

پایش دمای قالب ماشین پرس پخت در هنگام وارم آپ به صورت بی سیم جهت تبدیل «وارم آپ زمانی ثابت» به «وارم آپ دمایی متغیر»

سید هاشم محتشمی^{۱*}، سید محمدرضا جلالیان شهری^۲، سید علیرضا سیادت^۳ و محسن یاری نودر^۴

۱- مدیر واحد سیستم های هوشمند، شرکت کویر تایر

۲- کارشناس واحد سیستم های هوشمند، شرکت کویر تایر

۳- مدیر اداره فاوا، شرکت کویر تایر

۴- سرپرست مهندسی پخت، شرکت کویر تایر

mohtashami.ai@gmail.com

چکیده: فرایند پخت لاستیک در پرس های پخت یکی از حساس ترین مراحل تولید تایر است که پایداری کیفیت محصول نهایی به کنترل دقیق دما در این مرحله وابسته است. در کارخانه های تولید تایر، به ویژه در مرحله Warm-Up پس از توقف های تولید یا تعمیرات، تعیین دقیق زمان رسیدن قالب پرس به دمای مناسب (حدود ۱۸۰ درجه سانتی گراد) اهمیت ویژه ای دارد. عدم دقت در این زمان بندی می تواند منجر به تولید لاستیک های معیوب (اسکرپ)، کاهش بهره وری و افزایش مصرف انرژی شود. در این پژوهش، یک سامانه ی پایشگر دمای قالب پرس پخت طراحی و پیاده سازی شده است که با تکیه بر فناوری اندازه گیری تماس مستقیم، ارتباط بی سیم مقاوم در برابر تداخل و واحد کنترل صنعتی با قابلیت ثبت و تحلیل داده، امکان پایش پیوسته و دقیق دمای داخل قالب را در شرایط سخت محیطی فراهم می سازد. این سامانه به صورت کامل بومی طراحی شده و در طراحی آن از محفظه ی عایق حرارتی چندلایه و الگوریتم کنترل دمای بهینه استفاده شده است. نتایج آزمون های میدانی نشان داد که تجهیز پیشنهادی توانسته است با حفظ دمای داخلی ماژول های الکترونیکی زیر ۶۰ درجه، خطای اندازه گیری را به کمتر از ۲ درجه سانتی گراد کاهش دهد و زمان بهینه ی شروع پخت را برای اپراتور مشخص کند. به کارگیری مستمر این سامانه ضمن کاهش ضایعات اولیه ی پخت، موجب افزایش بهره وری خطوط و بهبود کنترل فرایند تولید تایر و کاهش مصرف انرژی می شود.

واژه های کلیدی: Warm-Up، قالب پرس پخت، کاهش مصرف انرژی، پایش دما، تایر، هوشمندسازی صنعتی

مقدمه

فرایند پخت، آخرین و حیاتی ترین مرحله در تولید تایر است که طی آن مجموعه ی ترکیبات لاستیکی و الیاف تقویتی در قالب های حرارتی مخصوص، تحت فشار و دمای بالا پخته می شوند تا ساختار نهایی و خواص مکانیکی مطلوب حاصل شود. پایداری کیفی محصول نهایی در این مرحله، مستقیماً به دقت کنترل دما و یکنواختی حرارت در قالب های پرس بستگی دارد. در خطوط تولید تایر، پس از توقف های برنامه ریزی شده یا ناگهانی (برای تعمیرات یا تغییر قالب)، لازم است پیش از آغاز تولید مجدد، قالب ها تا دمای حدود ۱۸۰ درجه سانتی گراد گرم شوند. این مرحله که در صنعت تایرسازی با عنوان Warm-Up شناخته می شود، به صورت سنتی بر پایه ی تجربه های قبلی بازمان ثابت انجام می گیرد. با این حال، روش تجربی همواره با خطای زمانی همراه بوده و موجب نوسان در کیفیت، افزایش ضایعات اولیه (اسکرپ)، کاهش نرخ بهره وری و افزایش مصرف انرژی می شود.

