

# **A review of **commercial** applications of hydroxyl terminated polybutadiene and its derivatives**

**Komeil Pahlavani Bidgoli, Mahmoud Heydari\***

**Faculty of engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran**

**P.O. Box 1698715461**

**\* Mahmoud.heydari@ihu.ac.ir**

## **Abstract**

Hydroxyl-terminated polybutadiene resin is used as prepolymer of binder in the preparation of composite solid propellant in military industry. The unique properties of this resin and its derivatives have significantly extended the commercial and civilian applications of these substances. In this article, different commercial applications of hydroxyl terminated polybutadiene have been investigated. According to previous studies, incorporation of small amounts of hydroxyl terminated polybutadiene can significantly improve the mechanical properties, especially the impact resistance, of various composites and thermosetting resins. We have also addressed the use of this resin in the preparation and synthesis of adhesives and sealants. Utilization of hydroxyl terminated polybutadiene in the preparation of waterproof membranes with unique capabilities and various applications, for instance in the oil industry, is another interesting application that has been described. Moreover, this resin can be used as an additive to increase the dielectric strength, especially in the automotive industry. Thereafter, the use of hydroxyl-terminated polybutadiene in drug delivery systems, lubricating oil production and bitumen modification has been discussed. Despite the high cost of this resin, its use as a raw material

for the preparation and design of new materials is expected to grow in the near future.

**Key words:** hydroxyl-terminated polybutadiene, impact resistance, adhesive, waterproof membranes, dielectric strength.

## مروری بر کاربردهای تجاری پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل و

### مشتقات آن

کمیله پهلوانی بیدگلی، محمود حیدری\*

تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده فنی و مهندسی

صندوق پستی ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱

\*) [Mahmoud.heydari@ihu.ac.ir](mailto:Mahmoud.heydari@ihu.ac.ir)

### چکیده

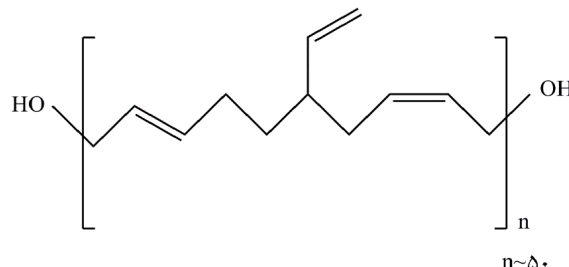
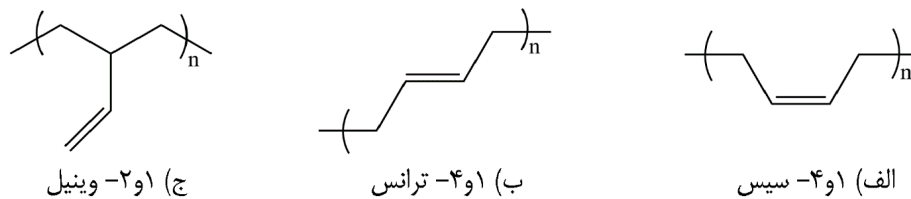
رزین پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل به عنوان پیش‌پلیمر در تهیه محمل در تولید پیش‌رانه جامد مرکب در صنایع دفاعی استفاده می‌شود. امروزه، خواص منحصر به فرد این رزین و مشتقات آن موجب گسترش قابل توجه کاربردهای تجاری این رزین گردیده است. در این مقاله انواع کاربردهای تجاری پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل بررسی می‌شود. مطالعه منابع علمی نشان داد خواص مکانیکی بویژه مقاومت به ضربه انواع کامپوزیت‌ها و رزین‌های گرماسخت با مقادیر اندک پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل به عنوان افزودنی بصورت قابل توجهی بهبود می‌یابد. استفاده از این رزین در تهیه چسب و درزگیر از دیگر بخش‌های مورد بررسی بود. استفاده از پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل در تهیه غشاهای آب‌گریز با قابلیت‌های منحصر به فرد و کاربردهای گوناگون همچون صنعت نفت از دیگر کاربردهای مورد توجه بود. علاوه بر این، پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل قابلیت استفاده به عنوان افزودنی افزایش

دهنده مقاومت دی الکتریک بویژه در صنعت خودرو را داراست. در ادامه به استفاده از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل در سامانه های دارورسانی، صنعت تولید روغن های روان کننده و اصلاح قیر پرداخته شد. با وجود قیمت بالای این رزین، پیش بینی می شود استفاده از آن به عنوان ماده اولیه تهیه و طراحی مواد جدید، در آینده نزدیک روبه رشد باشد.

**واژگان کلیدی:** پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل، مقاومت ضربه، چسب، غشاهای آب گریز، مقاومت دی الکتریک.

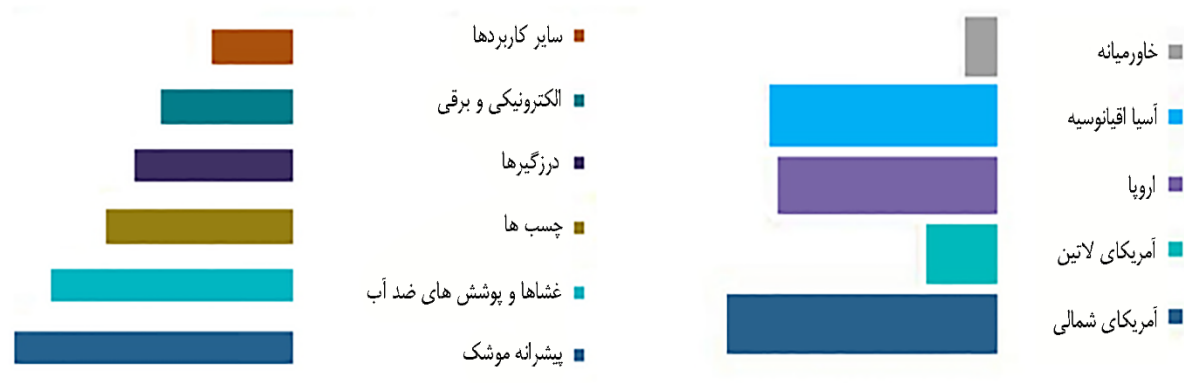
## مقدمه

در صنعت دفاعی برای تولید پیشراندهای جامد مرکب از رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل استفاده می گردد. این رزین با داشتن گروه های هیدروکسیل انتهایی و قابلیت پخت با ترکیبات ایزوسیاناتی به عنوان پیش پلیمر در تهیه محمل<sup>۱</sup> پلی یورتانی پیشراندهای جامد مرکب استفاده می گردد. پیکربندی رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل از سیس، ترانس و وینیل تشکیل شده است، شکل ۱ [۱]. نسبت این پیکربندی ها یکی از عوامل تعیین کننده خواص رزین نهایی است. در حالت کلی، افزایش میزان ترانس، منجر به افزایش استحکام کششی می گردد، در حالی که افزایش میزان سیس منجر به افزایش رفتار الاستومری و ازدیاد طول رزین پخت شده می شود. علاوه بر این، با افزایش میزان پیکربندی وینیل، ویسکوزیته رزین پخت نشده افزایش می یابد. این پدیده به جلوگیری از لغزش زنجیرها با رفتار لنگرگونه گروه وینیل نسبت داده می شود.



شکل ۱- ریز ساختارهای پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل (الف) ۴ سیس، (ب) ۴ ترانس، (ج) ۲ وینیل [۱].

عموما پلیمریزاسیون به روش رادیکالی منجر به نسبت ترانس بیشتر گردیده و این در حالی است که در پلیمریزاسیون آنیونی وینیل بالاتر مشاهده می شود. پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل با میزان سیس بالا، از روش کوئوردیناسیونی تهیه می شود. امروزه، استفاده از این رزین با داشتن خواص منحصر به فرد همچون ایجاد قابلیت چقرمه کنندگی به عنوان فاز الاستومری، افزایش مقاومت دی الکتریک، بهبود رفتار چسبندگی، ایجاد قابلیت آبگریزی و ... در صنایع غیر نظامی و تجاری رو به افزایش است. با این حال، قیمت بالای این دسته از رزین ها در مقایسه با سایر رزین های صنعتی متداول از چالش های اصلی گسترش کاربردهای تجاری آن است. ارزش جهانی بازار پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ حدود ۶/۷ درصد افزایش یافت [۲]. طی ده سال آینده، پیش بینی می شود بازار جهانی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل با افزایش سالیانه ۹/۵ درصد از ۲۰۳ میلیون دلار آمریکا در سال ۲۰۲۲ به ۴۹۸/۷ میلیون دلار تا سال ۲۰۳۲ برسد. بازار جهانی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل به عنوان محمل پیشرانه موشک در سال ۲۰۲۱ به ۴۸/۹ میلیون دلار رسید، در حالی که بازار جهانی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل در پوشش ها و غشاهای آب گریز ۴۲/۴ میلیون دلار بود. پیش بینی می شود تا سال ۲۰۳۲، بازار جهانی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل به عنوان محمل پیشرانه موشک تا ۱۷۰/۱ میلیون دلار افزایش یابد، در حالی که کاربرد آن در صنعت تولید چسب به ۷۷/۱ میلیون دلار خواهد رسید. توزیع میزان مصرف این رزین در نقاط مختلف جهان در شکل ۲ مشاهده می گردد.



