمودی ایجاد شده به سمت داخل است و باعث کاهش قطر ماده خارج شده از حدیده خواهد شد.

آزمون XRD به منظور بررسی اثر چرخش حدیده بر ساختار بلوری پلیمر انجام شد. نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. در اینجا تنها از سطح داخلی لوله طیف گرفته شده است. افزایش ارتفاع پیکها به طور کیفی نشان می‌دهند که چرخش حدیده منجر به افزایش درصد بلورینگی می‌شود. در اثر چرخش حدیده نیروی برشی که روی مذاب اعمال می‌شود باعث تشکیل بلورهایی می‌شود که با دور شدن از



شکل ۷ طیف XRD نمونه HD0035 در حالت چرخش عضو داخلی با دور ۲۰ rpm.

### قدردانی

از شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی ایران به دلیل حمایت مالی در اجرای این طرح پژوهشی قدردانی می‌شود.

کاهش خواص در جهت محوری می‌شود.

- با توجه به آزمون فشار هیدروستاتیک مشخص شد که بهترین طول عمر مربوط به لوله‌هایی است که با دور ۲۰ rpm تولید شده‌اند.
- با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان لوله‌هایی مستحکم در حد استاندارد با ضخامت کمتر تولید کرد.

### مراجع

1. Saheban M., *Design and Manufacture of Die with Rotating Member to Produce High Performance Pipe*, MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1994.
2. Bakhtiari M.R., *Extrusion Production of Weld-less High Performance Pipe by Rotating Die System and Investigation of Mechanical Properties*, MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1996.
3. Baradaran Ajili S., *Manufacture of High Performance Polymeric Pipe Using Rotating Die System*, MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1997.
4. Bilgin S., *Extrusion of Pipe Using a Rotating Die System*, MSc Thesis, Mechanical Department, University of Manchester, UK, 1981.
5. Long J., Kaizh S. and Guan Q., A Mandrel Rotating Die to Produce High-hoop Strength HDPE Pipe by Self-reinforcement, *J. Appl. Polym. Sci.*, **69**, 323-328, 1998.
6. Lee K.S., Lai M.O. and Chen C.M., Flow-forming of Super-tough Polypropylene Pipes Using a Twin Motor-driven Rollers Setup, *J. Mater. Proc. Technol.*, **65**, 228-236, 1997.
7. Ward I.M., Morath C.C., Taraiya A.K. and Richardson A., The Development of Continuous Large-scale Die Drawing for the Production of Oriented Polymer Rods and Tubes, *Plast. Rubber Compos. Proc. Applicat.*, **19**, 55-62, 1993.
8. Kwon J.A. and Truss R.W., The Work of Fracture in Uniaxial and Biaxial Oriented Unplasticised PVC Pipes, *J. Eng. Fract. Mech.*, **69**, 605-616, 2002.
9. Huang Y., Gentle U.C.R., Lacey M. and Prentice P., Analysis and Improvement of Die Design for the Processing of Extruded Plastic Pipes, *Mater. Des.*, **21**, 465-475, 2000.