

مروری بر بررسی علمی و صنعتی نقش کربنات کلسیم رسوبی در صنعت لاستیک



A review of the scientific and industrial study of the role of precipitated calcium carbonate in the rubber industry

چکیده

کلسیم کربنات یا دی کربنات کلسیم ماده‌ای شیمیایی با فرمول CaCO_3 است. کلسیم کربنات رسوبی (pcc) مخفف precipitated calcium carbonate پودری سفید رنگ و بی بو است که از تغییرات شیمیایی آهک هیدرات شده یا کلسیم هیدروکسید به دست می آید. کربنات کلسیم رسوبی، به عنوان یک پرکننده چندمنظوره و تقویت کننده در صنعت لاستیک شناخته شده است. این ماده به دلیل مورفولوژی خاص، توزیع یکنواخت اندازه ذرات و خلوص بالا، موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، پایداری ابعادی و فرآیندپذیری در آمیزه‌های لاستیکی می گردد. در این مقاله، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کربنات کلسیم رسوبی و تأثیر آن بر عملکرد آمیزه‌های لاستیکی طبیعی و مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین فناوری‌های اصلاح سطح، مقایسه با سایر پرکننده‌ها و مطالعات موردی از کاربردهای صنعتی مانند تایر، واشر و ضربه گیر ارائه می شود. استفاده از این ماده نه تنها به کاهش هزینه‌های تولید کمک می کند، بلکه با الزامات زیست محیطی سازگار است و آن را به ماده‌ای راهبردی در تولید لاستیک مدرن تبدیل کرده است. این پژوهش با مشارکت شرکت شیمی معدنی همدان به عنوان یکی از تولیدکنندگان پیشرو کربنات کلسیم در ایران تدوین شده است.

کلمات کلیدی: کربنات کلسیم رسوبی، صنعت لاستیک، خواص فیزیکی و مکانیکی

نوع مقاله: مروری

محمد جواد سفیدابی^۱، لعیان مردانه شالقونی^{۲*}

۱- شرکت شیمی معدنی همدان، همدان، ایران

۲- کارشناس مطالعات فناوری مرکز تحقیقات صنایع لاستیک ایران، تهران، ایران

Layaa.Mardanee@gmail.com*

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۳

۱. مقدمه

صنعت لاستیک یکی از صنایع راهبردی و کلیدی در اقتصاد جهانی است که دامنه گسترده‌ای از کاربردها را در حوزه‌های خودروسازی، بهداشت، تجهیزات صنعتی و حمل‌ونقل در بر می‌گیرد. از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در کیفیت، عملکرد و هزینه تمام شده محصولات لاستیکی، انتخاب و بهینه‌سازی پرکننده‌هاست. در این میان، کربنات کلسیم رسوبی به‌عنوان یک پرکننده معدنی با خواص تقویت‌کنندگی، طی سال‌های اخیر مورد توجه ویژه صنایع داخلی و بین‌المللی قرار گرفته است [۱]. کربنات کلسیم در قالب‌های مختلفی همچون کلسیت، آراگونیت و به‌ویژه شکل رسوبی آن (PCC) موجود است. نوع رسوبی این ماده با کنترل دقیق مورفولوژی و اندازه ذرات، مزایایی نظیر پراکندگی بهتر، مقاومت مکانیکی بالاتر و زیبایی ظاهری را به آمیزه‌های لاستیکی می‌بخشد. برخلاف تصور رایج، این ماده صرفاً نقش پرکننده را ندارد، بلکه به‌عنوان افزودنی عملکردی شناخته می‌شود که می‌تواند خواص رئولوژیکی، دوام، استحکام کششی و سطح ظاهری قطعات لاستیکی را ارتقا دهد [۵].

هدف این مقاله، ارائه تحلیلی جامع از جنبه‌های علمی و صنعتی کاربرد کربنات کلسیم رسوبی در فرمولاسیون لاستیک‌هاست. در ادامه، یافته‌های حاصل از بررسی‌های

تجربی و صنعتی، به‌ویژه با همکاری شرکت شیمی معدنی همدان، به‌عنوان تولیدکننده داخلی این ماده، ارائه می‌گردد.

۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کربنات کلسیم رسوبی

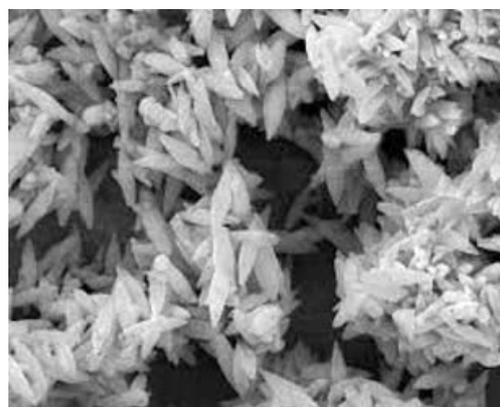
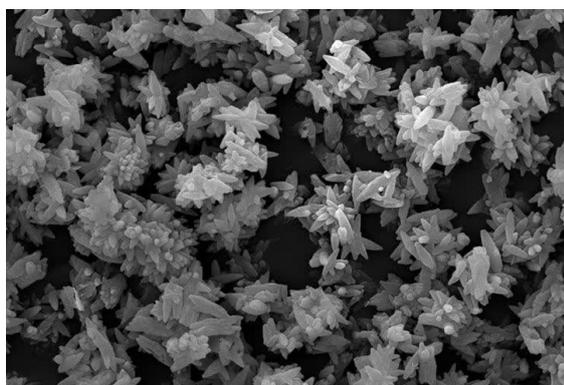
کربنات کلسیم (CaCO_3) یکی از فراوان‌ترین مواد معدنی در طبیعت است که در سه شکل اصلی رسوبی شامل کلسیت (Calcite)، آراگونیت (Aragonite) و ویتريت (Vaterite) یافت می‌شود. در صنعت لاستیک، بیشترین کاربرد مربوط به نوع کلسیتی آن، به‌ویژه در قالب کربنات کلسیم رسوبی (PCC) است که از طریق واکنش‌های شیمیایی کنترل شده تولید می‌شود و دارای خلوص بسیار بالا و توزیع اندازه ذرات یکنواخت است [۵].

۱.۲ ساختار بلوری و مورفولوژی

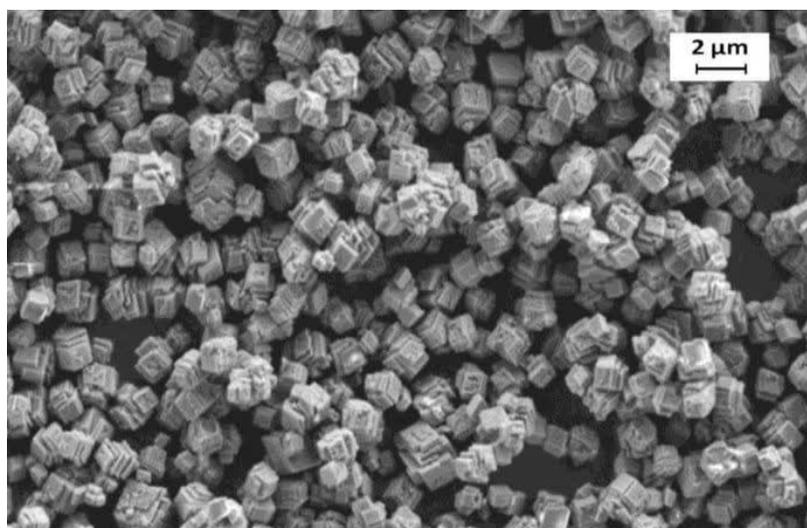
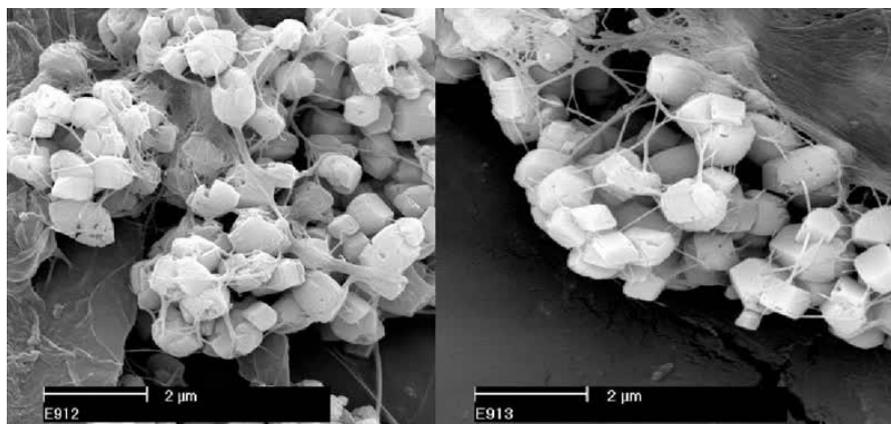
کلسیت: ساختار بلوری شش‌گوش و پایدارترین فرم از نظر ترمودینامیکی.