شکل ۲- پیش بینی بازار جهانی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل در بازه ی ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۳ میلادی [۲].

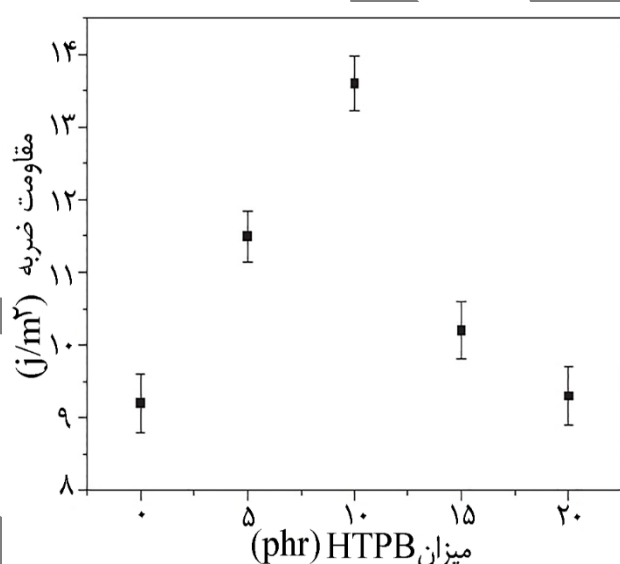
در این مقاله، با مروری بر منابع علمی به قابلیت های پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن در تهیه و سنتز مواد با کاربردهای متفاوت و یا به عنوان افزودنی بهبوددهنده خواص مختلف در صنایع چسب و رزین، کامپوزیت ها، غشاء و غشاها، اصلاح سطح الیاف، اصلاح قیر و بهبود خواص دی الکتریک پرداخته خواهد شد.

### بهبود دهنده خواص مکانیکی

خواص مکانیکی کششی، خمشی و ضربه رزین اپوکسی در حضور قطرات پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل توسط توماس<sup>۲</sup> و همکاران بررسی شد [۳]. آنان دریافتند حضور ۱۰٪ وزنی از این قطرات الاستومری منجر به افزایش ۴۷٪ مقاومت ضربه ای رزین اپوکسی گردید، شکل ۳. این قطرات الاستومری به صورت مراکز تمرکز تنش عمل نموده و باعث تغییر سازوکار شکست از حالت شکننده به چقرمه شدند. سازوکارهای متعددی برای بهبود چقرمه سازی رزین های ترموست در حضور قطرات لاستیکی مایع گزارش شده است. به عنوان مثال، سازوکارهای اصلی چقرمه سازی رزین اپوکسی، حفره زایی و متعاقباً تسلیم برشی در نظر گرفته می شوند. سازوکارهای دیگری همچون انحراف مسیر، ترکچه

۲ Thomas -

زایی و ... نیز ارائه شده اند. رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن با دارا بودن دمای انتقال شیشه ای بسیار پایین و انعطاف پذیری بالای زنجیر، موجب افزایش بازده هر یک از این سازوکارهای موثر در بهبود خواص مکانیکی بستر می گردند. انعطاف پذیری و رفتار الاستومری پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل با افزایش میزان پیکربندی سیس افزایش می یابد. مقادیر بیشتر پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل به دلیل انعقاد قطرات و توزیع نایکنواخت در بستر رزین اپوکسی منجر به کاهش مقاومت ضربه گردید. قطرات نرم پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل منجر به کاهش اندک خواص کششی و خمشی رزین اپوکسی گردید. آنان دریافتند حضور این قطرات لاستیکی موجب تاخیر در زمان ژل شدن و کاهش چگالی اتصال عرضی در حین پخت شد [۴].



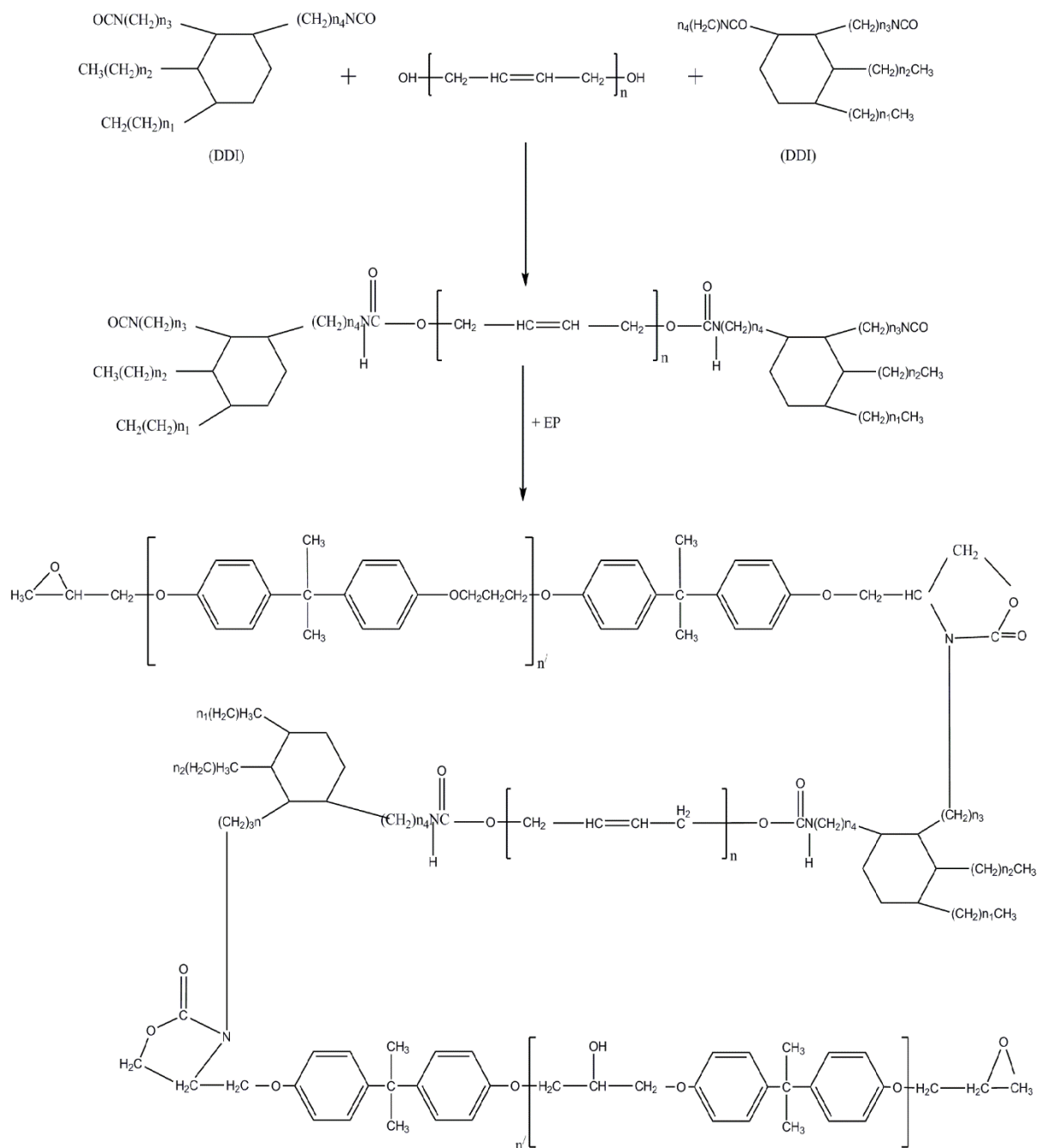
شکل ۳- مقاومت ضربه رزین اپوکسی در برابر مقادیر متفاوت رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل [۳]

سازگاری رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل با بستر رزین اپوکسی جزئی است، بنابراین پژوهش های بسیاری بمنظور افزایش سازگاری انجام شد. اوزتورک<sup>۳</sup> و همکاران از پلی بوتادین خاتمه یافته با سیلان برای افزایش برهم کنش میان رزین اپوکسی و پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل استفاده کردند. آنان دریافتند اختلاط اولیه پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و پلی بوتادین خاتمه یافته با سیلان و افزودن ترتیبی عامل پخت و در نهایت رزین اپوکسی

