

## بررسی روشهای ساخت پلی پروپیلن با استحکام مذاب بالا

سید عباس موسوی\* - مسعود فرونچی\* - سوسن دادبین\*\*

**چکیده:** پلی پروپیلن بدلیل دارا بودن ساختار ملکولی خطی دارای استحکام مذاب پایینی می‌باشد و همین نقیصه سبب شده است تا کاربرد این ماده در فرآیندهایی نظیر ترموفرموینگ، قالبگیری دمشی و فیلم دمشی محدود گردد. یکی از مهمترین روشهای برطرف کردن این محدودیت، شاخه‌دار کردن پلی پروپیلن می‌باشد. در این پژوهش ضمن معرفی پلی پروپیلن با استحکام مذاب بالا، پلی پروپیلن شاخه‌دار شده، خصوصیات و روشهای تولید آن مورد بررسی قرار خواهند گرفت. سپس مکانیسم مناسب برای هریک از روشها ارائه خواهد گردید.

واژه های کلیدی: نانو تکنولوژی، self cleaning، اثر hydrophobic، اثر hydrophilic

### ۱. مقدمه

Berthelot در سال ۱۸۶۹ توانست پروپیلن را از طریق مجاورت آن با اسید سولفوریک غلیظ، پلیمریزه نمایند. محصول بدست آمده که بصورت روغن غلیظ شده بود، در دمای اتاق خواص مورد نیاز کاربردهای صنعتی از خود نشان نمی‌دهد. Natta در سال ۱۹۵۵ توانست با استفاده از کاتالیستهای Organo-Metallic بر پایه‌ی تیتانیوم و آلومینیوم (کاتالیستهای زیگلر-ناتا) پلی پروپیلن با جرم ملکولی بالا را تهیه نماید که کاندیدای مناسبی برای کاربردهای صنعتی بوده است. پلیمر حاصل نیمه کریستالی بوده و بدلیل دارا بودن خواص مکانیکی قابل توجه سریع توسعه یافت. امروزه محدوده‌ی وسیعی از هموپلیمرهای PP و کوپلیمرهای بلاک و رندم آنها تهیه شده است و در صنایع متنوعی نظیر ساخت قطعات اتومبیل، صنایع

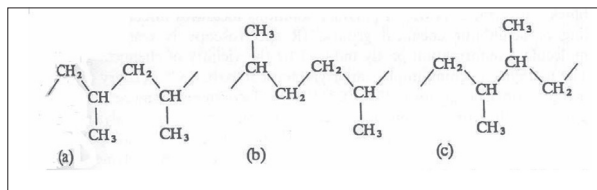
بسته‌بندی و ساخت الیاف (Textile و Non-Woven) بکار گرفته شده است.

ملکول پروپیلن دارای ساختار شیمیایی نامتقارن می‌باشد، از اینرو فرآیند پلیمریزاسیون آن می‌تواند به سه نوع توالی در ساختار پلیمر حاصل منتهی گردد که در شکل ۱ نشان داده شده است.

بدلیل اثرات ناشی از ممانعت فضایی گروه‌های متیل، توالی سر به دم دارای نظم ساختاری بالاتری نسبت به سایر انواع می‌باشد.

پلی پروپیلن دارای سه پیکربندی فضایی مختلف می‌باشد که عبارتند از ایزوتکتیک (iPP)، سیندیوتکتیک (sPP) و اتکتیک. در نوع ایزوتکتیک گروه‌های متیلی در یک طرف صفحه‌ی عبوری از زنجیر اصلی می‌باشند. در نوع سیندیوتکتیک گروه‌های متیل بصورت یک در میان در دو طرف صفحه‌ی عبوری از زنجیر قرار می‌گیرند. در نوع اتکتیک هم هیچ نوع نظم خاصی وجود ندارد.

