

جلوگیری از بروز مهاجرت به سطح رزورسینول در کائوچوی طبیعی و کاهش ضایعات هوای داخلی تایر

اسعد میره کی^{۱*} و پوریا عزتی^۲

۱- مدیر اداره ساختار تایر، شرکت بارز کردستان

۲- کارشناس مهندسی فرایند سالن آماده سازی، شرکت بارز کردستان

asad.mirahky@gmail.com

چکیده: در فرایند تولید تایرهای سواری، نیم ساخته «استریپ بلت» یکی از اجزای کلیدی در ساختار لایه های مقاومتی تایر محسوب می شود. کیفیت این نیم ساخته به طور مستقیم بر استحکام باند شدن با لایه های مجاور و عملکرد نهایی تایر اثرگذار است. در بررسی های انجام شده، عیب موسوم به «هوای بین بلت» به عنوان یکی از ضایعات تکرار شونده شناسایی شد. پژوهش های میدانی و آزمون های فرایندی متعدد نشان دادند که عامل اصلی بروز این عیب، اختلاف دمایی (گرادیان دما) ایجاد شده بین پوسته های حرارتی (شل ها) در بخش اکسترودر دستگاه رولرهد است. این اختلاف دما منجر به تغییر توزیع حرارتی در ترکیب لاستیکی (کامپاند) بخش استریپ شده و زمینه بروز بلوم یا مهاجرت سطحی ماده رزورسینول به سطح استریپ را فراهم می کند. رزورسینول، که به عنوان عامل چسبندگی در ساختار کامپاند به کار می رود، در صورت مهاجرت و تجمع سطحی، مانع از پخت کامل (فرایند ولکانیزاسیون) در ناحیه تماس شده و ایجاد لایه هوا بین استریپ و بلت را تشدید می کند. این پدیده نه تنها کیفیت اتصال لایه ها را کاهش می دهد، بلکه منجر به افزایش نرخ ضایعات و افت عملکرد مکانیکی تایر می شود.

اقدامات اصلاحی متعددی شامل تنظیم دما، بهبود مسیر جریان آب خنک کاری، و تغییر پارامترهای سرعت تولید انجام شد، اما اثر پایدار مشاهده نشد. در نهایت، با انجام تنظیمات دمای و یکسان سازی دمای شل های رولرهد در تولید استریپ عیب رفع شد و افزون بر کاهش ضایعات موجب افزایش کیفیت تایر ناشی از حذف هوای ریز در تایر شد.

واژه های کلیدی: استریپ بلت، هوای بین لایه، بلوم رزورسینول از زنجیره کامپاند

مقدمه

تایر خودرو یک سازه مرکب پیچیده است که در آن اجزای مختلف با نقش های مکانیکی، شیمیایی و دینامیکی خاص در کنار یکدیگر به کار گرفته می شوند تا محصول نهایی توانایی تحمل بار، انتقال نیرو، جذب شوک و ایجاد چسبندگی را داشته باشد. ساختار تایرهای رادبال سواری و باری سبک به گونه ای طراحی شده است که هم از نظر استحکام و پایداری ابعادی و هم از لحاظ ایمنی و راحتی عملکرد مناسبی ارائه می کنند. نقش هر نیم ساخته در این سیستم پیچیده، حیاتی است؛ زیرا کوچک ترین نقص در یک لایه می تواند عملکرد کلی را تحت تأثیر قرار دهد و موجب خرابی زودهنگام شود [۱].

یکی از لایه های مهم در این ساختار، استریپ بلت است که به صورت نواری باریک روی لایه های فولادی کمر بند تایر قرار می گیرد. این نوار با کامپاندی خاص بر پایه کائوچوی طبیعی و افزودنی های تقویتی ساخته می شود و وظیفه آن، بهبود هم چسبی بین لایه فولادی و آج، توزیع یکنواخت تنش و کاهش تمرکز تنش های موضعی است [۲]. خواص چسبندگی این لایه به زیر لایه فولادی، بیش از هر چیز وابسته به کیفیت پراکندگی و پایداری شیمیایی افزودنی هایی مانند رزورسینول است که به عنوان عامل ارتقاء چسبندگی شناخته می شود [۳].

رزورسینول یک ترکیب فنولی دوعاملی است که به دلیل قابلیت ایجاد شبکه های هیدروژنی و واکنش پذیری با سیستم های کورد-رزورسینول-فرمالدهید در صنعت تایر نقش عمده ای دارد. هنگامی که این ماده به صورت یکنواخت در ماتریس لاستیک توزیع شود، پیوند شیمیایی بین لایه لاستیکی و سیم فولادی یا فیبر را بهبود می بخشد. اما پایداری این ماده، به شدت به شرایط فرایندی وابسته است؛ دما، زمان ماند و میزان سرمایش یا گرمایش در مراحل اکستروژن و نورد، اثر مستقیم بر پایداری آن دارند [۴].