آراگونیت: ساختار اورتورومبیک با سختی بیشتر اما پایداری کمتر.

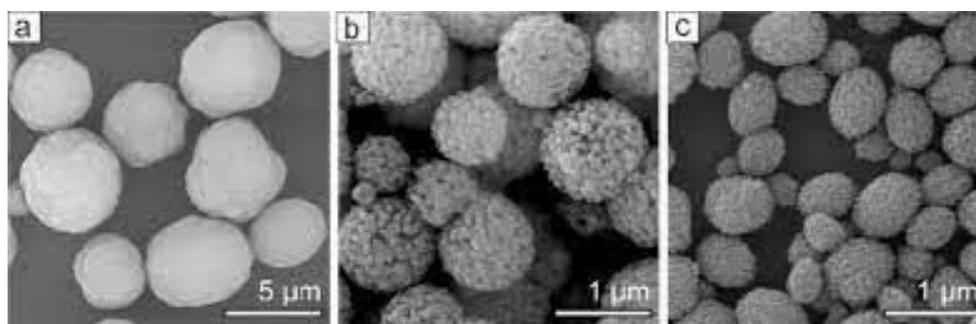
PCC معمولاً در فرم کلسیتی تولید می‌شود و با کنترل شرایط فرایند، می‌توان شکل‌هایی مانند کروی، اسکالنه‌درال و سوزنی ایجاد کرد که هرکدام خواص متفاوتی در آمیزه لاستیکی ایجاد می‌کنند [۵].



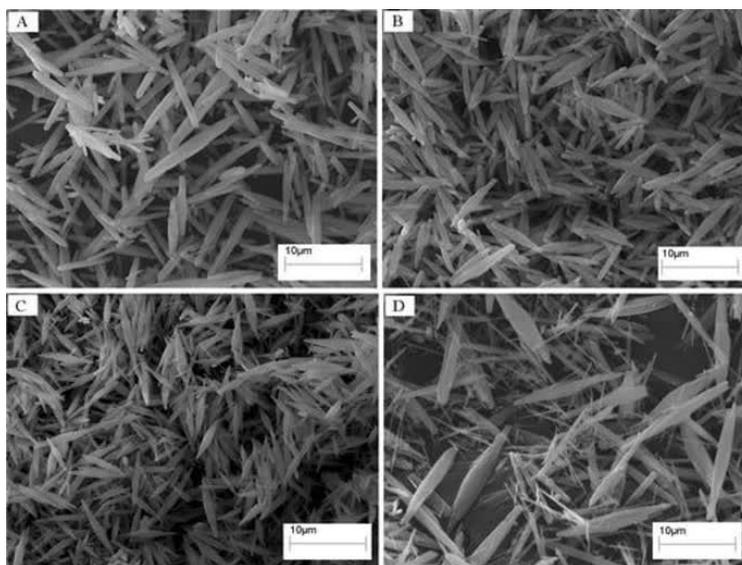
شکل ۱: بلورهای کربنات کلسیم رسوبی Scalnohedrah



شکل ۲: بلورهای کربنات کلسیم رسوبی Rhombohedral



شکل ۳: بلورهای کربنات کلسیم رسوبی Spherical



شکل ۴: بلورهای کربنات کلسیم رسوبی Needle

۲,۲ اندازه و توزیع ذرات

اندازه ذرات PCC معمولاً در بازه ۰.۰۵ تا ۵ میکرون قرار دارد. کاهش اندازه ذرات باعث افزایش سطح ویژه، پراکندگی بهتر در ماتریس پلیمری و تعامل بیشتر بین پرکننده و زنجیره‌های لاستیکی می‌شود. این ویژگی برای بهبود خواص مکانیکی بسیار حیاتی است [۵].

