

بررسی روش DPCT به عنوان یکی از روش های نوین پخت تایر و بررسی ویژگی های آن

سامان ثنائی^{۱*} و آزاد پرتوی^۲

۱- مدیر واحد فرایند پخت و بازرسی تایر، کارخانه لاستیک بارز کردستان

۲- مدیر اداره مرکز آزمون، کارخانه لاستیک بارز کردستان

sami.sana1983@gmail.com

چکیده: پخت (Curing) یکی از مراحل کلیدی در فرایند تولید تایر است که استحکام نهایی، شکل ظاهری و عملکرد دینامیکی محصول را تعیین می کند. در روش های سنتی، استفاده از سیستم های پرس بخار و بلادر لاستیکی، محدودیت هایی در زمینه یکنواختی حرارتی، کنترل فشار داخلی و بهینه سازی مصرف انرژی ایجاد می کرد. پیشرفت های اخیر در فناوری پخت، شامل روش هایی همچون Direct Pressure Curing Technology (DPCT)، پخت بدون بلادر (Bladderless Curing)، سامانه های کنترل هوشمند دما و فشار، و استفاده از قالب های با گرمایش القایی یا الکتریکی، موجب افزایش دقت در توزیع حرارت، کاهش زمان سیکل، بهبود چسبندگی لایه ها، و کاهش ضایعات شده است. این روش ها همچنین امکان پایش و کنترل آنلاین فرایند با بهره گیری از حسگرهای هوشمند و تحلیل داده ها (Big Data & AI) را فراهم کرده اند. نتایج مطالعات و تجربیات صنعتی نشان می دهد که پیاده سازی فناوری های نوین پخت، بهبود قابل توجهی در شاخص های کیفیتی مانند یکنواختی (Uniformity)، مقاومت چسبندگی و کاهش نرخ Air Defect on Belt را به همراه داشته و مسیر توسعه تایر های با عملکرد بالا در بخش SUV، PCR و VAN را هموار ساخته است.

واژه های کلیدی: پخت تایر، DPCT، پخت بدون بلادر، یکنواختی، تایر PCR، SUV، VAN، فناوری هوشمند

مقدمه

فرایند پخت (curing) یکی از مراحل کلیدی در تولید تایر است که طی آن ساختار شیمیایی و فیزیکی آمیزه های لاستیکی به وسیله واکنش های ولکانیزاسیون (vulcanization) تثبیت شده و استحکام، کشسانی و مقاومت سایشی نهایی محصول شکل می گیرد. در روش های مرسوم، این عملیات در قالب های بسته و با استفاده از فشار بخار یا آب داغ انجام می شود و گرما از طریق بلادر (bladder) به لایه های تایر منتقل می شود. با وجود اثبات کارآمدی این روش ها در دهه های گذشته، محدودیت هایی مانند زمان پخت نسبتاً طولانی، مصرف بالای انرژی و عدم یکنواختی کامل دمایی در مقاطع ضخیم تر تایر، نیاز به نوآوری های فناورانه را بیش از پیش نمایان ساخته است. در سال های اخیر، توسعه روش های نوین پخت نظیر فناوری های پخت مستقیم با فشار (DPCT)، پخت بدون بلادر (Bladderless Curing)، سامانه های گرمایش القایی و مایکروویوی و کنترل دقیق پروفایل دمایی توسط سنسورها و الگوریتم های پیشرفته، تحولی چشم گیر در ارتقای کیفیت، کاهش ضایعات و افزایش بهره وری خطوط تولید رقم زده است. این فناوری ها نه تنها امکان بهبود یکنواختی توزیع حرارت و کاهش گرادیان های حرارتی بین لایه ها را فراهم می کنند، بلکه در ترکیب با سیستم های مانیتورینگ هوشمند و ردیابی دیجیتال، توانایی تطبیق پذیری با نیازهای مختلف طراحی تایر را نیز افزایش می دهند. شناخت ویژگی ها، مزایا و چالش های روش های مدرن پخت، به تولیدکنندگان این امکان را می دهد که با انتخاب فناوری مناسب، ضمن بهبود مشخصه های عملکردی تایر در حوزه هایی مانند مقاومت غلتشی، دوام و ایمنی، هزینه های عملیاتی را نیز بهینه کنند. در این مقاله، به بررسی جامع انواع روش های نوین پخت تایر، مکانیسم عملکرد آن ها و تأثیر هر کدام بر کیفیت محصول نهایی پرداخته خواهد شد.

