

مروری بر فناوری تایرهای بدون هوا: پیشرفت‌ها، طراحی‌ها، مواد و تحلیل‌های مکانیکی

مهرنوش ابراهیمی^{۱*} و سید محمدرضا خلیلی^۲

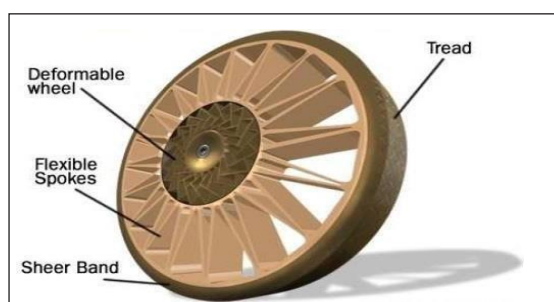
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

۲- استاد تمام، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

mehrnooshebrahimi214@gmail.com

چکیده: تایرهای بدون هوا به‌عنوان یکی از نوآوری‌های برجسته در صنایع حمل‌ونقل، خودروسازی، نظامی و فضایی، با حذف نیاز به فشار هوا، بسیاری از مشکلات تایرهای پنوماتیکی مانند پنچری، نشت هوا و هزینه‌های نگهداری را برطرف کرده‌اند. این مقاله مروری به بررسی تاریخچه توسعه این فناوری، مواد پیشرفته به‌کاررفته، هندسه ساختارهای تکرارشونده و تحلیل‌های مکانیکی مرتبط می‌پردازد. در این پژوهش، نقش مواد هاپیرالاستیک، کامپوزیت‌های تقویت‌شده و آلیاژهای حافظه‌دار در بهبود عملکرد و دوام این تایرها تحلیل شده است. هم‌چنین تأثیر هندسه‌های شبکه‌ای مانند ساختارهای لانه‌زنبری و پرده‌دار بر توزیع بار، جذب انرژی و رفتار دینامیکی بررسی شده است. نتایج مطالعات عددی و تجربی نشان می‌دهد که تایرهای بدون هوا با جذب انرژی تا حدود ۳۰ درصد، کاهش مقاومت غلتشی در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد و افزایش دوام در شرایط کاری مختلف، می‌توانند گامی مهم در جهت افزایش ایمنی و پایداری زیست‌محیطی باشند. با این حال، چالش‌هایی مانند لرزش در سرعت‌های بالا، مدیریت حرارت و هزینه تولید انبوه، نیازمند تحقیقات بیشتر و بهینه‌سازی طراحی هستند.

واژه‌های کلیدی: تایرهای بدون هوا، جذب انرژی، ساختارهای تکرارشونده، هاپیرالاستیک، چاپ سه‌بعدی



شکل ۱- اجزای تایر بدون هوا

مقدمه

تایرهای پنوماتیک، علی‌رغم استفاده گسترده در صنعت، از قرن نوزدهم با چالش‌های ذاتی مانند آسیب‌پذیری در برابر پنچری، نشت هوا و نیاز به نگهداری مداوم فشار مواجه هستند [۱ و ۲]. این محدودیت‌ها، به‌ویژه در کاربردهای حیاتی نظامی، صنعتی و فضایی، انگیزه اصلی برای توسعه فناوری جایگزین، یعنی تایرهای بدون باد بوده است [۳]. برخلاف تایرهای پنوماتیک که به فشار هوای داخلی وابسته‌اند، تایرهای بدون هوا از ساختارهای مکانیکی پیچیده و مواد الاستیک پیشرفته برای تحمل بار، جذب شوک و حفظ شکل بهره می‌برند. این تایرها اساساً سیستمی یکپارچه از چرخ و تایر هستند که در آن، اجزای ساختاری (مانند اسپوک‌های الاستیک، ساختارهای لانه‌زنبری یا تکرارشونده) جایگزین هوای فشرده می‌شوند [۴ و ۵].

تاریخچه این فناوری به تلاش‌های اولیه در اوایل قرن بیستم، با طرح‌هایی مانند چرخ‌های فنی و پره‌های الاستیکی برمی‌گردد [۱]. با این حال، نقطه عطف مهم، توسعه تایرهای فلزی مشبک توسط ناسا برای ماه‌نورد‌های آپولو در دهه ۱۹۷۰ بود که الهام‌بخش طراحی‌های مدرن شد. پیشرفت‌های کلیدی بعدی در دهه ۱۹۸۰ با تحقیقات Gibson بر روی مواد با نسبت پواسون منفی رخ داد که پتانسیل بالایی در جذب انرژی نشان دادند [۶]. این مسیر در سال ۲۰۰۵ با معرفی تایر Tweel توسط میشلن، که از پره‌های پلی‌اورتان یکپارچه استفاده می‌کرد، به بلوغ تجاری نزدیک‌تر شد، هرچند با چالش‌هایی نظیر لرزش در سرعت‌های بالا مواجه بود [۷]. پژوهش‌های نوین بر طراحی ساختارهای بهینه و استفاده از مواد پیشرفته متمرکز شده‌اند. ساختارهای تکرارشونده، مانند لانه‌زنبری یا الهام‌گرفته از طبیعت، به دلیل قابلیت جذب انرژی بالا و توزیع بهینه بار، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند [۸]. در این راستا، فناوری‌هایی مانند تایر سوپرالاستیک ناسا که از آلیاژهای حافظه‌دار و ساختارهایی با ضریب پواسون منفی بهره می‌برد، پتانسیل بالایی را نشان داده‌اند [۱]. هم‌زمان، فناوری چاپ سه‌بعدی امکان ساخت هندسه‌های پیچیده تکرارشونده را فراهم کرده و تحلیل‌های مکانیکی پیشرفته، مانند شبیه‌سازی کرنش محدود برای درک رفتار غیرخطی و ناهمگن این تایرها، در حال توسعه است [۹ تا ۱۲].

تایرهای بدون باد با ارائه مزایایی چون حذف پنچری، افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری و پایداری زیست‌محیطی (با استفاده از مواد قابل بازیافت)، پتانسیل ایجاد تحولی بزرگ در صنعت حمل‌ونقل را دارند. با این حال، چالش‌هایی نظیر مدیریت حرارت در سرعت‌های بالا، کاهش مقاومت غلتشی و بهینه‌سازی سفتی برای راحتی سرنشین هم‌چنان زمینه‌های اصلی پژوهش هستند. این مقاله مروری، به بررسی جامع پیشرفت‌ها، طراحی‌های ساختاری، مواد نوین و تحلیل‌های مکانیکی حاکم بر این فناوری نوظهور می‌پردازد.

بخش تجربی

۱- مواد

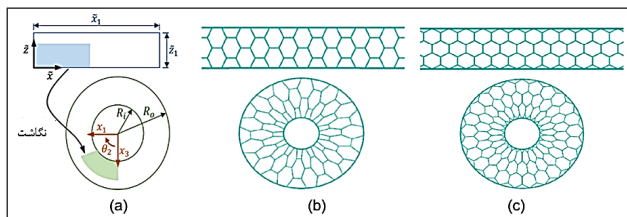
مواد به‌کاررفته در تایرهای بدون هوا باید ترکیبی از انعطاف‌پذیری بالا، جذب انرژی مؤثر، مقاومت سایشی و دوام طولانی‌مدت را بدون نیاز به فشار هوا فراهم کنند. در بخش ساختاری، پلیمرهای الاستیک مانند پلی‌اورتان و ترموپلاستیک پلی‌اورتان بیشترین کاربرد را دارند. به‌ویژه با دلیل سازگاری با چاپ سه‌بعدی و قابلیت تغییر شکل الاستیک بالا، گزینه‌ای مناسب برای تولید اسپوک‌های تکرارشونده محسوب می‌شود [۱۳].

برای افزایش استحکام و پایداری، از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن، شیشه یا کولار در باند برشی و لایه‌های تقویت‌کننده استفاده می‌شود. در لایه ترد

را تا ۱.۴ برابر افزایش داده و توزیع تنش یکنواخت‌تری دارند [۱۸]. ساختارهای کایرال و لولایی نیز برای تایرهای هیبریدی و فضایی به کار می‌روند و مقاومت در برابر فرورفتگی و تغییر شکل را افزایش می‌دهند [۱۹].

• انتخاب هندسه براساس کاربرد:

انتخاب ساختار به نوع کاربرد بستگی دارد. در خودروهای شهری، طراحی‌های ساده و سبک پرده‌دار ارجح هستند و در کاربردهای نظامی یا فضایی، از شبکه‌های پیچیده با جذب انرژی بالا و مقاومت حرارتی بیشتر استفاده می‌شود. به‌طور کلی، بهینه‌سازی هندسه با بهره‌گیری از مواد هایپرالاستیک و طراحی‌های شبکه‌ای و تکرار شونده چندمقیاسی مسیر اصلی پیشرفت تایرهای بدون هوا به‌شمار می‌رود.



شکل ۲- شماتیک تبدیل یک نوار مسطح شش‌ضلعی به ساختار دایره‌ای برای طراحی تایرهای بدون هوا

تحلیل‌های مکانیکی تایرهای بدون هوا

رفتار مکانیکی تایرهای بدون هوا به‌طور مستقیم به هندسه ساختار، جنس مواد و نحوه توزیع بار وابسته است. برای ارزیابی عملکرد، معمولاً دو نوع تحلیل استاتیکی و دینامیکی انجام می‌شود.

۱- تحلیل استاتیکی

در تحلیل استاتیکی، پاسخ تایلر تحت بارهای شعاعی و فشاری بررسی می‌شود. تا میزان تغییر شکل، سفتی شعاعی، توزیع تنش و ظرفیت باربری تعیین شود. شبیه‌سازی با استفاده از روش المان محدود مدل‌های مواد هایپرالاستیک انجام می‌شود. هندسه‌های لانه‌زنبوری و پرده‌دار معمولاً سختی شعاعی یکنواخت‌تری نسبت به خرابایی دارند. افزایش ضخامت سلول‌ها یا زاویه پرده‌ها باعث افزایش سفتی و کاهش تغییر شکل می‌شود. در مقابل، ساختارهای گرادانی و کایرال به توزیع بهتر تنش و جذب انرژی بالاتر کمک می‌کنند. نتایج آزمایش‌های فشاری نشان می‌دهد که تنظیم نسبت سختی شعاعی به جانبی، نقش کلیدی در بهبود راحتی سواری و پایداری دارد [۲۰].

۲- تحلیل دینامیکی

تحلیل دینامیکی به بررسی رفتار تایلر در شرایط حرکت، ارتعاش، خستگی و ضربه می‌پردازد. مدل‌های دینامیکی معمولاً شامل تحلیل گذرا و مدل‌سازی تماس تایلر و سطح جاده هستند. ساختارهای پرده‌دار در سرعت‌های بالا مستعد نوسان شعاعی‌اند، درحالی‌که هندسه‌های TPMS و خرابایی، پایداری دینامیکی بهتری نشان می‌دهند. استفاده از مدل‌های ویسکوالاستیک برای پیش‌بینی میرایی و اتلاف انرژی ضروری است. مطالعات تجربی و عددی نشان داده‌اند که طراحی مناسب شبکه می‌تواند دامنه ارتعاش را تا ۴۰ درصد کاهش و طول عمر خستگی را تا دو برابر افزایش دهد. افزون‌بر این، شبیه‌سازی دینامیکی نقش مهمی در ارزیابی مقاومت غلتشی و توزیع حرارتی دارد که برای کارکرد پایدار در سرعت‌های بالا حیاتی است [۵].

بحث و نتیجه‌گیری

تایرهای بدون هوا با حذف وابستگی به فشار داخلی، رویکردی نوین در طراحی سامانه‌های حرکتی ارائه می‌دهند که ایمنی، دوام و پایداری زیست‌محیطی را به‌طور هم‌زمان ارتقا می‌دهد. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که ترکیب

نیز، لاستیک طبیعی همراه با پرکننده‌هایی نظیر کربن بلک در گریدهای N220 و N550 جهت بهبود مقاومت سایشی و چسبندگی به کار می‌رود. افزودنی‌های نانوساختار مانند نانوکلی و گرافن نیز برای ارتقای خواص مکانیکی و حرارتی ماتریس‌های پلیمری استفاده می‌شوند.

در طراحی‌های پیشرفته‌تر، مواد هایپرالاستیک برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی ساختارهای تکرار شونده و آلیاژهایی نظیر Nitinol برای ایجاد اسکلت‌های مشبک با قابلیت بازیابی شکل به کار می‌روند. انتخاب نوع لاستیک طبیعی نظیر RSS1 یا SIR20 معمولاً براساس هدف کاربردی، از خودروهای سبک با تمرکز بر بازیافت تا تایرهای نظامی با تمرکز بر دوام انجام می‌شود [۱۴].

۲- روش‌شناسی

توسعه تایرهای بدون هوا بر پایه یک چرخه یکپارچه از طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و آزمون تجربی انجام می‌گیرد. در مرحله طراحی، مدل‌های هندسی با الگوهای لانه‌زنبوری یا تکرار شونده از طریق چاپ سه‌بعدی تولید می‌شوند. سپس، رفتار مکانیکی این ساختارها با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزارهایی مانند آباکوس تحلیل می‌شود. در این فرایند، از مدل‌های مواد هایپرالاستیک و فرمول‌بندی کرنش محدود برای شبیه‌سازی پاسخ غیرخطی تایلر تحت بارهای شعاعی، طولی و پیچشی بهره گرفته می‌شود [۱۵].

نتایج عددی به‌وسیله آزمایش‌های تجربی نظیر تست‌های فشاری و غلتش اعتبارسنجی می‌شوند تا اثر پارامترهایی چون ضخامت دیواره، جهت‌گیری سلول‌ها و سفتی شعاعی بررسی شود. هدف نهایی این رویکرد، بهینه‌سازی رفتار تایلر از نظر کاهش مقاومت غلتشی، افزایش جذب انرژی و بهبود دوام است. در نهایت، تولید صنعتی از طریق فرایندهایی مانند ریخته‌گری، ماشین‌کاری دقیق یا چاپ سه‌بعدی رزینی انجام می‌شود، هرچند مقیاس‌پذیری تولید انبوه هم‌چنان یکی از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود.

۳- هندسه ساختارهای تکرار شونده

هندسه ساختارهای تایرهای بدون هوا نقشی تعیین‌کننده در توزیع بار، جذب انرژی و رفتار مکانیکی دارد. این ساختارها معمولاً براساس الگوهای تکرار شونده مانند لانه‌زنبوری، پرده‌دار و خرابایی طراحی می‌شوند تا انعطاف‌پذیری و دوام را افزایش دهند. فناوری چاپ سه‌بعدی امکان ساخت هندسه‌های پیچیده با رفتار غیرخطی و کارایی بالا را فراهم کرده است [۱۶ و ۱۷].

• ساختارهای پایه:

ساختارهای پرده‌دار، رایج‌ترین هندسه در تایرهای تجاری مانند Tweel میشلن هستند. پرده‌های الاستیکی، بار را به‌صورت شعاعی توزیع کرده و جذب ضربه را افزایش می‌دهند، هرچند در سرعت‌های بالا لرزش ایجاد می‌کنند. زاویه و تعداد پرده‌ها مستقیماً بر سفتی شعاعی و توان جذب انرژی اثر می‌گذارند. از طرفی لانه‌زنبوری‌ها شامل سلول‌های شش‌ضلعی با توزیع بار یکنواخت هستند و برای تایرهای نظامی و خارج‌جاده‌ای مناسب است. هندسه‌های گرادانی (با تغییر ضخامت یا چگالی سلول‌ها) تا ۷۰ درصد جذب انرژی بیشتری ارائه می‌دهند. جهت‌گیری شبکه و ضخامت دیواره سلول‌ها پارامترهای کلیدی در کنترل سختی و پایداری هستند.

• ساختارهای پیشرفته:

سطوح حداقل سه‌گانه دوره‌ای، ساختارهایی هستند که از الگوهای طبیعی الهام‌گرفته و تداخل کنترل‌شده، جذب انرژی بالا و عملکرد پایدار در دماهای زیاد فراهم می‌کنند [۲ و ۳]. هم‌چنین ساختارهای خرابایی دارای وزن پایین و مقاومت فشاری بالا هستند. این ساختارها ترکیبی از واحدهای دوبعدی و سه‌بعدی بوده و جذب انرژی ویژه را در تغییر شکل‌های بزرگ افزایش می‌دهند.

• ساختارهای الهام‌گرفته از طبیعت:

الگوهایی مانند ساختار زنبی شکل الهام‌گرفته از میگوی مانتیس، ظرفیت باربری

در آینده، تمرکز پژوهش‌ها بر طراحی هندسه‌های تطبیقی و چندمقیاسی، استفاده از مواد هوشمند با حافظه‌دار و یکپارچه‌سازی حسگرها برای پایش وضعیت تایر خواهد بود. این رویکردها می‌توانند تایرهای بدون هوا را به نسل جدیدی از سامانه‌های حرکتی خودترمیم‌پذیر، سبک و پایدار تبدیل کنند که کاربرد آن‌ها از خودروهای شهری تا مأموریت‌های فضایی گسترش می‌یابد.

هندسه‌های تکرارشونده پیشرفته، مواد هایپر الاستیک و تحلیل‌های عددی دقیق مسیر اصلی توسعه این فناوری است. باوجود پیشرفت‌های چشم‌گیر، چالش‌هایی مانند مدیریت حرارت در سرعت‌های بالا، بهینه‌سازی مقاومت غلتشی، کاهش وزن و مقیاس‌پذیری تولید همچنان پابرجاست. پیشرفت در چاپ سه‌بعدی چندماده‌ای و مدل‌سازی چندفیزیکی می‌تواند این موانع را برطرف سازد.

مراجع

- [1] Y. Deng, Z. Wang, T. Liu, W. Liang, H. Shen, and Z. Xiao, "Static and dynamic mechanical characteristics of honeycomb non-pneumatic tire under structural damage condition," *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 102, p. 105120, 2023.
- [2] D.-Y. Kim, H.-S. Kim, S. S. Kamath, X. Hou, J.-W. Choi, and S.-H. Park, "TPMS-based auxetic structure for high-performance airless tires with variable stiffness depending on deformation," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 11419, 2024.
- [3] H.-S. Kim, D.-Y. Kim, J.-W. Choi, and S.-H. Park, "High stability in compressive and shear behavior of airless tire using primitive TPMS-based cylindrical spoke," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 1247-1262, 2024.
- [4] M. Sardinha, M. Fátima Vaz, T. R. Ramos, and L. Reis, "Design, properties, and applications of non-pneumatic tires: A review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 237, no. 11, pp. 2277-2297, 2023, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1177/14644207231186762>.
- [5] J. Yang, H.-f. Zhou, H.-c. Zhou, Z. Zheng, and G.-l. Wang, "Comparative study of static and dynamic characteristics of non-pneumatic tires with gradient honeycomb structure," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 6, p. 366, 2024, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1007/s40430-024-04875-z>.
- [6] H. Hankin et al., "Airless tires: Structural concepts, mechanical design, and application prospects," *Materials & Design*, p. 113933, 2025, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113933>.
- [7] J. Yang, Y.-J. Wang, H.-C. Zhou, H.-F. Zhou, H.-R. Liu, and X.-R. Wang, "Optimizing the honeycomb spoke structure of a non-pneumatic wheel to reduce rolling resistance," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 13, p. 5425, 2024, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/app14135425>.
- [8] "Are Bulletproof Tires Real," 2024. [Online]. Available: <https://carlisletyrfile.com/are-bulletproof-tires-real/>.
- [9] R. Murniati et al., "Enhancing airless tire performance for military vehicles: natural rubber compound with carbon black Fillers N220 and N550 with dynamic mechanical analysis approach," *Journal of Polymer Research*, vol. 31, no. 5, p. 137, 2024/05/08 2024, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1007/s10965-024-03981-x>.
- [10] N. J. Mathew, D. K. Sahoo, and E. M. Chakravarthy, "Design and static analysis of airless tyre to reduce deformation," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 197, no. 1: IOP Publishing, p. 012042, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1088/1757-899X/197/1/012042>.
- [11] M. Sun et al., "The Development of Processing Methods and Materials Used for Non-Pneumatic Tires: A Review," *Materials*, vol. 17, no. 22, p. 5660, 2024, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/ma17225660>.
- [12] M. Sun, H. Zhong, J. Yang, and T. Xu, "Structural Design and Manufacturing Processes of Non-pneumatic Tires: A Mini-Review," in *International Conference on Electric Vehicle and Vehicle Engineering*, 2025: Springer, pp. 46-50, doi: https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1007/978-981-97-2007-0_6.
- [13] J. Hallare, C. Mamigo, F. Ramos, M. Sy, A. Tablico, and N. Lim, "Parametric analysis and optimization of pentagonal auxetic metamaterial for airless tire," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2025, vol. 1500, no. 1: IOP Publishing, p. 012049, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1088/1755-1315/1500/1/012049>.
- [14] A. Ubando, D. Coronado, and I. Marfori, "Green design of airless tires using metamaterials: a mini review," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2025, vol. 1500, no. 1: IOP Publishing, p. 012051, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1088/1755-1315/1500/1/012051>.
- [15] P. D. V. B. U. Rahul Shukla "An Overview in use of Airless/ Non Pneumatic Tyres (NPTs) in Military Vehicles," vol. <https://www.ijert.org/>, no. <https://www.ijert.org/>, 2025, doi: 10.17577/IJERTV14IS030145.
- [16] A. Üzün and M. Y. Kayacan, "Investigation of over obstacle performance analysis of auxetic airless tyres," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 7, no. 3, pp. 415-427, 2023, doi: <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1378393>.
- [17] A. Daman Pak, J. Lotfi, and S. M. R. Khalili, "A finite-strain simulation of 3D printed airless tires," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 149, no. 10, p. 04023073, 2023.
- [18] 이광제, "Design of buckling induced meta-tire with circular hole array," *서울대학교 대학원*, 2025.
- [19] B. Liu and X. Xu, "Mechanical behavior and mechanism investigation on the optimized and novel bio-inspired nonpneumatic composite tires," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 61, no. 1, pp. 250-264, 2022, doi: <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0033>.
- [20] C. Sidhu and Z. El-Sayegh, "Comparative Analysis of Non-Pneumatic Tire Spoke Designs for On-Road Applications: A Traction Force Perspective," in *ASME 2024 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2024, vol. Volume 1: 26th International Conference on Advanced Vehicle Technologies (AVT), V001T01A002, doi: 10.1115/detc2024-145579. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/DETC2024-145579>