۳,۲ سطح ویژه (Surface Area)

سطح ویژه بالا باعث افزایش میزان پیوند فیزیکی و در صورت اصلاح سطح، پیوند شیمیایی بین پرکننده و پلیمر می‌شود. سطح ویژه در PCC معمولاً بین ۵ تا ۲۵ m^2/g است [۵].

۴,۲ خواص شیمیایی و پایداری

کربنات کلسیم رسوبی ماده‌ای خنثی، زیست‌سازگار و دارای مقاومت حرارتی قابل قبول تا دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد است. این ویژگی‌ها آن را مناسب برای استفاده در فرایندهای حرارتی اکستروژن، پخت (vulcanization) و قالب‌گیری می‌سازد. [۵]

۵,۲ رفتار در محیط پلیمری

بدون واکنش‌پذیری شیمیایی منفی با لاستیک افزایش مدول الاستیسیته کاهش جمع‌شدگی در قالب

کمک به کنترل ویسکوزیته و رئولوژی آمیزه لاستیکی [۱][۳]

۳. تأثیر کربنات کلسیم رسوبی بر خواص مکانیکی و

فرآیندی آمیزه‌های لاستیکی

استفاده از کربنات کلسیم رسوبی در آمیزه‌های لاستیکی صرفاً به‌منظور کاهش هزینه‌ها نیست؛ بلکه این ماده می‌تواند نقش کلیدی در افزایش خواص مکانیکی، سهولت فراوری و کنترل خواص رئولوژیکی ایفا کند. در این بخش، این تأثیرات به‌تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱,۳ خواص مکانیکی

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افزودن کربنات کلسیم رسوبی در محدوده ۱۰ تا ۳۰ درصد وزنی به آمیزه‌های لاستیکی می‌تواند خواص زیر را بهبود بخشد: افزایش سختی (Hardness): استفاده از PCC باعث افزایش

۴,۳ اصلاح سطح کربنات کلسیم رسوبی و تأثیر آن بر عملکرد در لاستیک

یکی از چالش‌های اصلی استفاده از پرکننده‌های معدنی در ماتریس‌های پلیمری، ناسازگاری شیمیایی میان فاز معدنی و فاز آلی است. برای حل این مشکل، اصلاح سطحی (Sur-face Treatment) روی کربنات کلسیم رسوبی انجام می‌گیرد تا چسبندگی آن به پلیمر افزایش یابد و پراکندگی بهتری حاصل شود.

۱,۴ روش‌های اصلاح سطح

اسید استئاریک (Stearic Acid): رایج‌ترین عامل پوشش‌دهنده برای بهبود هم‌خوانی با لاستیک‌های غیرقطبی مانند NR و SBR است. پوشش اسید استئاریک باعث کاهش آب‌دوستی سطحی و افزایش پراکندگی در فاز لاستیکی می‌شود.

سیلان‌ها (Silanes): برای لاستیک‌های قطبی مانند، NBR، EPDM و CR استفاده می‌شود و پیوند شیمیایی میان سطح معدنی و زنجیره‌های پلیمر ایجاد می‌کند.

پوشش‌های پلیمری (Polymeric Coating): شامل اصلاح با پلی‌اتیلن، EVA یا پلی‌آمیدها برای کاربردهای خاص. [۱][۵]

۲,۴ مزایای اصلاح سطح

کاهش جذب رطوبت در فرایند اختلاط
پراکندگی یکنواخت‌تر و پایداری بهتر در طول انبارداری
افزایش مدول و استحکام کششی محصول نهایی
کاهش ویسکوزیته و بهبود روان‌شوندگی در فرایند اکستروژن [۱][۵]

۳,۴ ملاحظات صنعتی

نوع لاستیک پایه باید با روش اصلاح سطح تطابق داشته

سختی آمیزه می‌شود که برای بسیاری از قطعات فنی مانند واشرها، ضربه‌گیرها و زیره کفش مطلوب است.

افزایش مدول الاستیسیته (Modulus): ذرات ریز و سخت باعث محدودشدن حرکت زنجیره‌های پلیمری می‌شوند و به این ترتیب مدول را افزایش می‌دهند.

بهبود مقاومت سایشی (Abrasion Resistance): به‌ویژه در ساخت تایر، وجود کربنات کلسیم رسوبی می‌تواند عمر لاستیک را افزایش دهد.