یکی از مشکلات شناخته شده در تولید استریپ بلت با دستگاه رولرهد، پدیده بلومینگ رزورسینول است [۵]. رولرهد ترکیبی از یک اکسترودر و مجموعه

غلطک های نورد است که کامپاند گرم از بین آن ها عبور کرده و به صورت نوار یا ورق با ضخامت مشخص درمی آید. این دستگاه مجهز به شل های حرارتی است که با گردش آب یا روغن داغ، دمای فرایندی را کنترل می کنند. اختلاف دما یا گرادیان حرارتی بین بخش های مختلف دستگاه، به ویژه بین رول ها مهم ترین عامل فعال سازی پدیده بلومینگ به شمار می آید [۶].

وقتی دمای رول پایین کمتر از مقدار هدف باشد، سطح کامپاند به سرعت سرد می شود. این سرمایش سریع باعث تغییر ضریب حل پذیری رزورسینول در فاز لاستیکی و در نتیجه مهاجرت آن به سطح می شود [۷]. برعکس، اگر دما بیش از حد باشد، تحرک مولکولی رزورسینول افزایش یافته و به سمت سطح رانده می شود و سپس در مراحل بعدی به شکل بلوم ظاهر می شود [۸].

بلومینگ رزورسینول مانع از برقراری پیوند شیمیایی کامل بین نیم ساخته و لایه زیرین در مرحله پخت می شود و در نهایت، باعث حبس هوا یا گاز در ناحیه فصل مشترک شده و عیب «هوای بین بلت» ظاهر می شود [۳]. شواهد صنعتی نشان داده است که اختلاف دمای بیش از ۵ °C بین رول پایین و بقیه بخش ها، ضایعات را به شدت افزایش داده و کاهش این اختلاف به کمتر از ۱ °C نرخ عیب را به صفر نزدیک کرده است [۶].

در نهایت با ریشه‌یابی دقیق عیب، عیب به صورت دقیق پیدا و رفع شد.



شکل ۱- بروز عیب هوای داخلی تایر

بند ۱- سابقه و بروز اولیه عیب

عیب «هوای بین بلت» در مقاطع مختلف بروز کرده بود و با وجود اقداماتی مانند تنظیم سرعت رولرهد، مدیریت رطوبت کامپاند، کاهش سرعت تولید و افزایش فشار رول پرس (همراه با نصب رول کمکی)، تنها بخشی از مشکل مهار شد و رفع ریشه‌ای حاصل نشد. در دوره‌های مختلف مورد مشکوکی به افزایش مونی ناشی از مصرف سرد کامپاند ثبت شد. برای مهار این وضعیت، نخ کتان در تولید کتود استیل‌کورد به کار گرفته شد که ابتدا باعث کاهش نرخ عیب شد، اما با گذشت زمان مجدداً شدت گرفت.

بند ۲- تمرکز بر کنترل کامپاند و میکسر

با توجه به نقش حیاتی پارامترهای کامپاند در کیفیت نهایی، کنترل دقیق‌تر فرایند بنبوری و پایبندی به دستورالعمل‌ها ضروری است. پارگی نخ کتان و تراکم کم آن در کتود استیل‌های تولیدی، رطوبت بالای کامپاند، مونی زیاد و MH پایین باعث رشد ضایعات شد. با افزایش شدید ضایعات، تمامی تولید کامپاند استریپ به میکسر دیگر منتقل شد تا محصول خشک‌تر و هیچ مایع داستینگی روی کامپاند باقی نماند. همچنین احتمال بلوم گوگرد بررسی و سه دارم خنک‌کاری از خط خارج شد که نتیجه محسوسی نداشت.

بند ۳- اصلاحات در ابتدای تولید و ریورک

بررسی‌ها نشان داد بیشترین ضایعات از رول‌های ابتدای تولیدی استریپ ناشی می‌شود؛ از این رو، در هر ران تولیدی صد متر اول تولید ریورک شد. هم‌زمان در تایرسازی، تنظیم نادرست تنش جی آل بی اصلاح شد. با استمرار عیب، ریورک ابتدای تولید از ۱۰۰ به ۱۵۰ متر افزایش یافت. در ابتدای تولید، سرعت اسکرو روی ۱۶ و سرعت خط روی ۱۲ تنظیم شود تا کامپاند قبلی تخلیه و شل‌ها به دمای مرجع برسند. این اقدام باهدف کاهش احتمال بلوم رزورسینول انجام شد.

