



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



A Comprehensive Review of Airless Tire Structures: Geometries, Materials, Static and Dynamic Analysis, and Future Perspectives

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors

Atefeh Ahmadi
Mechanical Engineering Dept.,
Engineering Faculty, Engineering
Faculty, Bu-Ali Sina University,
Hamedan, Iran

Alireza Shooshtari *
Department of Mechanical
Engineering, Engineering Faculty, Bu-
Ali Sina University, Hamedan, Iran

* Correspondence

al.shooshtari@gmail.com
Postal Code: 6516957483
Phone: 08138292505
Fax: 08138292505

Article History

Received: 17 Feb. 2026
Accepted: 14 Apr. 2026
ePublished: 15 Apr. 2026

ABSTRACT

A review of previous studies revealed that the internal structural geometry plays a decisive role in the mechanical performance of non-pneumatic tires. Among various geometries, including honeycomb, triangular, plate-spoke, and curved-spoke structures, honeycomb configurations exhibited the highest stiffness and load-carrying capacity, whereas increasing spoke curvature resulted in reduced radial stiffness and greater structural deformation. The findings also indicated that a cellular shear band with a cell angle of 65° and a height of 21 mm can provide favorable structural performance. Furthermore, the use of porous shear bands was found to reduce rolling resistance by approximately 39–43% compared with continuous shear-band designs, contributing significantly to improved energy efficiency. Dynamic analyses demonstrated that the first ten natural frequencies of honeycomb non-pneumatic tires lie within the range of 9–65 Hz, while increasing structural damage can reduce these frequencies by up to 19.37%. These findings suggest that appropriate cellular geometry design can simultaneously enhance stiffness, improve load-carrying capability, reduce rolling resistance, and improve the vibration performance of non-pneumatic tires.

Keywords: Airless tire; Acoustic; Metamaterial; vibration; vehicle

کلیدواژه‌ها

تایر بدون هوا، آکوستیک، فرا مواد، ارتعاشات، خودرو.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

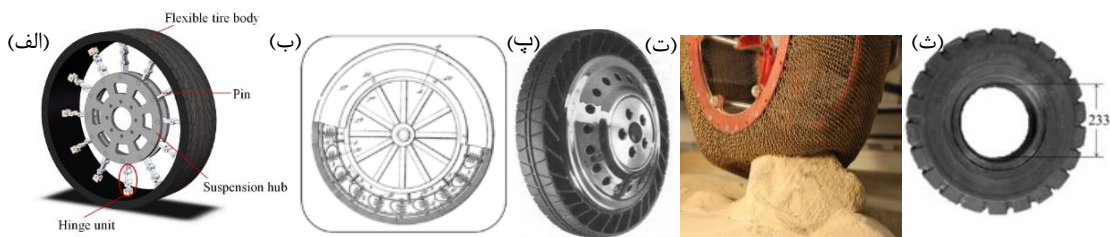
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

* نویسنده مسئول: shooshta@basu.ac.ir

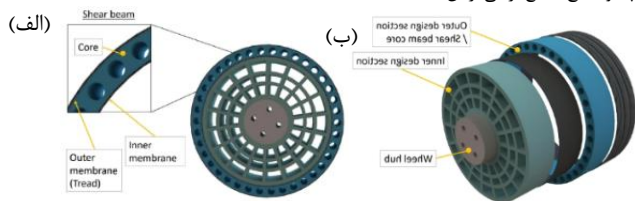
۱. مقدمه

تایر جزء کلیدی سیستم رانندگی وسیله نقلیه است و تنها جزئی است که با وسیله نقلیه و جاده در تعامل است. از لحاظ تاریخی، تایرهای بادی در بریتانیا کبیر در اواخر دهه ۱۸۰۰ به عنوان ارتقای تایرهای لاستیکی جامد آغاز شدند. آن‌ها عمدتاً برای کاربردهای دوچرخه بودند. تایرهای غیر بادی با پیشرفت‌هایی در طراحی رینگ در اوایل دهه ۱۹۵۰ معرفی شدند. [۱]. داده‌های مربوطه نشان می‌دهد که تقریباً ۷۰ درصد از تصادفات ترافیکی بزرگراه‌ها ناشی از نشت تایر بادی است [۲]. مزایای تایرهای غیر بادی بدین شرح است؛ بدون نیاز به تعمیر و نگهداری و مقاومت در برابر آسیب‌های مکانیکی و بدون نیاز به ترمیم در تایرهای خودروهای سواری و سنگین ناشی از سوراخ شدن تایر [۳] [۴] [۵] [۶]. تایرهای غیر بادی تایرهایی هستند که از تکیه‌گاه‌های تایر پلیمری یا پرکننده‌ها برای جایگزینی سازه‌های بادی استفاده می‌کنند [۷].

مدل‌های مختلفی از مفهوم تایر غیر بادی مثل تایرهای غیر بادی فنی و لولا دار که در مطالعات پیشین معرفی شده‌اند که در شکل ۱ (الف) و (ب) نشان داده شده است [۸] [۹]. با توجه به شکل ۱ (پ) از مدل‌های نخست تایر غیر بادی می‌توان به مدلی که اسکات در سال ۱۹۹۰ ارائه داده است اشاره کرد [۱۰]. تایرهای بدون هوا ساخته شده از آلیاژهای حافظه‌دار با برخورد با اشیای تیز دچار تغییر شکل شده و با گذشت اندکی زمان یا تغییر در خصوصیات رفتاری آن به شکل اولیه بازمی‌گردند [۱۱]. شکل ۱ (ت) یک نوع از این تایرها را نشان می‌دهد. تحت بار، مرکز تایر دچار تغییر شکل بدون آسیب می‌شود و به بعد از برداشتن نیرو، تایر به شکل قبل برمی‌گردد. برخی از تایرهای بدون هوا شکل ۱ (ث) برای خودروهای سنگین، صندلی‌های چرخ‌دار وجود دارند که کل حجم آن‌ها از لاستیک یا پلیمر یکپارچه ساخته شده‌اند.



شکل ۱: (الف) تایر غیر بادی لولا دار، (ب) چرخ فنی، اختراع شده توسط کوزات در سال ۱۹۹۳ [۹] [۸]. (پ) مدل تایر غیر بادی ارائه شده توسط اسکات. (ت) شکل ۳ نمونه‌ای از تایر غیر بادی ساخته شده با آلیاژ حافظه‌دار [۱۱]. (ث) شکل ۴ تایر جامد یکپارچه و سطح مقطع برشی از آن [۱۲]



شکل ۲ ترکیب یک تایر غیر بادی. (الف) نمای جلوی اجزاء و نمای جزئیات برشی از تایر. (ب) نمای باز شده مفهوم حلقوی [۸].