کنترل جمع‌شدگی (Shrinkage): پرکننده‌های رسوبی باعث کاهش تغییر ابعاد محصول در مرحله پخت می‌شوند [۱][۵]

۲,۳ خواص فرآیندی و رئولوژیکی

پراکندگی بهتر (Dispersion): توزیع یکنواخت ذرات PCC در ماتریس لاستیکی موجب پایداری فرایند اختلاط، همگنی بیشتر و کنترل بهتر ویسکوزیته می‌شود [۳].

افزایش سرعت اختلاط: به‌ویژه در ترکیب با پلاستی‌سایزرها، حضور این پرکننده باعث کاهش اصطکاک داخلی و تسهیل فرایند می‌شود.

پایداری در فرایند پخت (Curing Stability): کربنات کلسیم رسوبی اثر منفی بر واکنش‌های پخت ندارد و در صورت استفاده مناسب از کمک فرایندها، موجب افزایش کارایی شبکه پخت نیز خواهد شد [۳].

۳,۳ مقایسه با سایر پرکننده‌ها [۴]

ویژگی پرکننده	کربنات کلسیم رسوبی (PCC)
سختی	متوسط تا بالا
پراکندگی در ماتریس	بسیار خوب
رنگ و شفافیت	سفید خالص
هزینه	کم
خواص مکانیکی	مناسب در سطوح بالا

باشد.

مقدار اصلاح سطح معمولاً بین ۰.۵ تا ۲ درصد وزنی است. استفاده بیش از حد از مواد اصلاح کننده ممکن است موجب تداخل در فرایند پخت شود.

۵. کاربردهای صنعتی کربنات کلسیم رسوبی در محصولات لاستیکی

استفاده از کربنات کلسیم رسوبی در محصولات لاستیکی نه تنها به دلایل اقتصادی بلکه به علت بهبود خواص عملکردی و فرایندی، در بسیاری از صنایع توسعه یافته است. در این بخش، برخی از مهم ترین کاربردهای صنعتی این ماده بررسی می شود. [۱][۵].

۱،۵ صنعت خودرو (Tire Industry)

در تولید تایر، ترکیب مناسبی از استحکام، دوام، مقاومت سایشی و انعطاف پذیری مورد نیاز است. کربنات کلسیم رسوبی، به ویژه در تایرهای سواری سبک و تجاری، در بخش هایی مانند:

لایه های داخلی (Innerliner)

دیواره جانبی (Sidewall)

نوار محافظ (Tread cap)

به کار می رود و موجب کاهش وزن، بهبود مقاومت در برابر سایش، و کنترل بهتر فرایند پخت می شود [۳].

۲،۵ قطعات فنی و صنعتی

در محصولات مهندسی و صنعتی مانند:

واشرها (Gaskets)

ضربه گیرها (Dampers)

اورینگ ها (O-rings)

نوارهای درزگیر (Sealing strips)

کربنات کلسیم نقش پرکننده تقویت کننده دارد و خواصی چون سختی، پایداری ابعادی و مقاومت شیمیایی را ارتقا می دهد [۳][۵]

۳،۵ زیره کفش و قطعات رنگ روشن

کربنات کلسیم رسوبی به دلیل رنگ سفید خالص و قابلیت پراکندگی بالا، انتخابی ایدئال برای: زیره کفش های سبک و ورزشی لاستیک های تزئینی و رنگ روشن قطعات لاستیکی پزشکی به کار می رود [۴].

۴،۵ لرزه گیر و ضربه گیرهای ساختمانی

در سازه ها و صنایع ساختمانی، آمیزه های لاستیکی حاوی PCC برای کاهش ارتعاش، جذب شوک و افزایش دوام در شرایط محیطی مختلف کاربرد دارند [۳].

۵،۵ محصولات فومی (Rubber Foams)

استفاده از PCC در ترکیب با عوامل پفزا، در تولید فوم های لاستیکی سبک و بادوام رایج است. این محصولات در صنایع بسته بندی، عایق کاری و کف سازی استفاده می شوند [۳].

۶. مزایای اقتصادی و زیست محیطی استفاده از کربنات کلسیم رسوبی

۱،۶ مزایای اقتصادی

استفاده از کربنات کلسیم رسوبی در ترکیب های لاستیکی، نه تنها به بهبود عملکرد کمک می کند، بلکه نقش قابل توجهی در کاهش هزینه ها دارد:

جایگزینی بخشی از پلیمر گران قیمت:

این ماده به عنوان پرکننده، بخشی از حجم آمیزه را بدون افت کیفیت جایگزین می کند و در نتیجه هزینه کلی کاهش می یابد

کاهش وزن محصولات:

به‌ویژه در صنعت تایر و قطعات خودرویی که کاهش وزن اهمیت دارد.

