



کاربرد هوش مصنوعی و شبیه‌سازی در صنعت تایرسازی ایران: راه‌کاری نوین برای کاهش

ضایعات و ارتقای بهره‌وری

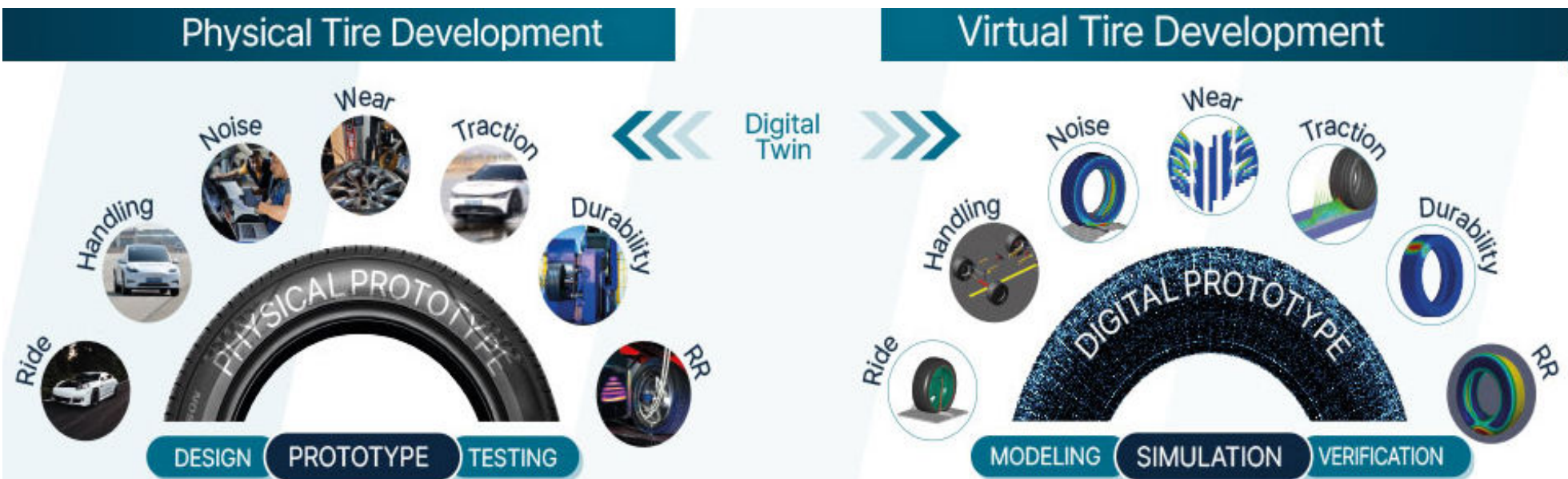
ندیمه فتحی زاده، شیفته شهبایی

کارشناس اداره طراحی محصول، مدیر واحد نوآوری و پژوهش مواد گروه صنعتی بارز

E-mail Address: nadimeh.fathizadeh@gmail.com



برای طراحی و تست مجازی تایرها استفاده می‌کند. با این روش هزینه‌های توسعه را به‌میزان قابل‌توجهی کاهش دهد [۷]. شرکت یوکوهاما با استفاده از هوش مصنوعی خواص فیزیکی آمیزه لاستیکی را پیش‌بینی نموده و با حذف تولید آزمایشی، مقدار ضایعات را کاهش داده‌است [۵]. تجربیات این شرکت‌های بزرگ تایرساز در جدول (۲) نیز آورده شده‌است.



شکل (۳) شمایینی از نحوه عملکرد دولولی دیجیتال به‌عنوان جایگزین تست رانندگی واقعی در ارزیابی عملکرد تایر

جدول (۲) تجربیات شرکت‌های بزرگ تایرسازی در شبیه‌سازی

تأثیر بر ضایعات	دستاوردها	فناوری کلیدی	شرکت
کاهش هزینه‌ها و ضایعات جهانی	بهینه‌سازی زنجیره تأمین	دیجیتال توپین و AI	میشلن
کاهش نمونه‌های فیزیکی	کاهش هزینه توسعه محصول	دیجیتال توپین و تست مجازی	گودیر
کاهش تست‌های واقعی	صرفه‌جویی ۱۲,۰۰۰ تایر	شبیه‌ساز DiL و VTD	برجستون
حذف تولید آزمایشی	تسریع توسعه آمیزه	AI برای پیش‌بینی خواص	یوکوهاما

بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در مسیر توسعه پایدار

به‌کارگیری فناوری‌های نوین در صنعت تایر تنها یک اقدام فناورانه نیست، بلکه شکلی از مدیریت بهره‌وری و رهبری فناورانه است. مدیریت صحیح داده‌ها، ارتقای مهارت نیروی انسانی و ایجاد فرهنگ نوآوری در سازمان، لازمه بهره‌برداری موفق از فناوری‌های شبیه‌سازی و هوش مصنوعی است. در مسیر توسعه پایدار، سه محور کلیدی باید مورد توجه قرار گیرد:

۱. بهینه‌سازی مصرف مواد اولیه از طریق پیش‌بینی دقیق و کنترل فرمولاسیون
۲. کاهش اثرات زیست‌محیطی از طریق کاهش ضایعات و مصرف انرژی
۳. افزایش بهره‌وری تولید از طریق تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و تحلیل هوشمند فرایندها.

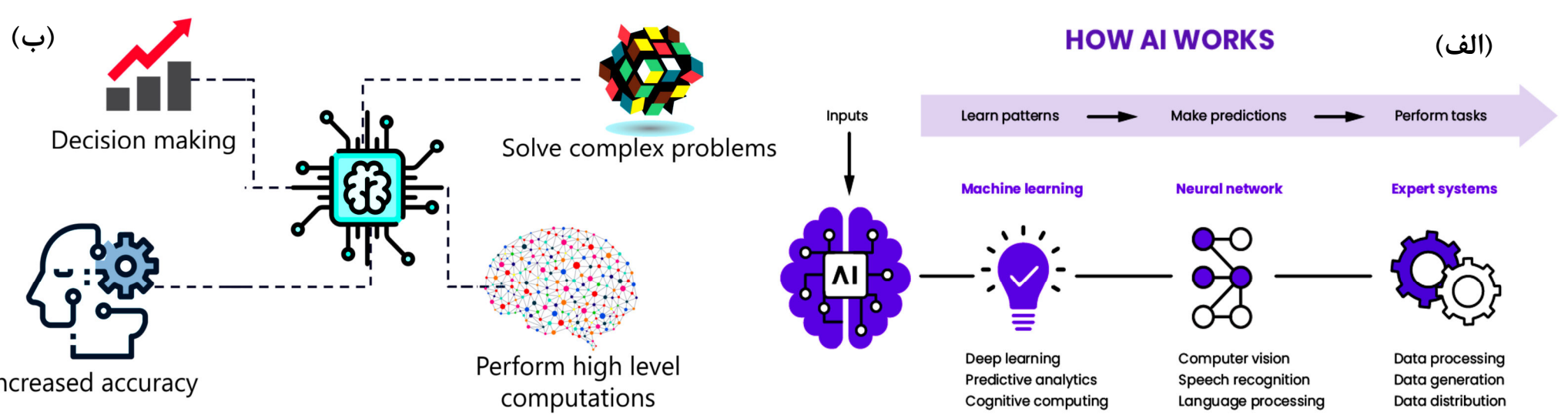
با این وجود، در ایران چالش‌های خاصی مانند کمبود داده‌های دقیق در کارخانه‌های کوچک‌تر (که در مراحل اولیه تولید و آزمون مانع بهره‌برداری کامل از هوش مصنوعی می‌شود)، محدودیت‌های ناشی از تحریم‌ها در دسترسی به نرم‌افزارهای پیشرفته خارجی و نوسانات ارزی که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین را دشوار می‌کند، وجود دارد. برای غلبه بر این موانع، راه‌حل‌های بومی مانند استفاده از ابزارهای متن‌باز نظیر OpenFOAM برای شبیه‌سازی فرآیندها، TensorFlow برای مدل‌سازی هوش مصنوعی و Scipy برای تحلیل داده‌ها پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات و تجربیات جهانی نشان می‌دهد که به‌کارگیری فناوری‌های شبیه‌سازی، هوش مصنوعی و دولولی دیجیتال در صنعت تایر، می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر ضایعات، افزایش بهره‌وری و دستیابی به توسعه پایدار شود. این فناوری‌ها، با جایگزینی آزمون‌های فیزیکی پرهزینه، تحلیل هوشمند داده‌های تولید و پیش‌بینی رفتار مواد، نه‌تنها زمان توسعه محصول را کوتاه‌تر می‌کنند، بلکه کیفیت و یکنواختی تایر را بهبود می‌بخشند. در صنعت تایرسازی ایران، سرمایه‌گذاری هدفمند در حوزه شبیه‌سازی و هوش مصنوعی، می‌تواند گامی مؤثر در حرکت به‌سوی تولید سبز و پایدار باشد. این مسیر، نه‌تنها موجب کاهش هزینه‌های تولید خواهد شد، بلکه جایگاه صنعت تایر کشور را در زنجیره جهانی تأمین لاستیک ارتقا خواهد داد. در ایران، با وجود محدودیت‌های تحریم و دسترسی به نرم‌افزارهای تخصصی، توسعه پلتفرم‌های بومی مبتنی بر ابزارهای متن‌باز و همکاری صنعت و دانشگاه، می‌تواند زمینه‌ساز جهش فناورانه در مسیر تولید پایدار تایر باشد. در این راستا همکاری میان واحدهای تولیدی و شرکت‌های فناوری، به‌ویژه در حوزه شبیه‌سازی فرآیند و مدلسازی داده‌محور می‌تواند مفید باشد.