مروری بر ساختارهای تایرهای غیر بادی: هندسه، مواد، تحلیل استاتیکی و دینامیکی و چشم‌اندازهای آینده

عاطفه احمدی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
علیرضا شوشتری*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

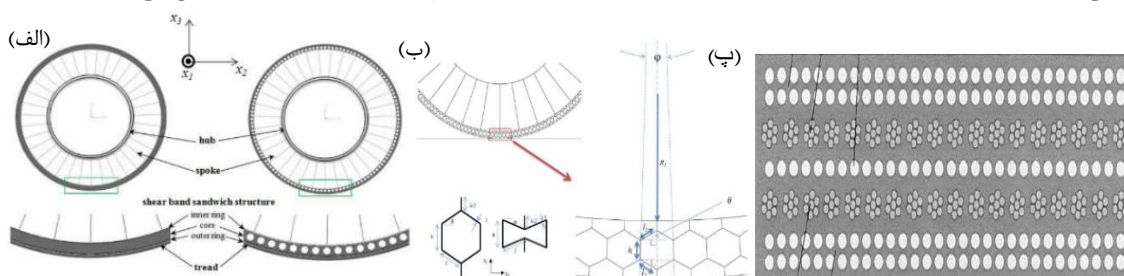
تایرهای غیر بادی به عنوان جایگزینی نوین برای تایرهای پنوماتیکی، به دلیل حذف خطر پنچری، کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری و قابلیت بازیافت بیشتر، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. در این مقاله مروری، مطالعات انجام شده در زمینه طراحی، تحلیل و توسعه تایرهای غیر بادی مبتنی بر ساختارهای سلولی و فرا مواد بررسی شده است. انواع هندسه‌های رایج شامل ساختارهای لانه‌زنبوری، مثلثی، صفحه‌ای و پره‌های منحنی از نظر عملکرد استاتیکی و دینامیکی مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد ساختارهای لانه‌زنبوری بیشترین سفتی و ظرفیت تحمل بار را در مقایسه با سایر هندسه‌ها ارائه می‌کنند، در حالی که افزایش انحنای پره‌ها موجب کاهش سفتی شعاعی می‌شود. همچنین نوار برشی سلولی با زاویه ۶۵ درجه و ارتفاع ۲۱ میلی‌متر به عنوان یکی از بهینه‌ترین طرح‌ها معرفی شده است. بررسی عملکرد غلتشی نشان داد استفاده از نوار برشی متخلخل می‌تواند مقاومت غلتشی را حدود ۳۹ تا ۴۳ درصد نسبت به ساختارهای پیوسته کاهش دهد. تحلیل‌های دینامیکی نشان داده فرکانس طبیعی نخست تایرهای لانه‌زنبوری در محدوده ۹ تا ۶۵ هرتز قرار دارند و آسیب سازه‌ای می‌تواند این فرکانس‌ها را تا ۱۹.۳۷ درصد کاهش دهد. همچنین استفاده از قوس‌های نامتقارن در پره‌ها موجب کاهش محسوس ارتعاشات شعاعی می‌شود. در مجموع، نتایج مطالعات نشان می‌دهد به کارگیری ساختارهای سلولی بهینه و فرا مواد می‌تواند موجب افزایش سفتی، بهبود ظرفیت باربری، کاهش مقاومت غلتشی و ارتقای عملکرد ارتعاشی تایرهای غیر بادی شود و زمینه توسعه کاربرد آنها در خودروهای آینده را فراهم سازد.

در این مقاله تایرهای غیر بادی دارای رینگ با بخش لاستیکی (که در آن تیوپ قرار نمی‌گیرد) بررسی خواهد شد.

۲. طراحی و ویژگی‌های ساختاری تایرهای غیر بادی

ساختار هندسی این تایرها معمولاً از یک قاب حلقوی پیروی می‌کند، همان‌طور که در طرح شکل ۲ نشان داده شده، پیکربندی دارای یک رینگ مرکزی است که یک بخش داخلی و یک بخش بزرگ‌تر خارجی را به هم متصل می‌کند. [۸].

نوار برشی جزء حیاتی یک تایر غیر بادی هنگام تعیین مقاومت غلتشی ناشی از اصطکاک برشی است [۱۵]. نوع دیگر از ساختار حلقه نگهدارنده تایر غیر بادی از نوع شکل لانه‌زنبوری است. این ساختار در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است [۱۷]. ساختار ساندویچی در شکل ۳ (پ) در لایه اول از طناب‌های فولادی و یک لایه دوم دولایه آرماتور نفاخته را ساندویچ می‌کند [۱۸].



شکل ۳ الف) حلقه نگهدارنده بیرونی تایر غیر بادی در دو حالت پیوسته و متخلخل [۱۵] ب) نوار برش تایر غیر بادی با ساختار لانه‌زنبوری [۱۶] پ) نوار برش تایر غیر بادی با ساختار ساندویچی [۱۸]

مهم‌ترین بخش تایرهای غیر بادی بخش داخلی تایر است که از مواد و ساختارهای هندسی مختلفی تولید می‌شوند. بخش مرکزی آنکه از جنس فلزات است و دو بخش نگهدارنده قسمت غیر بادی تایر که ساختارهای خاص خود را دارند. ولی با این وجود تأثیر لایه نگهدارنده بیرونی تایر غیر بادی بر عملکرد این تایر در مقالات بررسی شده است [۱۳] [۱۴].

۲.۲. انواع مواد ساختار تایر غیر بادی

قسمت لاستیکی تایرهای غیر بادی با مواد گوناگونی ساخته می‌شوند، این مواد با مواد تایرهای معمولی بادی متفاوت هستند. یکی از موارد اصلی که در ساخت تایرهای غیر بادی استفاده شده است، انواع فرا مواد هستند [۲۴] [۲۵]. در واقع فرا مواد، موادی با معماری مصنوعی هستند که خواصی فراتر از مواد طبیعی کلاسیک دارند [۲۶] [۲۷]. پیشوند "meta" (در یونانی) به معنای "فراتر از" است و از این نظر نام "metamaterial" به معنای سیستم‌هایی است که فراتر از مواد معمولی هستند. کلمه "فراماده" برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ ظاهر شد. منابع دیگر نشان می‌دهند که اصطلاح «فراماده» برای اولین بار کمی زودتر توسط راجر ام. والسر، استاد فیزیک دانشگاه تگزاس در سال ۱۹۹۹ ابداع شد. در واقع فرا مواد، موادی با معماری مصنوعی هستند که خواصی فراتر از مواد طبیعی کلاسیک دارند. فرا مواد شاخه جدیدی از کامپوزیت‌های نیمه‌فعال هستند که برای نشان دادن خواص استثنایی موادی که در طبیعت یا در مواد و به‌منظور توسعه فناوری‌های جدید پیشنهاد شدند. انواع مختلف فرا مواد وجود دارد که به‌طور کلی به چهار گروه تقسیم می‌شوند که هر کدام کاربرد وسیعی در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع دفاعی، خودروبی، هوافضا و پزشکی دارند، شکل ۵ انواع کاربرد فرا مواد را نشان می‌دهد [۲۸] [۲۹] [۳۰] [۳۱].

۱.۲. انواع ساختار هندسی تایر غیر بادی

در تایرهای غیر بادی میرایی عمدتاً به پیکربندی هندسی داخلی ساختار مواد مرتبط است. این مقاطع را می‌توان به‌عنوان یک نوع تیر دایره‌ای یا ساختار ساندویچی بهتر درک کرد. در ادامه به بررسی چندین نوع از این ساختارهای هندسی پرداخته شده است.

