

مروری بر تایرهای غیرپنوماتیک ساخته شده از فرامواد با پرینتر سه بعدی

دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، shokouhdzn@gmail.com

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، m.azadi.1983@gmail.com

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و صنعت، دانشگاه نروژی علم و فناوری، تروندهام، نروژ، javad.razavi@ntnu.no

شکوه دزبانیان

محمد آزادی*

سید محمد جواد رضوی

چکیده

در این مقاله، مروری بر انواع فرامواد و تایرهای غیرپنوماتیک صورت گرفته است. نتایج نشان داده است، مقاومت غلتشی در تایرهای پنوماتیک بین ۴ تا ۵ درصد است در حالی که در تایرهای غیرپنوماتیک کمتر از ۳ درصد است. در نتیجه تایرهای غیرپنوماتیک مصرف سوخت کمتر و راندمان بالاتری نسبت به تایرهای پنوماتیک دارند. همچنین حداکثر تنش در تایر غیرپنوماتیک تولید شده به روش سه بعدی ۱۲ درصد افزایش یافته است با این حال حدوداً ۸۲ درصد سفتی عمودی بهبود یافته است. استفاده از فرامواد در لایه برشی در صورتی که انرژی کرنشی در لایه میانی ۵۰ درصد کمتر از دیگر لایه‌ها باشد، توانایی کنترل ویژگی‌های خمش برشی را دارد. علاوه بر این نشان داده شده است، توانایی بالای تولیدات افزایشی در تولید ساختارهای پیچیده باعث شده پرینترهای سه بعدی روش مناسبی برای تولید این نوع تایرها باشند. در مواردی تایرهای غیرپنوماتیک با تحمل دمای بالا برای کاربرد در هوافضا نیز، اقداماتی صورت گرفته است. **واژه‌های کلیدی:** تایر خودرو، تایر غیرپنوماتیک، فرامواد، پرینتر سه بعدی، تولید افزایشی، کاربرد هوافضایی.

Review on Non-pneumatic Tires Fabricated by Metamaterials with 3D-printer

Sh. Dezianian

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

M. Azadi

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

S. M. Javad Razavi

Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway

Abstract

In this article, a review has been made on the types of metamaterials and non-pneumatic tires. The results show that rolling resistance in pneumatic tires was between 4 and 5%, while less than 3% in non-pneumatic tires. As a result, non-pneumatic tires have lower fuel consumption and higher efficiency than pneumatic tires. Moreover, the maximum tension in the non-pneumatic tire produced by the three-dimensional method increased by 12%. However, the vertical stiffness improved by about 82%. The use of metamaterials in the shear layer, if the strain energy in the middle layer was 50% less other than layers, can control the shear bending characteristics. In addition, it has been shown that the high ability of additive manufacturing in the production of complex structures has made 3D printers producing for suitable this type of tire. In some cases, non-pneumatic tires with high-temperature tolerance for use in aerospace have also been taken.

Keywords: Vehicle tire; non-pneumatic tire; Metamaterials; 3D-printer; Additive manufacturing; Aerospace application.

۱- مقدمه

امروزه استفاده از مواد با وزن کم و استحکام و کارایی بالا در طراحی سازه‌های مکانیکی، یک امر ضروری به حساب می‌آید. فراماده به موادی گفته می‌شود که ویژگی‌های غیرمعمول و بر خلاف طبیعت دارد [۱-۳].

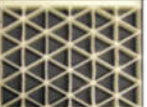




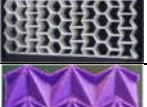


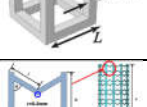
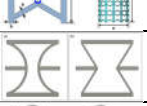
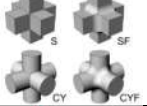
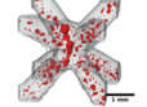


این مواد به طور کلی به چهار گروه مختلف تقسیم می‌شوند. فرامواد الکترومغناطیسی که منجر به بازتاب امواج در خلاف جهت طبیعی می‌شود [۴]، فرامواد آکوستیک با کاربردهایی در کنترل سروصدا و ارتعاش با افزایش جذب صدا [۵]، فرامواد گرمایی (حرارتی) که توسط آن‌ها می‌توان انتقال گرما را تقریباً مطابق با خواسته خود دستکاری کرد [۶] و فرامواد مکانیکی که خود انواع مختلف دارد. به عنوان مثال موادی با ضریب پواسون منفی [۷]، پنتامودها [۸] که جامداتی با خواص سیالات است و مواد با تراکم‌پذیری منفی [۹] که

تحت فشار منبسط می‌شوند و سفتی منفی [۱۰] از جمله فرامواد مکانیکی به شمار می‌آید. از جمله ویژگی‌هایی که فرامواد دارند می‌توان به وزن کم، جذب انرژی زیاد، کنترل ارتعاش و عملکرد گرمایی پیشرفته اشاره کرد [۱۱].

فراماده‌ها از تکرار سلول‌های واحد در کنار یک دیگر ساخته می‌شوند. به طور کلی ساختارها سلولی را می‌توان به ۴ دسته تقسیم‌بندی کرد. دسته اول شامل ساختارهایی مانند فوم‌ها است. دسته دوم با عنوان سازه‌های مشبک شناخته می‌شوند. دسته سوم و چهارم نیز شامل سطوح حداقل دوره‌ای سه‌گانه (TPMS)^۱ تحت عنوان صفحه TPMS و اسکلت TPMS است [۱۲-۱۳]. لازم به ذکر است تا کنون بیش از ۱۷۰۰۰ ساختار سلولی طراحی و ساخته شده‌اند [۱۴].

¹ Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)

جدول ۱- سلول‌های فرامادی ساخت شده به روش افزایشی

مرجع	روش ساخت	ماده	سلول
[۱۵]	مدل سازی رسوب ذوبی (FDM) ^۲	پلی لاکتیک اسید (PLA) ^۲	
[۱۶]	ذوب لیزری انتخابی (SLS) ^۶	ترموپلاستیک پلی ارتان (TPU) ^۵	
[۱۷]	FDM	پلی اتیلن گلیکول (PETG) ^۷	
[۱۸]	پرینتر چهاربعدی FDM	پلیمر حافظه شکل (SMP) ^۴	
[۱۹]	FDM	آکریونیترویل بوتادین استایرن (ABS) ^۱	
[۲۰]	پرینتر چهاربعدی FDM	پلیمر حافظه شکل PLA	
[۲۱]	FDM	PLA	
[۲۲]	FDM	PLA	
[۲۳]	FDM	پلی کربنات	
[۲۴]	تولید افزایشی	SMP	
[۲۵]	استریولیتوگرافی (SLA)	رزین	
[۲۶]	SLS	پلی آمید	
[۲۷]	SLM	AlSi10Mg	
[۲۸]	EBM	تیتانیوم	

یکی از مزایای عمده تولیدات افزایشی (AM)^۱ توانایی آن‌ها در تولید قطعات با هندسه پیچیده است [۲۹]. AM شامل پرینترهای سه، چهار و پنج‌بعدی است. پرینترهای سه‌بعدی به هفت دسته تقسیم می‌شوند که هر کدام فرآیند مخصوص به خود دارد [۳۰-۳۱]. پرینت چهاربعدی به عنوان پرینت سه‌بعدی در طول زمان تعریف می‌شود [۳۲-۳۶]. پرینت پنج‌بعدی نیز شاخه جدیدی از تولید مواد افزایشی است. در این فناوری، نازل و صفحه ساخت جمعاً دارای پنج درجه آزادی است [۳۷-۳۹].

یکی از روش‌های طراحی در فرامواد، الهام گرفتن از طبیعت است. با این حال، روش‌های دیگری از جمله فرایند بهینه‌سازی توپولوژی [۴۰-۴۲] مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که فرامواد دارای ساختارهای پیچیده است، تولیدات افزایشی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. پیشرفت‌های اخیر در فرآیندهای تولید افزایشی، از جمله پرینترهای سه‌بعدی، چهاربعدی و پنج‌بعدی تولید ساختارهای سلولی بهینه شده با طیف وسیعی از مواد را امکان پذیر کرده است. در جدول (۱) سلول‌های فرامادی ساخته شده به روش تولید افزایشی نشان داده شده است.

علاوه بر این، در مراجع [۴۳-۴۸] سلول‌های فلزی تولید شده، به روش‌های مختلف ساخت افزایشی، با توابع هدف و قیود متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تایرهای پنوماتیک

در خودروها عامل اصلی که حرکت را ایجاد می‌کند، تایر است. از جمله وظایف تایرها می‌توان به تحمل بار و نیروهای عمودی، تولید و تحمل نیروهای جانبی و طولی و همچنین جذب و مستهلک کردن مقداری از ضربات و ارتعاشات ناشی از حرکت خودرو در جاده‌های ناهموار اشاره کرد [۴۹-۵۱]. این نوع تایرها از ۳ جز اصلی هوا، لایه-هایی از جنس پلاستیک و آج تشکیل شده است. لایه‌های پلاستیکی می‌توانند در دو راستا باشند و تایر با لایه‌های شعاعی^۲ و مورب^۳ را ایجاد کنند [۵۲].

