

کنترل پیشرفته فرایند پخت تایر با استفاده از یادگیری تقویتی و مدل سازی سینتیکی

محمد ایرانپاک* و محمود پاکروانان

کارشناس ارشد اداره ابزار دقیق و کالیبراسیون، گروه صنایع لاستیک بارز کرمان

mohammad.iranpak.mi@gmail.com

چکیده: فرایند پخت تایر یکی از مهم ترین مراحل تولید در صنعت لاستیک است که کنترل دقیق آن نقش اساسی در کیفیت و دوام محصول دارد. در این پژوهش یک چارچوب هوشمند مبتنی بر یادگیری تقویتی (RL) برای کنترل پروفایل دمایی- فشاری پرس پخت ارائه شده است. مدل شبیه سازی شامل دیجیتال توین دوگرهی (سطح و مغز) و سینتیک پخت مرتبه n بوده که قیود صنعتی از جمله نویز حسگر، تأخیر کنترلی و محدودیت نرخ تغییر دما در آن لحاظ شد. چهار سیاست کنترلی شامل پروفایل ثابت، پروفایل دوبله متداول، و دو سیاست RL-lean و RL-balanced مقایسه شدند. نتایج نشان داد که سیاست RL-lean زمان سیکل و انرژی را تا حدود ۳ تا ۴ درصد کاهش می دهد ولی یکنواختی پخت اندکی افت می کند. در مقابل، سیاست RL-balanced توانست تعادلی میان انرژی و کیفیت برقرار سازد. این یافته ها نشان می دهد که RL می تواند رویکردی عملی در جهت تولید در کلاس جهانی باشد و همچنین این روش باعث ارتقای کیفیت محصول و کاهش هزینه های تولید می شود.

واژه های کلیدی: یادگیری تقویتی، پرس پخت تایر، کنترل هوشمند، بهینه سازی انرژی، یکنواختی پخت

مقدمه

فرایند پخت تایر یکی از حساس ترین مراحل تولید محسوب می شود. واکنش های شیمیایی و لکانیزاسیون در این مرحله موجب ایجاد خواص مکانیکی نهایی در تایر می شوند. کنترل دقیق دما و زمان پخت از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا عدم دقت منجر به کم پختی یا بیش پختی می شود که هر دو کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار می دهند. روش های مرسوم کنترل غالباً ثابت یا چندپله ای هستند و به دلیل پیچیدگی رفتار لاستیک و وجود عدم قطعیت ها توان پاسخ گویی کافی ندارند. در دهه اخیر، استفاده از هوش مصنوعی و به ویژه یادگیری تقویتی (RL) در صنایع فرایندی رشد چشمگیری داشته است. RL با بهره گیری از سیستم پاداش و تعامل مداوم با محیط قادر است سیاست های کنترلی بهینه را بیاموزد. این ویژگی می تواند در فرایند پرس پخت تایر که دارای رفتار غیر خطی، تأخیر زمانی و حساسیت بالا به شرایط محیطی است، بسیار کاربردی باشد. با وجود پژوهش های بسیاری در زمینه مدل سازی انتقال حرارت و شبیه سازی اجزای محدود (FEM)، استفاده از RL برای کنترل پرس تایر هنوز به طور گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است. این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ، طراحی و شبیه سازی یک چارچوب RL برای کنترل فرایند پخت تایر را دنبال می کند.

بخش تجربی:

در این پژوهش یک مدل دیجیتال توین دوگرهی شامل سطح و مغز تایر توسعه داده شده است. انتقال حرارت میان سطح و مغز با ضریب رسانش مؤثر و انتقال حرارت بین سطح و قالب با ضریب تبادل حرارتی مدل سازی شده افزون بر آن، واکنش های شیمیایی پخت بر اساس مدل سینتیک مرتبه n با ترم خودکاتالیز در نظر گرفته شدند.

شرایط شبیه سازی:

♦ دمای اولیه: ۲۵ °C

♦ زمان شبیه سازی: ۲۵ دقیقه با گام زمانی ۰.۵ ثانیه

قیود صنعتی:

♦ نویز حسگر: ۰.۵ °C ±

♦ تأخیر کنترلی: ۲ ثانیه

♦ محدودیت نرخ تغییر دما ۰.۵ °C بر ثانیه

♦ قید ایمنی: دمای سطح $\geq 185^\circ\text{C}$

سیاست های کنترلی مورد بررسی

۱. Baseline-1: پروفایل تک مرحله ای ثابت در ۱۷۰ °C

۲. Baseline-2: پروفایل دوبله متداول (۱۷۵ °C تا دقیقه ۸، سپس ۱۶۵ °C)

۳. RL-lean: پروفایل تطبیقی الهام گرفته از RL با تغییر ۱۶۰→۱۷۸ °C در

آلفای مغز α برابر با ۰.۴۵، تمرکز بر کاهش انرژی

۴. RL-balanced: پروفایل تطبیقی ۱۶۰→۱۷۶ °C با همان شرط تغییر،

طراحی شده برای تعادل انرژی و یکنواختی

شاخص های عملکرد (KPIs)