iPP تجاری شده دارای خصوصیات متنوعی می‌باشد که موجبات استفاده‌ی گسترده‌ی آن را فراهم آورده است. خصوصیات این ماده را می‌توان با انجام برخی اصلاحات بعدی افزایش داد. مهمترین اصلاحاتی که در حال حاضر انجام می‌گیرد عبارتند از: کنترل فرآیند تخریب، شبکه‌ای کردن، عاملیت دار نمودن و شاخه‌دار نمودن. در سه روش اصلاحی اول از فرآیند اکستروژن واکنشی استفاده می‌گردد. پلی پروپیلن علی‌رغم اینکه دارای خصوصیات بسیار مفیدی می‌باشد، اما استحکام مذاب آن پایین بوده و در حالت مذاب هیچگونه سختی کرنشی از خود نشان نمی‌دهد که این بدلیل خطی بودن ساختار ملکولی زنجیر پلی پروپیلن می‌باشد. ساختار ملکولی خطی در پلی پروپیلن نتیجه‌ی مستقیم بکارگیری کاتالیستهای زیگلر-ناتا در فرآیند



شکل ۱: سه نوع توالی متفاوت در پلی پروپیلن، (a) سر به دم، (b) سر به سر، (c) دم به دم

\* دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

\*\* دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، سازمان انرژی اتمی

شاخه‌های بلند تحقیقاتی را انجام داده است. براساس نتایج بدست آمده از Rheotens مشخص گردید که استحکام مذاب پلی‌پروپیلن دو قله‌ای خطی نسبت به پلی‌پروپیلن استاندارد افزایش یافته است در حالیکه مقدار Drawability بدون تغییر باقی می‌ماند. براساس نتایج بدست آمده توسط این شرکت حضور ملکولهای شاخه‌دار شده به شدت سبب افزایش دانسیته‌ی درهم رفتگی مولکولها و در نتیجه Drawability در حالت مذاب می‌شود. شکل ۲ مقایسه‌ای از طرفی Extensibility مذاب (مقاومتی که اجازه می‌دهد مذاب بدون پارگی تغییر شکل کششی داشته باشد) قویا تابع درهم تنیدگی مولکولها بوده و با ایجاد شاخه‌های بلند تقویت می‌گردد (شکل ۲ ملاحظه گردد). همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است Extensibility بالاتر در پلی‌پروپیلن شاخه‌دار سبب افزایش مقاومت در برابر کشیده شدن که همان استحکام مذاب باشد با افزایش سرعت کشیده شدن مذاب پلیمری می‌گردد.

## ۲. روشهای ساخت پلی‌پروپیلن شاخه‌دار

جهت تولید پلی‌اتیلن با شاخه‌های بلند از فرآیند پلیمریزاسیون رادیکالی استفاده می‌شود که به خوبی شناخته شده است. شاخه‌های بلند در ساختار ملکولی پلی‌اتیلن سبک از طریق واکنش انتقال بین ملکولی ایجاد می‌شوند. فناوری مربوط به کاتالیستهای زیگلر ناتا در تولید iPP در وضعیتی نیست که بتواند برای تولید پلی‌پروپیلن با شاخه‌های بلند بکار روند. از اینرو از روشهای دیگری برای این منظور استفاده می‌گردد. بطور کلی می‌توان گفت که برای تولید پلی‌پروپیلن شاخه‌دار از سه روش می‌توان استفاده نمود که اساس کار در دو روش اصلاح پلی‌پروپیلن خطی تولید شده در یک راکتور بعد از راکتور پلیمریزاسیون بوده و در روش سوم از کاتالیستهای مخصوصی نظیر کاتالیست متالوسن برای ایجاد شاخه حین فرآیند پلیمریزاسیون استفاده می‌گردد. به لحاظ تجاری دو روش اول دارای اهمیت می‌باشند و استفاده از کاتالیستهای متالوسن هنوز از اهمیت چندانی برخوردار نیست. دو شرکت Montell و Borealis با استفاده از فناوری اصلاح بعد از راکتور پلیمریزاسیون توانسته‌اند پلی‌پروپیلن شاخه‌دار شده تولید را بصورت تجاری نمایند. بررسی دقیقتر هر یک از سه روش بکار رفته در تولید پلی‌پروپیلن با استحکام مذاب بالا در ذیل ارائه شده است.