افزایش بهره‌وری فرایند تولید:

باعث کاهش زمان اختلاط، پایداری رئولوژیکی، و کاهش ضایعات فرایندی می‌شود [۴، ۵].

۲,۶ مزایای زیست‌محیطی

مادهای غیرسمی و زیست‌سازگار:

در مقایسه با برخی پرکننده‌های شیمیایی، کربنات کلسیم تأثیرات منفی بر محیط‌زیست ندارد.

قابلیت بازیافت در فرایندهای لاستیک‌سازی:

آمیزه‌های حاوی PCC را می‌توان در بسیاری از موارد بازیافت یا بازیابی نمود. [۵]

کاهش استفاده از منابع پتروشیمی:

با کاهش وابستگی به پلیمرهای سنتزی نفت‌پایه، نقش

مؤثری در حرکت به‌سوی تولید پایدار دارد.

۷. نتیجه‌گیری

کربنات کلسیم رسوبی یک ماده ارزشمند و مؤثر در صنعت لاستیک محسوب می‌شود که علاوه بر ایفای نقش پرکننده، می‌تواند به‌عنوان یک افزودنی عملکردی موجب ارتقای خواص مکانیکی، فرایندی و ظاهری محصولات شود.

با توجه به قابلیت اصلاح سطح، امکان استفاده در طیف گسترده‌ای از لاستیک‌های طبیعی و مصنوعی فراهم است. همچنین این ماده با مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی خود، جایگاه استراتژیکی در تولید لاستیک‌های مدرن و رقابتی دارد. [۱][۲][۵]

اطلاعات و تجربیات عملی ارائه‌شده در این مقاله، با مشارکت و همکاری شرکت شیمی معدنی همدان، به‌عنوان یکی از تولیدکنندگان مطرح کربنات کلسیم رسوبی در ایران گردآوری شده است.

۸. منابع

1. 1. Ramesh, S. et al. (2020). Effect of calcium carbonate on mechanical and morphological properties of natural rubber composites, Journal of Elastomers & Plastics, 52(4), 312--326.
2. 2. Shimi Madani Hamedan Co. -- Technical Data Sheets, <http://www.cmhco.ir/>
3. 3. JJHR Group. (2023). Application of Calcium Carbonate in Rubber Products, www.jjhrgroup.com
4. 4. ACCM Egypt. (2022). Role of Calcium Carbonate in Enhancing Rubber Industry, www.accm.com.eg
5. 5. Ismail, H. et al. (2019). Calcium carbonate as functional filler in rubber matrix composites: A review, Polymer Testing, 78, 105994.



A review of the scientific and industrial study of the role of precipitated calcium carbonate in the rubber industry

Mohammad Javad Sefidabi¹, Laya Mardaneh Shalqoni^{*2}

1- Hamedan Inorganic Chemistry Company, Hamedan, Iran

2- Iran Rubber Industry Research Center, Tehran, Iran

*Corresponding author Email: *Layaa.Mardanee@gmail.com

Abstract

Calcium carbonate or calcium bicarbonate is a chemical substance with the formula CaCO_3 . Precipitated calcium carbonate (PCC) is a white, odorless powder obtained from the chemical modification of hydrated lime or calcium hydroxide. Precipitated calcium carbonate is known as a multipurpose filler and reinforcement in the rubber industry. Due to its specific morphology, uniform particle size distribution, and high purity, this material significantly improves the mechanical properties, dimensional stability, and processability of rubber compounds. In this article, the physical and chemical properties of precipitated calcium carbonate and its effect on the performance of natural and synthetic rubber compounds are reviewed. Surface modification technologies, comparisons with other fillers, and case studies of industrial applications such as tires, gaskets, and shock absorbers are also presented. The use of this material not only helps reduce production costs, but also complies with environmental requirements, making it a strategic material in modern rubber production. This research was developed in partnership with Hamedan Mineral Chemistry Company, one of the leading producers of calcium carbonate in Iran.

Keywords: Precipitated calcium carbonate, rubber industry, physical and mechanical properties