منجر به افزایش ۳۰٪ مقاومت ضربه‌ای و ۱۰٪ استحکام کششی گردید [۵]. لاثا<sup>۴</sup> و همکاران با ایجاد گروه اپوکسی روی پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل امکان اتصال شیمیایی میان رزین اپوکسی و پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل را فراهم کردند [۶]. آنان پی بردند استحکام برشی، مقاومت ضربه و استحکام کششی با افزایش رزین پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل تا ۱۰٪ وزنی نسبت به رزین اپوکسی به ترتیب از ۹/۸ به ۱۸/۶، از ۱۵۰ به ۳۴۰ و از ۵۲ به ۶۷ MPa افزایش می‌یابد. یوجیاکو<sup>۵</sup> و همکاران بهبود خواص مکانیکی رزین اپوکسی اصلاح شده با رزین پلی بوتادین خاتمه‌یافته با گروه‌های اسید چرب دیمردی ایزوسیانات واکنش داده و سپس امکان واکنش با رزین اپوکسی فراهم می‌شود، هیدروکسیل با اسید چرب دیمردی ایزوسیانات واکنش داده و سپس امکان واکنش با رزین اپوکسی فراهم می‌شود، شکل ۴. بدین ترتیب سازگاری از طریق ایجاد پیوند کووالانسی میان رزین پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل و رزین اپوکسی افزایش یافت. مقاومت ضربه رزین اپوکسی در ۱۵٪ وزنی از رزین پلی بوتادین خاتمه‌یافته با گروه‌های اسید چرب دیمردی ایزوسیانات نسبت به رزین اپوکسی بیش از ۱۱۲٪ افزایش یافت. کاهش استحکام کششی و خمشی در این حالت قابل صرف نظر کردن بود. عبداللهی<sup>۶</sup> و همکاران نیز سازگاری رزین پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل و رزین اپوکسی را از طریق قرار دادن گروه‌های آمینی و سنتز پلی بوتادین خاتمه‌یافته با آمین بهبود دادند [۸].

---

۴ Latha -  
۵ Yujia Kou -  
۶ Abdollahi -



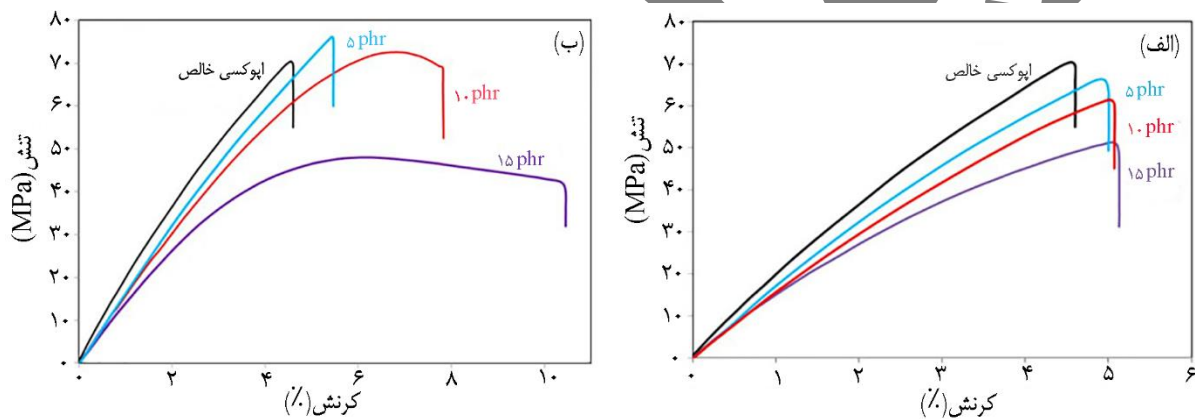
شکل ۴- مراحل واکنش پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل (HTPB) با اسید چرب دیمر و پس از آن با رزین

اپوکسی (EP) [V].

نمودارهای تنش- کرنش رزین اپوکسی دارای مقادیر متفاوت از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و پلی بوتادین خاتمه یافته با آمین در شکل ۵ مشاهده می گردند. در هر دو حالت، کاهش مدول یانگ مشاهده گردید. این پدیده به کمتر بودن مدول یانگ فاز متفرق الاستومری پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و یا زنجیرهای پلی بوتادین

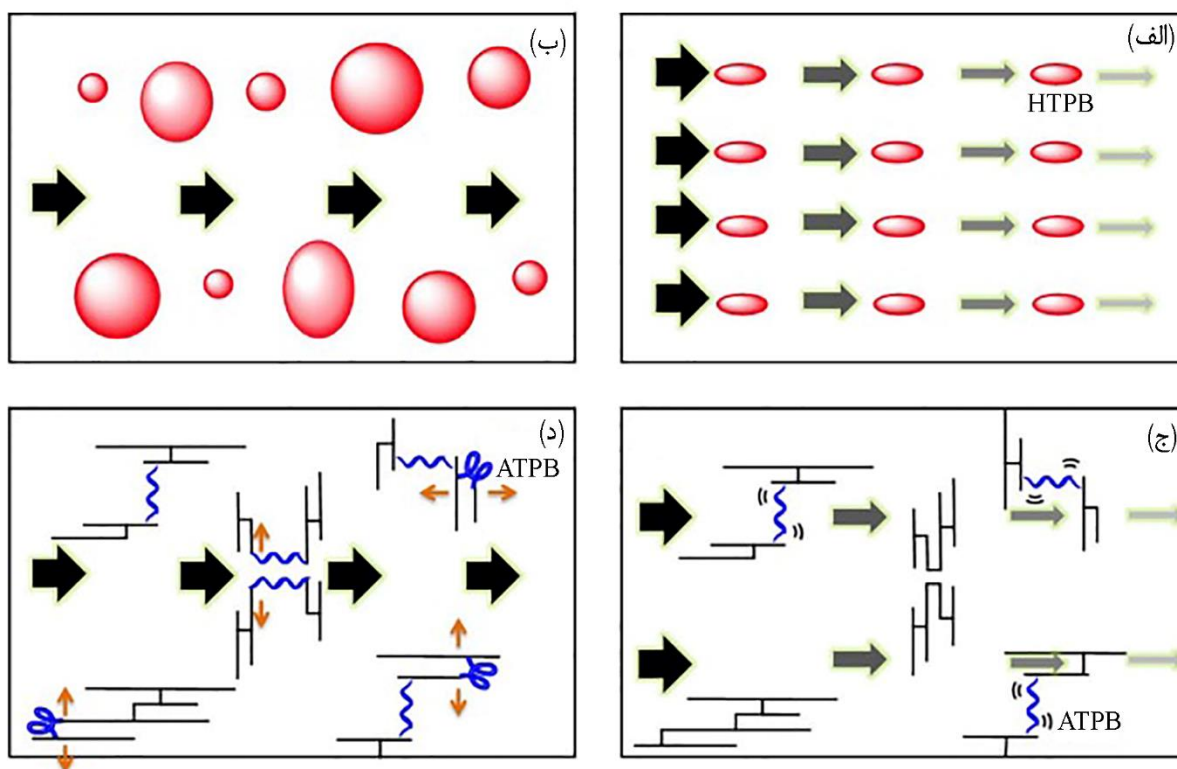


خاتمه یافته با آمین مرتبط گردید. کاهش استحکام کششی در حضور پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل به دوفازی بودن و محل تمرکز تنش قطرات الاستومری نسبت داده شد. از طرف دیگر، کاهش چگالی شبکه‌ای شدن بستر رزین اپوکسی نیز از دیگر دلایل آن می باشد. افزایش استحکام کششی در حضور پلی بوتادین خاتمه یافته با آمین به کاهش میزان تنش باقی مانده در رزین اپوکسی در حضور زنجیرهای پلی بوتادین خاتمه یافته با آمین نسبت داده شد. افزایش ازدیاد طول تا شکست در حضور قطرات الاستومری پلی بوتادین خاتمه یافته یا هیدروکسیل و زنجیرهای پلی بوتادین خاتمه یافته با آمین از دیگر اثرات حضور پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و آمین می باشد.



شکل ۵ - منحنی تنش کرنش رزین اپوکسی دارای مقادیر متفاوت از الف) پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و ب) پلی بوتادین خاتمه یافته با آمین [۹].

نتایج نشان داد میزان بهبود چقرمگی رزین اپوکسی با پلی بوتادین خاتمه یافته با آمین بیش از دو برابر بهبود با پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل بود. قطرات کوچک و یکنواخت پلی بوتادین مایع در مقادیر بهینه موجب پخش انرژی گردیده و مانع شکست کلی قطعه می گردند. با این حال با بزرگ شدن قطرات و نایکنواخت شدن توزیع اندازه ذرات رابری و افزایش فاصله میان آنها، امکان رشد ترک در میان این قطرات فراهم می گردد، شکل ۶. در پلی بوتادین اصلاح شده با آمین نیز، حضور بخش های منعطف در شبکه پخت شده منجر به مشاهده رفتار چقرمه می گردد.