### ۲-۱ روش شیمیایی

آزمایشات و یافته‌های بدست آمده از واکنشهای گرافت کردن مونومرها بر روی پلی‌پروپیلن در حضور مواد پراکسیدی R&D شرکت Borealis را به سمت روش جدیدی برای تولید پلی‌پروپیلن با شاخه‌های بلند (LCB-PP) هدایت کرد. بعد از انجام تحقیقات و پژوهشهای لازم، شرکت مذکور موفق شد اولین بار پلی‌پروپیلن شاخه‌دار را بصورت تجاری با استفاده از روشهای شیمیایی تولید بنماید. در روش ابداعی شرکت Borealis شاخه‌های بلند با بکارگیری تکنیکهای شیمیایی بر روی پلی‌پروپیلن خطی ایجاد می‌گردد. برای این منظور انتخاب و اضافه

پلیمریزاسیون آن می‌باشد. از اینرو می‌توان گفت پایین بودن استحکام مذاب سبب محدودیت کاربرد این پلیمر در فرآیندهایی نظیر قالبگیری دمشی و ترموفرمینگ می‌شود. روشهایی عمومی که برای افزایش استحکام مذاب وجود دارند، عبارتند از:

- افزایش جرم ملکولی متوسط
- پهن تر کردن توزیع جرم ملکولی
- آلیاژسازی با اولیگومرها و یا پلیمرهای شاخه‌دار
- ایجاد شاخه‌های بلند در زنجیر اصلی

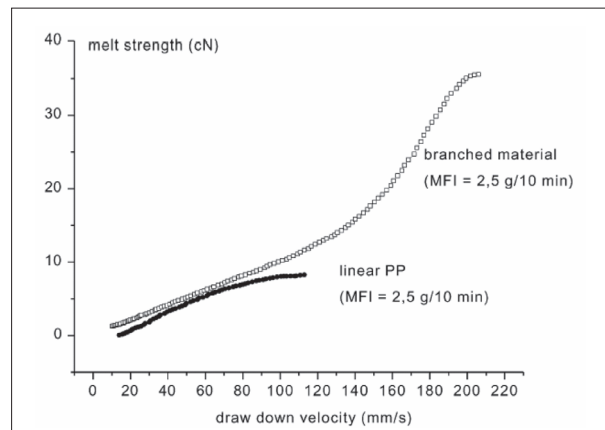
افزایش متوسط جرم ملکولی و یا پهن تر کردن توزیع جرم ملکولی علی‌رغم اینکه موجب بهبود در استحکام مذاب می‌گردد، اما تاثیری در افزایش کشش پذیری مذاب ندارد. در حالیکه افزودن ساختار شاخه‌دار و یا ایجاد شاخه در ساختار ملکول پلیمری می‌تواند سبب افزایش کشش پذیری مذاب گردد. حضور شاخه‌های بلند و ضریب پراکندگی بالا اثرات بسیار مهمی بر روی ویژگیهای پلی‌پروپیلن مذاب دارد. از اینرو به بررسی پلی‌پروپیلن با شاخه‌های بلند خواهیم پرداخت.

همانگونه که پیشتر هم اشاره شد، پلی‌پروپیلن استاندارد با draw-ability (که معادل با ماکزیمم سرعت کشیده شدن به سمت پایین است) پایین مذاب و کاهش ماکزیمم استحکام مذاب با کاهش وزن ملکولی شناخته می‌شود.