بررسی روش های سنتی پخت تایر با تمرکز بر محدودیت ها و مزایا:

اصلی ترین روش سنتی که در بیشتر کارخانه های تایر سازی استفاده می شود، پخت در قالب بسته مجهز به بلادر داخلی (Bladder Curing with Steam/Hot Water) است. در این روش، تایر خام (Green tire) درون قالب فلزی قرار داده می شود،

بلادر داخلی با بخار اشباع یا آب داغ در فشار بالا پر می شود، و همزمان گرما از طریق دیواره قالب (به کمک المنت های بخار یا سیرکولاسیون سیال داغ) به سطح بیرونی تایر منتقل می شود. فشار داخلی باعث فرم گیری دقیق و انتقال گرما به لایه های داخلی می شود.

مزایای روش سنتی پخت تایر که در حال حاضر در کارخانه بارز کردستان استفاده می شود، عبارت است از موارد زیر:

پایداری و تکرارپذیری فرایند: این روش طی دهه ها استفاده، به یک فرایند استاندارد با رفتار قابل پیش بینی تبدیل شده و در بیشتر خطوط تولید جهانی بدون مشکل پیاده سازی می شود.

انعطاف در تولید انواع سایز و طراحی: قابلیت تنظیم فشار و دما متناسب با ابعاد و ضخامت تایر در انواع تایرهای VAN، SUV و PCR

دوام بالایی تجهیزات قالب: قالب ها و سیستم بخار عمر کاری طولانی دارند و تعمیرات آن ها ساده تر از تکنولوژی های نوین است.

کیفیت فرم دهی دقیق آج و شانه تایر: به دلیل تماس کامل بلادر با سطح داخلی، جزئیات نقش آج و علامت گذاری جانبی بدون اعوجاج شکل می گیرد.

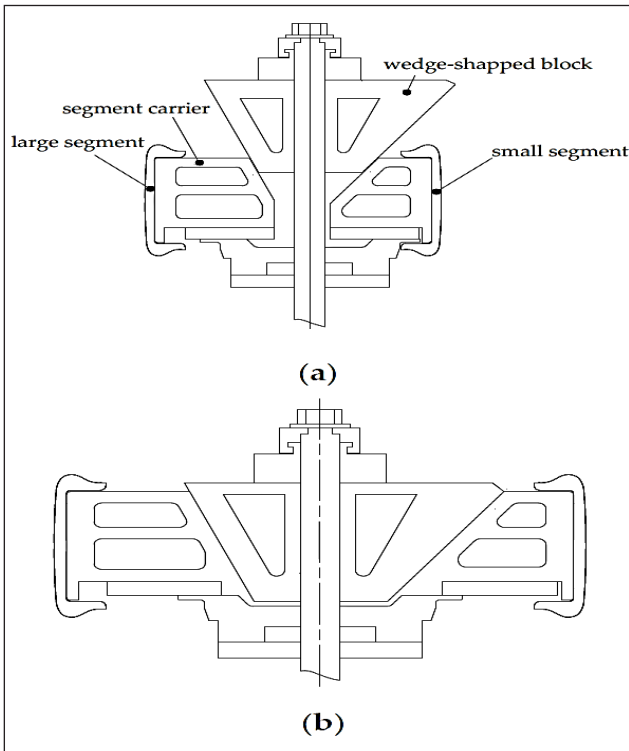
محدودیت های روش سنتی پخت تایر که در حال حاضر در کارخانه بارز کردستان استفاده می شود عبارت است از:

زمان پخت نسبتاً طولانی: به علت انتقال حرارت رسانشی (Conductive Heat Transfer) از سطح به مرکز، لایه های داخلی دیرتر به دمای ولکانیزاسیون می رسند. برای تایرهای ضخیم تر SUV یا VAN این موضوع برجسته تر است.

مصرف بالای انرژی: تولید و گردش بخار یا آب داغ فشار بالا هزینه انرژی زیادی می طلبد.