انواع مختلفی از تایرهای پنوماتیک طراحی و تولید شده است. از جمله تایرهای هوشمند [۵۳] و تایرهای خود ترمیم شونده [۵۴]. تایرهای پنوماتیک به دلیل چهار مزیت عمده در بازار مورد توجه قرار گرفته‌اند: (۱) اتلاف انرژی کم در سطوح ناهموار، (۲) سختی عمودی کم، (۳) فشار تماسی کم و (۴) جرم کم. با این حال، تایرهای پنوماتیک معایب مختلفی نیز دارند از جمله: (۱) پنچر شدن و احتمال خرابی فاجعه بار هنگام رانندگی، (۲) نگهداری لازم برای فشار مناسب داخلی هوا و (۳) روش پیچیده ساخت.

¹ Additive Manufacturing (AM)

² Radial

³ Bias

۳- تایرهای غیرپنوماتیک

پژوهشگران طی دهه‌های اخیر استفاده از سلول‌های فرامادی را جایگزین هوای تایر کرده‌اند. آنها معتقدند تایرهای غیرپنوماتیک (NPT)^۱ می‌توانند خواصی متفاوت و مزایای زیادی نسبت به تایرهای پنوماتیک داشته باشند. NPTها به طور کلی از چهار جز هسته، سلول، لایه برشی و آج تشکیل شده است [۵۷-۵۵]. در شکل ۱ ساختار کلی تایرهای غیرپنوماتیک نشان داده شده است.

به طور معمول، هسته از جنس آلایزهای آلومینیوم ساخته می‌شود [۴۲]. پس از هسته سلول‌های فرامادی که منحصر به فردترین جز NPTها هستند قرار دارد. این سلول‌ها بر پایه مواد پلی اورتان ساخته می‌شوند و به طور یکنواخت کنار یک دیگر قرار گرفته تا عاملی برای اتصال هسته و لایه برشی باشند. لایه برشی نیز خود با دو تقویت کننده یعنی حلقه‌های داخلی و خارجی عمدتاً از جنس فولاد احاطه شده است و سپس آج ساخته شده از لاستیک مصنوعی، ساختار یک تایر غیرپنوماتیک را کامل می‌کند. در میان اجزا نام برده سلول‌های فرامادی به این دلیل که جایگزین هوای تایر شده‌اند نقش مهم و اساسی دارند. از آنجایی که تایر وظیفه تحمل بارهای عمودی را دارد، باید به اندازه کافی استحکام و سفتی داشته باشد. از طرف دیگر در مواجه با موانع و پستی بلندی‌های جاده باید انعطاف‌پذیری کافی را نیز داشته باشند. سفتی و انعطاف‌پذیری دو ویژگی متضاد با یک دیگر هستند که افزایش هر یک باعث کاهش دیگری می‌شود. در نتیجه سلول‌های یک NPT به ترکیبی از سفتی و انعطاف‌پذیری تحت بارگذاری تنش- تراکمی چرخه‌ای نیاز دارند و این بدین معناست که به حداقل رساندن تنش- های موضعی سلول‌ها در هنگام بارگذاری چرخه‌ای در حین رانندگی بسیار مهم است. به عبارت دیگر، طراحی سلول‌های مقاوم در برابر خستگی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۵۷].

علاوه بر این، سلول‌ها عمدتاً در اثر فشار، کشش، خمش یا کمانش دچار تغییرشکل می‌شوند. لذا انتخاب مواد و طراحی سلول‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تایرهای غیرپنوماتیک که در معرض بار قرار دارند را از لحاظ تغییرشکل سلول‌ها و نیروهای اعمالی می‌توان به سه ناحیه تماسی، آزاد و پشتیبان تقسیم کرد. ناحیه تماسی در واقع ناحیه تماس بین لایه برشی و زمین است. در این ناحیه سلول‌ها دچار کمانش می‌شوند و باری روی لایه برشی و حلقه‌ها اعمال نمی‌شود. ناحیه آزاد، ناحیه بین لبه تماس و ناحیه‌ای است که در آن سلول‌ها درگیر می‌شوند و ناحیه پشتیبان که در آن هسته تایر توسط سلول‌ها از قسمت بالایی لایه برشی نگه داشته می‌شود و لذا تحت کشش قرار دارند. در واقع در ناحیه تماسی تنش‌های تماسی نرمال و مماسی وجود دارد، در ناحیه آزاد هیچ نوع تنش و تغییرشکلی وجود ندارد و در ناحیه پشتیبان تنش شعاعی ناشی از سلول‌ها وجود دارد [۵۸].

۳-۱- مزایای تایرهای غیرپنوماتیک

نیروهایی که به تایر اعمال می‌شود در یک نقطه اثر نمی‌کند، بلکه برآیند این نیروها در ناحیه تماسی اتفاق می‌افتد. نکته قابل توجه در

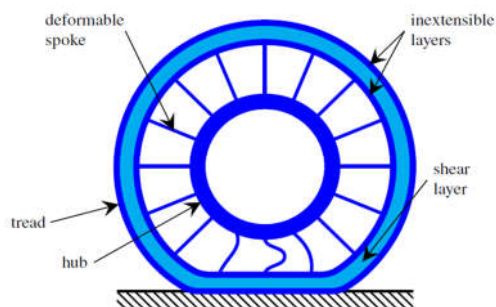
این ناحیه عدم توزیع فشار یکنواخت است. به عبارت دیگر هنگام چرخش تایر، توزیع فشار در ناحیه تماسی نامتقارن و در نیمه جلویی، سطح توزیع فشار بیش‌تر و عاملی برای ایجاد مقاومت غلتشی است. در تایرهای پنوماتیک هنگام ترمزگیری و شتاب‌گیری خودرو، آج تایر برای تحمل کردن این نیروها خم می‌شود و لغزش بیشتری تولید می‌شود. همچنین در صورتی که این تایرها به اندازه کافی باد نشده باشند مقاومت غلتشی افزایش می‌یابد. علاوه بر این موارد عوامل مختلفی همچون فشار داخلی، مدول یانگ، بار روی تایر و ابعاد تایر بر مقاومت غلتشی موثر است [۶۱-۵۹]. مقاومت غلتشی باعث افزایش دمای تایر می‌شود و افزایش دما تایر منجر به کاهش مقاومت در برابر سایش و مقاومت در برابر استحکام خستگی خمشی تایر می‌شود [۵۰ و ۵۲]. از مزایایی که تایرهای غیرپنوماتیک دارند می‌توان به کاهش مقاومت غلتشی اشاره کرد. نتایج نشان می‌دهد تایرهای غیر پنوماتیک مقاومت غلتشی کمتری نسبت به تایر پنوماتیک هم اندازه خود دارند. مقاومت غلتشی کمتر باعث کاهش مصرف سوخت نیز می‌شود [۵۷].

واضح‌ترین ویژگی NPTها رفع نگرانی برای پنچر شدن و عدم نیاز به تنظیم فشار هوای داخل تایر است [۶۲]. همچنین به دلیل ساختار مشبک و عدم نیاز به دیواره‌های جانبی، این نوع تایرها از مواد خام اولیه کمتری استفاده می‌کنند. بنابراین، NPTها باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و هزینه نیز می‌شوند [۶۳].

از دیگر مزایای تایرهای غیرپنوماتیک می‌توان به فرآیند ساده تولید آن‌ها اشاره کرد. برای تولید این تایرها به دلیل ساختار پیچیده‌ای که دارند از پرینترهای سه‌بعدی استفاده می‌شود و لذا فرآیند ساخت ساده‌تری نسبت به تایرهای پنوماتیک دارند. مزیت دیگر این نوع تایرها بهبود آسایش مسافران به دلیل جذب ضربه بهتر است [۶۲].

۳-۲- کاربرد تایرهای غیرپنوماتیک

پلاریس بزرگترین تولید کننده خودروهای نظامی، از تایرهای غیرپنوماتیک برای خودروهای خود استفاده کرده است. ظرفیت حمل بار بسیار بالا همچنین ادامه دادن به مسیر بدون خرابی حتی در وجود انفجار از ویژگی‌ها و کاربردهای این نوع تایر است [۶۳]. شرکت صنعتی Kenda Rubber نیز نوعی تایر با هدف جذب ضربات به منظور استفاده در ماشین‌های چمن‌زنی طراحی کرده است. از جمله کاربردهای دیگری که تایرهای غیرپنوماتیک دارند استفاده از آن‌ها در تایر صندلی‌ها چرخدار، کاوشگرهای فضایی، اتومبیل‌ها، کامیون‌ها، دوچرخه‌ها، وسایل نقلیه نظامی و غیره است [۵۸].