شکل ۶- سازوکار اتلاف انرژی در سامانه اپوکسی دارای رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل (الف و ب) و پلی بوتادین خاتمه یافته با آمین (ج و د) [۸].

افزایش مقادیر پلی بوتادین اصلاح شده با آمین نیز منجر به کاهش چگالی شبکه و کاهش انرژی هم چسبی رزین اپوکسی گردیده و انرژی شکست کاهش می یابد. بهبود چهار برابری مقاومت ضربه ای رزین اپوکسی با تنها پنج درصد وزنی از رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه های آمینی توسط سریتماکار<sup>۷</sup> و همکاران نیز گزارش شد [۱۰]. تیان<sup>۸</sup> و همکاران نیز اثر پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه آمینی با جرم های مولکولی متفاوت را بر رفتار پخت، ویسکوالاستیک، مورفولوژی و مقاومت ضربه رزین اپوکسی بررسی کردند. آنان دریافتند با کاهش جرم مولکولی، رفتار چقرمه کنندگی تشدید گردید [۱۱]. بارسیا<sup>۹</sup> و همکاران اثر پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه اپوکسیدی را بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی کردند [۱۲]. آنان دریافتند پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه اپوکسیدی سنتز شده از طریق مالیک انیدرید مقاومت ضربه بالاتری نسبت به پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه اپوکسیدی سنتز شده از طریق تولون دی ایزوسیانات

<sup>۷</sup> Sritma kar -

Tian -۸

Barcia -۹

داشت. از طرف دیگر، رافال<sup>۱۰</sup> و همکاران نشان دادند محل قرارگیری گروه اپوکسیدی بر روی پلی بوتادین بر رفتار چقرمه‌کنندگی آن موثر است [۱۳]. حسینی<sup>۱۱</sup> و همکاران نیز با استفاده از اپوکسی‌دار کردن رزین پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل، رزین پلی یورتان دارای گروه‌های اپوکسی تهیه کردند و متعاقباً از آن برای اصلاح خواص مکانیکی رزین اپوکسی و منعطف کردن آن استفاده کردند [۱۴]. این افزایش انعطاف‌پذیری منجر به تشکیل یک فیلم با قابلیت استفاده به عنوان پوشش منعطف و چقرمه را داشت.

مطالعات پیرامون بهبود چقرمگی تنها محدود به رزین اپوکسی نبود. بهبود چقرمگی رزین فنولیک با استفاده از خواص الاستومری پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل توسط نیرمال<sup>۱۲</sup> و همکاران گزارش شد [۱۵]. در این پژوهش از رزین رزول به عنوان سازگارکننده میان دو فاز رزین فنولیک نووالاک و قطرات الاستومری پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل استفاده شد. آنان دریافتند بهبود مقاومت شکست تنها در آمیزه‌های اصلاح شده با الاستومر تا ۱۰٪ وزنی مشاهده شد و افزودن بیشتر پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل منجر به کاهش انرژی شکست گردید. این پدیده به توقف رشد ترک در حضور فاز متفرق پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل مرتبط شد.

جکسون<sup>۱۳</sup> و همکاران اثر چقرمه‌کنندگی پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل بر رزین فنولیک و کامپوزیت رزین فنولیک/الیاف سیزال را بررسی کردند [۱۶]. آنان دریافتند بهبود مقاومت ضربه‌ای رزین فنولیک خالص در حضور ۱۰٪ وزنی از پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل حدود ۱۳۰٪ بوده و این در حالی است که بهبود مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت آن با الیاف سیزال تنها در ۲/۵٪ وزنی از پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل مشاهده شده و مقدار آن معادل با ۱۱٪ بود. آنان دریافتند از پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل می‌توان به عنوان افزایش‌دهنده چسبندگی میان رزین فنولیک و الیاف سیزال استفاده نمود. اثر پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل بر استحکام کششی و ضربه‌پذیری کامپوزیت رزین فنولیک/الیاف کربن توسط جعفری<sup>۱۴</sup> و همکاران گزارش شد [۱۷]. نتایج نشان داد مقاومت ضربه

---

۱۰ Rafal -

۱۱ - Hoseini

۱۲ Nirmal -

۱۳ Jackson -

۱۴ Jafari -

کامپوزیت دارای ۳۸/۴۱٪ وزنی از الیاف کربن و ۷/۵٪ وزنی از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل ۵۰٪ بیشتر از کامپوزیت دارای همین مقدار الیاف کربن و ۲/۲٪ وزنی از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل بود. رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن نسبت به افزودنی های چقرمه ساز متداول در بازار دارای جرم مولکولی بیشتری بوده و در نتیجه نرخ مهاجرت آن ها به سطح کندتر می باشد. در صورت استفاده از مشتقات پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه های انتهایی با قابلیت واکنش با بستر، سازگاری میان دو فاز نیز بصورت قابل توجهی افزایش و بازده چقرمه سازی قابل توجه خواهد بود. رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن دارای دمای انتقال شیشه ای پایینی بوده و سگمنت های انعطاف پذیر آن بازده چقرمه کنندگی بالایی دارند. خلاصه ای از اثر پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن بر بهبود خواص مکانیکی بسترهای مختلف در جدول ۱ نشان داده شد.

جدول ۱- تاثیر پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن بر بهبود خواص مکانیکی بسترهای مختلف.

مرجع	میزان بهبود (%)	نوع بهبود	درصد بهینه رزین بهبود دهنده (%)	نوع رزین بهبود دهنده	رزین پایه
۳	۴۷	مقاومت ضربه ای	۱۰	پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل	اپوکسی
۵	۳۰	مقاومت ضربه ای	۳	پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل در حضور سازگار کننده سیلانی	اپوکسی
۶	۸۹	استحکام برشی	۱۰	پلی بوتادین دارای گروه های اپوکسی	اپوکسی
۶	۱۲۶	مقاومت ضربه ای	۱۰	پلی بوتادین دارای گروه های اپوکسی	اپوکسی
۶	۲۸	استحکام کششی	۱۰	پلی بوتادین خاتمه یافته با اپوکسی	اپوکسی

۷	۱۱۲	مقاومت ضربه‌ای	۱۵	پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه‌های اسید چرب دیمر دی ایزوسیانات	اپوکسی
۸	۱۵۴	چقرمگی	۱۰	پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه‌های آمینی	اپوکسی
۹	۳۰۰	مقاومت ضربه‌ای	۵	پلی بوتادین خاتمه یافته با گروه‌های آمینی	اپوکسی
۱۴	۱۳۴	مقاومت ضربه	۱۰	پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل	فنولیک/توالاک
۱۵	۱۳۰	مقاومت ضربه‌ای	۱۰	پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل	فنولیک
۱۵	۱۱	مقاومت ضربه‌ای	۲/۵	پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل	کامپوزیت رزین فنولیک/الیاف سیزال

### چسب و درزگیر

پلی یورتان حاوی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل برای تولید انواع چسب و درزگیر استفاده می‌شود. امروزه از این نوع پلی یورتان در صنعت ساختمان به عنوان درزگیر غیر قابل نفوذ برای شیشه‌های دوجداره استفاده می‌گردد. استفاده از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل در فرمولاسیون چسب پلی یورتان امکان افزایش مقاومت در برابر هیدرولیز، کاهش دمای کاربری به سبب ماهیت الاستومری پلی یورتان و تهیه چسب‌های آب‌گریزتر نسبت به پلی‌ال‌های اتری و استری را فراهم می‌کند. بر خلاف پلی‌ال‌های اتری و استری که دارای اتصالات آبدوست در زنجیر اصلی بوده و بیشتر در معرض هیدرولیز قرار می‌گیرند، استفاده از پلی‌ال پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل با زنجیر