گرادیان حرارتی در لایه ها: حتی با کنترل پروفایل دمایی، اختلاف دما بین کمر بند فولادی و لایه های سطحی می تواند به عیوبی مثل حبس هوا و نپختگی منجر شود.

فرسودگی و خرابی بلادر: بلادر در اثر انبساط/انقباض مکرر و تماس با لایه های



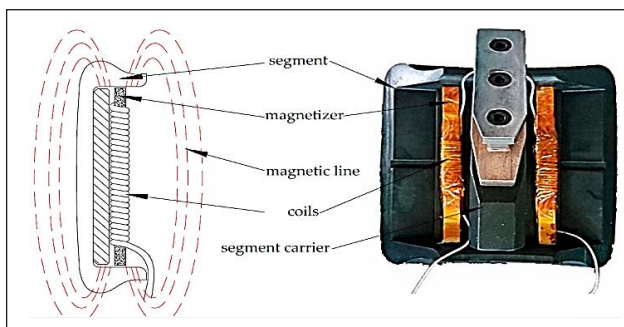
شکل ۱- شکل شماتیک قالب داخلی پرس پخت در روش DPCT در دو حالت: (a) قالب در حالت جمع شده (b) قالب در حالت باز

سیستم گرمایش القایی:

در روش سنتی، گرمایش از طریق بخار اشباع صورت می گیرد که دارای محدودیت های انتقال حرارت است. در DPCT، از سیستم گرمایش القایی برای گرم کردن سریع و یکنواخت قالب داخلی فولادی استفاده می شود. اصل کار گرمایش القایی بر پایه اصول الکترومغناطیس استوار است:

ایجاد میدان مغناطیسی: جریان متناوب با فرکانس بالا از طریق یک سیم پیچ (induction coil) عبور داده می شود. این جریان متناوب، یک میدان مغناطیسی متغیر در زمان در اطراف سیم پیچ ایجاد می کند. القای جریان گردابی (Eddy Currents): میدان مغناطیسی متغیر، به نوبه خود، جریان های الکتریکی در ماده رسانای قرار گرفته در داخل یا نزدیکی آن ایجاد می کند. در این سیستم، ماده رسانا، قالب داخلی فولادی است. این جریان های القایی که به صورت حلقوی در سطح و حجم ماده رسانا حرکت می کنند، به نام جریان های گردابی شناخته می شوند.

گرمایش مقاوم (Resistive Heating): همانند هر رسانای الکتریکی، فولاد دارای مقاومت الکتریکی است. عبور جریان های گردابی از این مقاومت باعث اتلاف انرژی به صورت گرما می شود (اثر ژول). این گرما به سرعت ماده را داغ می کند (شکل ۲).



شکل ۲- در داخل هر سگمنت قالب داخلی یک سیم پیچ برای ایجاد حرارت از طریق جریان القایی قرار دارد.

چسبناک، دچار پارگی یا نشت می شود که باعث توقف خط و هزینه تعمیر و تعویض می شود.

کنترل محدود الگوی دمایی داخلی: امکان اعمال پروفایل گرمایش کاملاً هدفمند به بخش های مختلف تایر (مثلاً کمربندها یا دیواره ها) محدود است و بیشتر گرمایش کلی اعمال می شود.

پخت تایر به روش فشار مستقیم (Direct Pressure Curing Technology):

به دلیل رسانایی گرمایی پایین و استحکام کم بلادر لاستیکی، فرایند پخت سنتی تایر با مشکلاتی مانند بازده پایین، مصرف انرژی بالا و دقت تولید کم مواجه است. برای رفع این معایب، این پژوهش فناوری نوینی به نام پخت فشار مستقیم (DPCT) معرفی می کند که در آن از قالب داخلی فولادی استفاده می شود که با گرمایش القایی الکترومغناطیسی گرم می شود. در این مطالعه تجهیزات ویژه ای با این فناوری ساخته شده و برای تولید آزمایشی تایر در سایز مشخصی به کاررفته است. مصرف انرژی تایر نمونه اندازه گیری و با فناوری سنتی مقایسه شده است. همچنین آزمون های یکنواختی (Uniformity) و بالانس تایر، و سنجش خواص فیزیکی بخش های آج (Tread) و دیواره جانبی (Sidewall) انجام گرفته است. افزون بر این، تحلیل المان محدود (FEA) برای بررسی نرخ گرمایش فناوری جدید و بهینه سازی فرایند پخت اجرا شده است. نتایج این مقاله نشان داده است که مصرف انرژی در هر سیکل پخت حدود ۸۶٪ کاهش یافته است، استحکام کششی بخش دیواره جانبی ۱۳٫۹٪ بیشتر شده است، تغییرات نیروی شعاعی (RFV) ۱۶٫۸٪ کاهش یافته است، جرم نابالانسی کوپل ۳۷٪ کاهش پیدا کرد. اختلاف دمای پخت در قسمت فوقانی و تحتانی تایر ۸ درجه سلسیوس کمتر شد. این داده ها ثابت می کند که DPCT دارای عملکرد عالی در صرفه جویی انرژی و دقت تولید است.