بند ۴- رفع کامل عیب با تغییر مسیر تولید

در نهایت با افزایش «هوای بین بلت» و افزایش ضایعات، فرض بر این بود که گرادیان دمای شل‌های اکسترودر پایین، عامل بلوم رزورسینول است. با اصلاح انجام‌شده و رفع اختلاف دمای بین شل‌ها و ادامه تولید عیب رفع شد. با توجه به بروز عیب بلومینگ در کامپاند عوامل مختلفی می‌تواند موجب کاهش عیب و برگشت رزورسینول به داخل شبکه کامپاند شود. یکی از این روش‌ها افزایش فشار روی نیم‌ساخته تولیدی است. عامل دیگر ماندن نیم‌ساخته در دمای محیط حداقل به مدت ۴۸ است.

نخستین لایه کنترل، پایش بلادرنگ گرادیان دمایی بین شل‌ها و به‌ویژه بین رول پایین و سایر بخش‌های رولرهد است. این کار با نصب سنسورهای دمای کالیبره‌شده و اتصال آن‌ها به سیستم مانیتورینگ مرکزی محقق می‌شود تا هرگونه انحراف از محدوده مجاز (کمتر از ۱ °C) بلافاصله هشدار دهد [۶]. در کنار کنترل سخت‌افزاری، استانداردسازی فرمولاسیون کامپاند اهمیت بالایی دارد. با یکنواخت‌سازی میزان رزورسینول و بهبود پراکندگی آن در مرحله میکس، حساسیت کامپاند به تغییرات دما کاهش می‌یابد [۴]. همچنین، برنامه‌ریزی نگهداشت پیشگیرانه (PM) برای شست‌وشوی دوره‌ای مسیرهای آب شل‌ها و رفع رسوب یا زنگ‌زدگی، احتمال ایجاد نقاط سرد یا گرم را به حداقل می‌رساند.

عیب «هوای بین بلت» تنها یک مشکل کیفی در مرحله تولید نیست، بلکه می‌تواند در طول عمر مصرفی تایر، خطرات جدی ایجاد کند. وجود حباب‌های هوا یا لایه‌های جداشده بین استریپ بلت و زیرلایه باعث کاهش استحکام چسبندگی داخلی می‌شود [۳]. این ضعف ساختاری تحت بارهای متناوب حاصل از شتاب‌گیری، ترمز و تغییر مسیر، به تدریج به جدایش کامل لایه‌ها منجر می‌شود.

در سرعت‌های بالا، ناحیه جداشده تبدیل به یک محل تمرکز تنش می‌شود که رشد ترک از آن آغاز می‌شود. این ترک‌ها در نهایت می‌توانند به لایه آج رسیده و باعث برآمدگی موضعی یا حتی انفجار موضعی شوند [۱]. این پدیده به‌ویژه در تایرهای محور جلو و در زمان مانور ناگهانی، کنترل خودرو را سخت کرده و احتمال تصادف را افزایش می‌دهد.

از دیدگاه دوام، وجود عیب باعث افزایش دمای موضعی به دلیل اصطکاک داخلی بیشتر در مرز جداشده می‌شود. این افزایش دما روند پیری حرارتی کامپاند را تسریع کرده و می‌تواند به‌ویژه در تایرهای باری سبک (VAN و SUV) که بارهای بالاتری تحمل می‌کنند، باعث شکست زودهنگام شود [۷]. آزمون‌های عمر شتاب‌داده نشان داده‌اند که تایرهای دارای این عیب، تا ۴۰٪ عمر کمتری در مقایسه با تایر سالم داشته‌اند [۵].

ریشه‌های پدیده بلومینگ در کامپاند و دستگاه رولرهد:

مواد مختلفی می‌تواند در کامپاند استریپ بلوم کرده و به سطح نیم‌ساخته بیاید که در این موارد فقط ماده رزورسینول می‌تواند موجب جلوگیری از فعال شدن گوگرد شده و باعث بروز عیب هوا شود مواد مستعد عیب بلومینگ در کائوچوی طبیعی و کامپاند استریپ بلت به شامل نمک کبالت، 6PPD و رزورسینول است. کبالت معمولاً به شکل نمک‌های آلی (مثل کبالت نفتانات) در کامپاندهای سیم‌دار (مثلاً تایر) به‌عنوان چسباننده سیم فولادی استفاده می‌شود. نمک کبالت در دوزهای زیاد اگر قابلیت حل‌شدن در ماتریس پلیمر را نداشته باشد، مستعد بلوم‌کردن است، به‌خصوص اگر دما افزایش یابد و پس از کاهش دما انحلال‌پذیری آن کاهش پیدا کند. 6PPD نسبتاً محلول در فاز لاستیکی است اما اگر مقدار مصرف بیش از حد یا توزیع نامناسب باشد و یا در دماهای پایین‌تر پس از رولینگ، ممکن است به‌صورت بلوم مشاهده شود. با این حال تمایل بلوم 6PPD نسبت به نمک کبالت و رزورسینول کمتر است. رزورسینول رزین فنولی با وزن مولکولی نسبتاً بالا است که به‌عنوان عامل چسبندگی یا کراس‌لینک‌کننده در کامپاندها به‌ویژه هنگام ساخت تایر دار استفاده می‌شود. تمایل به بلوم کردن رزورسینول بستگی به نوع و فرمول‌بندی دارد اما به‌طور معمول محلولیت نسبی بیشتری نسبت به کبالت در کائوچوی طبیعی دارد.