اصلی بوتادینی آبگریز در ساختار چسب‌های پلی یورتان منجر به افزایش قابل توجه مقاومت در برابر هیدرولیز و نفوذ آب می‌گردد. دمای انتقال شیشه ای پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل بسیار پایین بوده و امکان تهیه چسب‌های پلی یورتان با قابلیت دمای کاربری بسیار پایین را فراهم می‌کند. پاتری<sup>۱۵</sup> و همکاران تهیه یک درزگیر پلی‌یورتان دوجزئی بر پایه رزین پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل را بررسی کردند [۱۸]. در این پژوهش از واکنش تولوئن دی ایزوسیانات با پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل برای تهیه پلی بوتادین خاتمه‌یافته با ایزوسیانات استفاده شد. این درزگیر با قابلیت هم‌چسبی<sup>۱۶</sup> و چسبندگی<sup>۱۷</sup> بالا دارای رفتار لاستیکی و منعطف بوده و مقاومت در برابر کهولت در محیط‌های خورنده و دمای بالا نشان داد. بارسیا<sup>۱۸</sup> و همکاران استفاده از پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل، کربوکسیل و ایزوسیانات را بر خواص چسبندگی مورفولوژی و مکانیکی چسب اپوکسی ارزیابی کردند [۱۹]. نتایج نشان داد، حضور قطرات الاستومری موجب افزایش میزان شکست هم‌چسبی<sup>۱۹</sup> شد. از نظر بهبود همزمان خواص کششی و چقرمگی، افزایش پلی بوتادین خاتمه‌یافته با ایزوسیانات بصورت قابل توجهی موثرتر از پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل و کربوکسیل بود. شیخی<sup>۲۰</sup> و همکاران اثر استفاده از گستراننده زنجیر خطی و آروماتیک بر خواص چسب پلی‌یورتانی بر پایه پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل به عنوان پلی‌ال را بررسی کردند [۲۰]. آنان دریافتند گستراننده زنجیر خطی سازگاری بیشتری با پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل داشته و خواص چسبندگی و مکانیکی چسب پلی یورتان حاصل بالاتر بود. آچاری<sup>۲۱</sup> و همکاران اثر پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل و ایزوسیانات را بر مورفولوژی، چسبندگی، خواص حرارتی و مکانیکی چسب اکریلیک بر پایه کوپلیمر وینیل استر و متیل متاآکریلات را بررسی کردند [۲۱]. افزایش دو برابری استحکام چسبندگی برشی در ۱۰٪ وزنی از پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل مشاهده شد. حضور ۱۰٪ وزنی از پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل با ایجاد قطرات متفرق

---

Parti - ۱۵

Cohesion - ۱۶

Adhesion - ۱۷

Barica - ۱۸

Cohesion failure - ۱۹

Sheikhi - ۲۰

Achari - ۲۱

الاستومری ۳ تا ۸ میکرون در بستر چسب وینیل استر/متیل متاکریلات و اتلاف تنش وارده موجب تغییر سازوکار شکست از حالت شکننده به چقرمه گردید. با افزایش بیشتر پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و بزرگتر شدن قطرات، این پدیده معکوس گردید. در این حالت نیز، بهبود خواص چسبندگی و مکانیکی در پلی بوتادین خاتمه یافته با ایزوسیانات نسبت به پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل چشمگیرتر بود.

پایین بودن دمای انتقال شیشه ای پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل امکان استفاده به عنوان عامل چقرمه کننده الاستومری در چسب های پایه اپوکسی را نیز فراهم می کند. قطرات فاز متفرق پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل با دمای انتقال شیشه ای پایین موجب افزایش مقاومت در برابر ضربه چسب های اپوکسی در دماهای کاربری پایین می گردند. این قطرات الاستومری با پخش انرژی شکست، مانع از رشد و شکست ناگهانی در قطعه می شوند. اثر پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل بر خواص مکانیکی و حرارتی فرمولاسیون چسب اپوکسی توسط خلف<sup>۲۲</sup> و همکاران بررسی شد [۲۲]. آنان پی بردند اپوکسی های پخت شده با پلی آمید و رسامید انعطاف پذیری، مقاومت در برابر رطوبت و چسبندگی بالاتری دارند. همچنین وجود لاستیک در داخل شبکه اپوکسی باعث بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی بویژه چقرمگی گردید. تقریباً ۲/۵٪ از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل برای به دست آوردن بهترین خواص مکانیکی کافی بود. اکرم<sup>۳۳</sup> و همکاران اثر سه نوع دی ال پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل، بوتان دی ال و پلی پروپیلن گلایکول با جرم های مولکولی مختلف بر چسبندگی و خواص ترمومکانیکی چسب فشاری بر پایه پلی یورتان را بررسی کردند [۲۳-۲۵]. نتایج نشان داد افزایش میزان پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل تا ۱۵٪ وزنی و افزایش جرم مولکولی پلی پروپیلن گلایکول از ۴۲۵ تا ۲۷۰۰ گرم بر مول منجر به بالاترین استحکام چسبندگی شد. خلاصه ای از اثر پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن بر خواص چسب های مختلف در جدول ۲ نشان داده شد.

جدول ۲- اثر پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن بر بهبود خواص چسب های مختلف

مرجع	درصد	نوع بهبود	درصد بهینه رزین بهبود	نوع رزین بهبود دهنده	رزین پایه
------	------	-----------	--------------------------	----------------------	-----------

Khalaf -۲۲

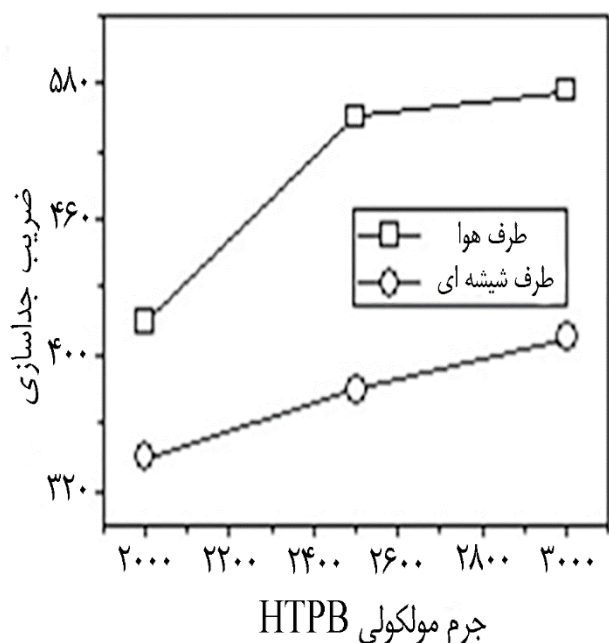
Akram -۲۳

	دهنده (%)	بهبود (%)			
چسب اکریلیک بر پایه کویلیمر وینیل استر و متیل متاآکریلات	۱۰	۱۰۰	استحکام چسبندگی برشی	۲۰	
چسب اپوکسی	۲/۵	۶۷	استحکام کششی	۲۱	
چسب اپوکسی	۱۵	۷۵	مقاومت ضربه	۲۱	
چسب فشاری بر پایه پلی یورتان	۱۵	۸۷	استحکام چسبندگی	۲۴-۲۲	

### غشاهای آب‌گریز

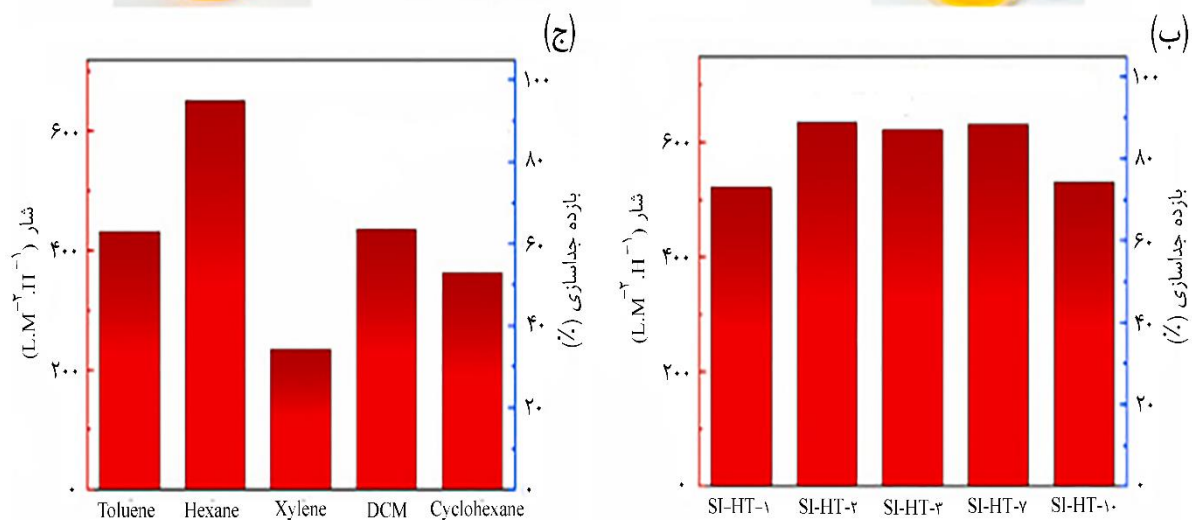
جینگو<sup>۲۴</sup> و همکاران غشاهای پلی‌یورتانی بر پایه رزین پلی‌بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل با اتصالات عرضی دی‌وینیل بنزن را برای جداسازی مخلوط اورتو و پارازیلین بررسی کردند [۲۶]. آنان دریافتند حضور دی‌وینیل بنزن به صورت قابل توجهی مقاومت در برابر حرارت این نوع غشاها را افزایش داده و ضریب جداسازی بهبود می‌یابد. جداسازی اتیل استات از محلول آبی با استفاده از پلی‌یورتان بر پایه پلی‌بوتادین خاتمه‌یافته با گروه هیدروکسیل توسط بای<sup>۲۵</sup> و همکاران بررسی شد [۲۷]. نتایج نشان داد با افزایش جرم مولکولی پلی‌بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل ضریب جداسازی افزایش یافته و شار اتیل استات کاهش یافت، شکل ۷. افزایش جرم مولکولی منجر به افزایش نسبت سگمنت نرم به سخت پلی‌یورتان شده و آب‌گریزی افزایش یافت. افزایش جرم مولکولی منجر به کاهش انعطاف‌پذیری سگمنت‌ها نیز گردید.