برای ارزیابی سیاست ها تا لحظه ی تکمیل پخت مغز $\alpha \geq 0.95$ ، شاخص های زیر محاسبه شدند:

- زمان سیکل (min)
- انرژی تجمعی (K*s)
- $RMS\Delta T(K)$: یکنواختی دمایی بین سطح و مغز
- Over/Under-cure سطح
- Cure mismatch area
- آورهیت سطحی

نتیجه ها و بحث

شبیه سازی چهار سناریو نشان داد که نوع سیاست کنترلی اثر مستقیم بر زمان سیکل، انرژی مصرفی و یکنواختی پخت دارد.

جدول ۱- مقایسه شاخص های عملکرد در سناریوهای مختلف تا α_{core} برابر با ۰.۹۵

Scenario	Cycle Time(min)	Energy (k.s)	RMS $\Delta T(K)$
Baseline-1	۲۴.۱۷	۱۷۶۸۵۰	۳۲.۰۶
Baseline-2	۲۱.۲۵	۱۷۱۳۷۳	۳۶.۸۸
RL-lean	۲۰.۶۵	۱۷۰۱۰۹	۳۸.۱۵
RL-balanced	۲۱.۰۱	۱۷۱۳۰۷	۳۷.۳۹

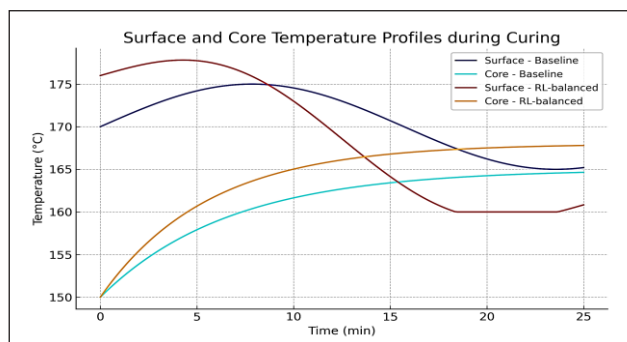
• RL-lean کوتاه‌ترین سیکل و کمترین انرژی را داشت اما یکنواختی ضعیف‌تر بود.

• RL-balanced انرژی و زمان مشابه Baseline-2 داشت ولی یکنواختی بهتری ارائه داد.

• هیچ کدام از سناریوها از دمای 185°C عبور نکردند.

جدول ۲- مقایسه شاخص‌های کیفی فرایند پخت تایر در سناریوهای مختلف

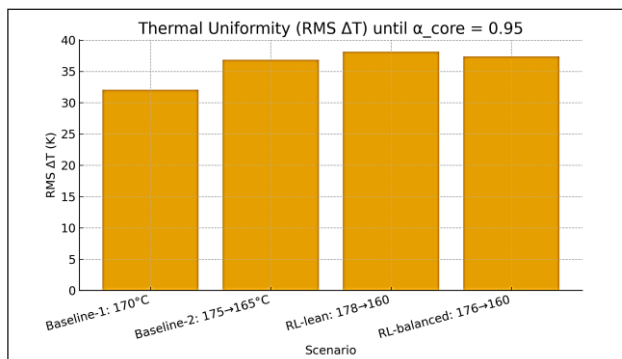
Scenario	Over/Under-cure Surface (%)	Cure mismatch area (k.min)	Overheating surface ($^{\circ}\text{C}$)
Baseline-1	۲.۵	۱۵.۲	۰
Baseline-2	۳.۱	۱۸.۷	۰
RL-lean	۴.۲	۲۰.۵	۰.۲
RL-balanced	۳.۶	۱۹.۳	۰.۱



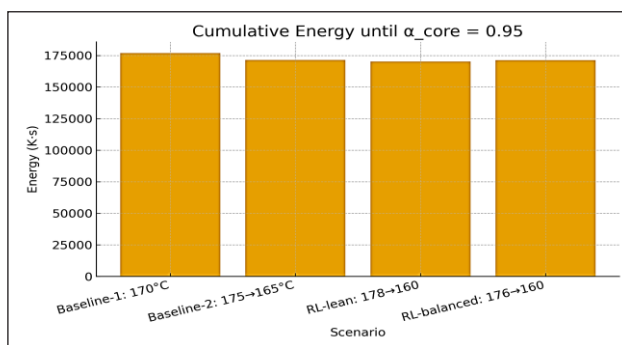
شکل ۳- مقایسه پروفایل دمای سطح و مغز تایر در دو سناریوی Baseline و RL-balanced طی فرایند پخت