شکل ۱- ساختار کلی تایرهای غیرپنوماتیک [۳۷]

^۱ Non-pneumatic Tire (NPT)

۳-۳- شرکت‌های تولید کننده تایرهای پنوماتیک

شرکت‌هایی که در ساخت تایرهای غیرپنوماتیک فعالیت دارند عبارت‌اند از: میشلن^۱، گودیر^۲، یونی رویال^۳، یوکوهاما^۴، بریجستین^۵، بریتک^۶، تویو^۷، هانکوک^۸، پلاریس^۹، آمریتیره^{۱۰}، بیگرپ^{۱۱}، بوئینگ^{۱۲}، کامهوتایر^{۱۳} و فن‌آوری‌های ارتجاعی^{۱۴} که در ادامه به معرفی تایرهای تولید شده و فعالیت‌های صورت گرفته پرداخته خواهد شد [۶۳].

میشلن یک شرکت تولید کننده تایر در فرانسه است. یکی از تایرهای این شرکت با استفاده از فناوری Uptis به معنی ضد سوراخ شدن منحصر به فرد شده است و به این دلیل که دچار خرابی نمی‌شوند و نیاز به تعویض تایر نیست ایمن‌تر هستند و همچنین با کاهش مواد خام مورد نیاز به محیط زیست کمک می‌کنند. چهار ویژگی عمده در این نوع تایرها عبارت‌اند از: غیرپنوماتیک، متصل، تولید شده به روش پرینتر سه‌بعدی و استفاده از مواد ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر که باعث شده است این شرکت جوایز متعددی را دریافت کند [۶۳]. علاوه بر این شرکت میشلن تایر دیگری با نام Tweel را عرضه کرده است.

این تایر در شکل ۲ قسمت الف نشان داده شده است. از ویژگی‌های بارز این تایر می‌توان به سبک بودن آن اشاره کرد. این تایرها برای انواع جاده مناسب است و طراحی منحصر به فرد آن‌ها باعث پایداری بهتر و کاهش خستگی راننده به دلیل اثرات برگشتی می‌شود همچنین ۲ تا ۳ برابر بیشتر از تایرهای پنوماتیک معمولی دوام می‌آورند.

تایر Tweel از جنبه‌های مختلفی بررسی شده است تا کارایی لازم و کافی را داشته باشند. از جمله فعالیت‌های صورت گرفته در خصوص این تایر قابلیت ساخت آن‌ها با پرینترهای سه‌بعدی است. این تحقیق توسط سووانجومات و روگساج [۶۴] انجام شده است. در این پژوهش نمونه‌های استاندارد تست کشش یک بار به کمک پرینتر سه‌بعدی و بار دیگر به کمک یک واتر جت از سلول‌های تایر Tweel تهیه و با یک یگر مقایسه شده است. با نتایج به دست آمده، شبیه‌سازی صورت گرفته و نتایج آن با تایر تولید شده به روش سه‌بعدی مقایسه شده است. نتایج که شامل حداکثر تنش و سختی عمودی است، نشان می‌دهد تایر تولید شده به روش پرینتر سه‌بعدی تفاوتی با تایر اصلی ندارد. ولی با توجه به توانایی پرینترهای سه‌بعدی برای تولید اشکال پیچیده این روش می‌تواند مفیدتر باشد. پژوهشگران نام برده تایر غیرپنوماتیک Tweel را از جنبه دینامیکی نیز مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل المان محدود دینامیکی برای این تایر با نیروی عمودی ۱۴ کیلونیوتن و سرعت ۱۱ کیلومتر بر ساعت در دو نوع جاده مسطح و انحنا دار ایجاد شده و با نتایج حاصل از آزمون تجربی مقایسه شده است. همزمان دوربین

فیلبردراری پرسرعت برای ثبت تغییرشکل سلول‌های تایر در موقعیت‌های مختلف زاویه‌ای متناسب با زمان مورد استفاده نیز ثبت شده است. نتایج مطابقت خوبی بین مدل المان محدود و نتایج تجربی نشان داده است [۶۵]. علاوه بر این آزمون خمش سه نقطه و شبیه‌سازی این آزمون به کمک روش اجزای محدود نیز توسط این پژوهشگران انجام شده است [۶۶].

این محققان در پژوهشی دیگر، با مدل‌سازی اجزای محدود و آزمون‌هایی بر تایر واقعی اثرات ضخامت سلول‌ها را بر سفتی عمودی، حداکثر تنش موضعی در سلول‌ها و وزن آن‌ها مطالعه کرده‌اند. بارهای مختلفی به تایر اعمال شده و حالت‌های کششی در قسمت بالایی تایر و حالت خمشی در قسمت پایینی سلول‌ها مشاهده شده است. نتایج نشان داد ضخامت ۵ میلی‌متر با اهداف در نظر گرفته شده، ضخامت مناسبی است [۶۴]. علاوه بر این تحقیق دیگری در زمینه سرو صدای تولید شده توسط تایر Tweel بررسی شده است. این تایر در طول چرخش با سرعت بالا صدای آکوستیک تولید می‌کند که فرض می‌شود به دلیل ارتعاش رزونانسی سلول‌های تایر در هنگام ورود به منطقه تماسی و کماتش سلول‌ها و سپس بازگشت آن‌ها به حالت کشش است. به منظور شناسایی و درک علل نویز صوتی برای این تایر، یک مدل المان محدود غیرخطی با استفاده از ABAQUS ایجاد شده است. این مدل تغییرات ضخامت سلول و سرعت چرخش تایر را بر روی دامنه و فرکانس ارتعاشی سلول‌ها مورد مطالعه قرار داده است.

نتایج نشان می‌دهد تغییرات ضخامت سلول به طور قابل توجهی بر فرکانس تأثیر نمی‌گذارد، اما می‌تواند تاثیرات جزئی بر دامنه ارتعاش داشته باشد. سلول‌ها با انحنای کوچک‌تر منجر به منحنی بار-جابه‌جایی می‌شوند که نشان‌دهنده سفتی بیشتر تایر است و فرکانس‌های ارتعاش بالاتری ایجاد می‌کند اما در مقایسه با سلول‌ها با انحنای بزرگ‌تر، دامنه کمتری دارد [۶۷]. مانیبالان و همکاران [۶۸] پارامترهای مختلف موثر بر مقاومت غلتشی و همچنین سطح مقطع مختلف تایر Tweel را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتیجه شده است، از آنجایی که تایر Tweel از جنس پلی‌یورتان است و پلی‌یورتان خاصیت سفتی و انعطاف‌پذیری را با هم دارد، این تایر می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به تایرهای پنوماتیک داشته باشد. علاوه بر این با تغییر هندسه سازه یا تغییر خواص کامپوزیت بر پایه پلی‌یورتان می‌توان بارهای مختلف و کاربردهای مختلف را از این نوع تایر انتظار داشت. همچنین مقاومت غلتشی در این تایر کمتر از تایرهای پنوماتیک است و در نتیجه مصرف سوخت کاهش می‌یابد. زموذا و همکاران [۶۹] نیز یک مدل عددی برای پیش‌بینی توزیع فشار در سلول‌های این تایر ارائه داده‌اند.

یکی از اهداف شرکت میشلن استفاده از تایر Tweel در کره ماه است. لذا تحقیقاتی در این خصوص صورت گرفته و عملکرد تایر در مواجهه با شن و ماسه از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ما و همکاران [۷۰]، از روش اجزای محدود برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تعامل دینامیکی بین تایر غیرپنوماتیک و ماسه استفاده کرده‌اند. علاوه بر خود تایر تعامل لایه برشی تایر با ماسه نیز توسط این پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش لایه برشی نیز به صورت ساختار سلولی و فرامادی در نظر گرفته شده و به بهینه‌سازی هندسی این سلول پرداخته شده است که منجر به ساختار

¹ Michelin

² Goodyear

³ Uniroyal

⁴ Yokohama

⁵ Bridgestone

⁶ Britek

⁷ Toyo

⁸ Hankook

⁹ polaris

¹⁰ Amerityre

¹¹ Bigrep

¹² Boeing

¹³ Kumho Tires

¹⁴ Resilient Technologies

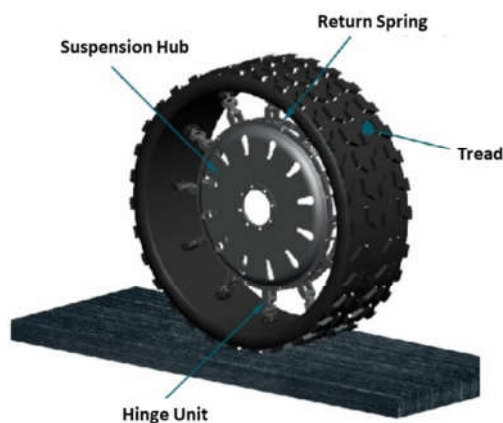
جذب دی اکسید کربن و بازدم اکسیژن است به طوری که برآورد می-شود در صورتی که از این نوع تایرها در تمام خودروهای شهری مانند پاریس استفاده شود، ۴۰۰۰ تن کربن دی اکسید به ۳۰۰۰ تن اکسیژن تبدیل می‌کند [۶۳].