شکل ۷- ضریب جداسازی اتیل استات بر حسب جرم مولکولی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل مورد استفاده در تهیه غشا [۲۷].

مالکاپا<sup>۲۶</sup> و همکاران از دو نوع دی ال پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و پلی بوتادین خاتمه یافته با دی نیترو بنزن برای تهیه پوشش پلی یورتان آبنگیز استفاده کردند [۲۸]. نتایج نشان داد با کاهش میزان پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و دی نیترو بنزن، زبری سطح افزایش یافته و زاویه تماس آن افزایش یافت. ذرات فوق آبنگیز سیلیکا پوشش داده شده با پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل با قابلیت جذب روغن تا چهار برابر وزن خود توسط لیو<sup>۲۷</sup> و همکاران تهیه شد [۲۹]. از این ذرات برای جداسازی با بازده بالای مخلوط آب و روغن استفاده شد. بازده جداسازی ۹۹ درصد بوده و شار عبوری روغن وابسته به میزان پلی بوتادی خاتمه یافته با هیدروکسیل بر روی سطح بود، شکل ۸

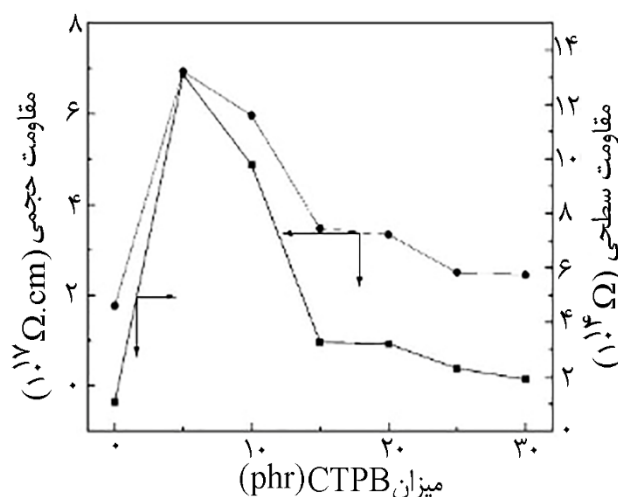


شکل ۸- الف) فرآیند جداسازی ترکیبات روغنی و آب با استفاده از ذرات سیلیکا پوشش داده شده با مقادیر متفاوت از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل، ب) نفوذپذیری و بازده جداسازی گازوئیل در برابر میزان اصلاح سیلیکا و ج) نفوذپذیری و بازده جداسازی در برابر حلال‌های مختلف [۲۹].

نوزاد<sup>۲۸</sup> و همکاران دریافتند حضور توامان پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل و ایزوسیانات چند عاملی و تشکیل شبکه های در هم تنیده موجب بهبود قابل توجه پایداری ابعادی و مقاومت در برابر حلال غشای بر پایه پلی فنیل سولفون شد [۳۰].

## افزایش دهنده مقاومت دی الکتریک

از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل می توان به عنوان افزایش دهنده مقاومت دی الکتریک بمنظور محافظت از کابل های مخابراتی در جعبه های اتصال و پوشش اجزاء در صنایع برق و الکترونیک استفاده نمود. خواص دی الکتریک رزین اپوکسی اصلاح شده با پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل توسط وینینگ ژو<sup>۲۹</sup> و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۳۱]. آنان دریافتند حضور پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل در اپوکسی باعث کاهش ثابت دی الکتریک و ضریب اتلاف در یک محدوده فرکانس وسیع از ۱ تا ۱۰<sup>۶</sup> هرتز گردیده و مقاومت الکتریکی (مقاومت سطحی و حجمی) به وضوح افزایش یافت. این پدیده به ماهیت غیرقطبی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل نسبت به رزین اپوکسی نسبت داده شد. دونگ<sup>۳۰</sup> و همکاران اثر پلی بوتادین خاتمه یافته با کربوکسیل را بر رفتار دی الکتریک رزین اپوکسی بررسی کردند [۳۲]. نتایج نشان داد بیشینه مقاومت سطحی و حجمی آمیزه در ۵٪ وزنی از پلی بوتادین خاتمه یافته با کربوکسیل صورت پذیرفته و با افزایش بیشتر آن، به علت شکل گیری حفره و حباب میان دو فاز، مقاومت دی الکتریک کاهش یافت، شکل ۹. بیشترین استحکام شکست در برابر میدان دی الکتریک نیز در ۲۰٪ وزنی مشاهده شد. بررسی رفتار دی الکتریک رزین اپوکسی دارای قطرات پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل، کربوکسیل و ایزوسیانات نشان داد با ایجاد برهم کنش شیمیایی میان دو فاز امکان تشخیص آسودگی فاز الاستومری امکان پذیر نبود [۳۳].



شکل ۹ - مقاومت دی الکتریکی سطحی و حجمی در برابر مقدار پلی بوتادین خاتمه یافته با کربوکسیل [۳۲].

## اصلاح قیر

اثر پلی یورتان بر پایه پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل بر اصلاح خواص قیر توسط لی<sup>۳۱</sup> و همکاران بررسی شد [۳۴]. نتایج نشان داد سازگاری پلی یورتان بر پایه پلی بوتادی خاتمه یافته با هیدروکسیل با قیر بیشتر از کوپلیمر دسته ای پلی استایرن-بوتادین-استایرن بود. این پدیده به قطبی تر بودن پلی یورتان و برهم کنش بیشتر با قیر نسبت داده شد. حضور این قطرات پلی یورتانی باعث افزایش کارایی قیر در دماهای پایین و مقاومت در برابر نفوذ آب گردید. پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل برای بازیابی خواص قیر اصلاح شده با کوپلیمر استایرن-بوتادین-استایرن نیز توسط هان<sup>۳۲</sup> و همکاران استفاده شد [۳۵].

## روغن روان کننده

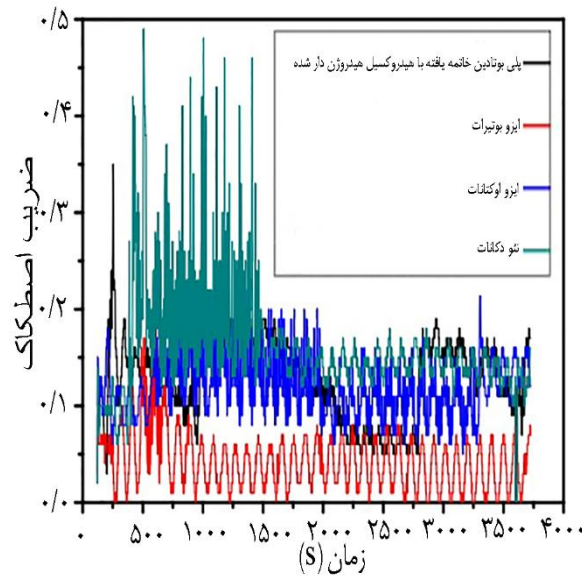
لیکسیاهوو<sup>۳۳</sup> و همکاران از طریق استری کردن پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل هیدروژن دار شده به روغن های روان کننده دی استری با کارایی بالا دست یافتند [۳۶, ۳۷]. فرآیند استری کردن منجر به کاهش قابل توجه گرانی پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل هیدروژن دار شده در تمامی شدت های برشی گردید. ضریب اصطکاک این روغن های روان کننده نیز کاهش قابل توجهی داشت، شکل ۱۰.