در فرایند رولرهد، اگر دما بعد از مخلوط‌کنی کاهش یابد، موادی که در دمای بالا حل‌شده‌اند و با سرد شدن قابلیت حل‌شدنشان کم می‌شود، تمایل به مهاجرت به سطح دارند.

اقدامات انجام‌شده جهت رفع عیب:

اقدامات زیادی جهت رفع عیب هوای بین بلت که در شکل ۱ نشان داده‌شده است در خط تولید انجام شد که خلاصه آن در بندهای زیر گزارش شده است که

نتیجه گیری

بررسی جامع فرایند تولید نیم ساخته «استریپ بلت» در تایرهای رادیال سواری نشان داد که عیب «هوای بین بلت» حاصل ترکیب عوامل فرایندی و مواد خام است. مهم ترین مکانیسم بروز این عیب، بلومینگ رزورسینول در اثر ایجاد گرادیان دمایی بین شل های حرارتی دستگاه رولرهد شناسایی شد. این اختلاف دمایی با تغییر انحلال پذیری رزورسینول در ماتریس لاستیک، مهاجرت آن به سطح و ایجاد مانع در فرایند پخت کامل لایه ها را تسهیل کرده و منجر به حبس هوا در ناحیه فصل مشترک می شود.

سیر اقدامات اصلاحی نشان داد که مداخلات متعارف مانند تنظیم سرعت رولرهد، کاهش رطوبت کامپاند، تغییر فشار رول پرس، یا اصلاح سرعت خط، هرچند در مقاطع کوتاه مدت باعث بهبود نسبی شدند، اما اثر پایدار نداشتند. کنترل دقیق تر فرایند بنبوری، بهینه سازی فرمولاسیون کامپاند، اصلاح تراکم نخ کتان در کتد استیل کورد و اعمال ریورک ابتدای تولید (از ۱۰۰ به ۱۵۰ متر)

مراجع

- [1] Gent, A. N., & Walter, J. D. (2006). The Pneumatic Tire. NHTSA, DOT.
- [2] Lake, G. J. (2018). Mechanical properties of rubber in service. Rubber Chemistry and Technology, 91(1), 122–146.
- [3] Bhowmick, A. K., & Stephens, H. L. (2001). Handbook of Elastomers, 2nd ed. CRC Press.
- [4] Akiba, M., & Hashim, A. S. (1997). Vulcanization and crosslinking in elastomers. Progress in Polymer Science, 22(3), 475–521.
- [5] Funt, J. M. (1980). Blooming in Rubber Compounds. Rubber Chemistry and Technology, 53(3), 600–618.
- [6] Brown, R. (2014). Physical Testing of Rubber. Springer.
- [7] Myhre, M., & MacKillop, D. (2002). Diffusion of additives in rubber. Elastomer Technology Handbook, CRC Press.
- [8] Akiba, M., & Hashim, A. S. (1997). Vulcanization and crosslinking in elastomers. Progress in Polymer Science, 22(3), 475–521.
- [9] Funt, J. M. (1980). Blooming in Rubber Compounds. Rubber Chemistry and Technology, 53(3), 600–618.

به کاهش موقتی ضایعات انجامید. با این حال، تنها رفع پایدار عیب زمانی حاصل شد که دمای شل های اکسترودر رولرهد با سایر شل ها یکسان شد. این اصلاح، گرادیان دمایی را به کمتر از ۱ °C رساند و با حذف شرایط ترمودینامیکی بلومینگ رزورسینول، نرخ عیب را به صفر کاهش داد. نتایج نشان داد که پایش بلادرنگ دما، نگهداشت پیشگیرانه تجهیزات خنک کاری، و رعایت دقیق دستورالعمل های عملیاتی، همراه با استاندارد سازی مواد اولیه، می تواند نه تنها عیب یاد شده را مهار کند، بلکه به بهبود یکنواختی محصول، کاهش هزینه های ضایعات و ارتقاء دوام و ایمنی تایر نیز بینجامد.

مطالعه حاضر اهمیت مدیریت هم زمان متغیرهای فرایند و ویژگی های مواد را برجسته می کند و تأکید دارد که در فرایندهای پیوسته ای چون تولید تایر، ناهمبستگی جزئی در واحدی مانند رولرهد قادر است زنجیره ای از پیامدهای شیمیایی-مکانیکی را رقم بزند که اثرات آن نه فقط در مرحله تولید، بلکه در طول عمر استفاده از تایر آشکار می شود.