

بهینه‌سازی زمان و شرایط پخت با تفسیر نتیجه‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی پخت در نرم‌افزار آباکوس توسط نرم‌افزار MINITAB

حسن عسکری* و صفیه انجم شعاع
کارشناس اداره طراحی آمیزه و پخت گروه صنعتی بارز
heaskari@gmail.com

چکیده: در این پژوهش امکان استفاده از مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی کامپیوتری فرایند پخت بررسی شده است و تفسیر نتیجه‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی پخت توسط نرم‌افزار مینی‌تب انجام شده است. با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری می‌توان بدون نیاز به انجام آزمون‌های وقت‌گیر و هزینه‌بر توزیع دما برای تمامی نقاط داخلی تایر را به‌دست آورد. حل معادلات انتقال حرارت به روش المان محدود بوده و با استفاده از نرم‌افزار Abaqus انجام شد. حل معادلات سینتیکی نیز با زبان فرترن به‌صورت جداگانه‌ای نوشته شد و به برنامه اصلی (Abaqus) متصل شد. برای یک تحلیل کاربردی با استفاده از نرم‌افزار DOE طراحی آزمایش‌ها با شرایط مختلف پخت انجام شد. سپس این شرایط مختلف پخت در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. تحلیل نتیجه‌های به‌دست آمده از این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی بهترین شرایط پختی برای یک سایز مشخص تایر در مینی‌تب ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی پخت، آباکوس، مینی‌تب

مقدمه

در این‌جا هدف از شبیه‌سازی پخت حذف یا کاهش تست‌های سیم‌گذاری که وقت‌گیر و هزینه‌بر هستند است. در شبیه‌سازی پخت تحلیل دمای تمامی نقاط داخلی تایر انجام می‌گیرد برخلاف حالت معمول که تست سیم‌گذاری تنها دمای نقاط خاصی از تایر را برداشت می‌کند. امکان تغییر شرایط مرزی و دمایی و فرایند پخت به‌دفعات دلخواه و تحلیل نتیجه‌های به‌دست آمده از شرایط مختلف پخت و همچنین تغییر ضرایب مواد و بررسی تأثیر هر کدام از این پارامترها بر پخت تایر تغییر هندسه تایر، بافزون‌بررسی تأثیر ابعاد قطعات مختلف تایر و ضخامت آن‌ها بر افزایش یا کاهش زمان پخت تایر از نقاط مثبت شبیه‌سازی است. ضمن این‌که این روش ایجاد وقفه در تولید کارخانه را ندارد.

برای این منظور لازم است پارامترهای مؤثر بر حل مسئله از قبیل ضریب هدایت گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی و محاسبه نرخ حرارت ایجاد شده در هر لحظه در طول واکنش پخت و درصد پخت و سرعت واکنش را به نحوی فرمول نویسی کرد که با تعیین ضرایب این فرمول‌ها از داده‌های آزمایشگاهی حل مسئله به روش المان محدود برای نرم‌افزار آباکوس قابل انجام باشد. این فرمول‌ها و روابط در قالب یک ساب‌روتین به نرم‌افزار آباکوس به زبان فرترن ارائه می‌شود. شرایط مرزی حل مسئله شامل شرایط مرزی در زمان پخت تایر در قالب از قبیل شرط مرزی دما ثابت از سمت قالب و شرط مرزی نمودار دما برحسب زمان از سمت بلادر می‌شود. همچنین شرایط مرزی پس از خروج از قالب پخت مانند نمودار تغییرات دما برحسب زمان نقاط سطحی تایر در هنگام خروج از قالب بسته به شرایط پخت، به نرم‌افزار داده می‌شود. اطلاعات خام خروجی از نرم‌افزار توسط نرم‌افزارهای تحلیل گری مثل مینی‌تب یا خود آباکوس به‌منظور استحصال بهترین شرایط فرایند دهی تحلیل و تفسیر می‌شود.

بخش تجربی

پخت تایرهای رادیال سواری (به‌صورت مشخص در این‌جا تایر با سایز 205/60 R15 P685) شامل سه مرحله اصلی H (پخت با فشار ثابت ۱۶ بار)، M (پخت با شکست فشار ده مرحله‌ای از ۱۶ بار به ۱۲ بار) و Z (پخت با فشار ثابت ۱۲ بار) است. همچنین به‌وسیله بخار آب درون قالب پخت خارجی تایر صورت می‌گیرد. تغییر دمای قالب به‌وسیله تغییر فشار بخار وردی به قالب تایر انجام

می‌شود.

