

تحلیل هوشمند و نمایش آنلاین نتایج یونیفورمیتی تایر در خط تولید

اسعد میره‌کی^{۱*} و دانیال قادری^۲

۱- مدیر اداره ساختار تایر بارز کردستان

۲- کارشناس یونیفورمیتی بارز کردستان

asad.mirahky@gmail.com

چکیده: در کارخانه تایرسازی بارز کردستان، باهدف ارتقاء کیفیت و کاهش ضایعات محصولات، سیستم بارکدینگ و هوشمندسازی داده‌ها در زنجیره تولید تایر پیاده‌سازی شده است. فرایند تولید شامل مراحل میکس مواد اولیه، آماده‌سازی نیم‌ساخته‌ها و اسمبل آن‌ها در سالن تایرسازی و نهایتاً تولید گرین تایر و عملیات پخت است. پس از پخت، تایرها تحت تست یونیفورمیتی قرار می‌گیرند و پارامترهایی چون نوسانات نیروی شعاعی و محوری، مخروط‌وارگی، پلی‌استر و عیوب ظاهری به‌صورت دقیق اندازه‌گیری می‌شود.

به‌منظور پایش و کنترل آنلاین کیفیت، هر مرحله از تولید نیم‌ساخته تا محصول نهایی توسط بارکد اختصاصی رهگیری می‌شود و داده‌های مرتبط در سامانه مرکزی ذخیره می‌شود. این سیستم قابلیت نمایش آنلاین نتایج تست یونیفورمیتی در خط تولید را فراهم کرده و امکان تحلیل سریع عیوب و ریشه‌یابی نقاط ضعف فرایند را به‌صورت لحظه‌ای به‌وجود آورده است. داده‌های یونیفورمیتی از طریق داشبوردهای صنعتی تحت وب (مانند پاور بی آی یا گرافانا) به مسئولین کیفی و تکنسین‌های خط نمایش داده می‌شود، تا اقدامات اصلاحی به‌موقع انجام گیرد. این رویکرد هوشمند و مکانیزه، باعث بهبود مستمر کیفیت، شفافیت فرایند تولید و افزایش سرعت تصمیم‌گیری مدیریتی و عملیاتی در کارخانه تایر بارز کردستان شده است.

واژه‌های کلیدی: پایش آنلاین، کنترل هوشمند محصول، هوشمند سازی صنعت تایر

مقدمه

تایر، به‌عنوان یگانه نقطه تماس دینامیک هر خودروی مدرن با سطح جاده، نقشی بی‌بدیل در کیفیت، ایمنی و کارایی وسیله نقلیه ایفا می‌کند [۱]. طراحی و ساختار تایر باتوجه به انتظارات عملکردی بالا، می‌بایست دارای حداقل وزن، یکنواختی تعادل، حداکثر پایداری و قابلیت انتقال نیرو باشد. از حدود یک قرن گذشته، پیشرفت‌های قابل‌ملاحظه‌ای در فناوری تایر حاصل شده است؛ مهم‌ترین آن‌ها معرفی تایر تیوبلس توسط کمپانی گودریچ در سال ۱۹۴۷ و تایر رادیال نخی توسط شرکت میشلن در سال ۱۹۴۸ بود [۲ و ۳]. امروزه تمامی تایرهای مدرن سبک و سنگین، با ساختار رادیال، تیوبلس و مبتنی بر ترکیبات پیچیده لاستیکی و تقویت‌کننده‌های سیمی و نخی ساخته می‌شوند [۴].