اگر Warm-Up زودتر از موعد مناسب به پایان برسد، تایرهای اولیه به صورت ناقص پخت می شوند و نه تنها قابل مصرف نیستند، بلکه تا هنگام کشف این مشکل چند جفت تایر دیگر نیز ممکن است ضایعات شوند. برعکس، در صورت تأخیر در تشخیص دمای مطلوب، زمان ارزشمند تولید از دست می رود و نه تنها ظرفیت کاری ماشین پرس پخت کاهش می یابد، بلکه انرژی بیهوده مصرف می شود. پس، پایش دقیق و بلادرنگ دمای قالب، راه کاری کلیدی برای افزایش بهره وری و ثبات کیفیت محصول محسوب می شود.

در این پژوهش، سامانه ای بومی برای پایش دمای قالب پرس پخت در مرحله ی Warm-Up طراحی و پیاده سازی شده است. این سامانه با استفاده از حسگرهای تماس مستقیم، ارتباط بی سیم مقاوم در برابر نویز و دمای بالا، و کنترلر صنعتی با قابلیت ثبت و تحلیل داده ها، دمای واقعی قالب را به صورت لحظه ای اندازه گیری

کرده و اپراتور را در تصمیم گیری برای شروع پخت یاری می کند. طراحی فیزیکی این تجهیز با در نظر گرفتن محدودیت ها و چالش های محیطی شامل دمای بالا، فضای محدود، آسیب پذیری اجزای الکتریکی در دمای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی گراد و ارتینگ کامل قالب انجام شده است.

از منظر کلان، اجرای این طرح در راستای حرکت صنعت تایر به سمت هوشمندسازی فرایندها و تحقق مفاهیم انقلاب صنعتی ۴.۰ ارزیابی می شود. به کارگیری تجهیزات پایشگر هوشمند و جمع آوری داده های فرایندی در بستر دیجیتال، بستری برای تصمیم گیری داده محور، نگهداری پیش بینانه و افزایش بهره وری در صنایع سنگین فراهم می سازد.

مروری بر پیشینه پژوهش:

پایش و کنترل دقیق دما در فرایندهای حرارتی صنعتی، به ویژه در پخت لاستیک، عامل کلیدی در کیفیت و پایداری محصول است. با توسعه فناوری های حسگر و ارتباط بی سیم، پژوهش های متعددی در زمینه طراحی سامانه های پایش دما انجام شده است.

Khairi و همکاران سامانه ای بی سیم برای پایش دما طراحی کردند که داده ها را از طریق ارتباط رادیویی منتقل می کرد و پایداری اندازه گیری در محیط های صنعتی را بررسی کرد. Dong و همکاران نیز شبکه ای بی سیم برای اندازه گیری دمای تجهیزات قدرت ارائه کردند که بر بهینه سازی مصرف انرژی و اطمینان از ارسال پایدار داده تمرکز داشت [۱ و ۲].

Nedelcu در پژوهشی عملی، از ترموکوپل نوع K و پردازنده Raspberry Pi برای پایش دمای محیط های صنعتی استفاده کرد و قابلیت پیاده سازی در سامانه های کم هزینه را نشان داد. همچنین Song و همکاران با تکیه بر استانداردهای IEEE ۱۴۵۱، سیستمی استاندارد برای پایش و کنترل دما طراحی کردند که امکان

می‌شود.

۳. داده‌ها به‌صورت بی‌سیم برای گیرنده ارسال می‌شوند.

۴. کنترلر مقدار دما را پردازش کرده، در دیتالاگر ذخیره و برای نمایشگر یا PLC ارسال می‌کند.

۵. در صورت رسیدن دما به مقدار تعیین‌شده (مثلاً ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد)، آلارم فعال می‌شود تا اپراتور از آمادگی قالب برای شروع پخت مطلع شود.