در حالت عادی با انجام سیم‌گذاری تایر و بررسی توزیع دما در نقاط مختلف تایر سعی می‌شود با تغییر زمان مراحل مختلف پخت، بهترین و کامل‌ترین پخت را در تمامی نقاط تایر انجام داد و با توجه به این‌که سیم‌گذاری تایر مستلزم صرف زمان و هزینه است سعی می‌شود فقط با یک‌بار سیم‌گذاری تایر و پخت آن با یک‌زمان تخمینی محاسبات زمان پخت انجام شود. با استفاده از توزیع دما حاصل از سیم‌گذاری T_{90} فاکتور در نقاط مختلف تایر محاسبه شده و بدین‌وسیله میزان پخت نقاط مختلف تایر بررسی می‌شود. در صورتی‌که T_{90} فاکتور در محدوده موردپذیرش نباشد سیم‌گذاری مجدد با شرایط پخت جدید انجام نمی‌شود بلکه توزیع دما حاصل از سیم‌گذاری با همان شیب قبلی و به‌صورت برآوردی اضافه یا کم می‌شود و دوباره با مقادیر جدید T_{90} فاکتور محاسبه می‌شود. این کاهش یا اضافه کردن نمودار توزیع دما-زمان می‌تواند در هر یک از مراحل پخت انجام شود. در صورتی‌که T_{90} فاکتور جدید در محدوده موردپذیرش باشد زمان جدید به‌عنوان زمان پخت تایر در نظر گرفته می‌شود.

در این‌جا داده‌های دما برحسب زمان، به‌عنوان شرایط مرزی استفاده شد تا توزیع دما در سرتاسر تایر با استفاده از شبیه‌سازی محاسبه شود. برای ایجاد شرایط مرزی جدید همانند قبل با همان شیب تغییرات دما برحسب زمان، به توزیع دما بلادر و قالب اضافه یا کم می‌کنیم. درواقع با اضافه یا کم کردن توزیع دما در هر لحظه‌ای از پخت شرایط مرزی جدید ایجاد می‌کنیم. با این روش به توزیع دما تمام نقاط تایر با شرایط پخت جدید دسترسی داریم و تفسیر بهتری جهت ارائه زمان پخت می‌توان انجام داد.

در جهت افزایش دقت در تعیین زمان پخت از خروجی نرم‌افزار شبیه‌ساز پخت و تفسیر آن‌ها با استفاده از آنالیز DOE استفاده شد. درواقع با تغییر شرایط مرزی در شبیه‌سازی پخت که بسته به شرایط مختلف پختی تغییر می‌کند حالت بهینه‌ای از پخت را با استفاده از داده‌های خروجی نرم‌افزار به‌دست آورد. ترکیب حالات مختلف پخت (تعیین‌شده توسط نرم‌افزار) به روشی که توضیح داده شد به نرم‌افزار آباکوس داده شد و خروجی شبیه‌سازی پخت در نرم‌افزار مینی‌تب مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و بهترین شرایط پخت استحصال شد. خروجی نرم‌افزار شامل درصد پخت چهار المان مجاور نود انتخابی در ناحیه هامپ تایر با شماره ۲۲۰ و همچنین دمای سربلت (نود ۲۲۲) است.

جدول ۱- هدف برای پارامترهای مؤثر در درصد پخت

Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
BELT TEMP	Target	167.829	175	184.253	1	1
84	Target	0.926	1	1.088	1	1
83	Target	0.900	1	1.023	1	1
75	Target	0.926	1	1.088	1	1
74	Target	0.900	1	1.023	1	1

هم‌چنین بازه تغییرات را همانند شکل زیر برای H از ۴ تا ۴:۳۰ دقیقه، Z از ۲ تا ۵ دقیقه و دمای قالب از ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

جدول ۲- بازه تغییرات متغیرهای پختی

Variable Ranges	
Variable	Values
H	(4, 4.5)
Z	(2, 5)
MOLD TEMP	(160, 180)

در نتیجه تحلیل صورت گرفته بهترین شرایط پخت برای تایر مورد آزمایش همان‌طور که در شکل زیر مشخص است H برابر با ۴، M برابر با ۴:۳۰ و Z برابر با ۲ با دمای قالب ۱۷۳ سانتی‌گراد محاسبه شد.

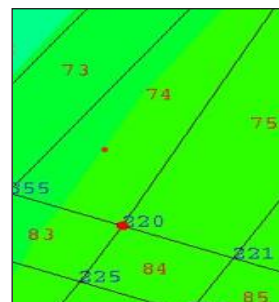
جدول ۳- بهترین شرایط پخت

Solution									
Solution	H	Z	MOLD TEMP	BELT TEMP Fit	84 Fit	83 Fit	75 Fit	74 Fit	Composite Desirability
1	4	2	172.825	173.663	1.00000	1.01282	1.00000	1.01282	0.689017

در نتیجه شرایط پختی بالا درصد پخت برای هر المان مجاور نود ۲۲۰ و هم‌چنین دمای سر بلت به شرح زیر به‌دست آمد که اعدادی قابل قبول هستند.