کیفیت و کارایی تایر به درجه بالایی به یکنواختی هندسی و جرمی آن (یعنی یونیفورمیتی) وابسته است [۵]. هرگونه نابالانسی یا ناهماهنگی داخلی در ساختار تایر، می‌تواند منجر به ارتعاشات ناخواسته، سایش نامتعادل، افزایش دمای عملیات، فشار بیشتر به مجموعه تعلیق و حتی بروز ناکارآمدی در عملکرد ترمز و هندلینگ شود [۶ و ۷]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که حدود ۱۰ الی ۱۵٪ شکایات رانندگان نسبت به کیفیت سواری و احساس ضربه، به مشکلات یونیفورمیتی برگشت داده می‌شود [۸]. در این میان، آزمون یونیفورمیتی تایر با اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر نوسانات نیروی شعاعی/محوری، عدم توازن، بیضی، اختلاف ضخامت و سایر عیوب، به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین گلوگاه‌های کنترل کیفی به‌شمار می‌رود [۹]. فناوری تست یونیفورمیتی طی دهه‌های اخیر به‌شدت پیشرفت کرده و امروزه در خطوط تولید پیشرفته تایر، با اتوماسیون کامل و پردازش داده لحظه‌ای انجام می‌شود [۱۰].

در سال‌های اخیر، تحول دیجیتال و هوشمندسازی خطوط تولید قدم به عرصه بسیاری از صنایع بزرگ جهان گذاشته است [۱۱]. در صنعت تایر، پیاده‌سازی راهکارهای صنعت ۴ و اینترنت اشیا صنعتی شامل نصب حسگرهای پیشرفته، شبکه‌سازی تجهیزات، جمع‌آوری بلادرنگ داده‌ها، تجزیه و تحلیل بزرگ‌داده، و استفاده ترکیبی از MES و SCADA به‌سرعت معمول شده است [۱۲].

شرکت‌های برتر جهانی نظیر میشلن، کنتینتال، گودیر و بریجستون از جمله پیشگامان هوشمندسازی خطوط تولید خود بوده‌اند. به‌عنوان نمونه، میشلن از سال

۲۰۱۷ طرح "کارخانه دیجیتال" را در بیش از ۶۰ کارخانه اجرایی کرده که هدف آن دیجیتالی کردن و مانیتورینگ کامل تمام شاخص‌های کیفیت، تولید و تعمیرات پیش‌بینی شده است [۱۳].

در کنتینتال، از سال ۲۰۱۹ پروژه "eMES Next Generation" آغاز شد که تمام تست‌ها و پارامترهای کیفی و عملیاتی را به‌صورت بلادرنگ بر بستر ابری (Cloud) جمع‌آوری و در داشبوردهای تحلیلی مبتنی بر پاور بی آی و Qlik Sense نمایش می‌دهد [۱۲]. این شرکت‌ها افزون‌بر جمع‌آوری داده‌های بی‌درنگ از خطوط تولید، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عیوب احتمالی و بهینه‌سازی فرایند استفاده می‌کنند [۱۱].

در کارخانه‌های تایرسازی روز دنیا کلیه نیم‌ساخته‌ها، تایرهای گرین و نهایی به‌وسیله بارکد یا RFID به‌طور کامل ردیابی می‌شوند [۱۳]. این رهگیری دیجیتال باعث می‌شود هرگونه خطا، مواد اولیه غیراستاندارد یا عیوب تولیدی به‌راحتی منشأیابی شده و اصلاحات فرایندی به‌سرعت اعمال شود [۱۰].

برای مثال، گودیر با به‌کارگیری سیستم‌های هوشمند RFID، موفق به کاهش بیش از ۲۰ درصدی تایرهای ریجکت شده و صرفه‌جویی میلیارد دلاری در دهه اخیر شده است. تایرسازی به‌عنوان یک صنعت پیچیده و متکی به تکرار دقیق فرایندها، به‌سرعت با موج چهارم انقلاب صنعتی یا صنعت ۴ همگام شد. صنعت ۴ مفهومی است متکی بر یکپارچه‌سازی فیزیکی و دیجیتال محیط کارخانه از طریق اینترنت اشیا صنعتی، کلان‌داده، یادگیری ماشین، پردازش ابری و تکنولوژی‌های اتوماسیون پیشرفته [۱]. هدف اصلی در این رویکرد ارتقای حداکثری بهره‌وری، شفافیت عملیاتی، امکان پایش بلادرنگ و کاهش خطاهای انسانی است. صنعت تایرسازی به‌دلیل اهمیت بالای کنترل کیفیت محصول نهایی و ریسک موارد عدم انطباق، استقبال گسترده‌ای از این تحول نشان داده است [۲].

شبکه‌سازی تجهیزات خط تولید (مانند میکسرها، اکسترودرها، دستگاه‌های پرس و ایستگاه‌های تست یونیفورمیتی) از طریق PLC‌های نسل جدید و تجهیزات جمع‌آوری داده، یک بستر هوشمند و انعطاف‌پذیر را ایجاد می‌کند. این سامانه‌ها نه‌تنها داده‌های تولیدی را بلادرنگ منتقل و آرشیو می‌کنند، بلکه قابلیت کنترل اصلاحی خودکار و حتی توقف خط براساس شاخص‌های حیاتی را دارا هستند [۳].

این داشبورد پیشرفته امکان انتخاب و فیلترسازی پویا براساس پارامترهای کنترل نظیر نام اپراتور، ماشین‌آلات، سایز، تاریخ تست و طیف عددی شاخص نابالانسی یا بارکد را فراهم می‌کند. براساس نوع دستگاه، تعداد تایر تست‌شده و میانگین هر شاخص (نابالانسی، RFV، LFV، Cony) به‌صورت تفکیک‌شده برای هر خط و هر یونیت گزارش می‌شود.

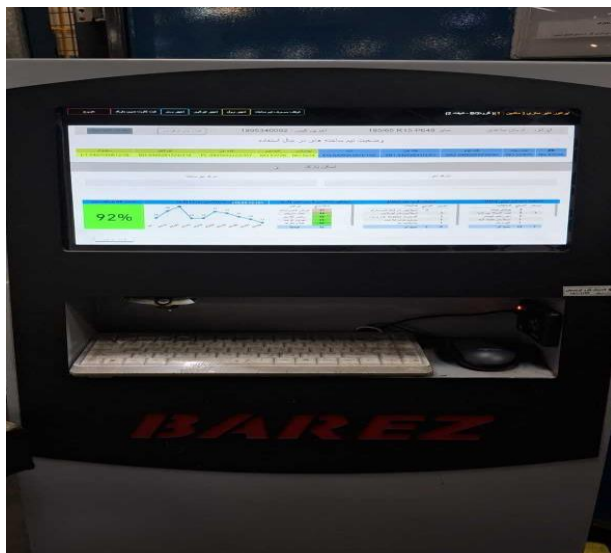
به کمک این سیستم، کارشناس کیفیت قادر است نه‌تنها وضعیت روز، بلکه روند عملکرد گذشته هر خط و اپراتور را تحلیل و مقاطع ضعف را شناسایی کند. در سطح مدیریت، داشبورد ترکیبی جمعیتی، با نمایش درصد OE یونیفورمیتی کل در یک بازه، روند میانگین نابالانسی روزانه (مثلاً ۸ روز اخیر)، و بالاترین میزان نابالانسی در خطوط مختلف (اپراتور محور) را ارائه می‌دهد. در جداول دیگری نیز نرخ و نوع ضایعات در محصولات گرین و نهایی گزارش‌شده (مثلاً تفکیک براساس جابه‌جایی بید، یونیفورمیتی، مواداضافه‌بین‌لایه، لاستیک پخته و...) که نقش حیاتی در هدف‌گذاری اصلاح فرایند و تشویق اپراتور ایفا می‌کند.

نتایج عملی و دستاوردها

پیاده‌سازی این سامانه هوشمند، نتایج زیر را به‌همراه داشته است: کاهش چشمگیر زمان تشخیص عیوب که کارشناس و تکنسین بلافاصله با هشدار یا نمودار داده، متوجه تغییر روند یا رخداد غیرعادی می‌شود و پیش از تجمع عیب، اقدام اصلاحی صورت می‌گیرد. این اقدام و بررسی سریع موجب افزایش تائیرهای OE خطوط تولید و پایش مستمر داده‌ها منجر به شناسایی دقیق تائیرسازی‌های مشکل‌دار و انگیزه مضاعف برای تیم عملیاتی شده است. با تجمع داده‌های کیفی، امکان تحلیل‌های عمیق‌تر (مثلاً افت OE هنگام تغییر اپراتور یا بچ مواد خاص) فراهم آمده است. امکان لینک به سایر ماژول‌های MES و گزارش‌گیری سفارشی داده‌ها به‌راحتی قابل‌تلفیق با بقایای خطوط MES و حتی به مشارکت گذاشتن گزارش با سطوح مدیریتی سازمان است.

استفاده از استندهای بارکدینگ و نمایش نتایج یونیفورمیتی در خط تولید

در تکمیل زیرساخت هوشمندسازی، در سالن تولید بارز کردستان از استندهای ویژه‌ی جهت نمایش لحظه‌ای نتایج یونیفورمیتی بهره‌گیری شده است. این استندها که به‌صورت فیزیکی در کنار هر دستگاه آزمون یونیفورمیتی یا دستگاه تائیرسازی نصب‌شده‌اند، به اپراتورها و کارشناسان امکان مشاهده وضعیت به‌هنگام هر ماشین و هر اپراتور را به‌طور دقیق فراهم می‌نمایند. داشبورد نمایش داده‌شده روی مانیتور استند، اطلاعات کلیدی همانند درصد OE روزانه ماشین، روند تغییرات شاخص‌های کیفی (مانند نابالانسی) به تفکیک شیفت/روز، و رکورد عیوب اخیر را با رابط کاربری ساده و بصری نمایش می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳- استند پروژه بارکدینگ

پیاده‌سازی و هوشمندسازی و پایش آنلاین یونیفورمیتی در کارخانه بارز کردستان در ادامه‌ی راهکارهای جهانی صنعت تائیرسازی، گروه صنعتی بارز کردستان باهدف افزایش شفافیت فرایندی، کاهش نرخ ضایعات، بهبود مداوم کیفیت و تسریع اقدام اصلاحی، پروژه پایش هوشمند و آنلاین یونیفورمیتی تایر را با اتکاء بر ظرفیت‌های فناوری اطلاعات و ابزار BI، به اجرا درآورد.

در این پروژه، داده‌های مرتبط با آزمون یونیفورمیتی برای تمامی تایرهای تولیدی از طریق اتوماسیون صنعتی به‌صورت بلادرنگ، از خطوط تست ماشین‌های TBM و ایستگاه‌های کنترل کیفی، جمع‌آوری می‌گردند. اطلاعات به کمک تکنولوژی DirectQuery و اتصال به پایگاه داده SQL سازمانی، مستقیماً روی داشبوردهای پاور بی آی پیاده‌سازی شده است.

روند جمع‌آوری و تحلیل آنلاین داده‌ها

در این مسیر، کلیه پارامترهای کلیدی، شامل OE یونیفورمیتی، میانگین و ماکزیمم نابالانسی، RFV و LFV، میزان بروز عیوب مانند Dent یا Bulge، وزن، ردگیری گروه تولیدی و... از هر تیوب بیلدر (TBM) به پایگاه داده مرکزی منتقل می‌شود. داده‌ها در پاور بی آی (تحت وب)، پس از پالایش اولیه، به‌صورت آنلاین در قالب جداول، نمودارها و شاخص‌های گرافیکی برای استفاده کارشناس و تکنسین‌های کنترل کیفیت به نمایش درمی‌آید.

نمونه‌های عملی از داشبوردهای اجراشده:

۱- داشبورد وضعیت ساخت و نتایج یونیفورمیتی هر دستگاه تائیرسازی در شکل ۱ به‌صورت آنلاین نمایش داده می‌شود.

وضعیت ساخت																
TBM No.	TBM Size	% OE	Count	OE	Access	OK	Ave Balance	Balance (A)	RFV (A)	LFV (A)	Cony (A)	Bulge (A)	Dent (A)	Weight	Dent (D>0.7)	
TBM 14	175/60 R13-P601	100.0%	60	60			25.1							6.35	24	
TBM 15	165/65 R13-P660	100.0%	49	49			22.1							5.88		
TBM 14	165/65 R13-P660	97.8%	45	44	1		29.7						1	2.72	1	
G 8	225/60 R14-P673	97.1%	104	101	1	2	61.3	1					1	12.70	1	
G 12	185/60 R14-P602	96.7%	487	471	15	1	29.8	5	3			5	2	3.66	289	
G 11	175/70 R13-P660	95.0%	537	510	22	5	31.7	18	5	1		1	1	6.87	2	
G 7	205/50 R16-P624	94.9%	552	524	15	13	32.0	5	2	4	1	5	8.68	34		
TBM 16	205/60 R14-P610	92.9%	168	156	6	6	31.9	3				3	1	8.20	108	
G 6	185/60 R14-P602	92.7%	559	518	34	7	33.6	20	7	1	6	1	4.69	459		
TBM 5	185/65 R14-P648	92.5%	254	235	18	1	36.7	9	2			2	6	4.89	29	
TBM 4	185/65 R14-P648	91.1%	515	469	42	4	39.4	22	2	1	8	17	5.33	85		
TBM 13	185/65 R14-P648	90.3%	443	400	42	1	34.2	20	1	2	4	20	5.70	81		
G 10	175/70 R13-P660	90.3%	555	501	53	1	37.2	33	17	4	1	1	1	6.81	1	
TBM 9	185/65 R14-P648	89.8%	459	412	47		38.1	27	6	2	4	12	5.12	60		
TBM 3	185/65 R14-P648	87.9%	1021	897	118	6	33.4	41		1	19	72	7.99	238		
TBM 1	185/65 R14-P648	86.6%	1009	874	132	3	37.4	57	1		22	67	8.00	254		
TBM 17	205/60 R15-P610	86.0%	1008	867	123	18	37.1	44			80	24	8.65	595		
TBM 2	185/65 R15-P648	82.2%	1061	872	186	3	43.6	102			27	80	8.06	251		
Total		89.6%	8886	7960	855	71	36.5	407	46	9	8	182	310	6.66	2512	

شکل ۱- نتایج یونیفورمیتی و وضعیت ساخت هر دستگاه تائیرسازی

در این داشبورد، شاخص‌های کلیدی عملکرد تولید (OE)، میانگین نابالانسی، تعداد و نوع عیوب (Dent، Bulge، Cony، LFV، RFV، Balance)، آماری از وزن تایرها، و توزیع دنت با ماکزیمم بحرانی (Dent>0.7) برای هر خط TBM و محصول، روزانه قابل‌مشاهده است.

این دید حرفه‌ای، به کارشناس اجازه می‌دهد بلافاصله خطوط مشکل‌دار را شناسایی و مقام مسئول را مطلع کند. عیوب تکرارشونده یا رخداد ناهنجار (مثلاً افزایش دفعات دنت یا نابالانسی) باعث هشدار و اقدام اصلاحی سریع می‌شود.

۲- داشبورد پایش عملیاتی و متوسط نتایج هر پارامتر یونیفورمیتی در شکل ۲ که ریز نتایج هر تایر نمایش داده‌شده است.

ردیف بارکد	ردیف نابالانسی	ماشین بارسازی	گروه تایر	تاریخ تست	سایز تایر	یونیفورمیت
All	All	All	All	1404/05/08	All	All
9999999999999999	0	99999.0	0.0			
میانگین نابالانسی						
TBM	Total	Up	Down	TBM	Unit 1	Unit 2
TBM 9	34.0	20.05	13.11	TBM 9	1	
TBM 5	30.9	16.12	14.82	TBM 5		
TBM 4	42.3	30.45	11.85	TBM 4	5	
TBM 3	34.2	16.95	17.30	TBM 3	294	1
TBM 2	42.2	17.94	24.24	TBM 2	342	2
TBM 17	41.1	16.95	24.22	TBM 17		
TBM 16	40.9	13.77	27.08	TBM 16	212	
TBM 15	31.0	14.60	16.34	TBM 15		
Total	39.6	19.28	20.34	Total	1060	885
RFV						
TBM	Unit 1	Unit 2	TBM	Unit 1	Unit 2	
TBM 9	4.11		TBM 9			
TBM 5			TBM 5			
TBM 4	2.06		TBM 4			
TBM 3	0.89		TBM 3	224	2	
TBM 2	0.79		TBM 2	240	2	
TBM 17			TBM 17			
TBM 16	2.45		TBM 16	140		
Total	0.85	2.81	Total	2.57	1.66	3
LFV						
TBM	Unit 1	Unit 2	TBM	Unit 1	Unit 2	
TBM 9	1.39		TBM 9			
TBM 5			TBM 5			
TBM 4	1.16		TBM 4			
TBM 3	0.15		TBM 3			
TBM 2	0.12		TBM 2			
TBM 17			TBM 17			
TBM 16	0.23		TBM 16			
Total	0.34	1.52	Total			

شکل ۲- داشبورد نتایج هر تایر و متوسط مقدار نتایج پارامتر یونیفورمیتی

نتیجه‌گیری

باتوجه به تجربه موفق بارز کردستان در راه‌اندازی سامانه پایش هوشمند یونیفورمیتی و تحلیل داده، می‌توان این پروژه را نمونه‌ای اثربخش از انتقال مفاهیم صنعت ۴ به صنایع تایر ایران دانست. این زیرساخت، بستر توسعه ابزارهای پیشرفته‌تری همچون الگوریتم‌های پیش‌بینی عیب، هوش مصنوعی برای تصمیم‌سازی اصلاح فرایند، و پیاده‌سازی داشبوردهای تصویری برای سایر حوزه‌های کیفی و تولیدی (مانند سایش، دوام، پرسینگ و...) را نیز فراهم می‌کند.

نحوه عملکرد این سیستم به گونه‌ای است که پس از ورود هر تایر با اسکن بارکد روی محصول، اطلاعات شناسنامه‌ای و نتایج آزمون یونیفورمیتی دقیقاً برای همان اپراتور و همان خط به‌روز می‌شود. کاربر با یک نگاه می‌تواند وضعیت فعلی و مقایسه با عملکرد روزهای قبل خود را مشاهده کند، و در صورت بروز هرگونه تغییر معنی‌دار یا افت کیفیت، بلافاصله هشدار بینایی دریافت می‌کند. این موضوع نه تنها انگیزه بهبود مداوم را در بین اپراتورها تقویت کرده، بلکه موجب افزایش سرعت واکنش به عیب و بهبود کنترل فرایند تولید در محل شده است.

مراجع

- [1] Clark, S.K., Mechanics of Pneumatic Tires, US Department of Transportation, 1981.
- [2] Michelin Group, "Radial tire technology: A revolution in mobility," company brochure, 2020.
- [3] The GoodyearTire & Rubber Company, "Company History," [Online].
- [4] ETRTO, "Standards Manual," European Tyre and Rim Technical Organisation, 2023.
- [5] Gent, A.N., "Tire Engineering," Rubber Chemistry and Technology, 1992.
- [6] Huang, Y., "Tire and Vehicle Dynamics," Butterworth-Heinemann, 2016.
- [7] Kumagai, S., et al., "Root cause analysis in tire uniformity defects," Tire Science and Technology, 2019.
- [8] Bridgestone, "Digital manufacturing for next-generation tires," Technical Review, 2021.
- [9] ISO 19960:2020, "Passenger car tyres — Uniformity test"
- [10] continental, "eMES Next Generation," 2022.
- [11] Jovanovic, V. et al., "Industry 4.0 in tire manufacturing: A case study," Journal of Manufacturing Systems, 2020.
- [12] Michelin, "Smart Tire Production," Company White Paper, 2018.
- [13] Goodyear, "RFID in Tire Manufacturing," Company Technical Note, 2022.