---

Li - ۳۱

Han - ۳۲

Lixia Huo - ۳۳



شکل ۱۰- ضریب اصطکاک بر حسب زمان برای دی استرهای پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل هیدروژن دار شده

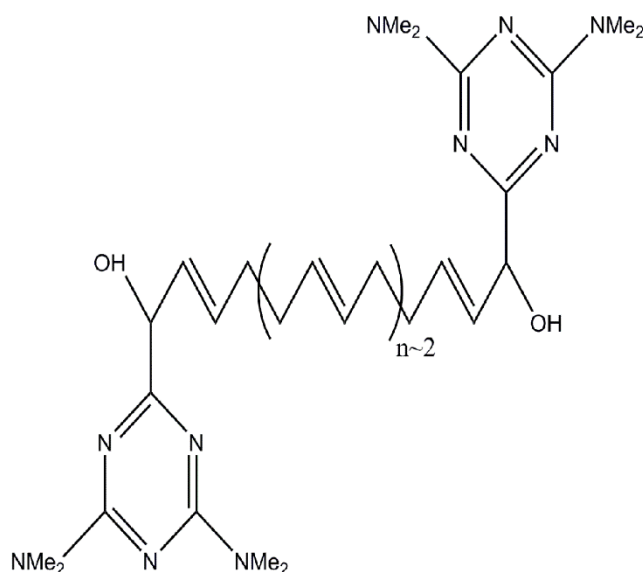
[۳۶].

### کاربرد در حوزه سلامت و مهندسی پزشکی

ینگ<sup>۳۴</sup> و همکاران با استفاده از پلی یورتان بر پایه پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل به عنوان فاز نرم یک پوست الکترونیکی طراحی کردند [۳۸]. استفاده از پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل موجب آب‌گریزی پوست الکترونیکی گردید. سانکار<sup>۳۵</sup> و همکاران از واکنش داروی ضد تومور ۲-کلرو-۶،۴- بیس دی متیل آمینو-۱،۳،۵- تری آزین با پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل برای طراحی سامانه دارورسانی پلی یورتانی استفاده کردند، شکل ۱۱ [۳۹]. این واکنش بر خواص فیزیکی و شیمیایی این دارو بی‌اثر بود.

Ying -۳۴

Sankar -۳۵

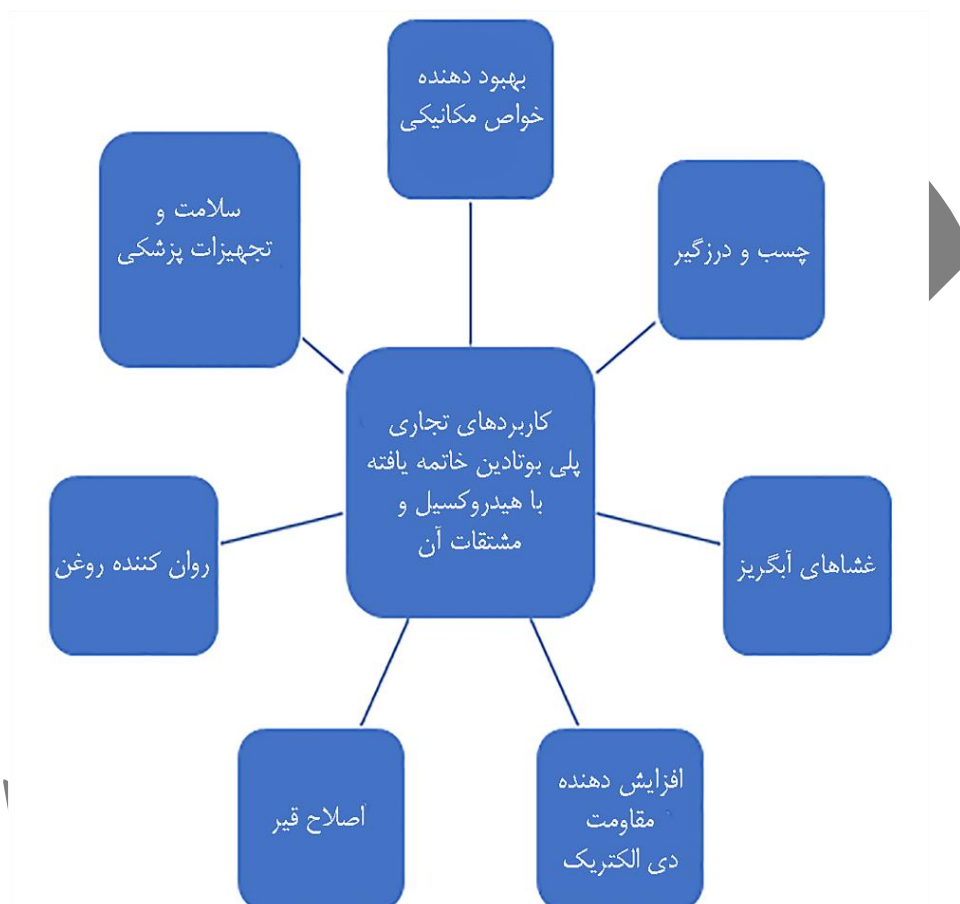


شکل (۱) - ساختار شیمیایی پلی بوتادین خاتمه یافته با داروی ضد تومور [۳۹].

## نتیجه گیری

امروزه استفاده از رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل تنها محدود به صنایع موشکی و دفاعی نیست. از این رزین می توان در تهیه و بهینه سازی خواص بسیاری از مواد بهره برد. مرور منابع علمی نشان داد این رزین قابلیت بالایی به عنوان بهبوددهنده مقاومت در برابر شکست و ضربه انواع رزین های گرماسخت و کامپوزیت های تقویت شده با الیاف را داراست. قرار گرفتن گروه های انتهایی همچون آمین و ایجاد پیوند کووالانسی با فاز پیوسته منجر به ایجاد سگمنت های نرم به جای تشکیل قطرات الاستومری متفرق گردیده و میزان بهبود خواص تشدید می گردد. از این رزین می توان به عنوان پیش پلیمر در تهیه چسب های پلی یورتانی آب گریز یا افزودنی الاستومری بهبوددهنده خواص چسب های اپوکسی استفاده نمود. استفاده از این رزین در تهیه غشاهای آب گریز بسیار مورد توجه می باشد. پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل به عنوان افزودنی بهبوددهنده مقاومت دی الکتریک انواع رزین ها بویژه رزین اپوکسی در صنعت خودرو قابل بهره برداری است. از این رزین می توان در صنایع قیرسازی برای ایجاد رفتار الاستومری و بهبود مقاومت در برابر نفوذ

آب استفاده نمود. از دیگر کاربردهای این رزین می‌توان به صنعت ساخت تجهیزات پزشکی و دارویی اشاره نمود. خلاصه‌ای از کاربردهای تجاری پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن در شکل ۱۲ نشان داده شد. در مجموع، با توجه به قیمت بالای این رزین و مشتقات آن نسبت به سایر رزین‌های تجاری، استفاده از آن‌ها به عنوان افزودنی در مقادیر اندک مقرون به صرفه و اقتصادی خواهد بود.



شکل ۱۲- خلاصه‌ای از کاربردهای متنوع پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل و مشتقات آن.

## مراجع

1. Quagliano Amado J.C., Ross P.G., Mattos Silva Murakami L., and Narciso Dutra J.C., Properties of Hydroxyl-Terminal Polybutadiene (Htpb) and Its Use as a Liner and Binder for Composite Propellants: A Review of Recent Advances, *Propellants Explos. Pyrotech.*, **47**, 1-19, 2022.
2. <https://www.factmr.com/report/hydroxyl-terminated-polybutadiene-htpb-market>,
3. Thomas R., Yumei D., Yuelong H., Le Y., Moldenaers P., Weimin Y., Czigany T., et al., Miscibility, Morphology, Thermal, and Mechanical Properties of a Dgeba Based Epoxy Resin Toughened with a Liquid Rubber, *Polymer*, **49**, 278-294, 2008.

4. Thomas R., Sinturel C., Pionteck J.r., Puliyalil H., and Thomas S., In-Situ Cure and Cure Kinetic Analysis of a Liquid Rubber Modified Epoxy Resin, *Ind. Eng. Chem.*, **51**, 12178-12191, 2012.
5. Ozturk A., Kaynak C., and Tincer T., Effects of Liquid Rubber Modification on the Behaviour of Epoxy Resin, *Eur. Polym. J.*, **37**, 2353-2363, 2001.
6. Latha P., Adhinarayanan K., and Ramaswamy R., Epoxidized Hydroxy-Terminated Polybutadiene—Synthesis, Characterization and Toughening Studies, *Int. J. Adhes Adhes*, **14**, 57-61, 1994.
7. Kou Y., Zhou W., Li B., Dong L., Duan Y.-E., Hou Q., Liu X., et al., Enhanced Mechanical and Dielectric Properties of an Epoxy Resin Modified with Hydroxyl-Terminated Polybutadiene, *Compos. Part A Appl.*, **114**, 97-106, 2018.
8. Abdollahi H., Salimi A., and Barikani M., Synthesis and Architecture Study of a Reactive Polybutadiene Polyamine as a Toughening Agent for Epoxy Resin, *J. Appl. Polym. Sci.*, **133**, 44061-44074, 2016.
9. Abdollahi H., Salimi A., and Barikani M., Synthesis and Architecture Study of a Reactive Polybutadiene Polyamine as a Toughening Agent for Epoxy Resin, *J. Appl. Polym. Sci.*, **133**, 2016.
10. Kar S. and Banthia A.K., Synthesis and Evaluation of Liquid Amine-Terminated Polybutadiene Rubber and Its Role in Epoxy Toughening, *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**, 2446-2453, 2005.
11. Tian X., Geng Y., Yin D., Zhang B., and Zhang Y., Studies on the Properties of a Thermosetting Epoxy Modified with Chain-Extended Ureas Containing Hydroxyl-Terminated Polybutadiene, *Polym. Test*, **30**, 16-22, 2011.
12. Barcia F.L., Amaral T.P., and Soares B.G., Synthesis and Properties of Epoxy Resin Modified with Epoxy-Terminated Liquid Polybutadiene, *Polymer*, **44**, 5811-5819, 2003.
13. Januszewski R., Dutkiewicz M., Nowicki M., Szolyga M., and Kownacki I., Synthesis and Properties of Epoxy Resin Modified with Novel Reactive Liquid Rubber-Based Systems, *Ind. Eng. Chem.*, **60**, 2178-2186, 2021.
14. Hosseini S.R. and Alavi Nikje M.M., Synthesis and Characterization of Novel Epoxy-Urethane Coating and Its Graphene Nanocomposites, *Polymer Composites*, **44**, 2794-2803, 2023.
15. Nirmal C., Maithi S., Padmavathi T., Vanaja A., and Rao R., Studies on Hydroxyl Terminated Polybutadiene Toughened Phenolic Resin, *High Perform. Polym.*, **18**, 57-69, 2006.
16. Megiatto Jr J.D., Ramires E.C., and Frollini E., Phenolic Matrices and Sisal Fibers Modified with Hydroxy Terminated Polybutadiene Rubber: Impact Strength, Water Absorption, and Morphological Aspects of Thermosets and Composites, *Ind. Crops Prod.*, **31**, 178-184, 2010.
17. Jafari F., Eslami-Farsani R., and Khalili S., Optimization of Mechanical and Thermal Properties of Elastomer Modified Carbon Fibers/Phenolic Resin Composites, *Fibers Polym.*, **22**, 1986-1994, 2021.
18. Patri M., Rath S., and Suryavansi U., A Novel Polyurethane Sealant Based on Hydroxy-Terminated Polybutadiene, *J. Appl. Polym. Sci.*, **99**, 884-890, 2006.
19. Barcia F.L., Soares B.G., and Sampaio E., Adhesive Properties of Epoxy Resin Modified by End-Functionalized Liquid Polybutadiene, *J. Appl. Polym. Sci.*, **93**, 2370-2378, 2004.
20. Sheikhy H., Shahidzadeh M., and Ramezanzadeh B., An Evaluation of the Mechanical and Adhesion Properties of a Hydroxyl-Terminated Polybutadiene (Htpb)-Based Adhesive Including Different Kinds of Chain Extenders, *Polym. Bull*, **72**, 755-777, 2015.
21. Sasidharan Achary P., Joseph D., and Ramaswamy R., Study on a Vinyl Ester/Methyl Methacrylate Based Reactive Acrylic Adhesive Toughened by Hydroxyl Terminated Polybutadiene, *J. Adhes.*, **34**, 121-136, 1991.
22. Khalaf E.S., Hassanein S.M., and Hadhoud M.K., Investigation of Mechanical Behavior for a Selected Rubber-Modified Epoxy Adhesive, *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology*, Cairo, 1-10, 26-28 May, 2009.
23. Akram N., Gurney R.S., Zuber M., Ishaq M., and Keddie J.L., Influence of Polyol Molecular Weight and Type on the Tack and Peel Properties of Waterborne Polyurethane Pressure-Sensitive Adhesives, *Macromol. React. Eng.*, **7**, 493-503, 2013.



24. Akram N., Zia K.M., Saeed M., Usman M., and Saleem S., Impact of Macrodiols on the Adhesion Strength of Polyurethane Pressure-Sensitive Adhesives, *J. Appl. Polym. Sci.*, **135**, 46635-46642, 2018.
25. Akram N., Zia K.M., Saeed M., Khosa M.K., Khan W.G., and Arain M.A., Compositional Effect on the Deformation Behavior of Polyurethane Pressure-Sensitive Adhesive Thin Films, *J. Appl. Polym. Sci.*, **137**, 48395-48402, 2020.
26. Gu J., Zhang C.F., Bai Y.X., Zhang L., Sun Y.P., and Chen H.L., Divinyl Benzene Cross-Linked Htpb-Based Polyurethaneurea Membranes for Separation of P-/O-Xylene Mixtures by Pervaporation, *J. Appl. Polym. Sci.*, **123**, 1968-1976, 2012.
27. Bai Y., Qian J., Yin J., Zhai Z., and Yang Y., Htpb-Based Polyurethaneurea Membranes for Recovery of Aroma Compounds from Aqueous Solution by Pervaporation, *J. Appl. Polym. Sci.*, **104**, 552-559, 2007.
28. Malkappa K. and Jana T., Hydrophobic, Water-Dispersible Polyurethane: Role of Polybutadiene Diol Structure, *Indust. Eng. Chem. Res.*, **54**, 7423-7435, 2015.
29. Liu Y., Liu J., Wang Z., Yuan Y., Hua J., and Liu K., Robust and Durable Superhydrophobic and Oil-Absorbent Silica Particles with Ultrahigh Separation Efficiency and Recyclability, *Micropor. Mesopor. Mat.*, **335**, 111772-111783, 2022.
30. Nozad E., Marjani A.P., and Mahmoudian M., A Novel and Facile Semi-Ipn System in Fabrication of Solvent Resistant Nano-Filtration Membranes for Effective Separation of Dye Contamination in Water and Organic Solvents, *Sep. Purif. Technol.*, **282**, 120121-120135, 2022.
31. Zhou W. and Cai J., Mechanical and Dielectric Properties of Epoxy Resin Modified Using Reactive Liquid Rubber (Htpb), *J. Appl. Polym. Sci.*, **124**, 4346-4351, 2012.
32. Dong L., Zhou W., Sui X., Wang Z., Cai H., Wu P., Zuo J., et al., A Carboxyl-Terminated Polybutadiene Liquid Rubber Modified Epoxy Resin with Enhanced Toughness and Excellent Electrical Properties, *J. Electron. Mater.*, **45**, 3776-3785, 2016.
33. Soares B., Leyva M., Moreira V., Barcia F., Khastgir D., and Simão R., Morphology and Dielectric Properties of an Epoxy Network Modified by End-Functionalized Liquid Polybutadiene, *J. Polym. Sci. B: Polym. Phys.*, **42**, 4053-4062, 2004.
34. Li Z., Yang F., Yuan J., Cong L., and Yu M., Study on Preparation and Pavement Performance of Polyurethane Modified Asphalt Based on in-Situ Synthesis Method, *Constr. Build. Mater.*, **309**, 125196-125207, 2021.
35. Han X., Mao S., Xu S., Cao Z., Zeng S., and Yu J., Development of Novel Composite Rejuvenators for Efficient Recycling of Aged Sbs Modified Bitumen, *Fuel*, **318**, 123715-123726, 2022.
36. Huo L., Guo J., Yang F., Pan C., Hu H., Zhang K., Zhou H., et al., Esterification of Hydrogenated Hydroxyl-Terminated Polybutadiene as a High-Performance Lubricating Oil, *Ind. Eng. Chem.*, **61**, 2685-2692, 2022.
37. Huo L., Guo J., Yang F., Pan C., Hu H., Zhang K., Zhou H., et al., Design of Linear Polymer-Based Liquid Lubricants by a Strategy of Complementary Advantages, *Polymer*, **265**, 125592, 2023.
38. Ying W. B., Yu Z., Kim D. H., Lee K. J., Hu H., Liu Y., Kong Z., et al., Waterproof, Highly Tough, and Fast Self-Healing Polyurethane for Durable Electronic Skin, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 11072-11083, 2020.
39. Murali Sankar R., Saha S., Seeni Meera K., and Jana T., Functionalization of Hydroxyl Terminated Polybutadiene with Biologically Active Fluorescent Molecule, *Bull. Mater. Sci.*, **32**, 507-514, 2009.