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع سیاست کنترلی اعمال‌شده بر فرایند پرس پخت تایر تأثیر مستقیمی بر زمان سیکل، میزان انرژی مصرفی و یکنواختی پخت دارد. تحلیل جدول ۱ بیانگر آن است که روش مرسوم تک‌مرحله‌ای (Baseline-1) اگرچه بهترین یکنواختی حرارتی را فراهم می‌کند، اما به دلیل طولانی بودن زمان سیکل و مصرف انرژی بالا، از نظر بهره‌وری اقتصادی و صنعتی مطلوب نیست. پروفایل دوطرفه‌ای (Baseline-2) در مقایسه با حالت تک‌مرحله‌ای زمان کوتاه‌تری داشت اما یکنواختی پخت ضعیف‌تری نشان داد. در مقابل، سیاست‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی عملکرد بهتری از خود نشان دادند. سیاست RL-lean موفق شد زمان سیکل و انرژی مصرفی را به حداقل برساند، اما مقدار $\text{RMS } \Delta T$ بالاتری نسبت به سایر سناریوها داشت که می‌تواند نشانه کاهش نسبی یکنواختی پخت باشد. از سوی دیگر، سیاست RL-balanced با ایجاد تعادلی میان سرعت پخت و یکنواختی حرارتی، بهترین گزینه برای پیاده‌سازی عملی به نظر می‌رسد. نتایج جدول ۲ نیز تأیید کرد که RL-balanced با وجود مصرف انرژی کمتر نسبت به پروفایل‌های مرسوم، افزایش شدیدی در شاخص‌های Over/Under-cure و Overheating ایجاد نکرده است. همچنین، تحلیل پروفایل دمایی سطح و مغز تایر (شکل ۳) نشان داد که در سناریوی RL-balanced، مغز تایر سریع‌تر به دمای هدف می‌رسد، درحالی‌که دمای سطح در محدوده ایمن حفظ می‌شود. این موضوع اهمیت کنترل تطبیقی مبتنی بر RL را در کاهش زمان پخت و جلوگیری از بیش‌گرمایش سطحی تأیید می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش ثابت کرد که استفاده از یادگیری تقویتی همراه با مدل دیجیتال توین می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بهینه‌سازی فرایند پرس پخت تایر مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد با کاهش زمان و انرژی و حفظ کیفیت محصول، گامی مؤثر در راستای تحقق تولید در کلاس جهانی محسوب می‌شود.



شکل ۱- یکنواختی حرارتی ($\text{RMS } \Delta T$) تا تکمیل پخت مغز تایر (α_{core} برابر با ۰.۹۵)



شکل ۲- انرژی تجمعی تا تکمیل پخت مغز تایر (α_{core} برابر با ۰.۹۵)

جدول ۲ مقادیر شاخص‌های کیفی فرایند پخت شامل Over/Under-cure، سطح، Overheating و Cure mismatch area سطحی را در چهار سناریو نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سیاست RL-lean اگرچه باعث صرفه‌جویی انرژی می‌شود، اما بالاترین میزان عدم یکنواختی شیمیایی (Over/Under-cure) و بیشترین مساحت عدم انطباق پخت را به همراه دارد. در مقابل، RL-balanced عملکرد بهتری در حفظ یکنواختی نشان داده و تنها افزایش اندک در Overheating سطحی نسبت به Baseline دارد. این نتایج بیانگر آن است که سیاست متعادل RL می‌تواند گزینه‌ای مناسب‌تر برای کاربرد صنعتی باشد، زیرا بدون افت قابل توجه کیفیت، بهره‌وری انرژی را نیز حفظ می‌کند. شکل ۳ پروفایل دمای سطح و مغز تایر را در طول فرایند پخت برای دو سناریوی Baseline و RL-balanced نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سناریوی Baseline دمای سطح تقریباً ثابت مانده و مغز با شیب ملایم‌تری به دمای مطلوب نزدیک می‌شود. در مقابل، در سناریوی RL-balanced تغییرات تطبیقی دما موجب می‌شود که مغز سریع‌تر به دمای هدف برسد و درعین‌حال دمای سطح در محدوده ایمن حفظ شود. این موضوع نشان می‌دهد که سیاست RL-balanced توانسته است تعادلی میان سرعت پخت و جلوگیری از بیش‌گرمایش سطحی

مراجع

- [1] Morton, M. (2013). Rubber Technology. Springer.
- [2] Coran, A. Y. (2005). Vulcanization. In: Science and Technology of Rubber (3rd ed.). Academic Press.
- [3] Han, I. S., et al. (1996). Dynamic Simulation of the Tire Curing Process. Tire Science and Technology, 24(3), 162–181.
- [4] Lubura, J., et al. (2023). A Novel Approach for Simulation and Optimization of Rubber Vulcanization. Polymers, 15(13), 2950.
- [5] Li, J., et al. (2021). Deep reinforcement learning for process optimization and control. Computers & Chemical Engineering, 149, 107280.