پره‌های لانه‌زنبوری که در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است، یکی از متداول‌ترین سازه‌های مورد استفاده در تحقیق و توسعه تایرهای غیر بادی هستند. سازه‌های لانه‌زنبوری یکی از متداول‌ترین طرح‌های پره‌ها هستند. این به این دلیل است که پره‌های لانه‌زنبوری می‌توانند سفتی بالا را در حالی که سبک هستند حفظ کنند. پره صفحه‌ای در شکل ۴ (ب) یک ساختار مستقیم و ستونی است که از سختی عمودی برای تحمل وزن استفاده می‌کند [۱۹] [۲۰] [۲۱] [۲۲]. پره مثلثی شکل ۴ (پ) دارای ساختار سلولی مثلثی و ویژگی‌های مشابه پره لانه‌زنبوری است. پره منحنی شکل یک ساختار سلولی منحنی با الگوی آمونیتی است که نسبتاً مقاومت فشاری بالایی دارد. شکل ۴ (ت) جزئیات مدل این نوع هندسه تایر را نشان می‌دهد. کاهش پره‌های جدا شده منحنی تایر باعث کاهش تراکم خاک می‌شود [۲۳].

پره‌ای در مقایسه با تایرهای پنوماتیکی است. در این زمینه، استفاده از فرا مواد آکوستیک در ساختار پره‌ها، نوار برشی و لایه‌های داخلی تایر می‌تواند موجب کاهش انتقال ارتعاشات و تضعیف امواج صوتی در محدوده فرکانسی مشخص شود.

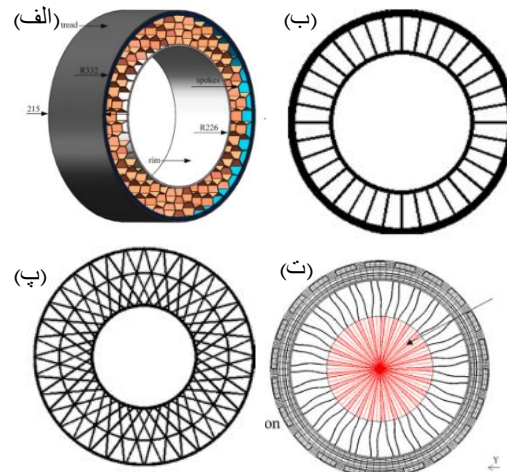
به‌کارگیری ساختارهای مبتنی بر فرا مواد آکوستیک در تایرهای غیر بادی می‌تواند باعث کاهش سروصدا جاده، افزایش راحتی سرنشینان و بهبود عملکرد دینامیکی خودرو شود. برای مثال، استفاده از سلول‌های تشدیدکننده محلی در بخش داخلی تایر قادر است دامنه ارتعاشات ناشی از تماس تایر و جاده را کاهش داده و از انتشار سروصدا به بدنه خودرو جلوگیری کند. بنابراین، فرا مواد آکوستیک یکی از گزینه‌های نویدبخش برای توسعه نسل جدید تایرهای غیر بادی کم‌صدا و با ارتعاش کمتر محسوب می‌شوند.

۲.۲.۲. فرا مواد فوتونیک

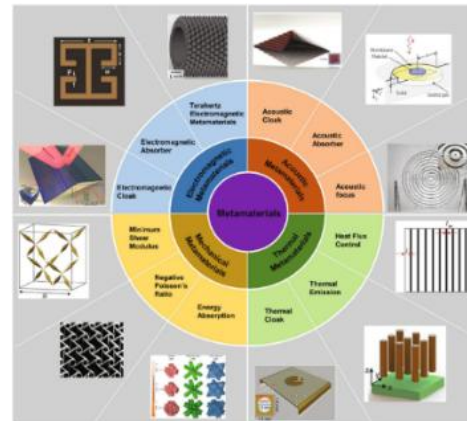
مورد بعدی، بلورهای فوتونیک مواد کامپوزیتی دوره‌ای بافاصله شبکه قابل‌مقایسه با طول موج صوتی هستند. آنها نه تنها به دلیل تأثیرات عمیق ساختار تناوبی آنها بر انتشار موج (به‌عنوان مثال، وجود شکاف‌های باند صوتی)، بلکه به دلیل کاربردهای بالقوه (به‌عنوان مثال، نقش احتمالی آنها در فیلترهای صوتی، طراحی مبدل و آینه‌های صوتی) مورد توجه هستند. شکل ۶ نمونه‌ای از فرا مواد فوتونیک را نشان می‌دهد.

فرا مواد فوتونیک ساختارهایی هستند که از طریق آرایش هندسی ویژه خود، امکان کنترل انتشار و هدایت امواج الکترومغناطیسی را فراهم می‌کنند. اگرچه کاربرد مستقیم این فرا مواد در ساختار مکانیکی تایرهای غیر بادی هنوز محدود است، اما قابلیت‌های آنها می‌تواند در توسعه تایرهای هوشمند مورد استفاده قرار گیرد.

به‌عنوان مثال، ادغام حسگرهای نوری مبتنی بر ساختارهای فوتونیک در داخل پره‌ها یا نوار برشی تایر می‌تواند امکان پایش لحظه‌ای تنش، کرنش، آسیب و خستگی سازه را فراهم کند. همچنین از ساختارهای فوتونیک می‌توان در سامانه‌های ارتباطی و پایش سلامت سازه برای ارسال اطلاعات عملکردی تایر به واحد کنترل خودرو استفاده کرد. از این‌رو، هرچند فرا مواد فوتونیک تاکنون کاربرد گسترده‌ای در طراحی مکانیکی تایرهای غیر بادی نداشته‌اند، اما می‌توانند در توسعه تایرهای هوشمند، سامانه‌های پایش وضعیت و فناوری‌های نسل آینده خودروهای خودران نقش مهمی ایفا کنند.



شکل ۴ (الف) طراحی لانه‌زنبوری [۱۹] [۲۰]. (ب) تایر غیر بادی پره صفحه‌ای. (پ) پره مثلثی [۲۱]. (ت) تایر غیر بادی پره منحنی [۲۳].



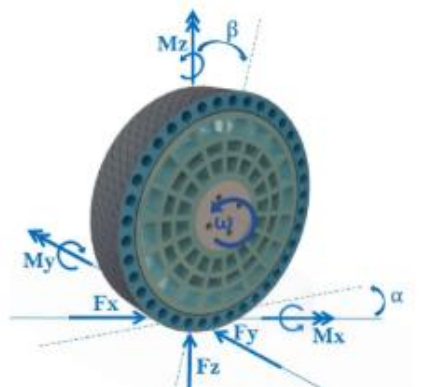
شکل ۵ انواع کاربرد فراماده [۳۲]

۱.۲.۲. فرا مواد آکوستیک

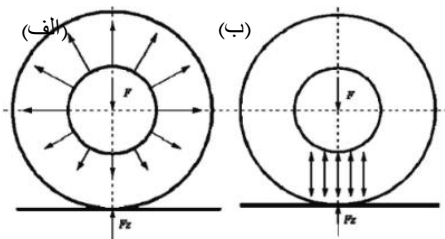
اولین مورد، مربوط به فرا مواد آکوستیک هستند. ظهور فرا مواد آکوستیک نه تنها مشکل اندازه نمونه را حل کرده است، بلکه عملکردهای جدیدی را معرفی کرد که قبلاً یافت نشده بود. فرا مواد آکوستیک قابلیت‌های تغییر امواج صوتی را گسترش داده‌اند [۳۴] [۳۳]. فرا مواد آکوستیک دسته‌ای از مواد مهندسی شده هستند که با استفاده از هندسه‌های تکرارشونده و ساختارهای تشدیدکننده، قابلیت کنترل انتشار و جذب امواج صوتی و ارتعاشی را دارند. یکی از چالش‌های اصلی تایرهای غیر بادی، افزایش سروصدا و ارتعاش ناشی از ساختارهای سلولی و

همچنین، شکل ۹ دو الگوی اصلی باربری تایرها را معرفی می‌کند؛ باربری از بالا در شکل ۹ (الف) و باربری از پایین در شکل ۹ (ب). تایرهای بادی از مکانیزم باربری از بالا استفاده می‌کنند. در این حالت، تمامی پره‌های تایر به‌جز ناحیه‌ی تماس با زمین، در تحمل بار مشارکت دارند و نیروی کششی ایجادشده در پره‌ها معادل بار اعمال شده به تایر است. این نوع باربری مشابه سازه‌های کششی متداول بوده و منجر به توزیع یکنواخت تنش و ایجاد ظرفیت باربری بالا می‌شود. در مقابل، تایرهای سخت و نیمه‌سخت، از جمله تایرهای لانه‌زنبوری، از مکانیزم باربری از پایین پیروی می‌کنند. در این تایرها، رینگ تحت فشار قرار گرفته و ناحیه‌ی تماس با زمین شکل می‌گیرد، به طوری که بار عمدتاً از طریق همین ناحیه منتقل می‌شود. در این شرایط، تنها بخش در تماس با زمین بار را تحمل کرده و سایر نواحی تایر سهم مستقیمی در باربری ندارند. این تایرها اگرچه سختی مناسبی دارند، اما توزیع نیرو در آن‌ها نسبت به تایرهای با باربری از بالا یکنواخت‌تر نیست.

در مجموع، تایرهای غیربادی در مقایسه با تایرهای بادی و لاستیک‌های جامد، از نظر پایداری، ظرفیت باربری و قابلیت اطمینان عملکردی مزایای قابل توجهی ارائه می‌دهند. علاوه بر این، به دلیل ساختار غیر پنوماتیکی، مشکلاتی نظیر پنچری و نیاز به تنظیم فشار هوا در این تایرها وجود ندارد.



شکل ۸ مدل تحلیلی: محور اصلی، نیروها، گشتاورها و زوایای شیب [۸]



شکل ۹ حالت‌های تحمل بار تایرها: (الف) باربری بالا، (ب) باربری پایین [20].



شکل ۶ تحقق اولیه مواد آکوستیک [۳۳].

اکثر دستگاه‌های کریستال صوتی که قبلاً گزارش شده‌اند، با دست ساخته شده‌اند، و اجزای پراکندگی را در یک محیط ویسکوالاستیک، عمدتاً هوا، آب یا اپوکسی جمع‌آوری می‌کنند، که منجر به ساختارهای بزرگ محدود به فرکانس‌های زیر ۱ مگاهرتز می‌شود. اخیراً، کریستال‌ها و دستگاه‌های آوایی به فرکانس‌های (۳۰-۳۰۰ مگاهرتز) و فراتر از آن با استفاده از میکروساخت و فناوری‌های ریز ماشین‌کاری مقیاس‌بندی شده‌اند [28]. در دهه آخر قرن بیستم، نوآوری در بررسی ساختارهای دی‌الکتریک دوره‌ای کریستال‌های فوتونی وجود داشت که ممکن است کارایی بیشتری نسبت به دستگاه‌های نوری سنتی در تولید، هدایت موج، تمرکز، شکافتن، کاهش سرعت و غیره از نور داشته باشند [۳۵] [۳۶].

۳. تحلیل استاتیکی تایرهای غیر بادی

سفتی یک شاخص حیاتی برای عملکرد تایر است و آزمون سفتی برای تعیین اینکه آیا تایرها نیازها را برآورده می‌کنند مهم است. باتوجه به شکل ۷ آزمون‌های استاتیکی سفتی عمودی، جانبی، طولی و پیچشی تایر بر روی دستگاه سختی‌سنج جامع تایر GDJ-4 انجام شده است [۳۷].



شکل ۷ آزمون سفتی استاتیک تایر HC [۳۷].

۴. تحلیل دینامیکی تایر غیر بادی

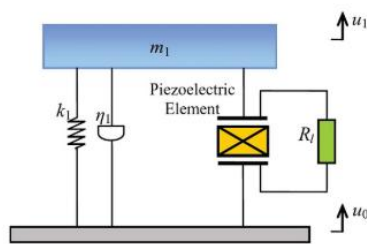
به‌عنوان یک سیستم دینامیکی پیچیده، بررسی سازوکار بارگذاری و ارتعاش تایر همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. شکل ۸ انواع نیروها و گشتاورهای وارد بر تایرهای غیربادی را نشان می‌دهد.

رانندگی و راحتی سواری تایرهای غیر پنوماتیک در حین رانندگی تأثیر می‌گذارد. حالت جانبی بر عملکرد فرمان خودرو تأثیر می‌گذارد. و حالت محیطی به طور مستقیم بر لغزش وسیله نقلیه در حین رانندگی تأثیر می‌گذارد. حالت شعاعی مهم‌ترین شکل لرزش لاستیک است [۳۹].

۲.۴. برداشت انرژی

برداشت انرژی فناوری تبدیل انرژی‌های محیطی مانند ارتعاشات، حرارت، نور خورشید و باد به انرژی الکتریکی قابل‌استفاده است. این فناوری در سال‌های اخیر به‌عنوان راهکاری مؤثر برای تأمین توان تجهیزات الکترونیکی کم‌مصرف و کاهش وابستگی به باتری‌های شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است. از میان منابع مختلف انرژی، ارتعاشات مکانیکی به دلیل فراوانی و دسترسی آسان، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای برداشت انرژی محسوب می‌شوند. به همین دلیل، برداشت‌کننده‌های انرژی مبتنی بر ارتعاش در دو دهه اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. علاوه بر این، توسعه فرا مواد و کریستال‌های صوتی امکان افزایش بازده و بهبود عملکرد سامانه‌های برداشت انرژی را فراهم کرده است [۴۰] [۴۱].

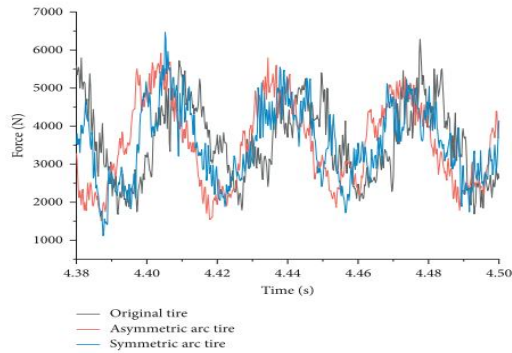
سه سازوکار اصلی مورد استفاده در برداشت انرژی ارتعاشی شامل تبدیل الکترومغناطیسی، الکترواستاتیکی و پیزوالکتریکی است. در سامانه‌های الکترومغناطیسی، حرکت نسبی بین آهنربا و سیم‌پیچ موجب القای جریان الکتریکی بر اساس قانون فارادی می‌شود. در روش الکترواستاتیکی، تغییر فاصله صفحات خازنی در اثر ارتعاشات باعث تغییر ظرفیت الکتریکی و تولید انرژی می‌شود. در مقابل، سامانه‌های پیزوالکتریکی از مواد پیزوالکتریک برای تبدیل مستقیم تنش و کرنش مکانیکی به ولتاژ الکتریکی استفاده می‌کنند که یک نمونه برداشت‌کننده پیزوالکتریک در شکل ۱۲ نشان داده شده است. به دلیل چگالی توان بالا، راندمان مناسب و قابلیت یکپارچه‌سازی با سازه‌های مهندسی، فناوری پیزوالکتریک متداول‌ترین روش برداشت انرژی در کاربردهای ارتعاشی محسوب می‌شود [۴۲].



شکل ۱۲ برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک [۴۳]

۱.۴. کاهش ارتعاش در تایرهای غیر بادی

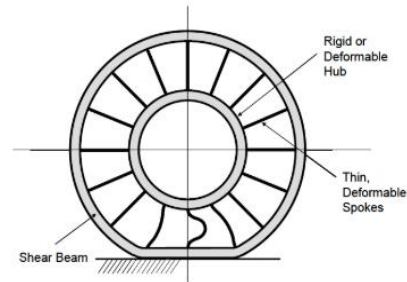
ارتعاش تایرها عامل مهمی است که بر راحتی و فرمان‌پذیری وسایل نقلیه تأثیر می‌گذارد. منبع ارتعاش در تایر غیر بادی در طول فرایند غلتش در درجه اول از کمانش و برگشت پرها تحت کشش در هنگام ورود و خروج از ناحیه تماس، بر همکنش بین پرهاهای گسسته و حلقه است؛ بنابراین پرها تأثیر زیادی بر لرزش تایرهای غیر بادی دارند.



شکل ۱۰ مقایسه توزیع نیرو در حوزه زمان سه نوع تایر [7].

مقایسه نیروی تحریک شعاعی سه نوع تایر در حوزه زمان در شکل ۱۰ نشان داده شده است [7].

یکی از منابع بالقوه ارتعاش طبق شکل ۱۱ در حین چرخاندن تایرهای غیر بادی، پدیده کمانش و عقب افتادن پرها در حالت کشش هنگام ورود و خروج از ناحیه تماس است [۳۸].



شکل ۱۱ پدیده کمانش پره در ناحیه تماس هنگام وارد شدن بار بر روی تایر

[۳۸]

ناپوستگی ساختارهای نگهدارنده تایرها باعث ایجاد یک مشکل ارتعاشی جدی می‌شود که مانع توسعه بیشتر تایرهای غیر بادی می‌شود. افزایش سرعت و ارتفاع مانع هنگام عبور از موانع، لرزش عمودی و طولی تایرها را تشدید می‌کند [۳۸]. لرزش لاستیک غیر بادی بسیار پیچیده است و اشکال ارتعاش آن را می‌توان به شعاعی، عرضی و محیطی تقسیم کرد. حالت شعاعی بر سختی

پره‌ها، حداکثر تنش برشی منعکس می‌شود. تأثیر آسیب شکستگی پره‌ها بر ویژگی‌های بار تاپر غیربادی با تغییر سفتی عمودی نشان داده می‌شود. سفتی شعاعی تاپر لانه‌زنبوری به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و تنش لایه برشی به دلیل آسیب پره‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. تأثیر آسیب شکستگی پره‌ها بر ویژگی‌های زمین تاپر غیربادی با تغییر فشار زمین آج نشان داده می‌شود. فشار زمین تحت تأثیر شکل ساختار سلول لانه‌زنبوری است. تأثیر آسیب شکستگی لانه‌زنبوری بر ویژگی‌های ارتعاش تاپر غیربادی در تغییر فرکانس طبیعی و حالت ارتعاش آشکار می‌شود. حالت لرزش تاپر لانه‌زنبوری پس از آسیب پره عمدتاً در رفتگی قسمت آسیب‌دیده است و فرکانس طبیعی آن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. با تشدید آسیب، سفتی تاپر لانه‌زنبوری کاهش می‌یابد، بنابراین فرکانس طبیعی آن روند کاهشی قابل توجهی را نشان می‌دهد [۴۵].

مطالعات انجام‌شده بر روی تاپره‌های غیر بادی لانه‌زنبوری نشان می‌دهد که آسیب‌های محیطی و شکستگی اجزای سلولی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی سازه دارند. نتایج بیانگر آن است که با افزایش میزان آسیب، جابه‌جایی مرکز رینگ و توزیع فشار تماس با زمین تغییر کرده و تنش‌های ایجادشده در پره‌ها، آج و لایه برشی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شده است که آسیب‌های محیطی موجب کاهش سفتی سازه و افت ظرفیت باربری تاپر می‌شوند، به طوری که شدت این تغییرات به محل و میزان آسیب بستگی دارد. علاوه بر این، افزایش تنش در لایه برشی می‌تواند احتمال گسترش آسیب و کاهش عمر کاری تاپر را افزایش دهد [۴۶].

بررسی آسیب‌های چندسلولی نیز نشان داده است که با افزایش تعداد سلول‌های آسیب‌دیده، تمرکز تنش در نواحی مجاور آسیب افزایش‌یافته و توزیع تنش در ساختار لانه‌زنبوری نامتقارن می‌شود. این پدیده موجب کاهش سفتی شعاعی، افزایش تغییر شکل موضعی و افت عملکرد مکانیکی تاپر می‌شود. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که سلامت ساختار سلولی نقش بسیار مهمی در حفظ ظرفیت باربری، پایداری سازه و عملکرد دینامیکی تاپره‌های غیر بادی دارد و طراحی مناسب هندسه سلولی می‌تواند حساسیت سازه را نسبت به آسیب‌های موضعی کاهش دهد [۴۷][۴۸].

۱.۵. طول عمر تاپره‌های غیربادی

دوام یکی از شاخص‌های کلیدی عملکرد این تاپرها است. طول عمر آن تأثیر مهمی بر اقتصاد و ایمنی دارد. مفهوم طراحی با عمر

تاپره‌های غیر بادی به دلیل ساختارهای سلولی، پره‌ای و لانه‌زنبوری، در حین حرکت تحت تغییر شکل‌های مکرر و ارتعاشات قابل توجهی قرار می‌گیرند. این ویژگی باعث می‌شود که این تاپرها بستر مناسبی برای استقرار سامانه‌های برداشت انرژی باشند. یکی از کاربردهای مهم، استفاده از مواد پیزوالکتریک در پره‌ها یا نوارهای برشی تاپر است که می‌توانند انرژی ناشی از تغییر شکل‌های دوره‌ای را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. انرژی تولیدشده می‌تواند برای تغذیه حسگرهای پایش سلامت سازه، حسگرهای اندازه‌گیری تنش و کرنش، حسگرهای دما و سامانه‌های ارتباطی بی‌سیم مورد استفاده قرار گیرد.

علاوه بر سامانه‌های پیزوالکتریک، برداشت‌کننده‌های انرژی الکترومغناطیسی نیز می‌توانند در ساختار تاپره‌های غیر بادی مورد استفاده قرار گیرند. در این روش، ارتعاشات ناشی از تماس تاپر با سطح جاده باعث ایجاد حرکت نسبی بین آهنربا و سیم‌پیچ شده و انرژی الکتریکی تولید می‌شود. همچنین نانوژنراتورهای ترموالکتریک به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور، قابلیت تبدیل انرژی حاصل از تماس و جدایش سطوح داخلی تاپر به انرژی الکتریکی را دارند و می‌توانند به‌عنوان منبع تغذیه سامانه‌های هوشمند به کار روند.

نمونه‌های کاربردی برداشت انرژی در سامانه‌های مرتبط با تاپر شامل: (۱) استفاده از المان‌های پیزوالکتریک در پره‌های تاپره‌های غیر بادی برای تأمین انرژی حسگرهای داخلی، (۲) به‌کارگیری برداشت‌کننده‌های الکترومغناطیسی جهت تغذیه سامانه‌های پایش وضعیت تاپر، (۳) استفاده از نانوژنراتورهای ترموالکتریک برای تولید انرژی از ارتعاشات و تماس‌های داخلی تاپر، و (۴) تأمین توان سامانه‌های پایش سلامت سازه و حسگرهای بی‌سیم در تاپره‌های هوشمند است. بنابراین، ترکیب فناوری برداشت انرژی با ساختارهای سلولی و فرا مواد می‌تواند زمینه توسعه نسل جدید تاپره‌های غیر بادی هوشمند و خودتأمین از نظر انرژی را فراهم کند [۳۸] [۳۹] [۴۰] [۴۱] [۴۲] [۴۳] [۴۴].

۵. تأثیر آسیب لانه‌زنبورها بر عملکرد تاپر

با افزایش بار، جابه‌جایی مرکز رینگ، فشار زمین و تنش هر یک از اجزای تاپر لانه‌زنبوری به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. شکستگی یک دیواره سلولی تأثیر کمی بر روی تاپر کلی دارد. در مقایسه با پره‌های پایینی، شکستگی پره‌های بالایی تأثیر بیشتری بر سفتی لاستیک دارد. در مقایسه با تاپر لانه‌زنبوری در شرایط خوب، تأثیر آسیب دیواره سلولی بر ویژگی‌های مکانیکی استاتیک تاپر لانه‌زنبوری عمدتاً در کاهش سفتی، کاهش حداکثر تنش

باتوجه به تنوع هندسه‌ها، مواد مورد استفاده و معیارهای ارزیابی در مطالعات مختلف، مقایسه مستقیم نتایج پژوهش‌ها دشوار است. از این رو، جدول ۱ مهم‌ترین مطالعات انجام شده در زمینه تایرهای غیر بادی را از نظر نوع هندسه، جنس ماده، سفتی شعاعی، مقاومت غلتشی و ویژگی‌های دینامیکی مقایسه می‌کند تا امکان ارزیابی جامع‌تر عملکرد ساختارهای مختلف فراهم شود.

محدود مستلزم آن است که هیچ آسیب خستگی در طول چرخه عمر محصولات رخ ندهد [۴۹]. روش طراحی عمر محدود برای مطالعه طول عمر و به دست آوردن طول عمر نامی تایرهای غیر بادی استفاده می‌شود. تایرهای خودرو نباید آسیب ببینند و مسافران باید در طول چرخه زندگی محافظت شوند.

۶. مقایسه مطالعات انجام شده بر روی تایرهای غیر بادی

جدول ۱ مقایسه مطالعات منتخب در زمینه تایرهای غیر بادی

مهم‌ترین نتایج	فرکانس طبیعی (Hz)	مقاومت غلتشی	سفتی شعاعی (N/mm)	جنس ماده	نوع هندسه	مرجع
ظرفیت باربری بیشتر و تنش کمتر نسبت به تایرهای معمولی	-	کمتر از تایر پنوماتیکی	-	پلی‌یورتان الاستومری	لانه‌زنبوری	Jin et al
سفتی عمودی به شدت تابع ضخامت و زاویه سلول است	-	-	وابسته به چگالی و زاویه سلول	پلیمر	لانه‌زنبوری	Gennari-Papageorgiou et al
بهترین تعادل میان سفتی و انعطاف	-	-	عملکرد بهینه در زاویه ۶۵° و ارتفاع ۲۱ میلیمتر	پلیمر	نوار برشی سلولی	Liu et al
کاهش قابل توجه اتلاف انرژی و مقاومت غلتشی	-	۳۹-۴۳٪ کاهش	اندکی کمتر از ساختار پیوسته	پلیمر/فراماده	ساختار متخلخل	مطالعات نوار برشی متخلخل
سفتی بیشتر از ساختار لانه‌زنبوری هم‌وزن	-	-	۲.۸۶-۴.۳۷	فراماده پلیمری	TPMS Auxetic	Kim et al (۲۰۲۴)
سفتی کمتر نسبت به ساختار TPMS	-	-	۱.۴۶	فراماده پلیمری	لانه‌زنبوری	Kim et al (۲۰۲۴)
سفتی جانبی بالا و ظرفیت باربری مناسب	-	-	۴۴۹.۱۷	پلیمر	لانه‌زنبوری بهینه‌شده	wang et al (۲۰۲۵)
کاهش ۸.۸-۹.۳٪ سفتی جانبی همراه با حفظ عملکرد شعاعی	-	-	۴۰۹.۵۲-۴۰۷.۴۲	پلیمر	لانه‌زنبوری بهینه‌شده NSGA-II	Wang et al (۲۰۲۵)

کامل بررسی نشده است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر توسعه ساختارهای هیبریدی مبتنی بر فرا مواد، بهینه‌سازی چندهدفه هندسه سلولی، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در طراحی و انجام آزمایش‌های تجربی گسترده برای اعتبارسنجی نتایج عددی متمرکز شوند. این رویکردها می‌توانند مسیر توسعه نسل جدید تایرهای غیر بادی با عملکرد بهتر، دوام بیشتر و مصرف انرژی کمتر را هموار سازند.

منابع

- [1] A. N. Gent and J. D. Walter, "Pneumatic tyre," *Composites*, vol. 8, no. 4, p. 271, 1977, doi: 10.1016/0010-4361(77)90231-2.
- [2] Y. Deng, Z. Wang, H. Shen, J. Gong, and Z. Xiao, "A comprehensive review on non-pneumatic tyre research," *Mater. Des.*, vol. 227, p. 111742, 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.111742.
- [3] A. Ahmadi, M. Masih-tehrani, and S. Ebrahimi-nejad, "Investigating the factors affecting tire wear of heavy and off-road vehicles and technologies for its wear detection and control," *Iran. Rubber Ind. J.*, 2021, doi: 10.22034/irm.2021.136712.
- [4] J. Jackowski, M. Wieczorek, and M. Żmuda, "Energy Consumption Estimation of Non-Pneumatic Tire and Pneumatic Tire During Rolling," *J. KONES Powertrain Transp.*, vol. 1, no. 1, 2018, doi: 10.5604/01.3001.0012.2463.
- [5] P. Dhrangdhariya, S. Maiti, and B. Rai, "Effect of Spoke Design and Material Nonlinearity on Non-pneumatic Tire Stiffness and Durability Performance," *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.*, vol. 14, no. 2, 2021, doi: 10.4271/06-14-02-0008.
- [6] J. Jackowski, M. Żmuda, M. Wieczorek, and A. Zuska, "Quasi-static research of ATV/UTV non-pneumatic tires," *Energies*, vol. 14, no. 20, pp. 1-12, 2021, doi: 10.3390/en14206557.
- [7] H. Zhou, H. Li, Y. Mei, G. Wang, C. Liu, and L. Zhang, "Research on Vibration Reduction Method of Nonpneumatic Tire Spoke Based on the Mechanical Properties of Domestic cat's Paw Pads," *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9976488.
- [8] M. Sardinha, M. Fátima Vaz, T. R. P. Ramos, and L. Reis, "Design, properties, and applications of non-pneumatic tires: A review," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, no. June, 2023, doi: 10.1177/14644207231177302.
- [9] Z. Xiao, Y. Q. Zhao, F. Lin, M. M. Zhu, and Y. J. Deng, "Studying the fatigue life of a non-pneumatic wheel by using finite-life design for life prediction," *J. Mech. Eng.*, vol. 64, no. 1, pp. 56-67, 2018, doi: 10.5545/sv-jme.2017.4695.
- [10] S. R. Pajtas, "Polyurethane Non-Pneumatic Tire Technology- Development and Testing Histor," *JSTOR*, 1990, [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/44554053>.

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۱، ساختارهای لانه‌زنبوری در اغلب مطالعات عملکرد بهتری از نظر سفتی و ظرفیت باربری نشان داده‌اند، درحالی‌که ساختارهای مبتنی بر فرا مواد و هندسه‌های متخلخل توانسته‌اند مقاومت غلتشی و ارتعاشات را کاهش دهند. همچنین مشاهده می‌شود که عملکرد تایرهای غیر بادی به‌شدت به هندسه سلولی، خواص مواد و شرایط بارگذاری وابسته است و هنوز یک طراحی بهینه واحد برای تمامی کاربردها وجود ندارد.

۷. نتایج

در این مقاله، مطالعات انجام‌شده در زمینه تایرهای غیر بادی و کاربرد ساختارهای سلولی و فرا مواد در بهبود عملکرد آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هندسه ساختار داخلی تأثیر مستقیمی بر رفتار مکانیکی و دینامیکی تایر دارد. در میان هندسه‌های مختلف بررسی‌شده، ساختارهای لانه‌زنبوری به دلیل توزیع مناسب تنش، سفتی بیشتر و ظرفیت باربری بالاتر، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به ساختارهای مثلی، صفحه‌ای و پره‌های منحنی از خود نشان دادند. همچنین مشخص شد که استفاده از نوار برشی سلولی با زاویه ۶۵ درجه و ارتفاع ۲۱ میلی‌متر می‌تواند تعادل مناسبی میان استحکام سازه‌ای و انعطاف‌پذیری ایجاد کند.

بررسی عملکرد دینامیکی تایرهای غیر بادی نشان داد که فرکانس‌های طبیعی این سازه‌ها به‌شدت تحت تأثیر هندسه و میزان آسیب قرار دارند. نتایج مطالعات حاکی از آن بود که ده فرکانس طبیعی نخست تایرهای لانه‌زنبوری در محدوده ۹ تا ۶۵ هرتز قرار دارند و با افزایش آسیب سازه‌ای، این فرکانس‌ها تا حدود ۱۹.۳۷ درصد کاهش می‌یابند. علاوه بر این، استفاده از پره‌های نامتقارن و هندسه‌های بهینه‌شده می‌تواند موجب کاهش ارتعاشات شعاعی و بهبود کیفیت سواری شود.

مقایسه ساختارهای مختلف نشان داد که هرچند هندسه‌های لانه‌زنبوری از نظر سفتی و تحمل بار عملکرد برتری دارند، اما ساختارهای متخلخل و مبتنی بر فرا مواد مزایای قابل توجهی در کاهش اتلاف انرژی و کنترل ارتعاشات ارائه می‌کنند. نتایج نشان داد که استفاده از نوارهای برشی متخلخل می‌تواند مقاومت غلتشی را حدود ۳۹ تا ۴۳ درصد نسبت به ساختارهای پیوسته کاهش دهد که این موضوع نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و افزایش بازده عملکرد تایر ایفا می‌کند.

باوجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، هنوز چالش‌هایی در زمینه طراحی بهینه، ساخت و ارزیابی عملکرد تایرهای غیر بادی وجود دارد. بخش عمده مطالعات موجود مبتنی بر تحلیل‌های عددی بوده و تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی محدودی در این زمینه انجام شده است. همچنین اثرات خستگی، سایش، شرایط محیطی و عملکرد بلندمدت فرا مواد در ساختار تایرهای غیر بادی به طور

- doi: 10.15282/IJAME.17.3.2020.10.0614.
- [23] J. Phromjan and C. Suvanjumrat, "Non-pneumatic tire with curved isolated spokes for agricultural machinery in agricultural fields: Empirical and numerical study," *Heliyon*, vol. 9, no. 8, p. e18984, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18984.
- [24] W. Cai and V. Shalaev, *Optical Metamaterials*. 2010.
- [25] D. Bílková, "Modern methods of parametric estimation: Estimation using L-moments and TL-moments," *APLIMAT 2015 - 14th Conf. Appl. Math. Proc.*, pp. 53–79, 2015.
- [26] X. Fang, P. Sheng, J. Wen, W. Chen, and L. Cheng, "A nonlinear metamaterial plate for suppressing vibration and sound radiation," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 228, no. June, p. 107473, 2022, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107473.
- [27] P. F. Pai, H. Peng, and S. Jiang, "Acoustic metamaterial beams based on multi-frequency vibration absorbers," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 79, pp. 195–205, 2014, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2013.12.013.
- [28] S. Dezania and M. Azadi, "A review on metamaterial types, additive manufacturing technique and its application in automotive industry," *Sci. J. Iran. Soc. Mech. Eng.*, 2021.
- [29] R. Liu, C. Ji, Z. Zhao, and T. Zhou, "Metamaterials: Reshape and Rethink," *Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 179–184, 2015, doi: 10.15302/J-ENG-2015036.
- [30] J. Jung, H. G. Kim, S. Goo, K. J. Chang, and S. Wang, "Realisation of a locally resonant metamaterial on the automobile panel structure to reduce noise radiation," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 122, pp. 206–231, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.11.050.
- [31] C. Y. Wang, W. W. Wang, W. Z. Zhao, Y. Wang, and G. Zhou, "Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system," *Compos. Part B Eng.*, vol. 153, pp. 78–96, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.07.024.
- [32] J. Fan et al., "A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends," *Mater. Today*, vol. 50, no. xx, pp. 303–328, 2021, doi: 10.1016/j.mattod.2021.04.019.
- [33] G. Ma and P. Sheng, "Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons," *Sci. Adv.*, vol. 2, no. 2, 2016, doi: 10.1126/sciadv.1501595.
- [34] A. Ahmadi and A. Shooshtari, "Numerical investigation of vibration absorber plate, under non-linear input," *ISAV*, 2022, [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/1611196>.
- [35] R. H. Olsson and I. El-Kady, "Microfabricated phononic crystal devices and applications," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 1, 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/1/012002.
- [36] V. Laude, "Phononic Crystals," *Phononic Cryst.*, 2020, doi: 10.1515/9783110641189.
- [37] H. Liu, J. Zhong, C. Lee, S. W. Lee, and L. Lin, "A C. Creager, "Design and Analysis of Shape Memory Spring Tires for Martian and Lunar Rover Vehicles," no. June, 2023.
- [12] J. Phromjan and C. Suvanjumrat, "The Contact Patch Analysis of Solid Tire on Drum Testing by Finite Element Method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 886, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/886/1/012049.
- [13] J. Ju, B. Ananthasayanam, J. D. Summers, and P. Joseph, "Design of cellular shear bands of a non-pneumatic tire -investigation of contact pressure," *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 598–606, 2010, doi: 10.4271/2010-01-0768.
- [14] European Patent Application, "Designated extension states," *Office*, vol. 1, no. 19, pp. 1–18, 2007, [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/EP1795201A1/es>.
- [15] J. Ju, M. Veeramurthy, J. D. Summers, and L. Thompson, "Rolling resistance of a nonpneumatic tire having a porous elastomer composite shear band," *Tire Sci. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 154–173, 2013, doi: 10.2346/tire.13.410303.
- [16] J. Ma, J. D. Summers, and P. F. Joseph, "Numerical simulation of tread effects on the interaction between cellular shear band based non-pneumatic tire and sand," *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 8, no. January 2011, pp. 769–779, 2011, doi: 10.1115/DETC2011-47044.
- [17] J. Ma, J. D. Summers, and P. F. Joseph, "Numerical simulation of tread effects on the interaction between cellular shear band based non-pneumatic tire and sand," *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 8, no. May, pp. 769–779, 2011, doi: 10.1115/DETC2011-47044.
- [18] T. Tepzz, "Tepzz¥¥ ¥6¥5a_t (11)," vol. 1, no. 19, pp. 1–13, 2018.
- [19] O. Wyatt, P. Chatzistergos, E. D. Pasiou, N. Chockalingam, and E. Ganniari-Papageorgiou, "Exploration of the optimum finite element modelling techniques for honeycomb structures for non-pneumatic tyre applications," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 0–4, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.06.040.
- [20] 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," *Eur. J. Mech. - A/Solids*, vol. 102, no. August, p. 105120, 2023, doi: 10.1016/j.euromechsol.2023.105120.
- [21] J.-Y. Seong, S. Ji, D. Choi, and S. Lee, "Optimizing Generative Adversarial Networks Models for Non-Pneumatic Tire Design," pp. 1–7, 2023, doi: 10.1145/3599957.3606243.
- [22] Z. Hryciów, J. Jackowski, and M. Żmuda, "The Influence of Non-Pneumatic Tyre Structure on its Operational Properties," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 8168–8178, 2020,

- [48] H. Li, H. Zhou, J. Yang, J. Ge, G. Wang, and T. Xu, "Study of the dynamic performance of rolling non-pneumatic tires using finite element method," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 7, pp. 1–17, 2022, doi: 10.1007/s40430-022-03532-9.
- [49] C. Suvanjumrat and R. Rugsaj, "the Dynamic Finite Element Model of Non-Pneumatic Tire Under Comfortable Riding Evaluation," *Int. J. GEOMATE*, vol. 19, no. 76, pp. 62–68, 2020, doi: 10.21660/2020.76.9135.
- comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 5, no. 4, 2018, doi: 10.1063/1.5074184.
- [38] N. Ullah, M. Shabiul Islam, A. Hoque, W. H. Yong, M. S. Soliman, and M. T. Islam, "A compact-sized four-band metamaterial-based perfect absorber for electromagnetic energy harvesting applications," *Opt. Laser Technol.*, vol. 168, no. July 2023, p. 109836, 2024, doi: 10.1016/j.optlastec.2023.109836.
- [39] G. Hu, L. Tang, J. Liang, C. Lan, and R. Das, "Acoustic-elastic metamaterials and phononic crystals for energy harvesting: A review," *Smart Mater. Struct.*, vol. 30, no. 8, 2021, doi: 10.1088/1361-665X/ac0cbc.
- [40] L. T. Govindaraman, A. Arjunan, A. Baroutaji, J. Robinson, and A. G. Olabi, "Metamaterials for Energy Harvesting," *Encycl. Smart Mater.*, pp. 522–534, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-815732-9.00127-3.
- [41] D. F. Berdy, P. Srisungsitthisunti, B. Jung, X. Xu, J. F. Rhoads, and D. Peroulis, "Low-frequency meandering piezoelectric vibration energy harvester," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, no. 5, pp. 846–858, 2012, doi: 10.1109/TUFFC.2012.2269.
- [42] J. Lueke, A. Badr, E. Lou, and W. A. Moussa, "Microfabrication and integration of a sol-gel PZT folded spring energy harvester," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 6, pp. 12218–12241, 2015, doi: 10.3390/s150612218.
- [43] M. I. Hussein, M. J. Leamy, and M. Ruzzene, "Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress, and future outlook," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 66, no. 4, 2014, doi: 10.1115/1.4026911.
- [44] Y. Fu, H. Ouyang, and R. B. Davis, "Effects of electrical properties on vibrations via electromechanical coupling in triboelectric energy harvesting," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 53, no. 21, 2020, doi: 10.1088/1361-6463/ab7792.
- [45] L. Tang and Y. Yang, "A multiple-degree-of-freedom piezoelectric energy harvesting model," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 23, no. 14, pp. 1631–1647, 2012, doi: 10.1177/1045389X12449920.
- [46] W. Liu, S. Liu, X. Li, Q. Zhang, C. Wang, and K. Li, "Static Stiffness Properties of High Load Capacity Non-Pneumatic Tires with Different Tread Structures," *Lubricants*, vol. 11, no. 4, 2023, doi: 10.3390/lubricants11040180.
- [47] S. Biggers, "A COMPUTATIONAL METHOD FOR ANALYSIS OF MATERIAL PROPERTIES OF A NON-PNEUMATIC TIRE AND THEIR EFFECTS ON STATIC LOAD-DEFLECTION , VIBRATION , AND ENERGY LOSS FROM IMPACT ROLLING OVER OBSTACLES A Thesis Presented to The Graduate School of Clemson University," no. August, 2010.