مشخصه‌های کلیدی سامانه

- طراحی بومی با مشارکت شرکتی دانش‌بنیان با کارخانه مورد مطالعه و ماژولار با قابلیت گسترش برای چند پرس هم‌زمان
- دقت اندازه‌گیری ± 2 درجه سانتی‌گراد در محدوده‌ی ۲۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد
- ارتباط پایدار تا فاصله‌ی ۱۵ متر در محیط فلزی و نویزی سالن پرس‌های پخت تایلر
- نگهداری آسان، باتری قابل شارژ و قابلیت کالیبراسیون دوره‌ای
- امکان ثبت و تحلیل داده برای بهینه‌سازی زمان Warm-Up

نتیجه‌ها و بحث:

داده‌های آزمایش میدانی

برای ارزیابی عملکرد سامانه، آزمایش‌های میدانی در یکی از خطوط تولید تایلر کشور انجام شد. در این تست، پایشگر دما بر روی قالب پرس پخت نصب و داده‌های دمایی طی مرحله‌ی Warm-Up ثبت شد. جدول (۱) مقادیر نمونه‌ای از داده‌های ثبت‌شده را نشان می‌دهد:

جدول ۱- داده‌های ثبت‌شده در آزمون میدانی سامانه پایشگر دمای قالب پرس

پخت در مرحله Warm-Up

زمان (دقیقه)	دمای داخل قالب (°C)	دمای داخل جعبه تجهیز پایش (°C)	رطوبت نسبی (%)
t_0 (زمان شروع)	۲۴	۲۳	۳۰
$t_0 + 15$	۴۵	۲۴٫۳	۳۰
$t_0 + 30$	۶۲	۲۴٫۸	۳۰
$t_0 + 45$	۸۳	۲۵٫۱	۳۱
$t_0 + 60$	۱۰۶	۲۵٫۷	۳۳
$t_0 + 75$	۱۳۰	۲۶٫۱	۳۳
$t_0 + 90$	۱۴۵	۲۶٫۸	۳۵
$t_0 + 105$	۱۷۰	۲۷٫۲	۴۰
$t_0 + 110$	۱۸۰	۲۷٫۸	۴۲
$t_0 + 120$	۱۹۰	۲۸٫۴	۴۴
$t_0 + 135$	۲۰۰	۳۰	۸۱

داده‌های جدول نشان می‌دهد که باوجود افزایش تدریجی دمای قالب تا حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، دمای داخلی تجهیز تنها حدود ۷ درجه افزایش یافته و از محدوده‌ی ایمن ۶۰ درجه سانتی‌گراد فراتر نرفته است. این نتیجه بیانگر کارایی بالای طراحی عایق حرارتی و پایداری عملکرد الکترونیک سامانه است.

نمودار شکل ۱ رابطه‌ی بین دمای قالب و دمای داخلی تجهیز را در طول مرحله‌ی Warm-Up نشان می‌دهد.

در تحلیل عملکرد، مشاهده شد که سامانه توانست نوسان دمای داخلی را کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد حفظ کند؛ درحالی‌که دمای قالب تا مرز ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. همچنین پاسخ حسگر دما در این بازه دارای پایداری زمانی مناسب و خطای کمتر از ± 2 درجه سانتی‌گراد بود.

نتایج نشان می‌دهد که تجهیز طراحی‌شده قادر است بدون نیاز به خنک‌سازی خارجی، عملکرد خود را در شرایط دمای بالا حفظ کند و داده‌های دقیق را برای تصمیم‌گیری اپراتور فراهم سازد. این ویژگی، امکان تعیین لحظه‌ی رسیدن قالب به دمای هدف ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد را با دقت بالا و به‌صورت بلادرنگ فراهم

تبادل داده میان حسگرهای سامانه و کنترلرهای آن را به‌صورت یکپارچه فراهم می‌کرد [۳ و ۴].