شرکت بریتک^۱ نیز نوع دیگری از تایر را معرفی کرده است که انرژی پتانسیل الاستیک ذخیره شده در چرخ را به حرکت مفید رو به جلو تبدیل می‌کند.

تایرهای دیگری نیز تولید شده‌اند و تحقیقات زیادی درباره آن‌ها صورت گرفته است از جمله تایری با نام چرخ الاستیک مکانیکی (MEW)^۲ که در ادامه فعالیت‌های صورت گرفته در خصوص این تایر بررسی خواهد شد.

از ویژگی‌های این تایر می‌توان به سوراخ نشدن و جذب ضربات اشاره کرد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است ساختار چرخ شامل یک هسته، سلول‌های فرامادی به صورت لولا، حلقه‌های الاستیک، فنرهای برگشتی، آج و پین است.

وظیفه فنرها تولید نیروی کششی برای بازیابی لولاهایی که بسته شده‌اند به حالت اولیه است. در واقع لولاها در ناحیه تماس دچار تغییرشکل خمشی نمی‌شوند. این لولاها به طور یکنواخت در جهت شعاعی توزیع شده‌اند و هسته و آج تایر را بهم متصل می‌کنند همچنین وظیفه تحمل بار محوری اعمال شده در مرکز هسته را دارند. لولاها می‌توانند با روش‌های مختلفی کنار یک دیگر قرار بگیرند و طیف وسیعی از خوش سواری و پایداری را در خودرو ایجاد کنند. نکته قابل توجه دیگر این تایر آج آن است. الگو روی آج به نحوی طراحی شده است که سایس را تا حد امکان کاهش می‌دهد. همچنین آج تایر در صورت فرسودگی قابل تعویض است [۷۶].

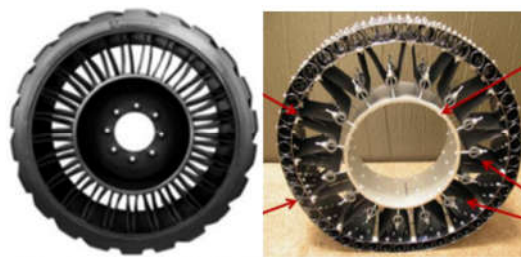


شکل ۳- ساختار تایر MEW [۷۷]

یوکان و همکاران [۷۷]، به منظور بررسی تاثیر چیدمان لولاها بر سختی استاتیکی، دو نوع ساختار مختلف از لولا را در نظر گرفته‌اند. یک ساختار شامل دو پیوند و ساختار دیگه شامل سه پیوند در یک لولا است. بر این اساس ۴ نوع تایر طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهد سفتی عمودی تایر با افزایش تعداد لولاها افزایش می‌یابد و تأثیر دو

جدیدی از تایر Tweel™ تحت عنوان Tweel™ شده است. طرح جدید می‌تواند بارهای چرخهای و دماهای شدید از محدوده ۴۰ الی ۴۰۰ کلون را تحمل کند. به همین دلیل از فلزات الاستیک خطی به جای پلی اورتان در لایه برشی استفاده شده است. هدف دیگر از انجام این پروژه کاهش مقاومت غلتشی تایر تا ۵۰ درصد در عین حال حفظ انطباق ساختاری در محدوده الاستیک تحت فشار در ناحیه تماسی بین تایر و جاده است. تصویر این تایر در شکل ۲ قسمت ب نشان داده شده است [۷۱].

فعالیت‌هایی درخصوص یافتن الگوی مناسب برای لایه برشی انجام شده است. از جمله می‌توان به پژوهش شانکار و همکاران [۷۲] اشاره کرد. آن‌ها سه نوع الگوی متفاوت را به منظور پیدا کردن سلولی با تحمل نیروی خمشی برشی بالا با در نظر گرفتن توزیع انرژی کرنش مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این ما و همکاران چندین لایه برشی فرامادی آجدار را مورد بررسی قرار دادند و لایه برشی با هندسه سلولی مشخص را با بهترین توزیع فشار در ناحیه تماسی مشخص کردند. سپس این پژوهشگران به بهینه‌سازی شکل این سلول و پیدا کردن ضخامت بهینه لایه‌های نگه‌دارنده این سلول‌ها پرداختند [۷۳]. در پژوهشی دیگر به منظور درک بهتر عملکرد Tweel™ با شن و ماسه و ارائه اطلاعات برای بهینه‌سازی بیشتر این تایر، تعامل بین تایر و شن و ماسه با استفاده از روش اجزا محدود مدل‌سازی و شبیه‌سازی صورت گرفته است [۷۴]. همانطور که مشاهده می‌شود به منظور دست یافتن به تایر غیرپنوماتیک با کارایی لازم افراد مختلف در زمینه‌های مختلفی فعالیت کرده‌اند. به طور خلاصه به منظور شکل‌گیری تایر Tweel تحقیقات در دانشگاه کلمسون تحت دو پروژه با بودجه موسسه ملی استاندارد و فناوری و ناسا انجام شد. میشلن به عنوان یک شریک صنعتی در هر دو پروژه همکاری کرد [۷۵]. با وجود تمام تحقیقات صورت گرفته میشلن در حال کار بر روی تایر غیرپنوماتیک دیگری است که کاملاً با محیط زیست سازگار و دارای سنسورهایی برای جمع-آوری اطلاعات واقعی از تایر است. ایده اصلی در این تایرها قابلیت پرینت سه‌بعدی الگوهای مختلف بسته به شرایط کاری تایر بر روی آج تایر است [۶۳].



(ب)

(الف)

شکل ۲- تایر Tweel ساخت شرکت میشلن شامل (الف) تایر با کاربرد خودرو [۶۱] و (ب) تایر با کاربرد خودروی فضایی [۷۵]

شرکت گودیر تایرهایی را معرفی کرده است که از پودر بازیافتی از لاستیک‌های قدیمی تولید می‌شود و کاملاً با محیط زیست سازگار است. این پودرها به عنوان ماده اولیه در تولید تایر از طریق پرینتر سه-بعدی با فرآیند SLS مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی دیگر این تایرها

¹ Bretek

² Mechanical Elastic Wheel (ME-wheel)

ساختار مختلف لولا بر سختی عمودی یکسان است. در صورتی که تعداد لولاها یکسان باشد، لولاهایی با ساختار دو پیوندی سختی طولی بیشتری نسبت به ساختار سه پیوندی دارد. با این حال ساختار لولاها بر سختی جانبی تاثیری ندارد. همچنین لولا با ساختار دو پیوندی و تعداد بیشتر سختی پیچشی بیشتری دارد. وی و همکاران [۷۶]، عملکرد ارتعاشی این تایر را در مواجهه با ضربه مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها برای ایجاد مدل المان محدود، عوامل غیرخطی مانند غیرخطی بودن هندسی، غیرخطی بودن مواد و غیرخطی تماس در نظر گرفته‌اند. آزمون مشخصه بار برای به دست آوردن منحنی‌های نیرو-انحراف انجام و اعتبار مدل از طریق آزمون مشخصه بار تایید شده است. عملکرد ارتعاش خودرو با تایر MEW و یک نوع تایر شعاعی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد خودرو با تایر MEW الزامات عملکرد ارتعاشی و نظم عملکرد ارتعاشی تایر پنوماتیک را برآورده می‌کند.