مراجع

- [1]. TIP & WBCSD, "Environmental Key Performance Indicators for Tire Manufacturing 2009–2019", 2020.
- [2]. Ram, S. & Bhattacharya, S., "Improve tire manufacturing effectiveness with a process digital twin", AWS for industries, 2024.
- [3]. Tamborski, M., Rojek, I. and Mikolajewski, I., " Revolutionizing Tire Quality Control: AI's Impact on Research, Development, and Real-Life Applications", Applied Sciences, 13, 8406, 2023.
- [4]. Hassanien A. E, Darwish A., "Digital Twins for Digital Transformation: Innovation in Industry", Springer, 2022.
- [5]. "Yokohama Develops AI System to Predict Physical Properties of Rubber", Published 03 October 2024.
- [6]. Michelin, Digital Twin and AI Integration for Sustainable Tyre Production, Tire Technology International, 2024.
- [7]. Paul, D. & Markle, Ch., "Digital twin in tire pre-production – unlocking double-digit impact", 2020.
- [8]. Brussels, "Bridgestone Enhances Virtual Tyre Development Capabilities with Own Driving Simulator Set-Up", 2025.
- [9]. Marr, B., "How Goodyear Is Using Data, Artificial Intelligence and Digital Twins to Create the Tyres of the Future", https://bernardmarr.com, 2020.
- [10]. Devillars, A., "How Michelin Innovates Through Its Computing Power", 2025.
- [11]. "Transforming the Tyre Manufacturing Industry: A Case Study on the Integration of AR and VR Technologies", IAVerse, 2023.



شکل (۲) الف) شمایینی از نحوه عملکرد هوش مصنوعی و ب) فواید این تکنولوژی

این روش‌ها قابلیت شبیه‌سازی جریان مواد اولیه در کارخانه تایرسازی از تولید آمیزه، نیم‌ساخته‌ها و محصول نهایی را دارا می‌باشند. این تکنولوژی‌ها پیش‌بینی رفتار تایرها و نیز مدل‌سازی بازیافت آن‌ها (مانند فرایند پیرولیز ضایعات تایر) را نیز ممکن ساخته‌اند [۵].

استفاده از فناوری‌های نوین در صنعت تایرسازی در راستای کاهش ضایعات

الف) هوش مصنوعی و پیش‌بینی خواص آمیزه

یکی از منابع عمده ضایعات در صنعت تایر، تولید آزمایشی آمیزه‌های جدید برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب است. در روش‌های سنتی، هر ترکیب جدید باید چندین‌بار ساخته و آزمایش شود تا ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی مناسب حاصل‌گردد. این فرایند پرهزینه و زمان‌بر بوده و باعث ایجاد ضایعات و مصرف زیاد مواد اولیه می‌شود. ورود هوش مصنوعی و نیز شبکه‌های عصبی، امکان پیش‌بینی خواص آمیزه بدون تولید فیزیکی آن فراهم کرده‌است. با آموزش مدل‌های یادگیری ماشین بر طبق داده‌های قبلی (ترکیب مواد، نوع دوده، رزین‌ها، روغن‌ها، خواص مکانیکی و غیره)، مدل می‌تواند خواص آمیزه جدید را با دقت بالایی پیش‌بینی نماید. این روش ضمن کاهش آزمون‌های فیزیکی، مصرف مواد اولیه و انرژی را نیز به حداقل می‌رساند.