مشکلات روش پخت سنتی تایر:

در روش سنتی، تایر خام با بلادر لاستیکی و بخار اشباع پخت می شود. این پدیده چند مشکل ایجاد می کند:

- اختلاف دمای بالا بین بالا و پایین بلادر که باعث پخت ناهمگن در سمت چپ و راست دیواره جانبی می شود.
- سفتی پایین و تغییر شکل بلادر که توان تصحیح عیوب هندسی تایر خام را ندارد.
- غیرممتقارن بودن ذاتی بلادر به دلیل کهنگی، طراحی ضعیف یا انبساط ناقص که ایجاد نابالانسی و کاهش یکنواختی تایر.
- تلفات حرارتی زیاد به علت رسانایی حرارتی پایین بلادر و مسیر طولانی بخار از دیگ تا دستگاه.

معرفی فناوری جدید TCPD:

این پژوهش برای رفع محدودیت های بالا، فناوری پخت فشار مستقیم با قالب داخلی فولادی منبسط شونده را معرفی می کند که در آن تغییرات عبارتند از:

- جایگزینی کامل بلادر لاستیکی با قالب فولادی سگمنتی.
- گرمایش القایی الکترومغناطیسی مستقیم بخش های داخلی قالب، بدون استفاده از بخار و مدار خط لوله.
- ایجاد فشار توسط مکانیسم های رانش شعاعی قالب، بدون نیاز به سیال تحت فشار.

مکانیسم قالب داخلی پخت در روش DPCT:

در روش سنتی، قالب داخلی ثابت است و بالدر نقش انتقال فشار و حرارت را ایفا می کند. در DPCT، قالب داخلی خود از فولاد ساخته شده و وظیفه انتقال فشار و حرارت را به طور مستقیم به تایر بر عهده دارد. این قالب داخلی به گونه ای طراحی شده است که بتواند باز و بسته شود و امکان ورود و خروج تایر خام را فراهم کند (شکل ۱).

بر خصوصیات فیزیکی تایر است. مقایسه دقیق این داده‌ها بین روش سنتی و DPCT، امکان ارزیابی کمی تأثیر فناوری جدید را فراهم آورد و مبنایی برای تحلیل‌های بعدی، از جمله بهینه‌سازی فرایند با استفاده از FEA، قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

فناوری پخت فشار مستقیم تایر (DPCT) با استفاده از قالب داخلی فولادی منبسط شونده و گرمایش القایی، راه‌کاری نوآورانه برای غلبه بر چالش‌های فرایند پخت سنتی تایر است. نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان‌دهنده مزایای قابل توجه DPCT در چندین جنبه کلیدی است:

کاهش چشم‌گیر مصرف انرژی: مصرف انرژی در DPCT به‌طور متوسط ۸۶٪ کاهش‌یافته است. این صرفه‌جویی، حاصل حذف تلفات بخار و افزایش راندمان انتقال حرارت است و پیامدهای مثبت اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی دارد.

کاهش زمان سیکل پخت: راندمان بالاتر انتقال حرارت و امکان استفاده از دماهای بهینه، زمان چرخه پخت را کاهش داده و بهره‌وری تولید را افزایش می‌دهد.

بهبود کیفیت ابعادی و مکانیکی: روش DPCT منجر به کاهش قابل توجهی در پارامترهایی مانند RFV و جرم نامتوازن کوپل شده است. همچنین، یکنواختی دمایی بهتر و افزایش استحکام کششی دیواره جانبی، کیفیت کلی تایر را ارتقا می‌بخشد.