ژائو و همکاران [۷۸]، تایر MEW را از لحاظ دینامیکی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتیجه شده است، سرعت غلتش می‌تواند تاثیر زیادی بر ویژگی‌های دینامیکی گذرا این تایر داشته باشد و سرعت لغزش بیشتر منجر به لرزش بیشتر می‌شود. نتایج آزمون عملی مطابقت خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود داشته است. دنگ و همکاران [۷۹]، نیز از یک مدل المان محدود غیرخطی سه‌بعدی برای بررسی عددی این تایر در حالت پایدار استفاده کرده‌اند. علاوه بر این، تنش در اجزای مهم تایر مانند حلقه و لولاها نیز بر اساس نتایج شبیه‌سازی تحلیل شده‌اند. نتیجه شده است، مدل توسعه یافته قادر به پیش‌بینی رفتار دینامیکی تایر در شرایط مختلف با قابلیت اطمینان بالا است. همچنین نشان داده شده است، توزیع فشار نرمال در این تایرها کاملاً متفاوت با تایرهای پنوماتیک است و ماکزیمم تنش در ناحیه مرکزی سطح تماس رخ می‌دهد که باعث بهبود مقاومت تایر می‌شود. دوو و همکاران [۸۰]، نیز تایر MEW با زاویه کمبرهای متفاوت را به صورت تجربی و با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها به منظور مقایسه بهتر از یک تایر پنوماتیک به عنوان مرجع استفاده کرده‌اند. نتیجه شده است، با افزایش زاویه کمبر تایر بادی و تایر MEW به تدریج دچار سایش می‌شوند. با این حال میزان فشار هوای داخل تایر تاثیر بیشتری دارد. این پژوهشگران همچنین تاثیر زاویه کمبر بر سختی عمودی، تغییر شکل تایر و توزیع فشار در سطح تماس را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده است، شکل ناحیه تماسی در حالت پایا به تدریج از یک مستطیل به یک مثلث با افزایش زاویه کمبر تغییر می‌کند. علاوه بر این، فشار در ناحیه تماسی عمدتاً در شانه متمرکز می‌شود که منجر به سایش ناهموار بدنه انعطاف‌پذیر تایر می‌شود. شکل ناحیه تماسی با زاویه کمبر یکسان به طور قابل ملاحظه‌ای در نسبت‌های مختلف لغزش بدون تغییر است، اما توزیع فشار به طور قابل توجهی متفاوت است. زوایای کمبر تأثیر کمی بر نیروی طولی دارند، اما افزایش زاویه کمبر منجر به افزایش نیروی جانبی در نسبت لغزش مشابه شده است [۸۱].

سیو و همکاران [۸۲]، دوام این تایر به منظور بهبود عمر آن مورد مطالعه قرار داده‌اند. همچنین، دوام تایر با استفاده از روش اجزای محدود بر اساس زمین ثابت مجازی شبیه‌سازی شده و ضریب اطمینان برای محاسبه طول عمر تایر لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد روش‌های محاسبه نظری و شبیه‌سازی برای پیش‌بینی طول عمر تایر

MEW، بسیار با نتایج تجربی همخوانی دارد. مشاهده شد، ضعیف‌ترین جزء در تایر پین است، زیرا بیشترین تنش روی آن متمرکز است. خطاهای ماشینکاری و نصب در سازه‌های مکانیکی اجتناب‌ناپذیر است. لذا ژائو و همکاران [۸۳]، تاثیر این نوع خطاها را بر سختی شعاعی تایر MEW مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این منظور، مدل ریاضی و مدل المان محدود برای تایر ایجاد و با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده است. مقایسه تأثیر خطاهای ماشینکاری و نصب بر سختی شعاعی تایر سازگاری خوبی را در بین تحلیل‌های ریاضی، شبیه‌سازی المان محدود و نتایج آزمون میز نشان داده است. همچنین نتایج نشان داده است که سفتی شعاعی اولیه بدنه تایر انعطاف‌پذیر به طور قابل توجهی بر سفتی شعاعی تایر تأثیر می‌گذارد و رابطه معکوس بین طول واحد لولا یا توپی تعلیق و سفتی شعاعی وجود دارد.

علاوه بر تایرهای معرفی شده پژوهشگران فعالیت‌هایی در خصوص انواع دیگر تایر داشته‌اند که در ادامه بررسی خواهد شد. جاکوب متیو و همکاران [۸۴]، در پژوهشی مدلی از یک تایر غیرپنوماتیک ساخته شده از مواد لاستیکی طبیعی به جای لاستیک مصنوعی در آج و پلی استر به جای نایلون در دیواره را معرفی کرده‌اند. این پژوهشگران علاوه بر این الگوهای مختلف از جمله لانه زنبوری، مثلی الماسی و S شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند. مطالعه مقایسه‌ای بین الگوهای مختلف با مواد مختلف انجام شده است. مطالعه نشان می‌دهد که تایر با ساختار الماس با مواد مصنوعی تغییر شکل کمتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد.

ژانگ و همکاران [۸۵]، بر اساس ویژگی‌های ساختار اندام تحتانی کانگورو، یک مدل تایر غیرپنوماتیک ارائه کرده‌اند. با مقایسه یک تایر پنوماتیک با همان اندازه، یک آزمایش مقایسه سختی شعاعی برای اطمینان از دقت آنالیز عددی انجام شده است. سختی شعاعی، سختی جانبی، سختی طولی، سختی پیچشی و فشار در ناحیه تماسی تحت بارهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تایر غیرپنوماتیک عملکرد بهتری نسبت به تایر بادی دارد.

ژانگ و همکاران [۸۶]، سه نوع تایر غیرپنوماتیک با الگوهای مختلف شامل صفحه پره‌ای، لانه زنبوری و شبکه‌ای ایجاد کرده و عملکرد استاتیکی و دینامیکی این تایرها را با تایر پنوماتیک مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، در حالت استاتیکی، فشار در ناحیه تماسی تایر غیرپنوماتیک در هر دو طرف آج توزیع می‌شود. تمرکز تنش تایر غیرپنوماتیک عمدتاً در ناحیه تماسی در نزدیکی تکیه‌گاه رخ می‌دهد. ناحیه تغییر شکل تایر غیرپنوماتیک عمدتاً در ناحیه اتصال به زمین و در مجاورت پره اتصال به زمین ظاهر می‌شود. خصوصیات استاتیکی و دینامیکی تایر غیرپنوماتیک لانه زنبوری نزدیک به تایر بادی است.

وانگ و همکاران [۸۷]، در پژوهشی کاربرد مواد TPU ساخته شده به روش FDM را در زمینه تایرهای غیرپنوماتیک ارزیابی کرده‌اند. ابتدا، فرآیند پرینت مواد TPU بر اساس فناوری FDM از طریق آزمایش کشش و مشاهده SEM مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که دمای بهینه پرینت سه‌بعدی مواد TPU انتخاب شده ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین مشخص شده است فناوری FDM

۴- نتیجه گیری

استفاده از ساختارهای فرامادی می‌تواند خصوصیات متفاوت از طبیعت را برای طراحان به ارمغان آورد. لذا استفاده از این مواد در تایرها می‌تواند بسیار مفید واقع شود. تایر غیرپنوماتیک از جنبه‌های مختلف، بررسی شد. بنابراین، مزایای این نوع تایرها شامل: مقاومت گلتنشی در تایرهای پنوماتیک بین ۴ تا ۵ درصد است در حالی که در تایرهای غیرپنوماتیک کمتر از ۳ درصد است. به منظور تحمل بارهای عمودی در تایر غیرپنوماتیک ضخامت سلول ۵ میلی‌متر ضخامت مناسبی است.

استفاده از فرامواد در لایه برشی با الگوی لانه زنبوری و زاویه سلول ۲۰- کمترین تنش فون میسر را دارد.

استفاده از فرامواد در لایه برشی در صورتی که انرژی کرنشی در لایه میانی ۵۰ درصد کمتر از دیگر لایه‌ها باشد، توانایی کنترل ویژگی‌های خمش برشی را دارد.

حداکثر تنش در تایر غیرپنوماتیک تولید شده به روش سه‌بعدی ۱۲ درصد افزایش یافته است با این حال حدوداً ۸۲ درصد سفتی عمودی بهبود یافته است. لذا با توجه به توانایی پرینتر سه‌بعدی در تولید ساختارهای پیچیده می‌تواند روش مناسبی برای تولید تایرهای غیرپنوماتیک باشد.

نهایتاً بر اساس مرور صورت گرفته و به عنوان یک چشم‌انداز برای این تحقیق، در کارهای آتی، استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی برای طراحی و ساخت یک سلول بهینه فراماده و یا ساختار کلی یک تایر غیرپنوماتیک، بر اساس توابع هدف و قیود مختلف (همچون وزن، استحکام و عمر خستگی)، با استفاده از فرامواد پلیمری، ارائه خواهد شد. ضمناً به منظور دستیابی به اهداف مختلف در طراحی، می‌توان بجای لحاظ کردن فقط یک ماده (همچون PLA) در ساخت تایر غیرپنوماتیک، از مواد دوگانه یا چندگانه (استفاده همزمان پلیمرهای PLA و TPU) در فرایند پرینت سه‌بعدی، استفاده نمود که در مقالات بعدی، گزارش خواهد شد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت مالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و پارک علم و فناوری دانشگاه سمنان از این پایان‌نامه مرتبط با این مقاله در قالب کد اعتباری ۱۶-۰۰-۱۰۰۱-۰۰۹۳۴۰۰۰ قدردانی می‌نمایند.