شرکت یوکوهاما^۴ با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی موفق شد ضایعات ناشی از تولید آزمایشی را تا ۴۰٪ کاهش دهد و زمان توسعه آمیزه جدید را از شش ماه به کمتر از سه ماه برساند [۵]. همچنین شرکت میشلن با بهره‌گیری از دولولی دیجیتال در ترکیب با مدل‌های هوش مصنوعی، توانست فرآیند طراحی تایرهای سبز را به‌صورت کاملاً مجازی اجرا کرده و وابستگی به آزمون‌های واقعی را به حداقل برساند [۶]. ادغام هوش مصنوعی با داده‌های بزرگ دقت پیش‌بینی را افزایش داده و امکان سفارشی‌سازی آمیزه را فراهم می‌نماید.

ب) کاربرد شبیه‌سازی در بهینه‌سازی فرآیند تولید تایر

شبیه‌سازی در صنعت تایر به معنای ایجاد مدل‌های مجازی از فرآیندهای واقعی تولید و عملکرد تایر است. این مدل‌ها امکان تحلیل رفتار مواد، جریان سیالات، توزیع حرارت و تنش را فراهم می‌کنند و ابزار تصمیم‌گیری مؤثری برای مهندسان تولید به‌شمار می‌روند. در فرآیند سنتی، تولید آزمایشی تایر منجر به ایجاد ضایعات می‌شود، زیرا چندین نمونه باید ساخته‌شده و مورد تست قرار گیرند. شبیه‌سازی کامپیوتری، مانند مدل‌سازی جریان مواد، ارزیابی سناریوهای مختلف را بدون مصرف مواد واقعی و ایجاد ضایعات فراهم می‌نماید [۷].

یکی از کاربردهای کلیدی شبیه‌سازی، تحلیل فرآیند پخت تایر می‌تواند با استفاده از روش المان محدود^۴ انجام می‌شود. این روش با مدل‌سازی دقیق انتقال حرارت در داخل قالب، زمان و دمای بهینه پخت را تعیین کرده و از سوختگی یا نپختگی تایر جلوگیری می‌کند. همچنین شبیه‌سازی جریان مواد در فرایند اکستروژن و کلد‌رینگ با روش دینامیک سیالات محاسباتی^۵ به تنظیم فشار و دمای بهینه کمک کرده و میزان ضایعات در تولید اجزای تایر را کاهش می‌دهد. در بخش طراحی، مدل‌سازی دیجیتال رفتار تایر تحت شرایط جاده‌ای مختلف (خیس، خشک، ناهموار) باعث کاهش نیاز به تست‌های فیزیکی و در نتیجه کاهش ضایعات نمونه‌های آزمایشی می‌شود. مطالعات شرکت برجستون نشان داد که استفاده از شبیه‌سازی مجازی، ضایعات ناشی از آزمون‌های فیزیکی را تا ۳۰٪ کاهش داده‌است [۸].

ج) شبیه‌سازی تست درآیو تایر به جای تست واقعی

تست‌های خودرویی تایر هزینه‌بر بوده و هم‌چنین باعث ایجاد ضایعات می‌شوند. امروزه استفاده از شبیه‌سازی، به جای تست درآیو تایر بر روی خودرو بسیار رایج شده‌است. با استفاده از فناوری‌های نوین می‌توان عملکرد تایر را در شرایط مختلف (مانند جاده خیس یا ناهموار) ارزیابی کرد. شرکت‌های بزرگی مانند برجستون^۶ و میشلن^۷ از شبیه‌سازهای رانندگی مانند DiL^۸ و فناوری‌های شبیه‌ساز مجازی مانند VIL^۹ برای ارزیابی عملکرد تایرهای تولیدی استفاده می‌کنند [۹]. شرکت برجستون توانسته با استفاده از شبیه‌ساز رانندگی Dil، رفتار تایر را در تعامل با خودرو شبیه‌سازی‌کند و از ضایع شدن ۱۲,۰۰۰ حلقه تایر در سال جلوگیری نماید. برخی از مزایای این رویکرد عبارتند از:

کاهش هزینه‌ها: تست‌های واقعی رانندگی نیاز به خودرو، راننده، و تجهیزات تست دارند که هزینه‌بر است.

سرعت بالاتر: شبیه‌سازی می‌تواند صدها سناریو (مانند شرایط جاده خیس یا خشک) را در زمان کوتاه آزمایش کند.

کاهش ضایعات: با حذف نیاز به تولید نمونه‌های متعدد برای تست واقعی، ضایعات کاهش می‌یابد.

ایمنی: شبیه‌سازی خطرات تست واقعی (مانند تصادفات) را حذف می‌کند.

این فناوری‌ها امکان تحلیل دقیق عواملی مانند چسبندگی، سایش و مصرف سوخت را نیز فراهم‌می‌کند. با استفاده از فناوری‌های نوین می‌توان عملکرد تایر را در شرایط مختلف (مانند جاده خیس یا ناهموار) ارزیابی کرد. دولولی دیجیتال با شبیه‌سازی شرایط جاده می‌تواند جایگزینی برای تست واقعی تایر باشد. در شکل (۳) شمایینی از نحوه عملکرد دولولی دیجیتال به‌عنوان جایگزین تست رانندگی واقعی در ارزیابی عملکرد تایر نشان داده‌شده‌است. مطالعات میشلن و گودیر نیز نشان داده‌اند که به‌کارگیری مدل‌های دولولی دیجیتال در طراحی تایرهای سبز، کاهش ۲۵٪ در زمان توسعه محصول و صرفه‌جویی چشمگیر در مواد اولیه را به دنبال داشته است [۱۰]. برخی از شرکت‌های بزرگ تایرساز مانند میشلن، برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین خود نیز از شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند. هم‌چنین این شرکت تایرهای Le Mans 2023 را به‌صورت کاملاً مجازی طراحی و تست نموده است [۱۱]. گودیر^۹، پیشگام در فناوری دولولی دیجیتال، از داده‌ها و هوش مصنوعی

چکیده

صنعت تایرسازی به‌عنوان یکی از ارکان مهم زنجیره تأمین حمل‌ونقل، با چالش‌هایی چون افزایش هزینه مواد اولیه، محدودیت انرژی و الزامات سخت‌گیرانه زیست محیطی روبه‌رو است. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند شبیه‌سازی فرایند، هوش مصنوعی و دولولی دیجیتال می‌تواند زمینه‌ساز افزایش بهره‌وری، کاهش ضایعات و توسعه پایدار باشد. شبیه‌سازی عددی با مدل‌سازی دقیق رفتار مواد، آمیزه لاستیکی و فرآیند پخت، امکان ارزیابی سناریوهای مختلف بدون نیاز به آزمون‌های پرهزینه فیزیکی را ایجاد می‌کند. ازسوی‌دیگر، هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های تولید و آزمون، قابلیت پیش‌بینی خواص مکانیکی آمیزه‌ها و بهینه‌سازی فرمولاسیون را بدون نیاز به تولید فیزیکی، دارد. مطالعات شرکت‌های پیشرو نظیر میشلن، برجستون، یوکوهاما و گودیر نشان‌می‌دهد که ادغام این فناوری‌ها می‌تواند منجر به کاهش ۳۰٪ ضایعات، صرفه‌جویی ۴۰٪ در زمان توسعه محصول و افزایش یکنواختی کیفیت شود. این مقاله ضمن بررسی تجربیات جهانی، به امکان پیاده‌سازی این فناوری‌ها در صنایع تایرسازی ایران می‌پردازد.

واژه های کلیدی : هوش مصنوعی، شبیه‌سازی، دولولی دیجیتال، صنعت تایرسازی، بهره‌وری، توسعه پایدار، کاهش ضایعات.

محور مقاله: مدیریت بهره‌وری/ رهبری در راستای توسعه فناوری و نوآوری

مقدمه

صنعت تایرسازی یکی از صنایع زیربنایی و حیاتی در حوزه حمل‌ونقل کشورها است. این صنعت با تولید بیش از ۱/۵ میلیارد حلقه تایر در سال یکی از بخش‌های حیاتی در اقتصاد جهانی است که با تولید میلیون‌ها تن ضایعات همراه می‌باشد. تولید تایر، فرایند پیچیده‌ای شامل مراحل مختلف از طراحی آمیزه تا شکل‌دهی، پخت و آزمون نهایی می‌باشد. که هر مرحله این فرایند، در معرض اتلاف مواد و انرژی و ایجاد ضایعات قراردارد. ضایعات تولیدی در این صنعت شامل آمیزه‌های تولیدی در مراحل آزمایشی، محصولات میانی نامنتطبق، تایرهای نامناسب و پسماندهای تولیدی می‌باشد که نه تنها باعث افزایش هزینه‌ها شده، بلکه به محیط زیست نیز آسیب می‌رساند [۱]. امروزه بهره‌گیری از فناوری‌های شبیه‌سازی عددی و هوش مصنوعی به‌عنوان راهکاری کلیدی برای ارتقای رقابت‌پذیری و دستیابی به تولید سبز در صنعت تایر مطرح است. با توجه به نوسانات ارزی، افزایش بهای مواد پتروشیمی، محدودیت دسترسی به منابع وارداتی، تحریم‌های فناوری در کشور و نیز فشارهای زیست‌محیطی، کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری به یک ضرورت استراتژیک در این صنعت تبدیل شده‌است. استفاده از هوش مصنوعی و مدل‌سازی دولولی دیجیتال^۲، می‌تواند راهکاری عملی برای افزایش بهره‌وری و دستیابی به توسعه پایدار باشد. استفاده از مدل‌های دولولی دیجیتال در پیش تولید تایر توانسته هزینه‌ها را تا ۲۵٪ کاهش دهد [۲]. این مدل‌سازی با جایگزینی آزمون‌های فیزیکی پرهزینه با مدل‌های مجازی، می‌تواند ضمن صرفه‌جویی در منابع، سرعت توسعه محصول و کیفیت خروجی را نیز افزایش دهد. امروزه دقت پیش‌بینی خواص آمیزه به‌کمک شبکه‌های عصبی تا ۹۰٪ افزایش یافته‌است [۳]. مقایسه روش‌های نوین و سنتی از جنبه‌های مختلف در جدول (۱) آورده شده‌است. یکی از راهکارهای پیشنهادی در زمینه کاهش آزمون و خطا، ادغام هوش مصنوعی و شبیه‌سازی است. با این حال، کمبود داده‌های دقیق در کارخانه‌های کوچک‌تر چالش اصلی در این زمینه به‌شمار می‌آید.

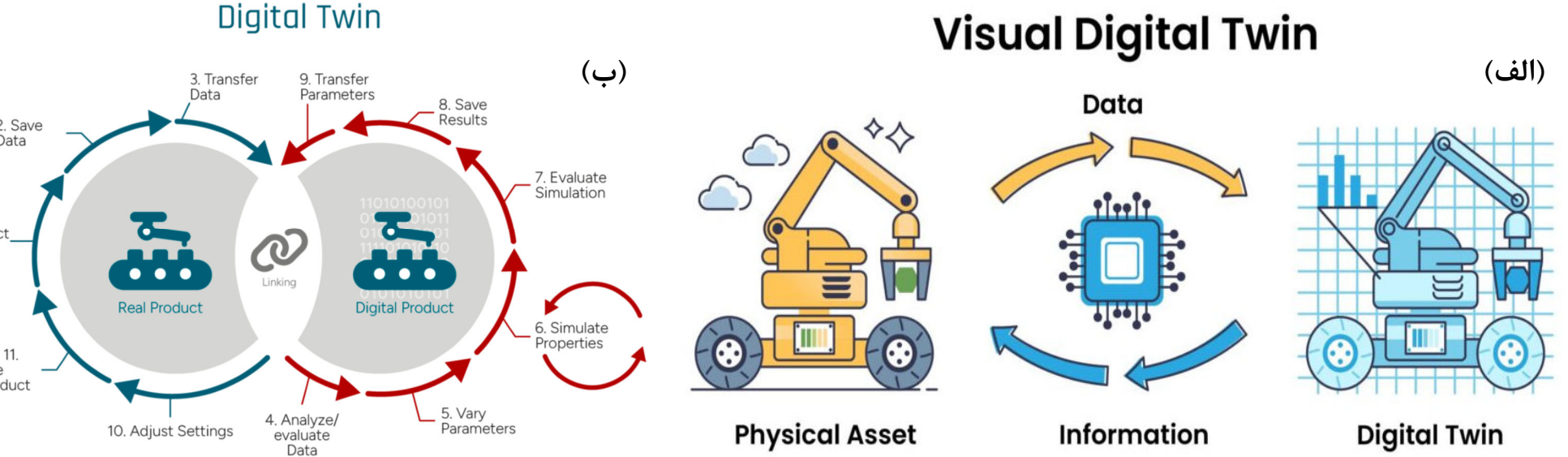
جدول (۱) مقایسه روش‌های سنتی و شبیه‌سازی در تولید تایر

مزایای شبیه‌سازی	روش شبیه‌سازی هوشمند	روش سنتی
کاهش زمان بازاررسانی	۳-۶ ماه (کاهش تا ۲۵٪)	۱۲-۶ ماه
صرفه‌جویی تا ۳۰٪ هزینه‌ها	پایین (آزمایش مجازی)	بالا (چندین نمونه فیزیکی)
کاهش ضایعات زیست‌محیطی	کم (پیش‌بینی دقیق)	زیاد (آزمون و خطا)
بهبود کیفیت محصول	بالا (با AI و داده‌های بزرگ)	متوسط (بر اساس تجربه)
پایداری بیشتر	پایین (بهینه‌سازی مجازی)	بالا

در این مقاله به کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی و شبیه‌سازی در کاهش ضایعات، ارتقای کیفیت و تحقق توسعه پایدار پرداخته‌شده‌است و راهکارهایی برای پیاده‌سازی این فناوری‌ها در واحدهای تولیدی داخلی ارائه شده‌است.

دولولی دیجیتال و هوش مصنوعی

دولولی دیجیتال یا همزاد دیجیتالی به نمایش دیجیتالی یک شی فیزیکی، فرآیند یا سیستم گفته‌می‌شود. این فناوری یک مدل مجازی است که ویژگی‌ها، رفتار و عملکرد همتای فیزیکی خود را در زمان واقعی یا در طول زمان تکرار می‌کند [۴]. شکل (۱) شمایینی از مفهوم فناوری دولولی دیجیتال و مزایای آن را نشان‌می‌دهد. این تکنولوژی به مهندسان، طراحان و اپراتورها اجازه می‌دهد تا عملکرد سیستم فیزیکی را در یک محیط مجازی شبیه‌سازی کرده و با نظارت بر آن بتوانند به عملکرد بهینه دست‌یابند. علاوه‌براین، دولولی دیجیتال ممکن است داده‌ها را از منابع دیگری مانند حسگرها و سایر دستگاه‌های اینترنت اشیا برای تجزیه و تحلیل دریافت کند. این جمع‌آوری و ترکیب داده‌ها امکان تصمیم‌گیری بهتر و بهبود عملکرد را فراهم می‌نماید. به‌صورت کلی، فناوری دولولی دیجیتال منجر به انقلابی در شیوه طراحی، عملکرد و نگهداری سیستم‌های فیزیکی شده‌است و می‌تواند منجر به بهبودهای قابل توجهی در کارایی، ایمنی و پایداری شود.



شکل (۱) الف) شمایینی از مفهوم فناوری دولولی دیجیتال و ب) مزایای این فناوری

در شکل (۲) نحوه عملکرد و مزایای استفاده از هوش مصنوعی آورده‌شده‌است. بعد از دریافت داده‌ها الگوریتم هوش مصنوعی (مانند شبکه عصبی یا مدل یادگیری ماشین) براساس این داده‌ها آموزش داده‌می‌شود.

1. Artificial Intelligence (AI)
2. Digital Twin

3. Yokohama
4. Finite Element Method - FEM
5. Computational Fluid Dynamics (CFD)
6. Bridgestone
7. Michelin
8. Driver-in-the-Loop
9. Vehicle-in-the-Loop
9. Goodyear