جدول ۴- نتیجه‌های به‌دست آمده از پخت با شرایط بهینه

Multiple Response Prediction				
Variable	Setting			
H	4			
Z	2			
MOLD TEMP	172.825			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
BELT TEMP	173.663	0.600	(172.122, 175.204)	(170.952, 176.374)
84	1.0000	0.0102	(0.9738, 1.0262)	(0.9540, 1.0460)
83	1.01282	0.00147	(1.00904, 1.01661)	(1.00616, 1.01948)
75	1.0000	0.0102	(0.9738, 1.0262)	(0.9540, 1.0460)
74	1.01282	0.00147	(1.00904, 1.01661)	(1.00616, 1.01948)



شکل ۱- نحوه قرارگیری نود ۲۲۰ و المان‌های مجاور

نتیجه‌ها و بحث

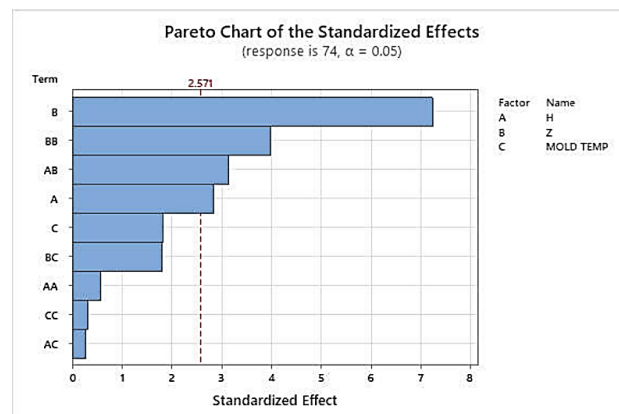
در این‌جا شرایط بهینه درصد پخت یک و دمای سر بلت کم‌تر از ۱۷۵ گرفته شد. در مرحله آنالیز اهمیت درصد اهمیت هریک از فاکتورهای H و Z دمای قالب و تأثیر هم‌زمانی این فاکتورها با نمودار میله‌ای برای یک المان نشان داده شده است. در نمودار شکل ۲ مشخص است فاکتورهای مهم برای هر چهار المان یکسان است. به‌طور کلی می‌توان گفت:

۱. فاکتور Z (زمانی که به مرحله فشار ثابت ۱۲/۵ بار اضافه می‌شود) بیش‌ترین

تأثیر را در محاسبه زمان پخت داراست.

۲. فاکتورهای H و دمای قالب رتبه‌های بعدی تأثیر در محاسبه زمان پخت را دارا هستند.

۳. برای دو نود عمودی بالا و پایین نود مدنظر افزون‌بر پارامترهای H و Z پارامتر دمای قالب نیز مؤثر خواهد بود. این مسئله مجدداً صحت و دقت مناسب شبیه‌سازی را به اثبات می‌رساند.



شکل ۲- نمودار میله‌ای اهمیت فاکتورها برای درصد پخت المان ۷۴

در ادامه به‌منظور به‌دست آوردن حالت بهینه پخت تایر مورد آزمایش با استفاده از DOE، تحلیلی در این نرم‌افزار انجام شد. همان‌گونه که در شکل زیر مشخص است مقدار هدف برای پارامترهای درصد پخت در المان‌های ۷۳، ۷۴، ۸۳ و ۸۴ عدد یک انتخاب شد و برای دمای سر بلت با توجه محدودیت دمایی که در این ناحیه داریم ۱۷۵ قرار داده شد.

مراجع

- [1] Drobný J G., Radiation Technology for Polymers, CRC Press, Chap 5, 77-90, 2003.
- [2] Drobný J G., Electron beam Processing of Elastomers, Rubber World, 27-31, July 2005.
- [3] Makul N., Rattanadecho P., Microwave Pre-Curing of Natural Rubber Compounding Using a Rectangular Wave Guide, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 914-923, 2010.
- [4] Han IN-SU., Chung C-B., Jeong H-G., Kang S-J., Kim S-J., Optimal Cure Steps for Product Quality in a Tire Curing Process, J. Appl. Polym. Scie, Vol 74, 2063- 2071, 1999.
- [5] Hofmann W., Rubber Technology Handbook, Hanser Publisher, Chap 5, 1989.
- [6] Aytac A., Deniz V., Sen M., Hegazy E., Guven O., Effects of Gamma and Electron Beam Irradiation on the Properties of Calendered Cord Fabrics, Radiation Physics and Chemistry, 79, 297-300, 2010.
- [7] Tyres components curing "Axellance Group-E-beam"
- [8] www.Rotas Strojirny Spol, Company Profile. Cz
- [9] www.ContinentalTire, Press Upgrade.com
- [10] www.beckhoffautomation/Rubber.com
- [11] www.Schubert-Salzer/Curing Press.com