۶- مراجع

- [1] Azadi M., An overview of the applications, design processes and fabrication of metamaterials using additive manufacturing techniques and 3D printers. Iran Polymer Technology Research and Development, Vol. 6, pp. 15-26, 2021.
- [2] Dezianian S., and Azadi M., A review on metamaterial types, additive manufacturing technique and its application in automotive industry. Vol. 30, pp. 70-80, 2021. DOI: 10.30506/MMEP. 2021.535668.1937
- [3] Li T., Hu X., Chen Y., and Wang L., Harnessing out-of-plane deformation to design 3D architected lattice metamaterials with tunable Poisson's ratio. Science Reports, Vol. 7, pp. 1-10, 2017. doi: 10.1038/s41598-017-09218-w.
- [4] Liu R., Ji C., Zhao Z., and Zhou T., Metamaterials Reshape and Rethink. Engineering. Vol. 1, pp. 179-184, 2015. doi: 10.15302/J-ENG-2015036.
- [5] Jung J., Kim H. G., Goo S., Chang K. J., and Wang S.,

روش مناسبی برای تولید تایرهای غیرپنوماتیک از جنس TPU می‌تواند باشد.

پاپاژورگیو و همکاران [۸۸]، تأثیر طیف وسیعی از پارامترهای هندسی بر وزن و رفتار مکانیکی تایر غیر پنوماتیک را مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این منظور یک مدل المان محدود طراحی و تحت بارگذاری عمودی قرار گرفته است تا حداکثر تنش، فشار تماس، حداکثر جابجایی عمودی و انرژی جذب شده در حین بارگذاری ارزیابی شود. تجزیه و تحلیل نشان داد که سفتی عمودی به شدت تحت تأثیر چگالی، ضخامت و زوایای داخلی سلول‌های لانه زنبوری قرار می‌گیرد. زوایای داخلی لانه زنبوری نیز قادر به تغییر سفتی عمودی تایر بدون تغییر وزن آن به نظر می‌رسد که با راندمان سوخت و خواص دینامیکی تایر مرتبط است. کاهش طول سلول یا افزایش تراکم سلولی می‌تواند به طور قابل توجهی تنش‌های داخلی را کاهش دهد. تنظیم مناسب ضخامت سلول یا طول سلول نیز می‌تواند به طور قابل توجهی میزان فشار تماسی ایجاد شده با توزیع یکنواخت‌تر بار بین آج و جاده را کاهش دهد.

ژنگ و همکاران [۸۹]، نیز تأثیر زاویه‌های مختلف در الگوی لانه زنبوری بر سختی چند محوری و ویژگی‌های تایر در ناحیه تماسی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتیجه شده است، سختی چند محوره تایر غیرپنوماتیک به شدت تحت تأثیر پارامترهای الگو است. با این حال، ویژگی‌های تایر در ناحیه تماسی عمدتاً تحت تأثیر پارامترهای حلقه‌ها و آج قرار دارد. در این پژوهش نشان داده شده است، با تغییر پارامترهای الگو لانه زنبوری می‌توان به خواص سفتی چند محوره قابل مقایسه با تایرهای پنوماتیک دست پیدا کرد.

فو و همکاران [۹۰]، عمر خستگی و عوامل مؤثر بر تایر غیرپنوماتیک را مورد بررسی قرار داده‌اند. با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی، تأثیر پارامترهای ساختاری مانند انحنا و زوایا، ضخامت پره‌های جانبی و ضخامت آج بر عمر خستگی تایر بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، روش پیشنهادی می‌تواند برای پیش‌بینی عمر خستگی تایر غیرپنوماتیک و پره‌های انعطاف‌پذیر استفاده شود و عمر خستگی تایر غیر پنوماتیک با پره‌های انعطاف‌پذیر را می‌توان با انتخاب پارامترهای ساختاری مناسب بهبود بخشید.

۴-۳- معایب تایرهای غیر پنوماتیک

با وجود تمام مزایایی که برای تایرهای غیرپنوماتیک بیان شد، این تایرها معایب خاص خود را دارند. از جمله این معایب می‌توان به سر و صدای تولید شده توسط سلول‌ها در حین حرکت اشاره کرد. همچنین ارتعاش ایجاد شده از سلول‌های فراماده ممکن است منجر به کاهش خوش‌سواری و ناراحتی مسافران شود [۶۷]. بنابراین احتمال از دست دادن کنترل وسیله نقلیه در سرعت‌های بالای ۸۰ کیلومتر در ساعت برای رانندگان وجود دارد. آنها ناپایدار هستند. نصب تایرهای غیرپنوماتیک بستگی به کاربری آن‌ها دارد. این موارد در تایرهای معمولی نیز وجود دارند اما مهم‌ترین عیب آن، این است که تایرهای غیرپنوماتیک گران قیمت‌تر از تایرهای پنوماتیک هستند و ممکن است چندین دهه زمان لازم باشد تا جایگزین تایرهای پنوماتیک شوند.