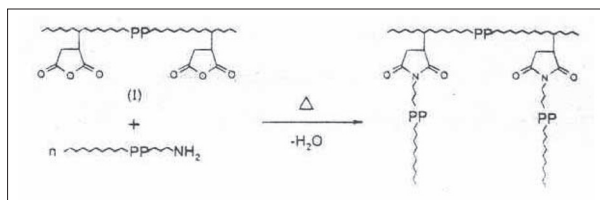
رابطه‌ی بین خصوصیات پلی‌پروپیلن خطی و شاخه‌دار مشابه با رابطه‌ی بین LDPE و HDPE می‌باشد. محصولات شاخه‌ای شده سختی کرنش، استحکام مذاب و drawability بالاتری را نسبت به نوع خطی آن از خود نشان می‌دهند.

استحکام مذاب پلی‌پروپیلن تابعی از وزن ملکولی، ضریب پراکندگی، تعداد شاخه‌های بلند و دانسیته‌ی درهم رفتگی است. تعداد شاخه و ضریب پراکندگی در پلی‌پروپیلن شاخه‌دار به ترتیب برابر با ۰/۱۵ - ۰/۰۵ شاخه به ازای ۱۰۰۰ کربن و بزرگتر از ۴ می‌باشد.

شرکت Borealis یکی از تولید کنندگان پلی‌پروپیلن با استحکام مذاب بالا بر روی پلی‌پروپیلن با توزیع دو قله‌ای (Bimodal) خطی و بدون



شکل ۲: استحکام مذاب پلی‌پروپیلن اصلاح شده بصورت تابعی از سرعت کشیده شدن بسمت پایین در دمای ۲۰۰ C



شکل ۴: مکانیسم روش Lu برای ایجاد شاخه‌های بلند بر روی زنجیر اصلی پلی پروپیلن<sup>۶</sup>

کننده‌ی شبکه به پلی پروپیلن، آنرا شبکه‌ای نمایند. آنها از چهار عامل متفاوت برای این منظور استفاده کردند که عبارت بودند از -2-bibis(furanyl) aldazine (VP3), ethyl 2-carboxyethyl 3-(2-furanyl) propenoate (CEFA), butyl 3-(2-furanyl) propenoate (BFA) و ((N,N dimethylen p-phenylen bis maleimide (BMI)) عامل پراکسیدی مصرف شده هم 2,5-dimethyl-2,5-di-tert-butylperoxy hexane بوده است. نتایج حاصل مطالعات رئولوژیکی بر روی محصولات بدست آمده عبارت است از:

- اضافه کردن مقادیر پایین VP3 به پلی پروپیلن سبب شاخه‌دار شدن آن و مقادیر زیادتر آن سبب شبکه‌ای شدن پلی پروپیلن می‌گردد.
- اضافه کردن عامل واسطه‌ی تک عاملی (CEFA) سبب گسترش زنجیر می‌گردد، ولی MFR آن همچنان بالاست که حکایت از بالا بودن سرعت پارگی و پایین بودن شبکه‌ای شدن دارد.
- میزان MFR در پلی پروپیلن حاصل از اضافه شدن BFA به آن، کمتر از وقتی است که VP3 و CEFA به آن اضافه گردد. بنابراین می‌توان گفت که BFA قادر به جلوگیری از فرآیند گسست می‌باشد.
- افزودن BMI با سرعت سبب شبکه‌شدن پلی پروپیلن می‌گردد، ولی توانایی جلوگیری از گسست - را ندارد. از اینروست که پلی پروپیلن اصلاح شده دارای MFR بالا، ساختار شدیداً شاخه‌ای و جرم ملکولی پایین می‌باشد.

Gotsis<sup>۸</sup> نیز با استفاده از Proxy-dicarbonates توانست در یک اکسترودر تا حدی پلی پروپیلن را شاخه‌دار نماید و آنرا از دیدگاه رئولوژیکی مورد بررسی قرار دهد.

استفاده از مونومرها تک عامله که با ایجاد رزونانس سبب پایداری رادیکالها شده و مواد پراکسیدی با دامای تجزیه‌ی مشخص، در فرآیند اصلاح پلی پروپیلن محصولی شبکه‌ای نشده همراه با زنجیرهای بلند را ایجاد خواهد کرد که با نام تجاری Daploy HMS وارد بازار می‌شود.<sup>۳</sup>

## ۲-۲ استفاده از اشعه‌های پرنرژی

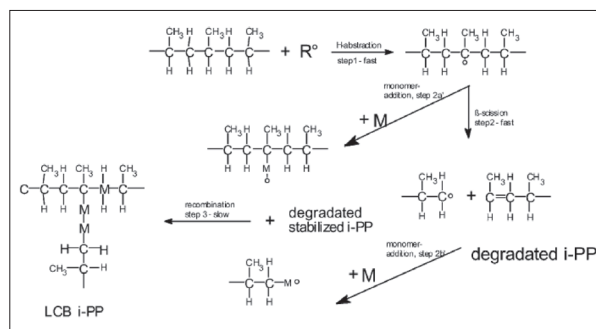
شرکت Montell از حدود ۱۰ سال پیش توسعه‌ی پلی پروپیلن با شاخه‌های بلند را با بکارگیری فرآیند تابش‌دهی اشعه‌ی الکترونی شروع کرده است. در روش بکار گرفته شده توسط این شرکت نیز همانند روش شیمیایی، پلی پروپیلن شاخه‌دار از استفاده از پلی پروپیلن خطی حاصل می‌گردد. شرکت Montell طی تحقیقات خود توانست زنجیره‌های بلندی را بصورت شاخه‌های عرضی از طریق

کردن مقادیر کمی از مونومرهایی که با ایجاد یک رزونانس خاص سبب پایداری رادیکال حاصله می‌شوند ضروری است. محققین شرکت Borealis توانستند برای اولین بار امکان افزایش پایداری رادیکالهای کربن را تشخیص دهند. آنها دریافتند که واکنش مونومر با رادیکال حاصل از فرآیند جذب هیدروژن (ماکرورادیکال اولیه) و ماکرورادیکال حاصل از تخریب ماکرورادیکالهای اولیه (ماکرورادیکال ثانویه) سبب پایداری این رادیکالها می‌شود. این پایداری سبب می‌گردد تا ترکیب مجدد رادیکالهای مذکور بگونه‌ای که در شکل ۳- نشان داده شده اتفاق بیافتد.<sup>۳</sup> منظور از degraded stabilized i-PP که در شکل ۳ بیان شده است همان رادیکالهای ثانویه‌ی پایدار شده می‌باشد. ترکیب واکنشهای گرفت شدن و ترکیب مجدد در شرایط میانه‌ای بین حالت جامد و فاز مذاب پلی پروپیلن انجام می‌گیرد که برای این منظور نیاز به طراحی اکسترودر خاصی می‌باشد.

Wong و [Baker 5] از استاینر بعنوان مونومر پایدارکننده‌ی رادیکال استفاده کرده‌اند و توانسته‌اند شاخه‌های بلندی را بر روی زنجیر اصلی ایجاد کنند. محققین ژاپنی شاخه‌های بلند را بر روی زنجیر اصلی پلیمر با استفاده از مونومرهای چند عاملی (نظیر -triallylcyanurates, tetramethylolmethantetraacrylates و سیلانها) ایجاد نموده‌اند.<sup>۴</sup> در تمامی واکنشهای انجام شده علاوه بر شاخه‌های بلند، بخش شبکه‌ای شده‌ای نیز تولید می‌شود که اثر منفی بر روی خصوصیات جریان پذیری پلیمر دارد. همچنین Wang و همکارانش<sup>۵</sup> توانسته‌اند در یک اکسترودر واکنشی دو پیچه پلی پروپیلن شاخه‌دار را با استفاده از مونومر چند عاملی -Pentaerythritol Triacrylate تولید نمایند.