در حوزه بهینه‌سازی شبکه‌های حسگر، Stojkoska و Avramova کاربرد شبکه ZigBee را در تنظیم خودکار دمای محیط بررسی کرده و با کاهش نرخ ارسال داده، عمر باتری حسگرها را افزایش دادند. افزون‌بر آن، Boisseau و همکاران با معرفی روش برداشت انرژی حرارتی برای حسگرهای بی‌سیم، امکان عملکرد بدون باتری را در محیط‌های با دمای بالا فراهم کردند [۵ و ۶].

مرور این مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه فناوری پایش دما و ارتباط بی‌سیم پیشرفت قابل‌توجهی داشته است، اما کاربرد آن در محیط‌های سخت و دمای بالا مانند قالب‌های پرس پخت لاستیک همچنان با چالش‌هایی همراه است. پژوهش حاضر با تمرکز بر طراحی بومی یک سامانه مقاوم در برابر حرارت و نویز، گامی در جهت رفع این نیاز در صنعت تایرسازی برداشته است.

بخش تجربی:

ساختار کلی سامانه

سامانه‌ی طراحی‌شده باهدف پایش دمای قالب پرس پخت در مرحله‌ی Warm-Up شامل چند ماژول اصلی است که هرکدام وظیفه‌ی خاصی در فرایند اندازه‌گیری، پردازش و ارسال داده دارند. این ماژول‌ها عبارت‌اند از:

۱. ماژول سنجش دما (Temperature Sensing Unit): از حسگرهای تماس

مستقیم نوع RTD یا Thermocouple استفاده‌شده است تا دمای واقعی بدنه‌ی قالب اندازه‌گیری شود. اتصال رزوه‌دار کوتاه با مواد مقاوم در برابر حرارت، امکان عایق‌بندی کامل محل نصب را فراهم می‌کند و خطای ناشی از نشت حرارت را کاهش می‌دهد.

۲. واحد تغذیه (Power Unit): با توجه به غیرممکن بودن استفاده از کابل

تغذیه در محیط داغ قالب، منبع انرژی سامانه از نوع باتری قابل شارژ با ظرفیت بالا انتخاب شد. برای جلوگیری از آسیب ناشی از حرارت، باتری درون محفظه‌ای با عایق چندلایه قرار گرفت و مدار شارژ کنترلر مخصوصی برای پایداری عملکرد در دماهای بالا طراحی شد.

۳. واحد انتقال بی‌سیم (Wireless Transmitter / Receiver): داده‌های

دمایی پس از اندازه‌گیری به‌صورت بی‌سیم به گیرنده منتقل می‌شوند. با توجه به چگالی و ضخامت بالای قالب فلزی، از طول موج رادیویی خاصی استفاده‌شده که عبور سیگنال را تا فاصله‌ی بیش از ۱۵ متر تضمین می‌کند.

۴. کنترلر صنعتی (Controller Unit): میکروکنترلر صنعتی مقاوم در برابر

نویزهای الکترومغناطیسی (EMC) وظیفه‌ی پردازش داده، تبدیل سیگنال خام به دمای واقعی و ارسال اطلاعات به شبکه یا PLC را بر عهده دارد. این واحد همچنین دارای الگوریتم PID برای کنترل و تنظیم آستانه‌های هشدار است.

۵. واحد نمایش و ثبت داده (Display & Data Logger): داده‌های دمایی اندازه‌گیری‌شده به‌صورت بلادرنگ روی نمایشگر یا HMI نمایش داده می‌شوند و امکان ثبت و بازیابی تاریخچه‌ی دما برای تحلیل‌های آماری فراهم است.

۶. محفظه عایق حرارتی (Insulated Enclosure): چالش اصلی در طراحی

سامانه، حفظ دمای داخلی مدارهای الکترونیکی در محدوده‌ی مجاز بود. با به‌کارگیری مواد عایق چندلایه و ترکیب جاذب‌های حرارتی ویژه، دمای داخل محفظه در شرایطی که قالب به ۱۸۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، کمتر از ۶۰ درجه باقی می‌ماند.

فرایند عملکرد سامانه

فرایند کلی کار سامانه به‌صورت زیر است:

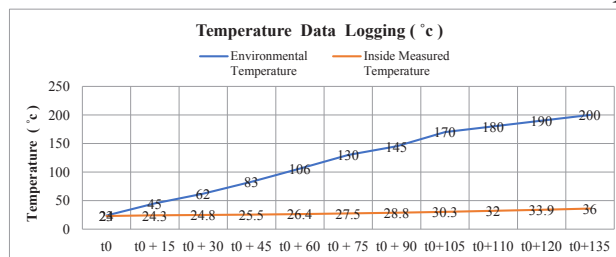
۱. حسگر دما، دمای سطح قالب را اندازه‌گیری می‌کند.
۲. سیگنال آنالوگ به ماژول پردازش ارسال و به مقدار دیجیتال تبدیل

کرده است.

♦ مصرف انرژی تحت کنترل باشد و بیشتر از نیاز Warm-Up مصرف نشود. به‌طور کلی، سامانه‌ی پیشنهادی افزون‌بر دقت بالا و پایداری حرارتی، با طراحی بومی و ماژولار خود قابلیت توسعه برای چند پرس هم‌زمان را دارد و می‌تواند بخشی از زیرساخت هوشمندسازی خطوط تولید تاپر محسوب شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سامانه‌ای بومی برای پایش دمای قالب پرس پخت در مرحله‌ی Warm-Up طراحی و پیاده‌سازی شد تا زمان دقیق رسیدن قالب به دمای مناسب (حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) تعیین و از بروز ضایعات اولیه جلوگیری شود. نتایج آزمون‌های میدانی نشان داد که سامانه در شرایطی که دمای قالب تا حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، توانسته است دمای داخلی مدارهای الکترونیکی را زیر ۶۰ درجه سانتی‌گراد حفظ کند. این موفقیت حاصل طراحی مناسب محفظه‌ی عایق حرارتی، انتخاب حسگر تماس مستقیم با دقت بالا، و استفاده از ارتباط بی‌سیم مقاوم در برابر تداخل است. به‌کارگیری این سامانه موجب کاهش ضایعات پخت، افزایش بهره‌وری، و امکان ثبت و تحلیل داده‌های حرارتی برای بهبود فرایند شده است.



شکل ۱- نمودار تغییرات دمای قالب و دمای داخلی تجهیز در مرحله Warm-Up

اثرات بهره‌وری و صنعتی

به‌کارگیری این سامانه در خطوط تولید باعث شد:

- ♦ ضایعات ناشی از شروع زود هنگام پخت (اسکرپ اولیه) کاهش یابد.
- ♦ زمان انتظار اپراتور برای Warm-Up بهینه شود.
- ♦ دقت کنترل فرایند افزایش یافته و وابستگی به تجربه‌ی فردی کاهش یابد.
- ♦ امکان تحلیل داده‌های حرارتی برای برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه فراهم شود.

مراجع

- [1] N. Khairi et al., "Design and analysis of a wireless temperature monitoring system," IEEE ICCSCE, Penang, 2013.
- [2] Z. Dong et al., "Design and use of a wireless temperature measurement network tailored for IoT wireless power equipment," Sensors, vol. 24, 2024.
- [3] R. Nedelcu, "Design and Implementation of a Temperature Monitoring System in Industrial Environments," ResearchGate Preprint, 2024.
- [4] E. Song et al., "Temperature Monitoring and Airflow Control System Using IEEE 1451 Standards," NIST, 2023.
- [5] B. L. Stojkoska and V. Avramova, "Application of Wireless Sensor Networks for Indoor Temperature Regulation," arXiv preprint, 2016.
- [6] S. Boisseau et al., "Bimetal- and electret-based thermal energy harvesters – Application to a battery-free Wireless Sensor Node," Smart Materials and Structures, vol. 22, 2013.