انعطاف‌پذیری در کنترل فرایند: قابلیت تنظیم مستقل دما و فشار در DPCT، امکان بهینه‌سازی دقیق‌تر فرایند را برای انواع مختلف تایرها و ترکیبات لاستیکی فراهم می‌آورد.

پتانسیل جای‌گزینی: با توجه به مزایای برجسته DPCT، این فناوری پتانسیل بالایی برای جای‌گزینی روش پخت مبتنی بر بخار در تولید انواع تایرهای سواری (PCR)، تایرهای ون (Van)، و تایرهای SUV دارد. این جای‌گزینی نه تنها منجر به صرفه‌جویی منابع و کاهش هزینه‌ها می‌شود، بلکه به تولید تایرهای ایمن‌تر و با عملکرد بهتر نیز کمک می‌کند.

در مجموع، DPCT یک فناوری پیشرفته و کارآمد است که استانداردهای جدیدی را برای فرایند پخت تایر تعیین می‌کند و گامی مهم در جهت تولید پایدارتر و باکیفیت‌تر در صنعت تایر است.

این سیستم گرمایش القایی، توانایی تولید حرارت بالا و کنترل دقیق دما را فراهم می‌آورد که برای بهینه‌سازی چرخه پخت و بهبود کیفیت محصول ضروری است. اعتبارسنجی فرایند: در این پژوهش برای اعتبارسنجی عملکرد و کارایی فناوری DPCT، یک سری آزمایش‌های میدانی انجام شده است. در این آزمایش‌ها، بیش از ۲۰۰ حلقه تایر با استفاده از هر دو روش، سنتی و DPCT، تولید و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

تجهیزات آزمایش: برای انجام این مقایسه، از دستگاه پخت ۴۸ krupp استفاده شده است. این دستگاه یک تجهیز صنعتی استاندارد برای تولید تایر است که امکان مقایسه مستقیم دو روش را فراهم می‌کند.

شرایط آزمایش:

دمای پخت: دمای داخلی (Internal Surface Temperature) برای هر دو روش ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است. این دمای استاندارد برای پخت این نوع تایر است.

دمای خارجی (External Temperature): دمای قالب خارجی نیز ۱۷۸ درجه سانتی‌گراد بوده است. تفاوت جزئی بین دمای داخلی و خارجی به دلیل ماهیت انتقال حرارت در هر روش و تلفات حرارتی رخ داده است.

داده‌های ثبت شده:

در طول فرایند تولید این ۲۰۰ حلقه تایر، داده‌های مختلفی به‌طور دقیق ثبت و جمع‌آوری شده است. این داده‌ها شامل موارد زیر بودند:

مصرف انرژی: میزان انرژی الکتریکی یا بخار مصرف شده در هر چرخه کامل پخت برای هر تایر. این معیار اصلی برای ارزیابی جنبه صرفه‌جویی انرژی DPCT است.

کیفیت پخت: شامل معیارهایی مانند یکنواختی دما در نقاط مختلف تایر، و میزان بالانس بودن تایر پس از پخت. این پارامترها به‌دقت تولید و عملکرد نهایی تایر مربوط می‌شوند.

خواص مکانیکی: نمونه‌هایی از بخش‌های کلیدی تایر، مانند آج (Tread) و دیواره جانبی (Sidewall)، گرفته شد و خواص مکانیکی آن‌ها (مانند استحکام کششی، ازدیاد طول در نقطه پارگی) اندازه‌گیری شد. این ارزیابی نشان‌دهنده تأثیر DPCT

مراجع

- [1] J. Zhang, B. Wang, X. Liu, L. Cheng, H. Yan, Q. Ding, J. Tan, and W. Yang, "Energy-Saving Performance and Production Accuracy of the Direct-Pressure Tire Curing Technology with an Expandable Steel Internal Mold," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 1, p. 79, Dec. 2019, doi: 10.3390/app10010079.
- [2] M. Su, B. Wang, X. Liu, and L. Cheng, "Optimization of Tire Curing Process Based on Finite Element Analysis," *Polymer Testing*, vol. 62, pp. 222–230, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.06.032.