Lu و [Chung<sup>۶</sup>] هم روش جدیدی برای ایجاد شاخه با ساختار ملکولی مشخص شده‌ای را ابداع کردند که شماتیک آن در شکل ۴ نشان داده شده است. در این روش شاخه‌ها از طریق واکنش بین اینترید مالئیک گرفت شده بر روی پلی پروپیلن (PP-g-MA) و گروه‌های آمینسی موجود در انتهای زنجیرهای پلی پروپیلن (PP-t-NH<sub>2</sub>) ایجاد می‌شوند.

Romani<sup>۷</sup> و همکاران سعی کردند تا با اضافه کردن عوامل ایجاد



شکل ۳: مکانیسم تولید پلی پروپیلن شاخه‌دار

به روش شیمیایی<sup>۳</sup>

آمده است، می‌باشد. دمای عملیاتی پایین و حدود ۶۰-۱۲۰°C بوده و محیط تابش باید عاری از اکسیژن باشد. مکانیسم انجام فرآیند بطور شماتیک در شکل ۵- نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، مرحله‌ی دوم بعد از فرآیند جذب هیدروژن، واکنش گسست می‌باشد. مرحله‌ی سوم شامل ترکیب مجدد دو رادیکال و تشکیل i-PP با شاخه‌های بلند می‌باشد. در دماهای بالاتر واکنش تخریب سریعتر بوده و واکنش ترکیب مجدد تا اندازه‌ای کاهش می‌یابد بطوریکه عملاً تخریب پلیمر اتفاق می‌افتد. Scheve<sup>۱۰</sup> ضمن تولید پلی‌پروپیلن شاخه‌دار به این روش، نشان داد که در اثر تابش اشعه‌ی پرنانژی، شاخه‌ها عمدتاً در قسمت آمورف پلی‌پروپیلن محبوس می‌شوند. چراکه حجم آزاد و تحرک پذیری سگمنتها در این بخش برای ماکرورادیکالها کافی می‌باشد. همچنین می‌توان با تابش یون بر روی پلی‌پروپیلن، آنرا شاخه‌دار کرد.<sup>۱۱</sup>

### ۲-۳ استفاده از فرآیندهای پلیمریزاسیون

Weng و همکارانش<sup>۱۲</sup> روش جدیدی را برای تولید پلی‌پروپیلن شاخه‌دار ارائه داده‌اند که ساده‌تر و کارتر از روش‌هایی است که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس کار در این روش تولید پلی‌پروپیلن شاخه‌دار با استفاده از فرآیند پلیمریزاسیون مونومر پروپیلن می‌باشد. مراحل انجام کار در این روش عبارت است از:

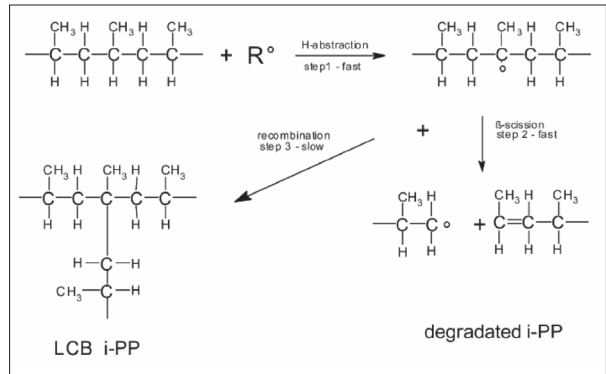
- برقراری تماس بین مونومر پروپیلن با کاتالیستی که توانایی تولید پلیمر یکنواختی دارد (Single Site) در یک راکتور حاوی حلال یا ماده‌ی رقیق کننده در محدوده‌ی دمایی ۱۲۰-۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

- جداسازی پلی‌پروپیلن شاخه‌دار با پراکندگی (polydispersity) کمتر یا برابر ۴ و دمای ذوب بالاتر از ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

کاتالیست مورد استفاده در این تحقیق از نوع متالوسن بوده است که شماتیک ساختار آن در شکل ۶- نشان داده شده است. Weng و همکارانش<sup>۱۲</sup> از پنج نوع کاتالیست متفاوت و سه نوع راکتور ناپیوسته، نیمه پیوسته و پیوسته برای تولید پلی‌پروپیلن شاخه‌دار شده استفاده کرده‌اند و محصول بدست آمده را تحت آزمایشات شناسایی قرار داده و خواص رئولوژیکی آنها را مورد بررسی قرار دادند. Ye و Zhu<sup>۱۳</sup> با استفاده از کاتالیستهای Single Site آهن و زیرکونیم به تولید پلی‌پروپیلن شاخه‌دار پرداختند که زنجیر اصلی از نوع ایزوتکتیک و شاخه‌های آن از نوع اتکتیک بوده است. کاتالیست آهن ماکروم اتکتیک با گروه‌های انتهایی 1-Propenyl تولید می‌کند و کاتالیست زیرکونیم نیز با استفاده از ماکرومها کوپلیمر را ایجاد می‌نماید.

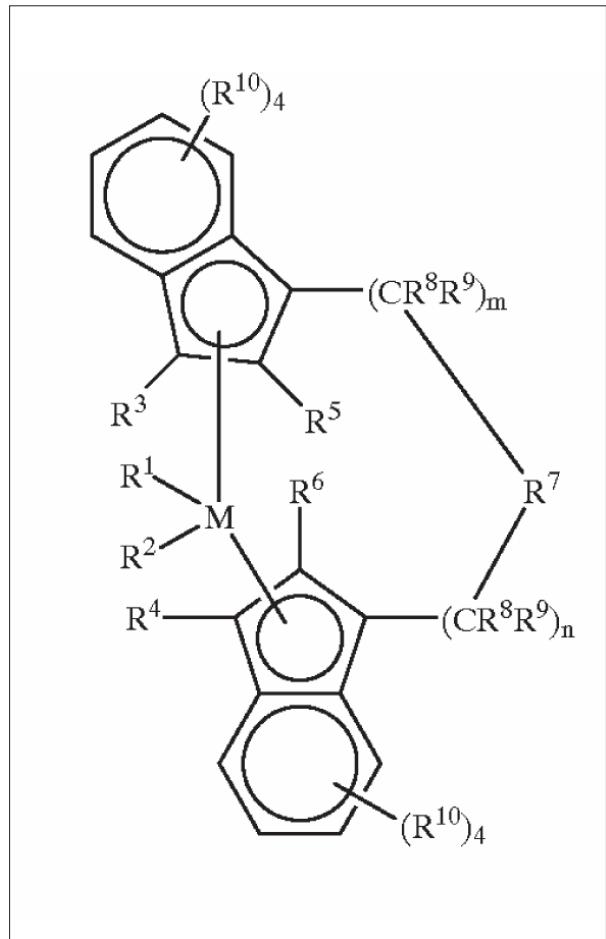
### ۳- نتیجه گیری

پلی‌پروپیلن علی‌رغم دارا بودن خواص فیزیکی و مکانیکی بسیار مناسب، بدلیل کم بودن استحکام مذاب پایین قابل بکارگیری در فرآیندهایی که مذاب تحت نیروهای کششی قرار دارد نیست. همین نقیصه سبب گردید تا کاربرد این پلیمر در فرآیندهایی نظیر



شکل ۵: مکانیسم شاخه‌دار شدن پلی‌پروپیلن با استفاده از اشعه‌ی پرنانژی<sup>۲</sup>

واکنش رادیکالی در دمای پایینتر از ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد در ملکول پلی‌پروپیلن ایجاد نماید و یک توازن بین واکنشهای تخریب و Build-up برقرار کند. روش ابداعی شرکت Montell شامل تابش اشعه‌ی الکترونی بر روی پودر پلی‌پروپیلنی که مستقیماً از سنتر بدست



شکل ۶: شماتیک فرمول شیمیایی یک کاتالیست متالوسن<sup>۱۲</sup>

Polypropylene", *Polymer*, Vol. 38, No. 11, pp. 2781-2789, 1997.

[6] Lu, B., Chung, T.C., "Synthesis of Long Chain Branched Polypropylene with Relatively Well Defined Molecular Structure", *Macromolecules*, 32, pp. 8678-8680, 1999.

[7] Romani, F., Corrieri, R., Braga, V., Ciardelli, F., "Monitoring the Chemical Crosslinking of Propylene Polymers through Rheology", *Polymer*, 43, pp. 1115-1131, 2002.

[8] Gotsis, A.D., "Elongational Rheology of Branched Polypropylene", 3rd International Meeting of Hellenic Society of Rheology, Greece, pp. 59-60, 2001.

[9] Ratzsch, M., Bucka, H., Panzer, U., "Polypropylene Foams", *Polypropylene: An A-Z Reference*, Edited by Karger-Kocsis, J., Kluwer Publishers, 1999.

[10] Scheve, B. J., Mayfield, J. W., DeNicola Jr., A. J., "High melt strength, propylene polymer, process for making it, and use thereof", U.S. Pat. 5,731,362, 1998.

[11] Raetzch, M., Bucha, H., Hesse, A., Panzer, U., Reichelt, N., "Modified Polypropylene of Improved Processibility", U.S. Pat. 6,433,109.

[12] Weng, W., Markel, E. J., Dekmezian, A. H., Arjunan, P., "Branched Polypropylene Compositions", U.S. Pat. 6,225,432, 2001.

[13] Ye, Z., Zhu, S., "Synthesis of Branched Polypropylene with Isotactic Backbone and Atactic Side Chains by Iron and Zirconium Single-Site Catalysts", *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 41, No. 8, pp. 1152-1159, 2003.

ترموفرمینگ و ساخت فوم که کاربرد وسیعی در صنعت خودروسازی دارند با محدودیت مواجه گردد. بهبود استحکام مذاب می تواند موجبات افزایش دامنه‌ی کاربرد این پلیمر را بخصوص در صنعت خودروسازی و ساخت قطعات اتومبیل فراهم آورد. از اینرو در این مقاله انواع روشهای افزایش استحکام مذاب پلی پروپیلن مورد بررسی قرار گرفته و مشخص گردید که ایجاد ساختار شاخه‌ای مناسبترین روش برای این منظور می باشد. بطور کلی سه روش برای ایجاد ساختار شاخه‌ای در پلی پروپیلن وجود دارد که عبارتند از روش شیمیایی، استفاده از اشعه‌های پر انرژی و استفاده از کاتالیستهای متالوسن بجای زیگلر-ناتا در حین فرآیند پلیمریزاسیون. مشخص گردید که از میان این روشها، دو روش اول دارای اهمیت تجاری می باشند.

مراجع:

[1] Karger-Kocsis, J., "Polypropylene: Structure and Morphology", Vol. 1, CHAPMAN & HALL, 1995.

[2] Wang, X., Tzoganakis, C., Rempel, G. L., "Chemical Modification of Polypropylene with Peroxide/Pentaerythritol Triacrylate by Reactive Extrusion", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 61, pp. 1395-1404, 1996.

[3] Ratzsch, M., Arnold, M., Borsig, E., Bucka, H., Reichelt, N., "Radical Reactions on Polypropylene in the Solid State", *Prog. Polym. Sci.*, 27, pp. 1195-1282, 2002.

[4] Beren, J.R., DeMaio, V.V., "On-Line Melt Strength Enhancement of Polypropylene for Extrusion Coating", SPE, ANTEC, 1998.

[5] Wong, B., Baker, W. E., "Melt Reology of Graft Modified