- [22] Lumpe T. S., and Stankovic T., Exploring the property space of periodic cellular structures based on crystal networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 118, 2003504118, 2021. doi:10.1073/pnas.2003504118.
- [۲۳] دزنیان ش.، مطالعه رفتار خستگی در مواد ساخته شده از روش‌های تولید افزایشی، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۸
- [24] Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., and Hui D., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and challenges. *Composites Part B*. Vol. 143, pp. 172–196, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [25] Standardization Roadmap for Additive Manufacturing. *Annual Book of ASTM Standard*. pp. 1–203, 2017.
- [26] Mulakkal M. C., Trask R. S., Ting V. P., and Seddon A. M., Responsive cellulose-hydrogel composite ink for 4D printing. *Materials & Design*. Vol. 160, pp. 108–118, 2018. doi: 10.1016/j.matdes.2018.09.009.
- [27] Liu Y., Zhang W., Zhang F., Leng J., Pei S., Wang L., Jia X., Cotton C., Sun B., and Chou T. W., Microstructural design for enhanced shape memory behavior of 4D printed composites based on carbon nanotube/poly(lactic acid) filament. *Composites Science and Technology*. Vol. 181, 107692, 2019. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107692.
- [28] Liu K., Han L., Hu W., Ji L., Zhu S., Wan Z., Yong X., Wei Y., Dai Z., Zhao Z., Li Z., and Wang Pand Tao R., 4D printed zero Poisson's ratio metamaterial with switching function of mechanical and vibration isolation performance. *Materials & Design*. Vol. 196, 109153, 2020. doi: 10.1016/J.MATDES.2020.109153.
- [29] Invernizzi M., Turri S., Levi M., and Suriano R., Processability of 4D printable modified polycaprolactone with self-healing abilities. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 7, pp. 508–515, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2018.12.001.
- [30] Choong Y. Y. C., Maleksaeedi S., Eng H., Wei J., and Su P. C., 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography. *Materials & Design*. Vol. 126, pp. 219–225, 2017. doi: 10.1016/j.matdes.2017.04.049.
- [31] Rastogi P., and Kandasubramanian B., Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 366, pp. 264–304, 2019. doi: 10.1016/j.cej.2019.02.085.
- [32] Haleem A., Javaid M., and Vaishya R., 5D printing and its expected applications in Orthopaedics. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. Vol. 10, pp. 809–810, 2019. doi: 10.1016/j.jcot.2018.11.014.
- [33] Ravinder Reddy P., and Anjani Devi P., Review on the advancements to additive manufacturing-4D and 5D printing. *International Journal Mechanical and Production Engineering Research and Development*. Vol. 8, pp. 397–402, 2018. doi: 10.24247/ijmperdaug201841.
- [34] Dezianian S., Azadi M., and Mohammadi Esfarjani S., An overview of the Additive manufacturing process with five-dimensional printers and their applications. *Iran Polymer Technology; Research and Development*. Vol. 6, pp. 51-60, 2021.
- [35] Vogiatzis P., Chen S., Wang X., Li T., and Wang L., Topology optimization of multi-material negative Poisson's ratio metamaterials using a reconciled level set method. *CAD Computer Aided Design*. Vol. 83, pp. 15–32, 2017. doi: 10.1016/j.cad.2016.09.009.
- [36] Li X., Yu S., Liu H., Lu M., and Chen Y., Topological mechanical metamaterials: A brief review. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. Vol. 24, 100853, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100853>
- [37] Maharaj Y., and James K. A., Metamaterial topology optimization of nonpneumatic tires with stress and buckling constraints. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Vol. 121, pp. 1410–1439, 2020. doi: 10.1002/NME.6273.
- [38] Bodaghi M., Damanpack A. R., Hu G. F., and Liao W. H., Large deformations of soft metamaterials fabricated by 3D printing. *Materials & Design*. Vol. 131, pp. 81–91, 2017. doi: 10.1016/J.MATDES.2017.06.002.
- [39] Yuan S., Shen F., Bai J., Chua C. K., Wei J., and Zhou K., Realisation of a locally resonant metamaterial on the automobile panel structure to reduce noise radiation. *Mechanic System Signal Process*. Vol. 122, pp. 206–231, 2019. doi: 10.1016/J.YMSSP.2018.11.050.
- [6] Wang J., Dai G., and Huang J., Thermal Metamaterial: Fundamental, Application, and Outlook. *iScience*. Vol. 23, 101637, 2020. doi: 10.1016/J.ISCI.2020.101637.
- [7] Wu W., Hu W., Qian G., Liao H., Xu X., and Berto F., Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. *Materials & Design*, Vol. 180, 107950, 2019. doi: 10.1016/J.MATDES.2019.107950.
- [8] Grima J. N., Caruana-Gauci R., Attard D., and Gatt R., Three-dimensional cellular structures with negative Poisson's ratio and negative compressibility properties. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 468, pp. 3121–3138, 2012. doi: 10.1098/RSPA.2011.0667.
- [9] Lee J. W., Soman P., Park J. H., Chen S., and Cho D. W., A Tubular Biomaterial Construct Exhibiting a Negative Poisson's Ratio. *PLoS One*. Vol. 11, 0155681, 2016. doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0155681.
- [10] Park Y. J., and Kim J. K., The effect of negative Poisson's ratio polyurethane scaffolds for articular cartilage tissue engineering applications. *Advances in Materials Science and Engineering*, 853289, 2013. doi: 10.1155/2013/853289.
- [11] Wang W., He C., Xie L., and Peng Q., The temperature-sensitive anisotropic negative poisson's ratio of carbon honeycomb. *Nanomaterials*, Vol. 9, pp. 1-4, 2019. doi: 10.3390/nano9040487.
- [12] Grima J. N., Caruana-Gauci R., Attard D., and Gatt R., Three-dimensional cellular structures with negative Poisson's ratio and negative compressibility properties. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 468, pp. 3121–3138, 2012. doi: 10.1098/rspa.2011.0667.
- [13] Li Z., Luo Z., Zhang L. C., and Wang C. H., Topological design of pentamode lattice metamaterials using a ground structure method. *Materials & Design*. Vol. 202, 109523, 2021. doi: 10.1016/J.MATDES.2021.109523.
- [14] Kadic M., Bückmann T., Stenger N., Thiel M., and Wegener M., the practicability of pentamode mechanical metamaterials. *Applied Physics Letters*. Vol. 100, 2012. doi: 10.1063/1.4709436.
- [15] Hedayati R., Leeftang A. M., and Zadpoor A. A., Additively manufactured metallic pentamode meta-materials. *Applied Physics Letters*. Vol. 110, 091905, 2017. doi: 10.1063/1.4977561.
- [16] Xie Y. M., Wang W., He C., and Peng Q., Designing orthotropic materials for negative or zero compressibility. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 51, pp. 4038–4051, 2014. doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2014.07.024.
- [17] Chen B., Chen L., Du B., Liu H., Li W., and Fang D., "Novel multifunctional negative stiffness mechanical metamaterial structure: Tailored functions of multi-stable and compressive mono-stable. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 204, 108501, 2021. doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108501.
- [18] Gatt R., and Grima J. N., Negative compressibility". *Physica status solidi - Rapid Research Letters*. Vol. 2, pp. 236–238, 2008. doi: 10.1002/PSSR.200802101.
- [19] Rashidi M., Zoali F., and Hajebrahimi F., Understanding the factors affecting tire durability and the relationship between them. *Iran Iranian Rubber Magazine*, Vol. 24, pp. 45-58, 2020.
- [20] Refai K., Brugger C., Montemurro M., and Saintier N., An experimental and numerical study of the high cycle multiaxial fatigue strength of titanium lattice structures produced by Selective Laser Melting. *International Journal of Fatigue*, Vol. 138, 105623, 2020. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105623.
- [21] Benedetti M., Plessis A., Ritchie R. O., Dallago M., Razavi S. M. J., and Berto F., Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *Materials Science and Engineering Reports*, Vol. 144, 100606, 2021. doi: 10.1016/j.msere.2021.100606.

- Structures. Vol. 187, pp. 27-35, 2018. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.12.044.
- [57] Rusiński E., and Pietrusiak D., Proceedings of the 13th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-50938-9.
- [58] Rashidi Moghadam M., Determining the factors affecting rolling resistance by analytical method. Iran Rubber Industry. Vol. 25, pp. 27-35, 2021. doi: 10.22034/IRM.2021.136711.
- [59] Nikravan G., Green tire technology". Iran Rubber Industry. Vol. 25, pp. 3-13, 2021.
- [60] Rashidi Moghadam M., Simulation of temperature distribution due to energy loss in cargo radial tire. Iran Rubber Industry. Vol. 25, pp. 57-63, 2022.
- [61] Jafferson J. M., and Sharma H., Design of 3D printable airless tyres using NTopology. Materials Today: Proceedings. Vol. 46, pp. 1147-1160, 2021. doi: 10.1016/J.MATPR.2021.02.058.
- [62] Mazur V. V., Experiments to Find the Rolling Resistance of Non-pneumatic Tires Car Wheels. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Springer International Publishing. pp. 641-648, 2020.
- [63] Suvanjumrat C., and Rugsaj R., Study of 3D printing for forming spoke of non-pneumatic tire using finite element method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1137, 012020, 2021. doi: 10.1088/1757-899x/1137/1/012020.
- [64] Rugsaj R., and Suvanjumrat C., Proper Radial Spokes of Non-Pneumatic Tire for Vertical Load Supporting by Finite Element Analysis. International Journal of Automotive Technology. Vol. 204., pp. 801-812, 2019. doi: 10.1007/S12239-019-0075-Y.
- [65] Rugsaj R., and Suvanjumrat C., Dynamic Finite Element Analysis of Rolling Non-Pneumatic Tire. International Journal of Automotive Technology. Vol. 22, pp. 1011-1022, 2021. doi: 10.1007/s12239-021-0091-6.
- [66] Rugsaj R., and Suvanjumrat C., Determination of material property for non-pneumatic tire spokes by inverse method. Key Engineering Materials. Vol. 777, pp. 411-415, 2018. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.777.411.
- [67] Ramachandran M., Nonlinear Finite Element Analysis of Tweel Geometric Parameter Modifications on Spoke Dynamics During High Speed Rolling. Msc Thesis, Mechanical Engineering, Clemson University, 2008
- [68] Manibaalan C., Balamurugan S., and Joshi C.H., Static Analysis of Airless Tyres. International Journal of Scientific and Research Publications. Vol. 3, pp. 1-4 2013.
- [69] Zmuda M., Jackowski J., and Hryciów Z., Numerical research of selected features of the non-pneumatic tire. AIP Conference Proceedings. Vol. 2078, 020027, 2019. doi: 10.1063/1.5092030.
- [70] Ma J., Summers J., and Joseph P., Dynamic impact simulation of interaction between non-pneumatic tire and sand with obstacle. SAE 2011 World Congress and Exhibition. Vol. 12, 2011. doi: 10.4271/2011-01-0184.
- [71] Ma J., Summers J. D., and Joseph P. F., Numerical simulation of tread effects on the interaction between cellular shear band based non-pneumatic tire and sand. Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference. Vol. 8, pp. 769-779, 2011. doi: 10.1115/DETC2011-47044.
- [72] Shankar P., Fazelpour M., and Summers J. D., An energy-based design approach for a meso-structure with high shear flexure. Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, pp. 4-7, 2013. doi: 10.1115/DETC2013-12292.
- [73] Ma J., Louis S., Summers J. D., and Joseph P. F., Numerical Investigation of Effect of Membrane on Thickness on the Performance of Cellular Shear Band Based non-pneumatic Tire. Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. pp. 28-31, 2011.
- [74] Ma J., Kolla A., Summers J. D., Joseph P. F., Blouin V. Y., and Biggers S., Numerical simulation of new generation non-pneumatic tire (tweelTM) and sand. Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference. Vol. 2, 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization. Materials & Design. Vol. 120., pp. 317-327, 2017. doi: 10.1016/J.MATDES.2017.01.098.
- [40] Zen A. O., Ganzosch G., Barchiesi E., Auhl D. W., and Müller W. H., Investigation of deformation behavior of PETG-FDM-printed metamaterials with pantographic substructures based on different slicing strategies. Composites and Advanced Materials. Vol. 30, pp. 1-13, 2021. doi: 10.1177/26349833211016477.
- [41] Celik H. K., Tan Y. S., Seviour R., and Rennie A. E. W., Effect of Thermal and Mechanical Deformation of Metamaterial FDM Components - Lancaster EPrints. US - TURKEY Work. Rapid Technol. pp. 83-88, 2009.
- [42] Namvar N., Zolfagharian A., Vakili-Tahami F., and Bodaghi M., Reversible Energy Absorption of Elasto-plastic Auxetic, Hexagonal, and AuxHex Structures Fabricated by FDM 4D Printing. Smart Materials and Structures. pp. 3-15, 2022. doi: 10.1088/1361-665X/AC6291.
- [43] Wickeler A. L., and Naguib H. E., Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling. Materials & Design. Vol. 186, pp. 108242, 2020. doi: 10.1016/J.MATDES.2019.108242.
- [44] Tan X., Chen S., Wang B., Zhu S., Wu L., and Sun Y., Design, fabrication, and characterization of multistable mechanical metamaterials for trapping energy. Extreme Mechanics Letters. Vol. 28, pp. 8-21, 2019. doi: 10.1016/J.EML.2019.02.002.
- [45] Matlack K. H., Bauhofer A., Krödel S., Palermo A., and Daraio C., Composite 3D-printed metastructures for lowfrequency and broadband vibration absorption. Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America. Vol. 113, pp. 8386-8390, 2016. doi:10.1073/PNAS.1600171113/SUPPL_FILE/PNAS.1600171113.SM01.MOV.
- [46] Liu R., Xu S., Luo X., and Liu Z., Theoretical and numerical analysis of mechanical behaviors of a metamaterial-based shape memory polymer stent. Polymers (Basel). Vol. 12, 12081784, 2020. doi: 10.3390/polym12081784.
- [47] Gao S., Liu W., Zhang L., and Gain A. K., A new polymer-based mechanical metamaterial with tailorable large negative Poisson's ratios. Polymers (Basel). Vol. 12, pp. 1-15, 2020. doi: 10.3390/polym12071492.
- [48] Savio G., Rosso S., Curtarello A., Meneghello R., and Concheri G., Implications of modeling approaches on the fatigue behavior of cellular solids. Additive Manufacturing. Vol. 25, pp. 50-58, 2019. doi: 10.1016/j.addma.2018.10.047.
- [49] Sandberg U., The Airless Tire: Will this Revolutionary Concept be the Tire of the Future?. Modern Concepts in Material Science. Vol. 3, pp. 1-6, 2020. doi: 10.33552/MCMS.2020.03.000563.
- [50] Nasiri S., Sarkarizavar M., Abedini M., and Rafei M., Chassis and body technology, Tehran, 2017.
- [51] Gasmi A., Joseph P. F., Rhyne T. B., and Cron S. M., Development of a two-dimensional model of a compliant non-pneumatic tire. International Journal of Solids and Structures. Vol. 49, pp. 1723-1740, 2012. doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2012.03.007.
- [52] Gillespie T., fundamentals of vehicle dynamics, Society of Automotive Engineers. Warrendale. Vol. 114, pp. 335-375, 2017.
- [53] Shahdadi A., Ashofte A., and Nematollahi M., Real-time analysis of effective tire properties using smart tires. Iran Rubber Industry. Vol. 25, pp. 17-25, 2021. doi: 10.22034/IRM.2021.136710.
- [54] Ahmadi A., Masih Tehrani M., and Ebrahim Nejat Rafsanjani S., Investigation of tire wear process of heavy vehicles and off-road vehicles. Iran Rubber Industry. Vol. 25, pp. 37-48, 2021. doi: 10.22034/IRM.2021.136712.
- [55] Ju J., Kim D. M., and Kim K., Flexible cellular solid spokes of a non-pneumatic tire. Composite Structures. Vol. 94, pp. 2285-2295, 2012. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2011.12.022.
- [56] Jin X., Hou C., Fan X., Sun Y., Lv J., and Lu C., Investigation on the static and dynamic behaviors of non-pneumatic tires with honeycomb spokes. Composite

- 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114735.
- [90] Fu H., Chen X., Zhao Q., Xiao Z., and Liang X., Fatigue life prediction and influencing factors analysis of mesh flexible spoke non-pneumatic tire. *Advanced in Mechanical engineering*. Vol. 13. pp. 1–10, 2021. doi: 10.1177/16878140211052454.
- pp. 123–130, 2009. doi: 10.1115/DETC2009-87263.
- [75] Fazelpour M., and Summers J. D., Evolution of Meso-Structures for Non-Pneumatic Tire Development: A Case Study. *Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*. pp. 17–20, 2014. doi: 10.1115/detc2014-34184.
- [76] Wei W., Kai Z., Shaoyi B., Lanchun Z., and Yongzhi W., Vibration performance analysis of vehicle with the non-pneumatic new mechanical elastic wheel in the impulse input experiment. *Journal of Vibroengineering*. Vol. 18. pp. 3970–3980, 2016. doi: 10.21595/jve.2016.16988.
- [77] Zhao Y., Du X., Lin F., Wang Q., and Fu H., Static stiffness characteristics of a new non-pneumatic tire with different hinge structure and distribution. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 32. pp. 3057–3064, 2018. doi: 10.1007/s12206-018-0608-8.
- [78] Zhao Y. Q., Deng Y. J., Lin F., Zhu M. M., and Xiao Z., Transient Dynamic Characteristics of a Non-Pneumatic Mechanical Elastic Wheel Rolling Over a Ditch. *International Journal of Automotive Technology*. Vol. 193. pp. 499–508, 2018. doi: 10.1007/S12239-018-0048-6.
- [79] Deng Y., Zhao Y., Lin F., Xiao Z., Zhu M., and Li H., Simulation of steady-state rolling non-pneumatic mechanical elastic wheel using finite element method. *Simulation Modelling Practice and Theory*. Vol. 85. pp. 60–79, 2018. doi: 10.1016/j.simpat.2018.04.001.
- [80] Du X., Zhao Y., Wang Q., Fu H., and Lin F., Grounding characteristics of a non-pneumatic mechanical elastic tire in a rolling state with a camber angle. *Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 65. pp. 287–296, 2019. doi: 10.5545/SV-JME.2018.5845.
- [81] Du X., Zhao Y., Lin F., Fu H., and Wang Q., Numerical and experimental investigation on the camber performance of a non-pneumatic mechanical elastic wheel. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Vol. 39. pp. 3315–3327, 2017. doi: 10.1007/S40430-016-0702-8/FIGURES/17.
- [82] Xiao Z., Zhao Y. Q., Lin F., Zhu M. M., and Deng Y. J., Studying the fatigue life of a non-pneumatic wheel by using finite-life design for life prediction. *Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 64. pp. 56–67, 2018. doi: 10.5545/SV-JME.2017.4695.
- [83] Zhao Y. Q., Xiao Z., Lin F., Zhu M. M., and Deng Y. J., Influence analysis of machining and installation errors on the radial stiffness of a non-pneumatic mechanical elastic wheel. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 31. pp. 1–9, 2018. doi: 10.1186/S10033-018-0273-Y/FIGURES/13.
- [84] Mathew N. J., Sahoo D. K., and Chakravarthy E. M., "Design and Static Analysis of Airless tyre to Reduce Deformation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 197. 012042, 2017. doi: 10.1088/1757-899X/197/1/012042.
- [85] Zhang Z., Fu H., Zhao Q., Tan D., and Yang K., Pattern design and performance analysis of a flexible spoke bionic non-pneumatic tire. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Vol. 43. pp. 1-11, 2021. doi: 10.1007/s40430-020-02743-2.
- [86] Zhang Z., Fu H., Liang X., Chen X., and Tan D., Comparative Analysis of Static and Dynamic Performance of Nonpneumatic Tire with Flexible Spoke Structure. *Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 66. pp. 458–466, 2020. doi: 10.5545/SV-JME.2020.6676.
- [87] Wang J., Yang B., Lin X., Gao L., Liu T., Lu Y., and Wang R., Research of TPU Materials for 3D Printing Aiming at Non-Pneumatic Tires by FDM Method. *Polymer*. Vol. 12. 12112492, 2020. doi: 10.3390/POLYM12112492.
- [88] Ganniari-Papageorgiou E., Chatzistergos P., and Wang X., The Influence of the Honeycomb Design Parameters on the Mechanical Behavior of Non-Pneumatic Tires. *International Journal of Applied Mechanics*. Vol. 12. 2050024, 2020. doi: 10.1142/S1758825120500246.
- [89] Zheng Z., Rakheja S., and Sedaghati R., Multi-axis stiffness and road contact characteristics of honeycomb wheels: A parametric analysis using Taguchi method. *Composite Structures*. Vol. 279. 114735, 2022. doi: