



University of Tehran

College of
Engineering

Faculty of Mechanical
Engineering

Parametric and geometric study of auxetic structures used in NPTs and investigation on their static and dynamic behaviour

A thesis submitted to the Graduate Studies Office

In partial fulfillment of the requirements for

The degree of Master in
Mechanical Engineering

By:

Mohammad Amin Faraji

Supervisor:

Dr. Alireza Daneshmehr

September 2022

Abstract:

Non-pneumatic tires have gained significant popularity as a result of their distinct qualities and advantages over pneumatic tires. In this paper, based on a finite element method and ABAQUS commercial software, a parametric and geometric study on auxetic and honeycomb structures used in non-pneumatic tires have been carried out under various static and dynamic loadings. four different spoke structures have been introduced and investigated under static and dynamic loadings. Two of which are honeycomb structures that have been thoroughly researched in literature, and the two others are compared to them and a pneumatic tire as well. To identify the best and the most optimal model between them, four different design parameters of NPTs have been studied: vertical stiffness, local stress in spokes, contact pressure and mass of the model. The main objective of this thesis is dedicated to finding and introducing new and optimal structures for the spoke layer of an NPT and then studying and comparing their behavior to the ones already exist in the literature and also to conventional pneumatic tires that exist in the industry and finally, those that potentially can be used as a replacement of pneumatic tires and have outperformed them will be introduced and studied.

Keywords:

Non pneumatic tires – Honeycomb structures - ABAQUS – Spoke structures– Vertical stiffness – Contact pressure – Dynamic loading – Auxetic structures – Pneumatic tires



بسمه تعالی

دانشکده مهندسی مکانیک

پردیس دانشکده‌های فنی



دانشگاه تهران

مطالعه پارامتری و هندسی ساختارهای آگزتیکی مورد استفاده در تایرهای غیربادی و بررسی رفتار دینامیکی و استاتیکی آنها در بارگذاری های متفاوت

پایان نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد

در رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

محمد امین فرجی

نام استاد راهنما:

دکتر علیرضا دانش‌مهر

شهریور ماه ۱۴۰۱

تعهدنامه اصالت اثر

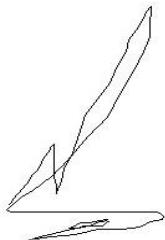
با اسمه تعالیٰ

اینجانب محمد امین فرجی تائید می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی
اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشه از آنها استفاده شده است مطابق مقررات
ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبل از احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.
کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو :

محمد امین فرجی

امضای دانشجو :



تقدیم به

پدر و مادر فدایکارم که در همه سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره همراه و پشتیبان من بوده‌اند.

با سپاس از **جناب دکتر علیرضا دانش‌مهر** که با دقت و حوصله یاری‌رسان و با درایت تمام راهنمای

بنده بوده‌اند.

چکیده

تایرهای غیر بادی به دلیل ویژگی‌ها و مزایایی که نسبت به تایرهای بادی دارند طی سال‌های اخیر محبوبیت قابل توجهی به دست آورده‌اند و پژوهش‌های زیادی به بررسی خواص و پارامترهای تاثیرگذار بر روی عملکرد آن‌ها پرداخته‌اند. در این پروژه، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس مطالعه‌ی هندسی بر روی اسپوک‌های یک تایر غیر بادی و تاثیر آن در عملکرد کلی تایر و پارامترهای تاثیرگذار در طراحی یک تایر غیر بادی مثل سفتی عمودی، حداکثر تنش در اسپوک‌ها و کل تایر، فشار تماسی، وزن ساختار و مقاومت غلطشی در بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این پایان نامه طراحی و مدل سازی ساختارهایی جدید برای لایه اسپوک تایر غیر بادی و همچنین یافتن شرایط هندسی مناسب‌تر نسبت به مدل‌های ارائه شده پیشین است. ساختارهای آگزتیکی جدیدی برای این منظور ارائه شده است و برای بدست آوردن عملکردی بهتر، مطالعه پارامتری بر روی ساختارهای مختلف و شرایط تاثیرگذار از جمله نوع بارگذاری، تاثیر استفاده از طبقات بیشتر سلول‌های لانه‌زنوری، بررسی ضخامت‌های مختلف برای دیواره سلول‌ها، تاثیر استفاده از چگالی‌های بیشتر، بررسی اثر استفاده از لایه برشی بررسی شده است. این ساختارها در بارگذاری‌های استاتیکی و سپس دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرند و با تایرهای مشابه بادی مقایسه می‌شوند و همچنین مود اول کمانشی و فرکانس طبیعی ساختارها مقایسه شده و در نهایت بهترین ساختارهایی که بالاترین ظرفیت حمل بار را دارا هستند و بهترین شرایط را برای جایگزین شدن با یک تایر بادی معمولی را دارند ارائه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی:

تایر غیر بادی – آگزتیک – بارگذاری استاتیکی – سفتی عمودی – فشار تماسی

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۱	۱-۱- موضوع تحقیق
۳	۱-۲- اهداف پژوهش
۳	۱-۳- معرفی ساختارهای آگزتیکی
۳	۱-۴- معرفی
۵	۲-۱- ساختارهای لانه زنburی
۶	۲-۲- ساختار ری-انترنت
۶	۲-۳- ساختار کایرال
۷	۲-۴- خواص و کاربردها
۸	۳-۱- روش‌های ساخت
۸	۳-۲- به صورت ساختار ماکرو
۱۰	۳-۳- به صورت ساختار میکرو
۱۱	۴- فصل دوم: پیشینه پژوهش
۱۱	۴-۱- مقدمه
۱۲	۴-۲- پژوهش‌های مرتبط با ساختارهای آگزتیکی و لانه زنburی
۲۰	۴-۳- پژوهش‌های مرتبط با بارگذاری استاتیکی بر روی تایرهای غیر بادی
۲۹	۴-۴- پژوهش‌های مرتبط با بارگذاری دینامیکی بر روی تایرهای غیر بادی
۳۶	۵- فصل سوم: تایرهای غیربادی، تئوری‌ها و تعاریف مهم

۳۶	۱-۱- مقدمه
۳۷	۲- خواص مواد مورد استفاده
۳۷	۲-۱- مواد هایپرالاستیک
۳۹	۲-۲- مواد ویسکوالاستیک
۴۱	۳- مشخصات ساختاری تایر غیر بادی
۴۳	۴- تعاریف مهم
۴۳	۴-۱- سفتی عمودی
۴۳	۴-۲- مقاومت غلطشی
۴۴	۴-۳- فشار تاماسی
۴۵	فصل چهارم: شبیه‌سازی عددی
۴۵	۱-۱- مقدمه
۴۶	۲- روش حل مسئله
۴۸	۳- شبیه‌سازی مساله
۴۹	۳-۱- مدل‌سازی هندسی
۵۷	۳-۲- مشخصات مواد استفاده شده
۵۹	۳-۳- نوع حلگر و شرایط برهم کنش میان اجزا
۶۱	۳-۴- بارگذاری و شرایط مرزی
۶۲	۴-۱- مطالعه حساسیت مش
۶۴	۴-۲- اعتبارسنجی

فصل پنجم: نتایج

۱-۵- مقدمه	۶۶
۵-۲- اثر استفاده از ساختارهای اسپوک متفاوت بر خواص تایر تحت بارگذاری استاتیکی	۶۷
۵-۲-۱- بررسی مودهای تغییر شکل و بیشترین تنشهای ایجاد شده در ساختارهای مختلف	۶۷
۵-۲-۲- بررسی سفتی عمودی مخصوص	۶۹
۵-۲-۳- بررسی فشار تماسی	۷۲
۵-۲-۴- مقایسه جرم ساختارها	۷۳
۵-۳- تحلیل دینامیکی و اعمال غلطش به تایر	۷۴
۵-۳-۱- بررسی تنشها در لایه اسپوک	۷۶
۵-۳-۲- بررسی تنشها در کل مدل	۷۹
۵-۳-۳- بررسی مقاومت غلطشی	۸۰
۵-۴- تحلیل کمانشی و فرکانس‌های طبیعی ساختارها	۸۱
۵-۴-۱- مقایسه مود اول کمانشی هر کدام از ساختارها	۸۲
۵-۴-۲- بررسی بار بحرانی مربوط به مود کمانشی	۸۴
۵-۴-۳- بررسی فرکانس‌های طبیعی	۸۵
۵-۵- مطالعه دیگر عوامل تاثیرگذار بر تایرهای غیر بادی	۸۶
۵-۵-۱- مطالعه بر روی ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری	۸۷
۵-۵-۲- بررسی تاثیر استفاده از چگالی سلول‌های بیشتر	۸۹
۵-۵-۳- بررسی تاثیر استفاده از لایه شیریند	۹۱

۹۳.....	۴-۵- استفاده از تعداد طبقات بیشتر برای ساختار لانهزنیوری
۹۷.....	فصل ششم: بحث و نتیجه گیری
۹۷.....	۱-۶- جمع‌بندی
۱۰۰.....	۲-۶- محدودیت‌ها
۱۰۰.....	۳-۶- نوآوری
۱۰۱.....	۴-۶- پیشنهادات
۱۰۲.....	منابع

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) نمایی از یک تایر غیربادی و لایه های استفاده شده در آن [۱]	۲
شکل (۲-۱) نمایی از مواد دارای ضربه پواسون منفی (سمت راست) و مواد با ضربه پواسون مثبت (سمت چپ) [۲]	۴
شکل (۳-۱) یک ساختار لانه زنبوری شش ضلعی چند طبقه [۴]	۵
شکل (۴-۱) فرم و چیدمان ساختار ری-انترنت [۶]	۶
شکل (۵-۱) فرم و چیدمان ساختار کایرال [۷]	۷
شکل (۶-۱) ساخت ساختار لانه زنبوری با استفاده از روش سنبه ماتریس [۳]	۹
شکل (۷-۱) نحوه ساخت ساختار لانه زنبوری چند طبقه با استفاده از روش چسب کاری و برش [۳]	۹
شکل (۸-۱) نحوه ساخت ساختار لانه زنبوری با استفاده از روش هیدروفرمینگ [۱۲]	۱۰
شکل (۱-۲) ۶ نمونه از ساختارهایی که از خود رفتار آگرتریکی نشان میدهند، ساختارهای (a) درون رو، (b) لانه زنبوری ستاره ای، (c) ۶ ضلعی سازهای درون رو، (d) شبکه لوزنگو، (e) شبکه مربعی، (f) پیوند سینوسی [۸]	۱۲
شکل (۲-۲) درصد انرژی جذب شده در سرعت های مختلف ضربه برای پوسته جلویی و پشتی و هسته [۲۳]	۱۴
شکل (۳-۲) مقایسه زمان نفوذ مدل جدید با نتایج مدل تجربی و عددی بیوتراگو [۲۴]	۱۵
شکل (۴-۲) سرعت باقیمانده سرعت های مختلف ضربه برای سه چیدمان صفحه کامپوزیت [۲۴]	۱۶
شکل (۵-۲) توزیع تنش و تغییر شکل مدلها و مقایسه ترکیب مختلفی از سلول ها [۲۵]	۱۷
شکل (۶-۲) توزیع تنش و تغییر شکل سه مدل با ترکیب مختلفی از سلولها بر اثر بارگذاری ضربه [۲۵]	۱۷

..... شکل (۷-۲) تغییر شکل ساختارهای مختلف تحت فشار در مدلسازی اجزاء محدود و آزمایش های تجربی	۱۹	[۲۷]
..... شکل (۸-۲) اثرات ضخامت دیوار بر منحنی تغییر شکل: الف) لانه زنبوری های غیر درون رو، و	۲۰	[۲۸]
..... شکل (۹-۲) نحوه رسم ساختار لانه زنبوری و متغیرهای آن [۴۱]	۲۲	
..... شکل (۱۰-۲) مقایسه سه ساختار غیر آگزتیکی با ساختار لانه زنبوری [۴۲]	۲۳	
..... شکل (۱۱-۲) مقایسه ای بین سفتی عمودی سه ساختار غیر آگزتیکی و لانه زنبوری [۴۲]	۲۳	
..... شکل (۱۲-۲) مطالعه ساختارهای مختلف با تعداد اسپوک های متفاوت [۴۳]	۲۴	
..... شکل (۱۳-۲) در نظر گرفتن پارامتر طول سلول برای بررسی و مقایسه آن با مقدار رفرنس [۱]	۲۵	
..... شکل (۱۴-۲) - ساختار آنتی تراکایرال در تایر غیر بادی [۴۴]	۲۶	
..... شکل (۱۵-۲) جابجایی لیگامان ها در ساختار تراکایرال [۴۴]	۲۷	
..... شکل (۱۶-۲) مقایسه ساختار الهام گرفته شده از طبیعت با تایر بادی معمولی [۴۵]	۲۸	
..... شکل (۱۷-۲) نمایی از فشار تماسی در سطح زیرین تایر در هنگام اعمال بارهای ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتنی برای یک ساختار لانه زنبوری [۴۶]	۲۹	
..... شکل (۱۸-۲) مقایسه تغییر شکل در لایه اسپوک و مقایسه با نتایج آزمایش تجربی [۵۴]	۳۱	
..... شکل (۱۹-۲) شرایط مرزی و نحوه شبیه سازی دینامیکی [۵۵]	۳۲	
..... شکل (۲۰-۲) مودهای شعاعی مرتبه دوم تایر غیر بادی با ساختار لانه زنبوری [۵۶]	۳۳	
..... شکل (۲۱-۲) مودهای خمشی مرتبه دوم تایر غیر بادی با ساختار لانه زنبوری [۵۶]	۳۳	
..... شکل (۲۲-۲) بررسی چیدمان های مختلف اسپوک ها برای مطالعه آیرودینامیکی تایر غیر بادی [۵۸]	۳۴	

- شکل (۱-۵) مودهای تغییر شکل و بیشترین تنش ایجاد شده لایه اسپوک ک تایر تحت بار ۲۰۰۰ نیوتن به ترتیب
برای ساختارهای (a) آگزتیکی لانه زنبوری، (b) NPT-A1، (c) درون رو، (d) مدل spoke pair ۶۸
- شکل (۲-۵) مقایسه میزان جابجایی عمودی در ساختارهای مختلف ۷۰
- شکل (۳-۵) سفتی عمودی برای ساختارهای اسپوک متفاوت تحت بارگذاری فشاری ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتن و
مقایسه آن با مقادیر یک تایر بادی معمولی مشابه [۴۶] ۷۱
- شکل (۴-۵) مقایسه فشار تماسی بین ساختارهای اسپوک متفاوت تایر غیر بادی و تایر بادی معمولی ۷۲
- شکل (۵-۵) نمایی از گسترش فشار تماسی در محل تماس لایه عاج تایر با سطح زمین با افزایش بار در ساختار
لانه زنبوری ۷۳
- شکل (۵-۶) مقایسه ای بین وزن تجمیعی ساختارهای اسپوک ۷۴
- شکل (۷-۵) مقایسه ظاهری تغییر شکل شبیه سازی شده تحت بار عمودی ۴۰۰۰ نیوتنی و با اعمال سرعت
زاویه ای در ساختار NPT-A1 با نتیجه تجربی مود تغییر شکل ۷۶
- شکل (۸-۵) تغییرات تنش لایه اسپوک در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل
NPT-A1 ۷۷
- شکل (۹-۵) تغییرات تنش لایه اسپوک در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل آگزتیکی
لانه زنبوری ۷۸
- شکل (۱۰-۵) تغییرات تنش لایه اسپوک در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل
Spoke pair ۷۸
- شکل (۱۱-۵) تغییرات تنش لایه اسپوک در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل
درون رو ۷۹

شکل (۱۲-۵) مقایسه تغییرات تنش در کل تایر در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل ارائه شده.....	۴
شکل (۱۳-۵) مقاومت غلطشی با افزایش سرعت دورانی تایر برای ساختار NPT-A1.....	۸۱
شکل (۱۴-۵) مود اول کمانشی برای ساختار NPT-A1.....	۸۳
شکل (۱۵-۵) مود اول کمانشی برای ساختار آگزتیکی لانه زنبوری.....	۸۳
شکل (۱۶-۵) مود اول کمانشی برای ساختار درون رو.....	۸۴
شکل (۱۷-۵) مود اول کمانشی برای ساختار Spoke pair.....	۸۴
شکل (۱۸-۵) مقایسه فرکانس طبیعی های یک تایر بادی معمولی با مدل های مختلف تایر غیر بادی.....	۸۶
شکل (۱۹-۵) تاثیر تغییرات سفتی عمودی بر اثر تغییر ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری.....	۸۷
شکل (۲۰-۵) تاثیر تغییرات تنش در لایه اسپوک بر اثر تغییر ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری.....	۸۸
شکل (۲۱-۵) تاثیر تغییرات فشار تماسی بر اثر تغییر ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری.....	۸۸
شکل (۲۲-۵) تاثیر تغییرات سفتی عمودی بر اثر تغییر تعداد سلول های لانه زنبوری.....	۸۹
شکل (۲۳-۵) تاثیر تغییرات تنش در لایه اسپوک بر اثر تغییر تعداد سلول های لانه زنبوری.....	۹۰
شکل (۲۴-۵) تاثیر تغییرات فشار تماسی بر اثر تغییر تعداد سلول های لانه زنبوری.....	۹۰
شکل (۲۵-۵) تغییر شکل تایر غیر بادی بدون لایه شیریند تحت بار استاتیکی.....	۹۲
شکل (۲۶-۵) مقایسه فشار تماسی در مدل a) بدون لایه شیریند و b) مدل دارای لایه شیریند.....	۹۳
شکل (۲۷-۵) جزئیات رسم ساختار سوم دارای ۴۸ سلول لانه زنبوری.....	۹۴
شکل (۲۸-۵) نمایی سه بعدی از لایه اسپوک ساختار لانه زنبوری با ۴۸ سلول.....	۹۵

فهرست جداول

جدول (۱-۴) مشخصات هندسی ساختارهای مختلف لایه اسپوکن	۵۱
جدول (۲-۴) مشخصات مواد مورد استفاده در لایه هاب و لایه های تقویتی [۴۶]	۵۷
جدول (۳-۴) خواص انرژی کرنش اوگدن هایپرالاستیک ماده پلی اورتان [۴۶]	۵۸
جدول (۴-۴) خواص انرژی کرنش اوگدن هایپرالاستیک ماده لاستیک مصنوعی [۴۶]	۵۸
جدول (۴-۵) خواص سری پرونی ویسکوالاستیک ماده پلیاورتان [۵۴]	۵۹
جدول (۴-۶) خواص سری پرونی ویسکوالاستیک ماده لاستیک مصنوعی [۵۴]	۵۹
جدول (۱-۵) بیشترین تنش ایجاد شده به تایر برای ساختارهای اسپوکن متفاوت تحت بار فشاری نیوتون	۲۰۰۰
جدول (۲-۵) مقایسه بار بحرانی مربوط به مود کمانشی اول ساختارهای ارائه شده	۸۴
جدول (۳-۵) نتایج مربوط به تایر غیر بادی بدون لایه شیربند تحت بار نیوتونی ۲۰۰۰	۹۲
جدول (۴-۵) نتایج مربوط به استفاده از ساختار آگزتیکی درون رو به عنوان لایه اسپوکن تحت بار نیوتون	۹۵

فصل اول: مقدمه

۱- موضوع تحقیق

از زمان معرفی نخستین تایر بادی دوچرخه توسط دانلپ^۱ در سال ۱۸۸۸ این نوع از تایرها به دلیل مزیت‌های ویژه‌ای که داشتند برای بیش از یک قرن در تمامی زمینه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. از مزیت‌های عمدۀ تایرها بادی می‌توان به اتلاف انرژی کم آنها در سطوح سخت، سفتی عمودی^۲ و فشار تماسی^۳ نسبتاً کم و جرم کم آنها اشاره کرد.

اما امروزه با پیشرفت روزافزون تکنولوژی و با معرفی ساختارهایی که دارای وزن نسبتاً کم و خواص مکانیکی بهتر هستند، محققان به دنبال جایگزینی این نوع از ساختارها با نمونه‌هایی که پیش از این از آنها استفاده می‌شدند هستند. تایرهای غیربادی^۴ نوع جدیدی از تایرها هستند که در آنها به جای استفاده از فشار باد از یک ساختار

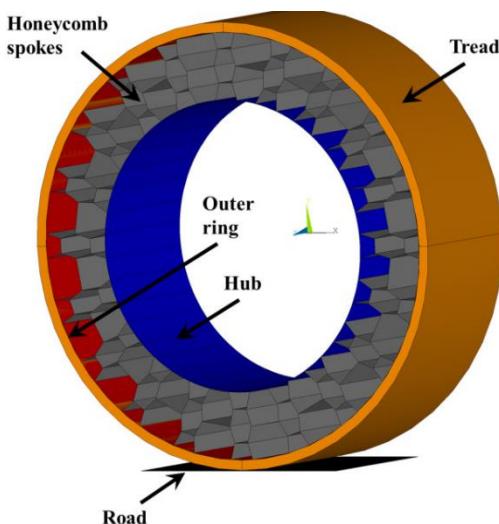
¹ Dunlop

² Vertical Stiffness

³ Contact Pressure

⁴ Non-pneumatic Tires

مکانیکی که می‌تواند یک ساختار آگزتیکی^۱ نیز باشد (مانند نمونه متداول لانه زنبوری^۲) استفاده می‌شود. این نوع از ساختارها اگر به صورت بهینه طراحی و مدل شوند می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به تایرهای بادی معمولی داشته باشند. در سالیان اخیر محققان و مهندسین توجه ویژه‌ای به تایرهای غیربادی داشته‌اند و پژوهش بسیاری به بررسی عوامل تاثیرگذار در عملکرد تایرهای غیربادی پرداخته‌اند. از جمله مواردی که تاثیر مستقیمی روی عملکرد یک تایر غیربادی می‌گذارد نحوه چیدمان و شرایط هندسی لایه اسپوک^۳ یک تایر غیربادی است. شکل (۱-۱) لایه‌های مختلف یک تایر غیربادی را نشان می‌دهد که برای لایه اسپوک آن از ساختار آگزتیکی لانه زنبوری استفاده شده است. علاوه بر لایه‌های نشان داده شده در شکل (۱-۱) در اکثر کاربردها از یک لایه برشی^۴ نیز قبل از لاینگ خارجی استفاده می‌شود.



شکل (۱-۱) نمایی از یک تایر غیربادی و لایه‌های استفاده شده در آن [۱]

¹ Auxetic

² Honey Comb

³ Spoke

⁴ Shear band

۱-۲- اهداف پژوهش

در این پژوهش تاثیر استفاده از هندسه‌های مختلف لایه اسپوک تایر غیر بادی در عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آن با نتایج مقالات پیشین و نتایج حاصل از یک تایر بادی معمولی مقایسه می‌شود. همچنین مطالعات دیگری بر روی انواع مختلف ساختارهای آگزتیکی لانه زنبوری و ساختار ری-انترنت^۱ و بررسی چگالی‌های مختلف از ساختارهای لانه زنبوری و تاثیر تغییر ضخامت دیواره ساختار در عملکرد تایر مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی هدف این پژوهه معرفی ساختارهای آگزتیکی که قابلیت پیاده‌سازی در محیط دایروی را داشته باشند و یافتن بهترین شرایط هندسی برای آن‌ها است که عملکرد تایرهای غیر بادی را ارتقا دهند و بتوانند به عنوان جایگزین برای تایرهای بادی معمولی در نظر گرفته شوند.

شبیه‌سازی‌ها به طور کلی به صورت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی بررسی می‌شوند و عملکرد مدل و ساختارهایی که بهترین عملکردهای در بارگذاری استاتیکی داشتند در بارگذاری دینامیکی و با دادن سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای (به نحوی که تایر بر روی زمین غلطش داشته باشد) مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

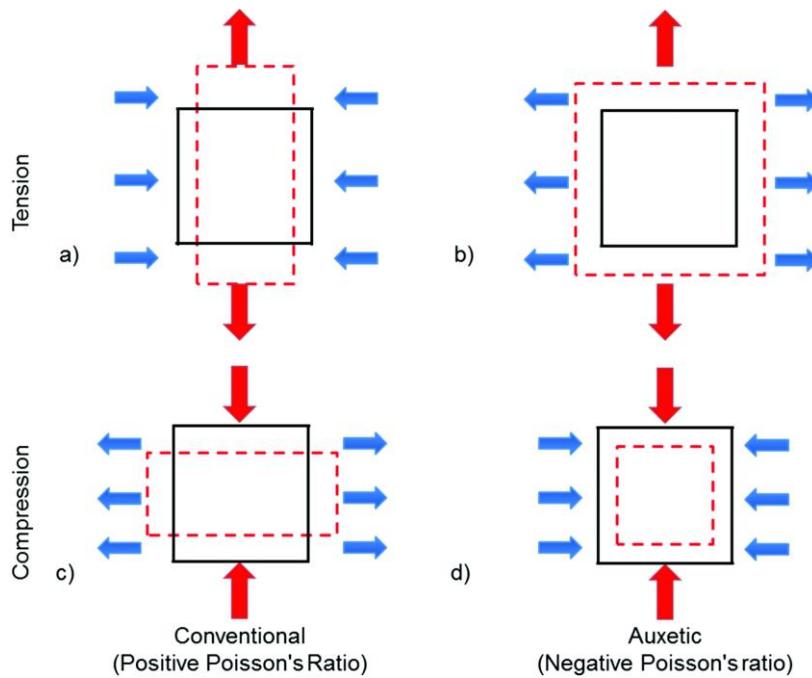
۱-۳- معرفی ساختارهای آگزتیکی

۱-۳-۱- معرفی

ضریب پواسون هر ماده‌ای مساوی است با منفی حاصل تقسیم کرنش جانبی به کرنش محوری در راستای بارگذاری وارد بر ماده یا ساختار. در حالت کلی، مواد دارای نسبت پواسون مثبت هستند که درنتیجه اگر در یک محور کشیده شوند در راستای محور دیگر دچار کاهش سطح مقطع می‌شوند. اما در مواد یا ساختارهای با نسبت پواسون منفی، این قضیه بر عکس است، یعنی هنگام کشش در راستای یک محور دچار افزایش سطح مقطع در

¹ Re-entrant

راستای محور عمود بر آن می‌شود که این پدیده در شکل (۲-۱) هم نمایش داده شده [۲]. مواد یا ساختارهایی که این رفتار را از خود نشان می‌دهند اصطلاحاً آگزتیک نامیده می‌شوند.



شکل (۲-۱) نمایی از مواد دارای ضریب پواسون منفی (سمت راست) و مواد با ضریب پواسون مثبت (سمت چپ) [۲]

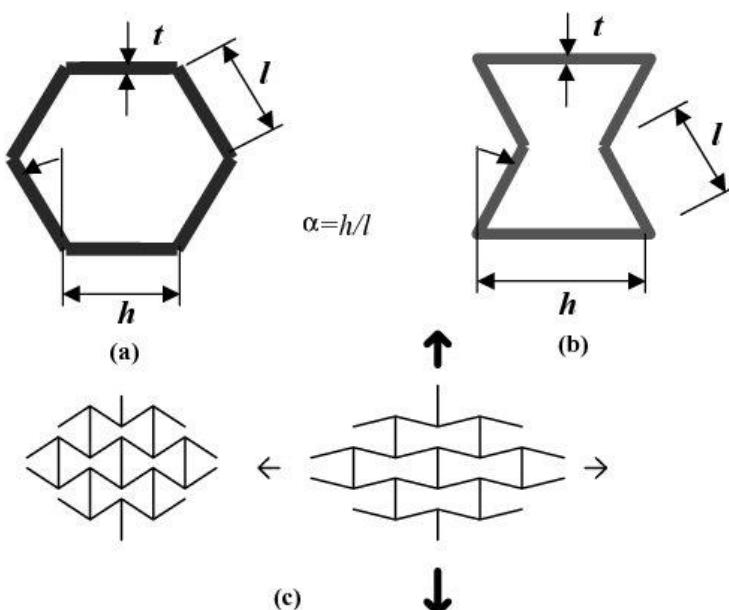
با توجه به ارتباط ضریب پواسون با کاهش و افزایش طول در اثر اعمال بارهای فشاری و کششی و ضرورت رفتار به خصوص مواد در هر فناوری کنونی؛ موادی با ضریب پواسون منفی ساخته شده‌اند که به عنوان مواد آگزتیک شناخته می‌شوند. همانطور که گفته شد موادی که ضریب پواسون منفی دارند، دارای تفاوت عمدی‌ای در اثر اعمال فشار یا کشش نسبت به مواد عادی هستند؛ رفتار آن‌ها به این صورت است که در اثر اعمال کشش دچار افزایش طول در راستای عمود بر امتداد کشش نسبت به مواد عادی هستند. ضریب پواسون منفی تاثیر ویژه‌ای بر خواص مکانیکی ماده از قبیل مقاومت خوردگی، متراکم سازی، مقاومت برشی و برخی جنبه‌های عملکرد دینامیکی دارد. این خواص به ویژگی‌های تغییر شکل بازگشتی^۱ نسبت داده می‌شوند. مواد آگزتیک به طور طبیعی در سنگ‌ها و مواد معدنی یافت می‌شود. با تئوری‌های ترمودینامیکی برای مواد همسانگرد، ثابت می‌شود که مقادیر ممکن برای ضریب پواسون بین ۰.۵ و ۱ است لذا وجود مواد آگزتیک منافاتی با آن ندارد [۳].

^۱ Elastic

۲-۳-۱- ساختارهای لانه زنبوری

یک ساختار لانه زنبوری مجموعه‌ای از سلول‌های توخالی است که از یک سری ورقه‌های نازک از یک ماده خاص و اتصال آنها به یکدیگر تشکیل شده است. متداول‌ترین ساختار لانه زنبوری به شکل شش ضلعی است. هندسه مربوط به این ساختار نسبت پواسون مثبت را موجب می‌شود. ساختار لانه زنبوری در مقایسه با دیگر ساختارها از خواص خوبی همچون مقاومت به لهشدگی بالا در مقایسه با وزن کم آن برخوردار است [۴].

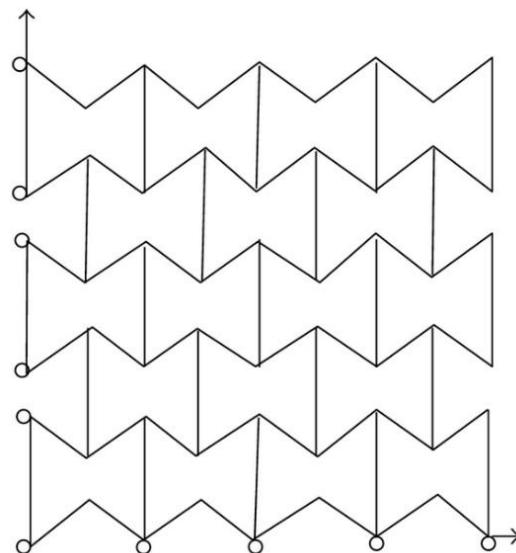
این نوع از سازه‌ها به تنها بی از کارایی مناسبی در برابر بارگذاری‌های متفاوت برخوردار نیستند. برای مثال تحت بارگذاری‌های موضعی، این امکان وجود دارد که بخشی از سازه اصلاً آن بار را احساس نکند. علاوه بر این موضوع لازم است در کاربردهای متداولی که آن‌ها دارند، پوششی رویشان قرار گیرد. پس معمولاً با اضافه کردن لایه‌های بالایی و پایینی، از جنس‌های مختلف مثل فلز، سرامیک و کامپوزیت، خواص آن بهبود پیدا می‌کند. از طرف دیگر با افروختن لانه زنبوری به رویه‌ها، ممان سطح سازه افزایش می‌باید، درنتیجه سفتی خمسی آن افزایش می‌یابد. در حقیقت هر یک از اجزا این پنل ساندویچی به تنها بی عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهند، اما پس از ترکیب آن‌ها با یکدیگر، سازه‌ای با سفتی بالا و همچنین وزن کم به وجود می‌آید. شکل (۳-۱) تفاوت یک ساختار لانه زنبوری معمولی و آگزتیکی را به لحاظ هندسی نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱) (a) یک ساختار لانه زنبوری عادی و (b) آگزتیکی [۵]

۳-۳-۱- ساختار ری-انترنت

ساختار ری-انترنت^۱ در سال ۱۹۹۶ توسط مسترز و ایوانز ارائه شد [۶]. این ساختار تقریباً مشابه با ساختار لانهزنبری است، با این تفاوت که همانند شکل (۴-۱) به جای ۶ ضلعی های منتظم، خطوط موربی با زاویه مشخصی آن ها را قطع کرده‌اند.



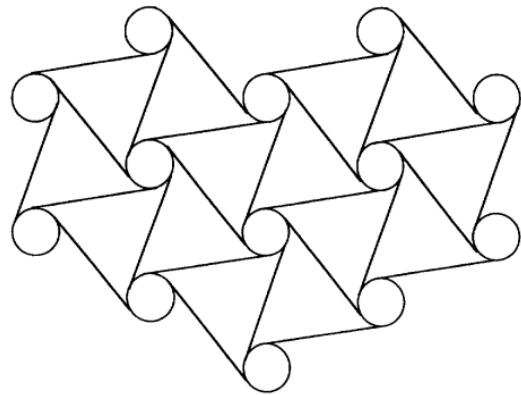
شکل (۴-۱) فرم و چیدمان ساختار ری-انترنت [۷]

۴-۳-۱- ساختار کایرال

ساختار کایرال^۲ در سال ۱۹۹۷ توسط پرال و لیکس ارائه شد [۸]. این ساختار دایره هایی در مرکز را شامل می‌شود که توسط ۶ رابط به دایره هایی دیگر مطابق با شکل (۵-۱) متصل می‌شوند.

¹ Re-entrant Structure

² Chiral Structure



شکل (۱-۵) فرم و چیدمان ساختار کایرال [۸]

۱-۳-۵- خواص و کاربردها

مواد آگزتیک به دلیل هندسه و انعطاف پذیری ای که در طراحی دارند می‌توانند بنا به سلیقه طراحان و بنا به کاربردی که مهندسین در نظر دارند، ویژگی خاص آن کاربرد را داشته باشند، اما به طور کلی می‌توان به چند مورد از خواص کلی آن‌ها اشاره کرد.

۱. استحکام بالاتر

۲. وزن به نسبت کمتر

۳. امکان جذب انرژی نسبتاً بالا

۴. مقاومت شکست بالا

۵. خصوصیات دینامیکی خوب

۶. مدول برشی عرضی خوب

از کاربردهای ویژه این ساختارها نیز می‌توان به موضوع اصلی این پژوهه یعنی تایرهای غیر بادی اشاره کرد. همچنین این مواد کاربردهای بسیاری در صنایع دیگر از جمله برای کاربردهای مهندسی مثل جاذب ضربه، جاذب صدا، چفت و گیره، صنایع ماهیگیری، درزبند و... دارند [۹]. از دیگر کاربردهای این مواد در صنایع هوافضا و در صنایعی که نیاز به حفاظت از جان انسان‌ها و یا جلوگیری از ضربه دارند است که برای مثال

می‌توان از آن‌ها در کلاه ایمنی برای جلوگیری از ضربه در تصادفات، یا دسنکش یا سپر خودرو یا محافظ ساق پا و سازه‌های ضد گلوله استفاده کرد [۱۰، ۱۱].

همچنین این مواد و ساختارها کاربردهای پزشکی نیز دارند و برای باند، رگ‌های خونی مصنوعی و ابزارهای رهاسازی دارو^۱ و همچنین به عنوان حسگر و محرک در دستگاه‌های پیزوالکتریک استفاده می‌شوند [۹، ۱۲].

۱-۴- روشهای ساخت

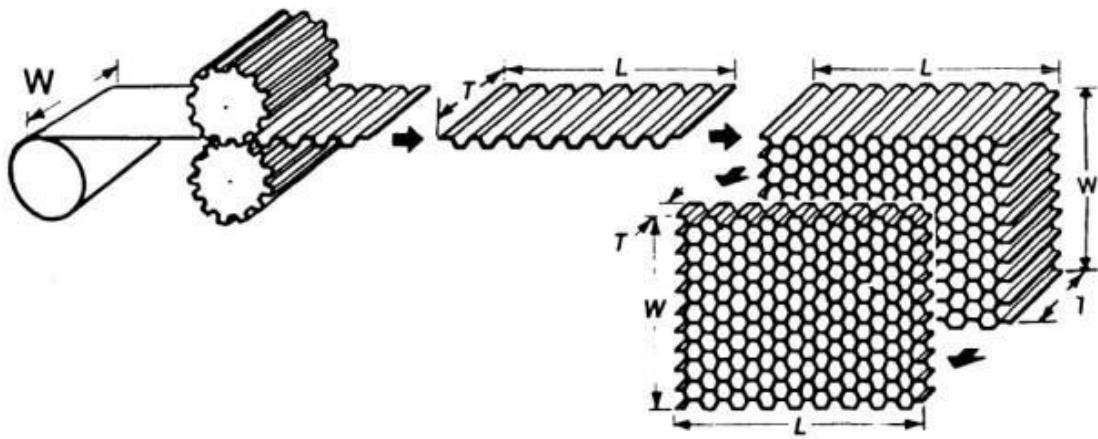
۱-۴-۱- به صورت ساختار ماکرو

به طور کلی روشهای مختلفی برای ساخت ساختارهای لانهزنبوری وجود دارد. از آنجا که ساخت هسته آگزتیک در سازه‌های ساندویچی با ساختارهای لانهزنبوری تشابه دارد، در این بخش یک سری از روشهایی که برای ساخت آن‌ها و به طور کلی برای ساخت ساختارهای لانهزنبوری‌ای که از جنس آلومینیوم ساخته شده‌اند بیان شده است.

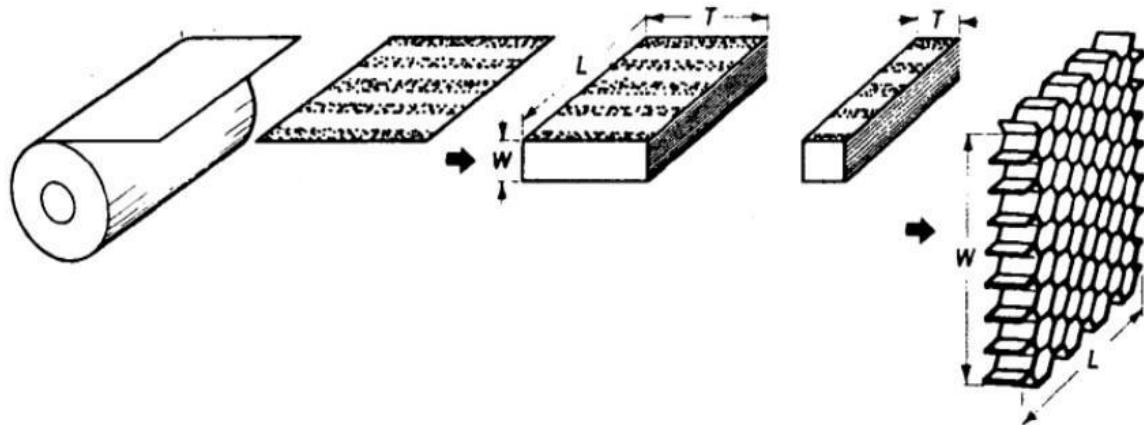
برای ساخت ساختارهای لانهزنبوری آلومینیومی، روشهای زیر قابل اجرا است:

۱. جوشکاری مقاومتی، غیر ذوبی و گداخت دمایی
۲. استفاده از سنبه ماتریس‌ها برای کنگره دار کردن فویل‌های آلومینیومی
۳. استفاده از چسب کاری خطی
۴. هیدروفرمینگ

^۱ Drug release devices

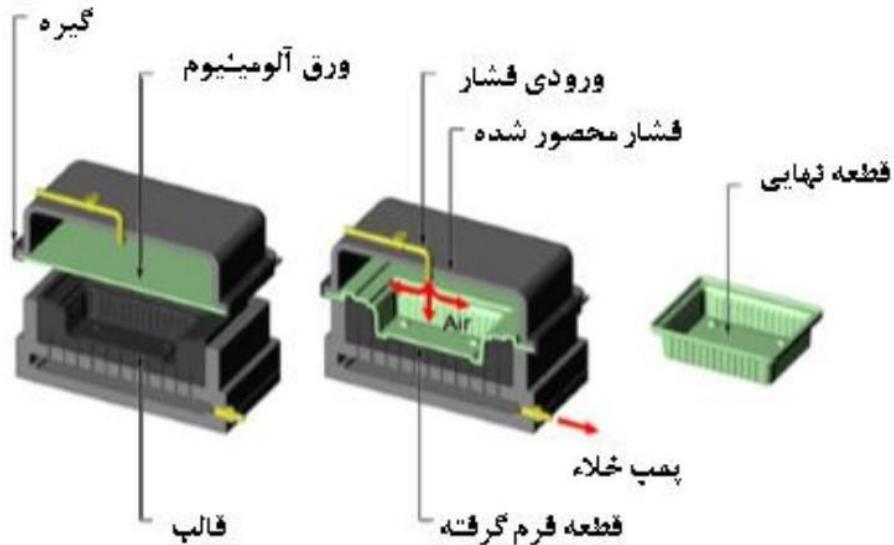


شکل (۱-۶) ساخت ساختار لانه زنبوری با استفاده از روش سنبه ماتریس [۴]



شکل (۱-۷) نحوه ساخت ساختار لانه زنبوری چند طبقه با استفاده از روش چسب کاری و برش [۴]

هیدروفرمینگ یا شکل دهی هیدرولیکی، یکی از فرآیندهای اصلی شکل دهی ورقهای فلزی بوده که در سالهای اخیر مورد توجه مهندسین قرار گرفته است [۱۳, ۱۴]. این روش به عنوان جایگزینی برای فرآیندهای سنبه ماتریس و جوشکاری سنتی در ساخت قطعات پیشنهاد می شود. این روش علاوه بر اینکه می تواند وزن قطعه را کاهش بدهد، می تواند منجر به کاهش دورریز مواد و همچنین ساخت قطعات محکم تر و استوار تر شود، به نحوی که نیاز به جوشکاری کمتری نیز بشود.



شکل (۸-۱) نحوه ساخت ساختار لانه زنبوری با استفاده از روش هیدروفرمینگ [۱۳]

۲-۴-۱- به صورت ساختار میکرو

برخی مواد به طور طبیعی از خود خواص آگزتیکی بروز می‌دهند اما دیگر مواد این رفتار را ندارند. می‌توان با اعمال شرایطی خاص از لحاظ شیوه‌ی تهیه و شکل دهی مواد، این خواص را به آنها اضافه کرد. از دیدگاه میکرو نیز مواد آگزتیک به روش‌های گوناگونی ساخته می‌شوند. در تمامی روش‌ها هدف ایجاد یک الگوی تکرار شونده از بلوک‌ها و سلول‌هایی است که دارای شکل ضروری لولا مانندی باشند. برای ساختن یک فوم آگزتیک می‌توان یک تکه فوم را از سه جهت تحت فشار قرار داد و سپس آن را تا دمای بالای نرم شدنگی ماده‌ی به کار رفته‌ی پلیمری فوم، حرارت داد. در نهایت آن را تا دمای محیط سرد کرد. البته شیوه‌های دیگری بسته به نوع ماده‌ی به کار رفته در فوم وجود دارد [۱۵].

فصل دوم: پیشینه پژوهش

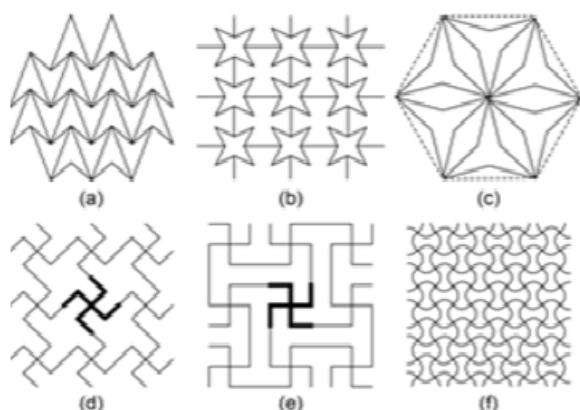
۱-۲- مقدمه

با مرور ادبیات مربوط به این پژوهه می‌توان متوجه شد که با توجه به اینکه ساختارهای آگزتیکی موضوع نسبتاً جدیدی هستند، در سالیان اخیر مطالعات بسیاری به بررسی این ساختارها و کاربردهای آن‌ها پرداخته‌اند. یکی از کاربردهای مهم این ساختارها نیز در تایرهای غیربادی است. مرور ادبیات تایرهای غیربادی در این پژوهه به دو بخش استاتیکی و دینامیکی تقسیم شده‌اند که با بررسی آن‌ها مشخص می‌شود که مقالات زیادی به بررسی رفتار استاتیکی این نوع از تایرهای پرداخته‌اند اما تنها مقالات اندکی در حوزه بررسی رفتار دینامیکی این تایرهای وجود دارند. در این پژوهه هم رفتار استاتیکی و هم رفتار دینامیکی این تایرهای در ساختارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند و تلاش بر این بوده است که یک ساختار که عملکرد بهتری نسبت به ساختارهای پیشین داشته باشد ارائه شود.

۲-۲- پژوهش های مرتبط با ساختارهای آگزتیکی و لانه زنبوری

ضریب پواسون^۱ یک ماده عبارت است از نسبت کرنش جانسی به کرنش محوری [۱۶]. به طور کلی مواد دارای ضریب پواسون مثبت هستند. به این صورت که در صورت اعمال بار کششی به آنها این مواد نازک‌تر و در صورت اعمال بار فشاری، ضخیم‌تر خواهند شد. اما این رفتار برای مواد آگزتیکی صادق نیست. این مواد با داشتن ضریب پواسون منفی خلاف این رفتار از خود نشان می‌دهند [۱۷، ۳]

در دهه‌های گذشته مهندسین به بررسی ساختارهایی که از خود رفتار آگزتیکی نشان می‌دهند پرداخته‌اند و از میان مهم‌ترین ساختارهای ارائه شده می‌توان به ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی درون‌رو که به ترتیب توسط گیبسون [۱۸] و لی [۱۹] اشاره کرد. پس از آن‌ها پژوهش‌های دیگری بر روی ساختارهای کایرال^۲ انجام شد و این ساختارها به عنوان ساختارهای به نسبت جدیدتر آگزتیکی معروفی شدند [۲۰، ۲۱].



شکل (۲-۲) ۶ نمونه از ساختارهایی که از خود رفتار آگزتیکی نشان می‌دهند، ساختارهای (a) درون‌رو، (b) لانه زنبوری ستاره‌ای^۳، (c) ۶ ضلعی سازه‌ای درون‌رو^۴، (d) شبکه لوزنگو^۵، (e) شبکه مربعی^۶، (f) پیوند سینوسی^۷

¹ Poisson's ratio

² Chiral

³ Double arrowhead structure

⁴ Structurally hexagonal honeycomb

⁵ Lozenge grids

⁶ Square grids

⁷ Sinusoidal ligaments

در سازه‌های ساندویچی می‌توان از ساختارهای لانه زنبوری و آگزتیکی به عنوان یک لایه استفاده کرد. این سازه‌ها شامل دو رویه نازک، سفت و محکم هستند که به هسته‌ای سبک و ضخیم با مدل الاستیسیته کوچک بوسیله اتصالات چسبی محکم شده‌اند تا سازه‌ای خیلی سبک و مستحکم بdest آید. در بیشتر موارد رویه‌ها بارهای صفحه‌ای و خمی را تحمل می‌کنند، همچنین هسته‌ی این نوع سازه‌ها در برابر بارهای برشی مقاومت می‌کند.

مهمترین جزء سازه ساندویچی، هسته آن است. ماده هسته باید خصوصیاتی مانند چگالی کم برای هرچه کمتر نمودن وزن سازه و مدل یانگ عمودی بالا برای ممانعت از تغییر شکل بیش از اندازه در راستای ضخامت و کاهش سریع سفتی خمی داشته باشد. هسته سازه‌های ساندویچی می‌تواند به صورت کامپوزیت و لانه زنبوری باشد. این هسته همچنین می‌تواند از جنس فلز (آلیاژهای سبک، فولاد) یا غیر فلزی (کارتنهای آغشته شده به رزین فنولیک، ورقه‌های پلی‌آمید، یا الیاف‌های شیشه آغشته شده) باشد.

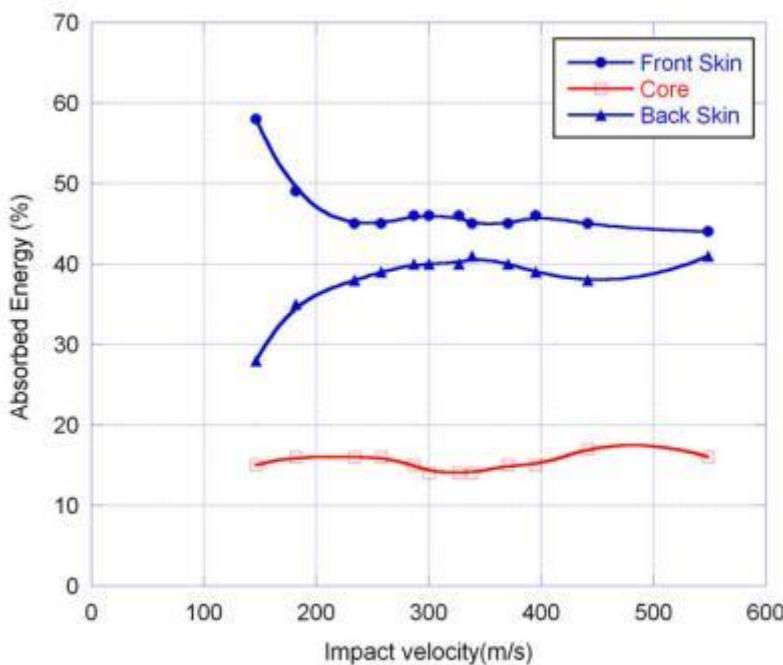
وانگ^۱ در سال ۲۰۰۹ در بررسی رفتار ساختار ساندویچی ساخته شده از مغزی لانه زنبوری پلی پروپیلن در مقابل بار ضربه مشاهده کرد که مغزی لانه زنبوری حدود ۵۰ تا ۹۵ درصد انرژی کل سازه را جذب می‌کند، در حالی که پوسته‌های فوقانی تنها ۳۵ تا ۷ درصد انرژی ضربه را جذب می‌نمایند. همچنین در بررسی مقاومت به ضربه و جذب انرژی پنل‌های ساندویچی لانه زنبوری کاغذی به این نتیجه رسید که افزایش چگالی نسبی و افزایش ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری باعث بهبود جذب انرژی در پنل ساندویچی و افزایش قابلیت فشردنگی پنل می‌گردد [۲۲].

بویتراغو^۲ و همکارانش [۲۳] تأثیر ضربه‌های با سرعت بالا را بر روی سازه‌های ساندویچی ساخته شده از هسته‌های لانه زنبوری آلومینیومی و رویه‌های کربن / اپوکسی را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. برای بررسی عددی این تحلیل از نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند و یک مدل سه‌بعدی المان محدود از یک چهارم مدل هدف را شبیه‌سازی و سپس با نتایج تجربی مقایسه و صحه‌گذاری کردند. آنها در نهایت تطابق خوبی بین نتایج مدل ریاضی و تجربی بدست آوردند. همچنین آنها تاثیرات پوسته و هسته در ظرفیت انرژی جذب شده صفحه‌های ساندویچی در محدوده وسیعی از سرعت‌های ضربه مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که اکثر انرژی

¹ Wang

² Buitrago

ضربه توسط پوسته جذب می‌شود. برای سرعت‌های ضربه‌ای که بالاتر از ۲۵۰ متر بر ثانیه هستند، تقریباً ۴۵ درصد انرژی ضربه توسط پوسته جلویی و ۴۰ درصد آن توسط پوسته پشتی جذب می‌شود. برای سرعت‌های ضربه نزدیک به محدوده بالستیک، پوسته جلویی تقریباً ۶۰ درصد انرژی کل را جذب می‌کند. از سوی دیگر، در تمامی سرعت‌های ضربه بررسی شده، هسته لانه‌زنبوری بین ۱۰ تا ۲۰ درصد انرژی ضربه را توسط کرنش پلاستیکی جذب می‌کند.

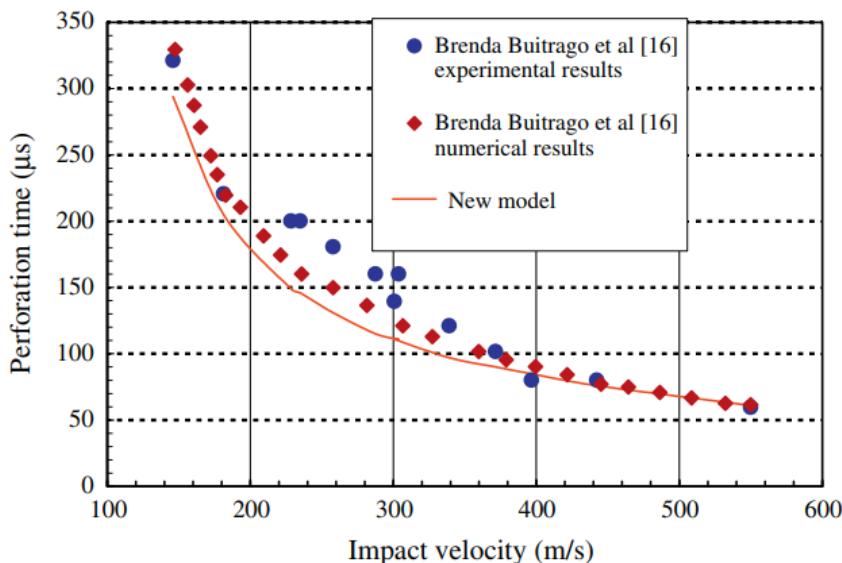


شکل (۲-۲) درصد انرژی جذب شده در سرعت‌های مختلف ضربه برای پوسته جلویی و پشتی و هسته لانه‌زنبوری [۲۳]

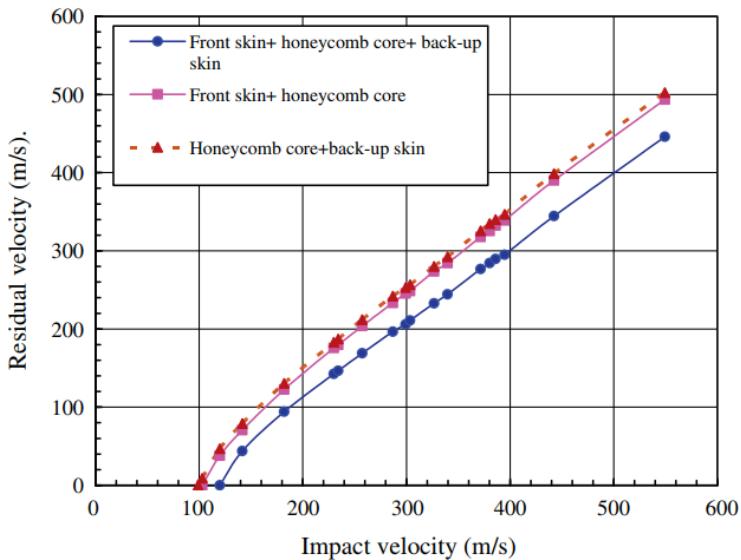
در سال ۲۰۱۲ فعلى و نامداری [۲۴] یک مدل تحلیلی برای بررسی رفتار سازه ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری که در معرض ضربه عمودی سرعت بالا قرار داشت، ارائه کردند. صفحه ساندویچی مورد مطالعه آنها از هسته لانه زنبوری آلومینیومی بین دو پوسته نازک کامپوزیت تشکیل می‌شد. آنها راه حل فرآیند نفوذ را به صورت ۳ مرحله‌ای در نظر گرفتند: نفوذ از پوسته کامپوزیت جلویی، هسته لانه زنبوری، پوسته کامپوزیت زیرین. تلاش آن‌ها این بود که کرنش و انرژی جنبشی پوسته کامپوزیتی جلویی و پشتی و انرژی جذب شده هسته لانه‌زنبوری را تخمین بزنند. علاوه بر این، بر اساس تعادل انرژی و معادله حرکت، انرژی جذب شده سازه ساندویچی، سرعت باقیمانده پرتابه، زمان نفوذ و سرعت پرتابه را بدست آوردند و یا مقادیر تست‌های تجربی و مدل‌های عددی در

دسترس مقایسه کردند. علاوه بر این موارد، آنها اثر پوسته کامپوزیت و هسته لانه‌زنبوری آلومینیومی را برابر مقاومت نفوذ و عملکرد بالستیک صفحه ساندویچ را بررسی کردند. شکل (۳-۲) مقایسه‌ای بین مقادیر تجربی و عددی را برای زمان مدل جدید نشان می‌دهد و شکل (۴-۲) نیز، برای سه چیدمان مختلف کامپوزیتی، سرعت‌های باقیمانده سرعت‌های ضربه را نشان می‌دهد. در کل نتایج بدست آمده از کار آنها و مقایسه آن با کار محققین قبلی مانند بیوتراگو به شرح زیر است:

- مدل تحلیلی بیان شده در این مقاله روشی ساده و قابل اعتماد برای پیش‌بینی مقاومت نفوذ صفحه‌های ساندویچ کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری است.
- پوسته کامپوزیتی جلویی و پشتی عوامل اصلی برای انرژی جذب شده است در حالیکه انرژی جذب شده توسط هسته لانه‌زنبوری بسیار کم است.
- سرعت باقیمانده توسط مدل جدید زمانی که حذف کردن پوسته جلویی بسیار بیشتر از حذف کردن پوسته پشتی می‌باشد، محاسبه شده است.
- سایز سلول لانه‌زنبوری، ضخامت دیواره لانه‌زنبوری و ضخامت لانه‌زنبوری دارای اثرات کمی بر روی مقاومت نفوذ سازه ساندویچی دارد.



شکل (۳-۲) مقایسه زمان نفوذ مدل جدید با نتایج مدل تجربی و عددی بیوتراگو [۲۴]



شکل (۴-۲) سرعت باقیمانده سرعت های مختلف ضربه برای سه چیدمان صفحه کامپوزیت [۲۴]

تلاش هایی توسط یانگ^۱ و همکارانش [۲۵] در سال ۲۰۱۶ برای به کار بردن ساختار آگزتیکی در لایه محافظ بدن با دو هدف پوشیده شدن راحت آن و اینکه در محافظت از قسمت های مختلف بدن بهینه باشد انجام دادند که با کاهش نیروی ضربه و جلوگیری از صدمه در فعالیت های با ریسک بالا و برای اقسامی از جامعه از جمله افراد سالخورده، کارگران های صنعتی، مجریان قانون و نظامیان و بازیکنان ورزشی انجام می شود.

روش محاسباتی انتگرال گیری (آنالیز اجزاء محدود FEA) برای بررسی اثر سازه های سه ماده (سازه لانه- زنبوری یا انعطاف پذیر، سلول های شش ضلعی درون رو^۲ یا سازه جمع شونده خودکار^۳، سازه نوک تیز^۴) در ترکیب با سه ماده پلیمری (ماده اسید پلی لاکتیک PLA^۵ و دو ماده پلی اتان پلاستیک حرارتی TPU^۶) در تحقیق یانگ و همکارانش استفاده شده است. همچنین تلاش هایی برای ربط دادن خواص تکی و یا ترکیبی اثر مواد و سازه آگزتیک به عملکرد سختی و جذب شوک لایه های محافظتی بدن انجام شده است. سپس بررسی های ضربه و شوک استخراج شده اند تا صحت نتیجه های بدست آمده از بررسی های استاتیک را تایید کنند. مکانیزمی برای توزیع ایده آل نیروی ورودی یا انحراف آن برای طراحی محافظت کننده ها با استفاده از شکل ها، ضخامت ها و

¹ Yang

² Re-entrant Hexagonal Cells

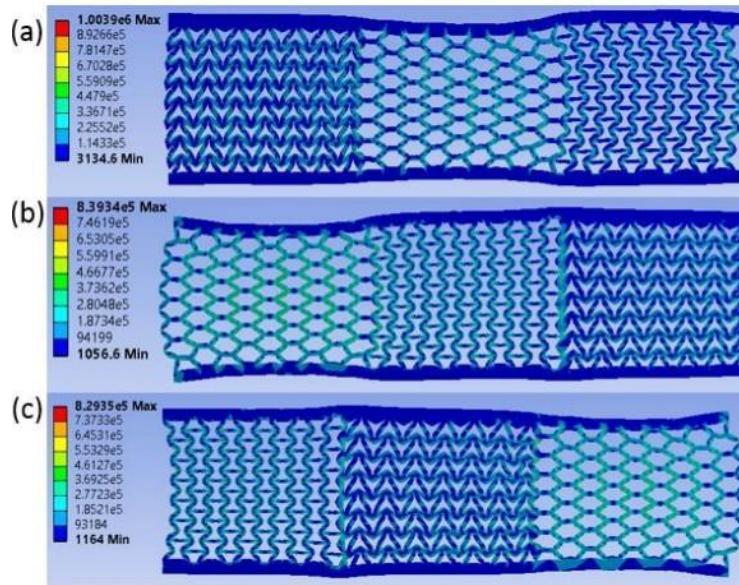
³ Reflexin Structure

⁴ Arrowhead Structure

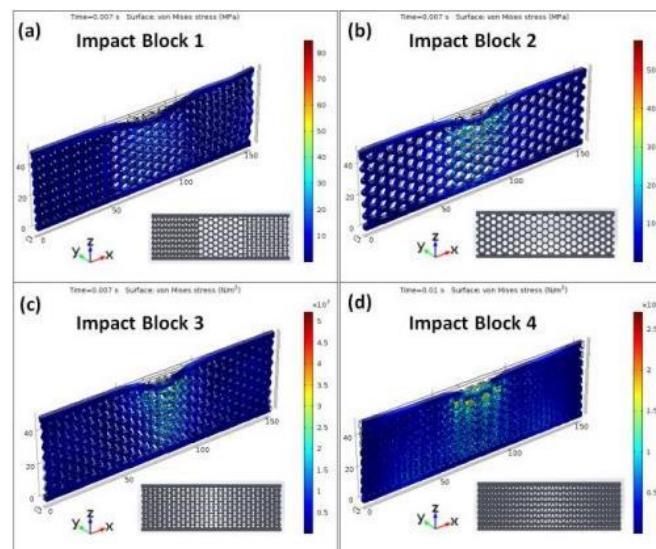
⁵ Polylactic Acid

⁶ Thermoplastic Polyurethane

مواد مختلف آگزتیک به منظور کاهش ریسک صدمه پیشنهاد شده است. شکل (۵-۲) توزیع تنش و تغییرشکل مدل‌ها را برای ساختارهای مختلف آگزتیکی نشان می‌دهد. شکل (۶-۲) نیز، این توزیع تنش و تغییرشکل مدل‌های مختلف را بر اثر بارگذاری ضربه نشان می‌دهد. در نهایت نتایج این پژوهش نشان‌دهنده این است که ماده آگزتیک می‌تواند به عنوان ماده سازه موثر برای لایه‌های محافظ بدن در نظر گرفته شود.



شکل (۵-۲) توزیع تنش و تغییر شکل مدل‌ها و مقایسه ترکیب مختلفی از سلول‌ها [۲۵]



شکل (۶-۲) توزیع تنش و تغییر شکل سه مدل با ترکیب مختلفی از سلول‌ها بر اثر بارگذاری ضربه [۲۵]

در ادامه همین مطالعه در همان سال یانگ و همکارانش [۲۶] از روش تولید افزودنی پیشرفت^۱ (پرینت سه بعدی) برای ساخت نمونه اولیه سازه‌های پلیمریک آگزتیک استفاده کردند.

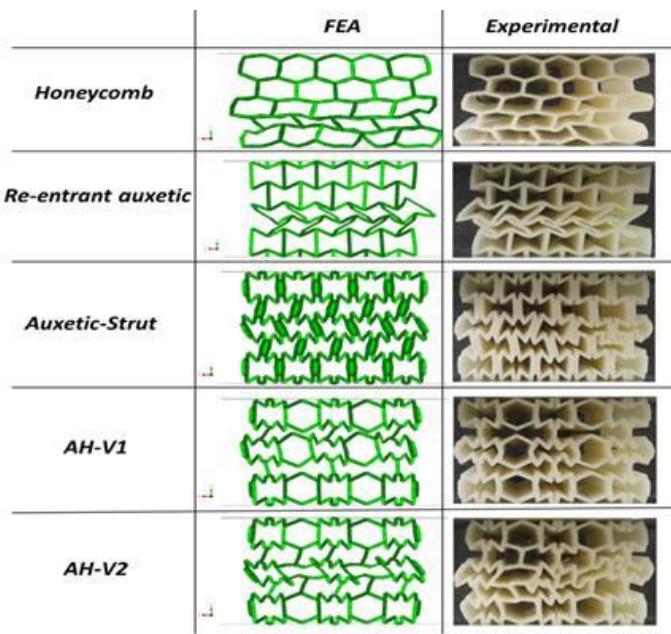
در مطالعه اینگرول^۲ و همکارانش [۲۷] در سال ۲۰۱۷ طراحی نوین و بهبود عملکرد ساختارهای جدید آگزتیک استرات^۳ ارائه شده است. مطالعه مقایسه‌ای رفتار بارگذاری فشاری تک محوره درون رو ساختارهای شامل لانه‌زنبوری متداول، لانه‌زنبوری آگزتیک درون رو، ساختار آگزتیک-استرات تقویت شده و ساختار هیبریدی ترکیب ساختار لانه‌زنبوری متداول و آگزتیک-استرات برای نمونه‌های پرینت سه بعدی این سازه‌ها استخراج شده است. مودهای شکست و تغییر شکل سلول‌های مختلف مطالعه شده است و در مورد عملکرد آن‌ها نیز بحث‌هایی انجام شده است. در این مطالعه ساختار جدید آگزتیک-استرات مشخصات مکانیکی بهتری از ساختارهای لانه‌زنبوری و آگزتیک نشان داده است.

نتایج این پژوهش به وسیله تست‌های تجربی که در شکل (۷-۲) آورده شده، صحبت‌سنجدی شده است. طراحی آگزتیک-استرات ویژگی‌های بسیار خوبی تحت بارگذاری تک محوره در صفحه نشان داده است. طراحی جدید دارای مقاومت فشاری ۶۵ درصد بیشتر از ساختار آگزتیک درون رو و ۳۰۰ درصد بیشتر از ساختار لانه‌زنبوری است. در کنار این ویژگی‌ها، انرژی کل جذب شده توسط طراحی آگزتیک-استرات ۷۰ درصد بیشتر از لانه‌زنبوری و ۳۰ درصد بیشتر از مدل آگزتیک درون رو است. انرژی جذب شده ویژه توسط ساختار آگزتیک-استرات ۱۳ درصد بیشتر از سایر ساختارهای قدیمی این مدل است. ساختار درون رو آگزتیک و لانه‌زنبوری دارای مدول یانگ بالاتری از ساختار آگزتیک-استرات است. با اینکه افزایش ۱۵ درصدی چگالی و ۴۵ درصدی نسبت پوآسون را نسبت به طراحی آگزتیک-استرات در مقایسه با طراحی آگزتیک درون رو شاهد بودند، ساختار جدید دارای ظرفیت جذب انرژی بالاتری بود. سلول آگزتیک-استرات به گونه‌ای طراحی شده است که فرو رفتگی ایجاد شده در آن موجب مقاومت‌شدن آن در حفظ بار می‌شود.

¹ Advanced Additive Manufacturing

² Ingrole

³ Strut

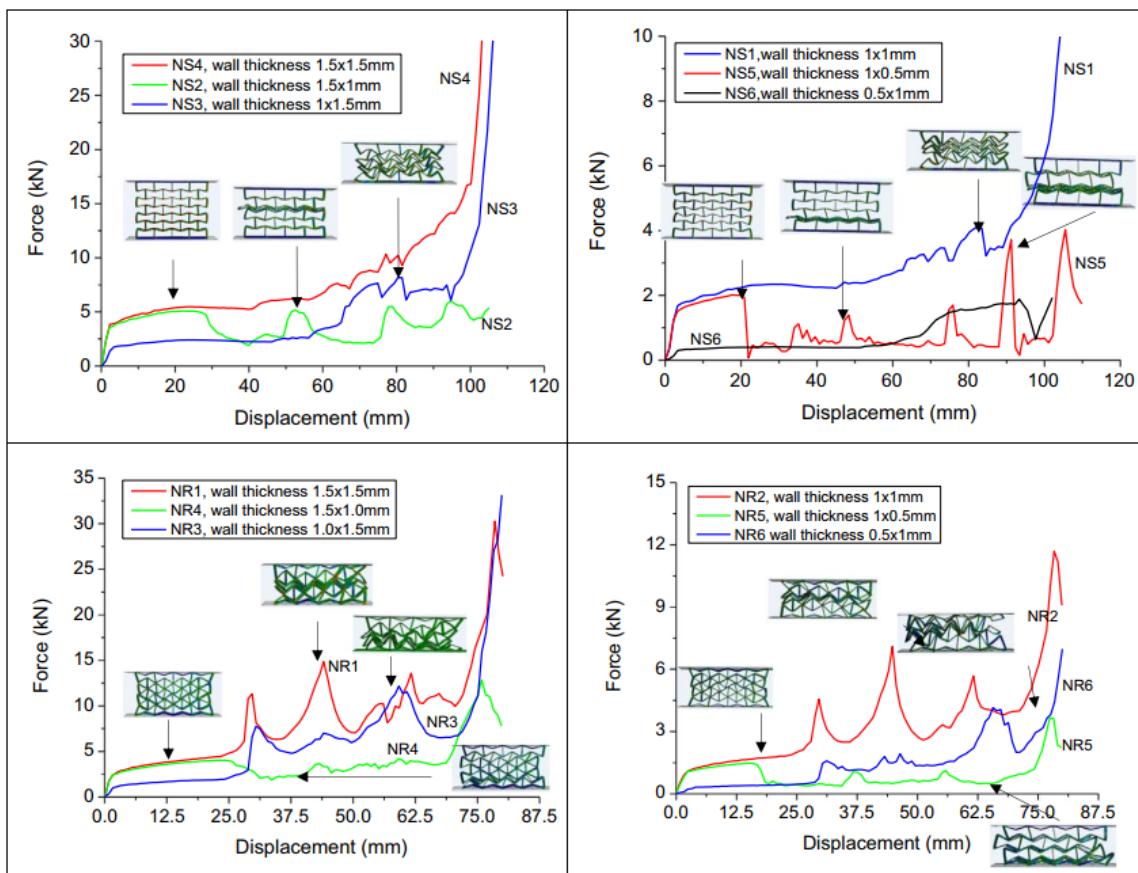


شکل (۷-۲) تغییرشکل ساختارهای مختلف تحت فشار در مدلسازی اجزاء محدود و آزمایش های تجربی [۲۷]

در مطالعه ژو^۱ و همکارانش [۲۸] در سال ۲۰۱۷ برای بدست آوردن ساختار ایدهآل جذب کننده انرژی، ساختاری که دارای مقدار حداکثر نیرو اولیه پایین و کارآیی جذب انرژی بالا داشته باشد، ساختار لانه زنبوری های درون رو و غیر درون رو که دارای تغییرشکل درون رو هستند، طراحی و ساخته شدند.

نتیجه گیری نهایی این پژوهش این بوده است که با توپولوژی درون رو اعمال شده، پیک اولیه نیروی ساختار سلولی کاهش خواهد یافت. این خصوصیت برای طراحی مهندسی به منظور جذب انرژی در وسایلی که نیاز به پیک نیروی کمتر و انرژی جذب بالاتر دارند فواید زیادی دارد.

^۱ Zhou



شکل (۸-۲) اثرات ضخامت دیوار بر منحنی تغییرشکل: (الف) لانه زنبوری های غیردرون رو، و (ب) لانه زنبوری های درون رو [۲۸]

۳-۲- پژوهش های مرتبط با بارگذاری استاتیکی بر روی تایرهای غیر بادی

برای نخستین بار، از اوایل سال ۱۹۲۰ تلاش هایی برای ارائه یک تایر غیر بادی با استفاده از اسپوک های مفتولی به منظور افزایش کارایی و مقاومت تایرها در برابر پنچری و افزایش امنیت آن انجام شد [۲۹]. از آن زمان مهندسین متعددی اقدام به ارائه مدل های متنوعی از تایرهای غیر بادی با اسپوک های چند ضلعی به عنوان جایگزینی برای فشار هوای تایرهای بادی نمودند [۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳].

با در نظر گرفتن ساختار مخصوص تایرهای غیر بادی، این تایرها دائماً و به طور سیکلی تحت فشار و کشش قرار می گیرند به همین دلیل بررسی تنش های محلی ایجاد شده در آنها اهمیت بالایی دارند. ساختارهای لانه زنبوری از مهم ترین و پر کاربرد ترین ساختارهای مورد استفاده در تایرهای غیر بادی هستند. ساختارهای

لانهزنیبوری شش ضلعی در مطالعه‌های مختلف تحت بارگذاری‌های محوری و برشی قرار گرفتند و انعطاف‌پذیری آن‌ها تحت این بارگذاری‌ها ثابت شده است [۳۴، ۳۵]. ساختارهای لانهزنیبوری استحکام^۱ و سفتی^۲ بیشتری از خود در جهت خارج از صفحه نسبت به داخل صفحه نشان می‌دهند اما خواص ارجاعی آن‌ها در ساختارهای داخل صفحه‌ای بیشتر است و به همین دلیل است که آرایش داخل صفحه‌ای معمولاً در تایرهای غیر بادی استفاده می‌شود [۳۶]. در همین راستا، جو^۳ و همکارانش [۳۷] در سال ۲۰۱۰ به بررسی این ساختارها تحت بارگذاری داخل صفحه‌ای پرداخته و سپس این مطالعه را در سال ۲۰۱۱ برای بارگذاری برشی صفحه‌ای انجام دادند [۳۸].

یکی از نکات مهم در هنگام طراحی ساختارهای مکانیکی با استفاده از سازه‌های لانهزنیبوری، توجه به مشخصات هندسی آن، از جمله زاویه سلول‌ها، ضخامت سلول‌ها و طول سلول‌ها است که در نهایت تغییر هر کدام از این پارامترها منجر به ایجاد خواص کاملاً متفاوت در ساختارهای گوناگون و از جمله تایرهای غیر بادی می‌شود. به همین دلیل پژوهشگران در سال‌های اخیر برای بررسی خواص تاثیرگذار بر عملکرد کلی تایرهای غیر بادی همواره به این موضوعات توجه داشته‌اند [۳۹، ۴۰].

یکی از پژوهش‌هایی که تاثیر تغییر ساختارهای آگزتیکی مورد استفاده در لایه اسپوک تایرهای غیر بادی را بررسی کرده، می‌توان به مقاله‌ای که جو و همکارانش [۴۱] در سال ۲۰۱۲ منتشر کردند، اشاره کرد. این مقاله، ساختارهایی مختلف را به عنوان لایه اسپوک در تایر غیر بادی استفاده کرده و به عنوان خروجی و برای مقایسه بین ساختارها، تنش‌های محلی وارد بر آن‌ها، وزن ساختارها و میزان تحمل بار^۴ را تحت یک بار استاتیکی عمودی با دو متده مختلف بررسی کرده. متده اول مورد استفاده آن‌ها، ثابت نگهداشتن ضخامت دیواره سلول‌های لانهزنیبوری و متده دوم آن‌ها، ثابت نگهداشتن میزان تحمل بار بود و سپس در هر متده، پارامترهای دیگر به عنوان متغیر در نظر گرفته شدند و بررسی‌ها برای ۸ ساختار انجام شد.

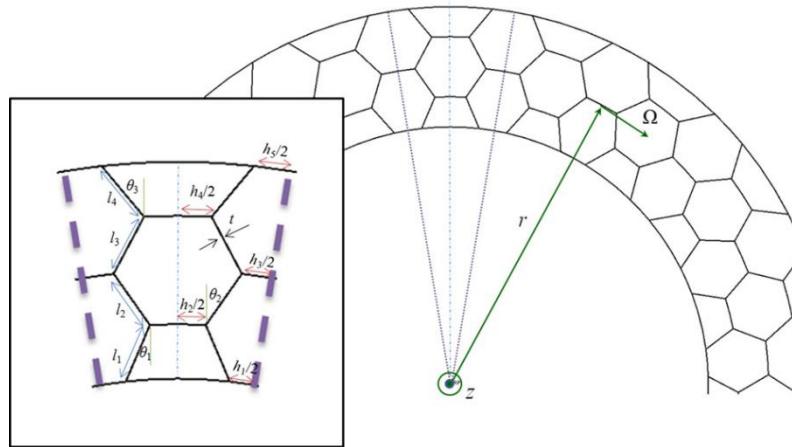
شرایط هندسی شرح داده شده، در یک مدل ۲ بعدی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی می‌شود. نحوه رسم ساختارها در شکل (۹-۲) نشان داده شده است.

¹ Strength

² Stiffness

³ Ju

⁴ Load carrying capability

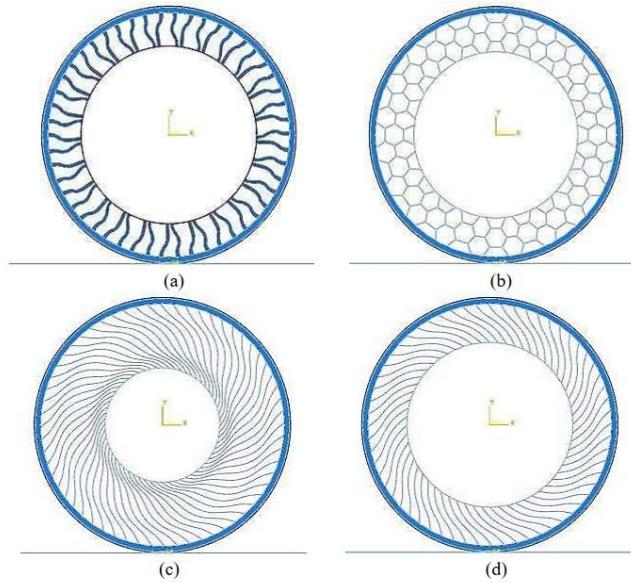


شکل (۹-۲) نحوه رسم ساختار لانه زنبوری و متغیرهای آن [۴۱]

مقادیر h , Θ و t به عنوان متغیرهایی که تفاوت را بین ساختارها ایجاد می‌کنند انتخاب شده اند و این مقادیر برای ساختارهای مختلف در جدول (۱-۲) ارائه شده‌اند.

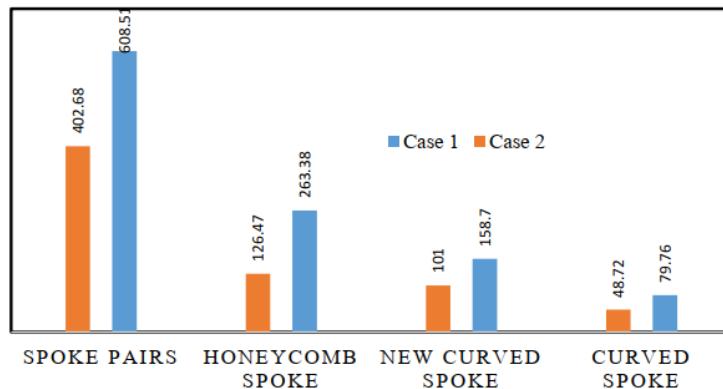
این مقاله ادعا کرده که جابجایی‌ها در راستای محور Z مختصات ناچیز و قابل چشم پوشی هستند و یک مدل ۲ بعدی را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کرده. همچنین به این موضوع اشاره شده که ممکن است برای تحلیل دقیق‌تر رفتار ساختارها به شبیه‌سازی یک مدل سه‌بعدی نیاز باشد.

از دیگر پژوهش‌های تاثیرگذار که تاثیر استفاده از ساختارهای اسپوک متفاوت را در عملکرد تایر غیر بادی بررسی کرده‌اند می‌توان به مطالعه مصطفی و همکارانش [۴۲] در سال ۲۰۱۵ اشاره کرد. این مطالعه یک مدل کواسی-استاتیک را برای بررسی سفتی عمودی، تماس فشاری و تنש‌های محلی اسپوک‌های یک تایر را انتخاب کرده و سه ساختار غیر آگزتیکی را با یک ساختار لانه‌زنبوری مقایسه کرده. شکل (۱۰-۲) این ساختار را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۰-۲) مقایسه سه ساختار غیر آگزتیکی با ساختار لانه زنبوری [۴۲]

مقایسه ای بین سفتی عمودی مدل های آورده شده در شکل (۱۰-۲) انجام شده و این نتایج در شکل (۱۱) آورده شده است.

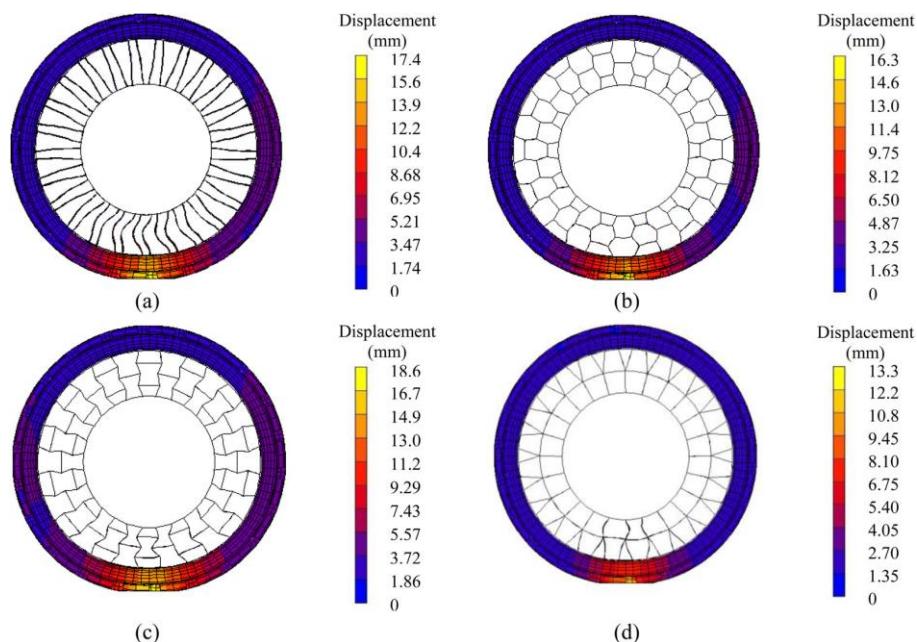


شکل (۱۱-۲) مقایسه ای بین سفتی عمودی سه ساختار غیر آگزتیکی و لانه زنبوری [۴۲]

در ادامه مقالاتی که به بررسی ساختارهای اسپوک تایر تحت بارگذاری استاتیکی پرداخته اند، روگساج^۱ و همکارانش [۴۳] در سال ۲۰۲۰ یک مدل المان محدود با ۴ ساختار مختلف برای لایه اسپوک ارائه کردند و بررسی کردند که چه تعداد اسپوک برای هر مدل باید انتخاب شود تا بیشترین سفتی و کمترین تنفس محلی و بیشترین

¹ Rugsaj

میزان تحمل بار رخ دهد. آنها انتخاب این هسته‌ها را بر اساس امکان ساخت آنها از نوع پلی اورتان^۱ یا پلیمرهای مهندسی و همچنین ساده‌تر بودن هر چه بیشتر ساختارها ملاک قرار داده شده است. همچنین از معادله‌های ساختاری هایپرالاستیک برای مدل سازی رفتار هسته تایر استفاده شده است. نتایج بیشترین تنش‌ها برای تعداد مختلف اسپوک‌ها نشان داده که یک رابطه سهمی وار بین پارامتر سفتی عمودی و بیشترین تنش محلی وجود دارد و این نتیجه حاصل شده که تعداد ۲۴ اسپوک می‌تواند مقدار سرحدی آن باشد و در نهایت مدل بهینه‌سازی شده توسط المان محدود گزارش شده است. نتایج این مدل در شکل (۱۴-۲) آورده شده است. پس از بررسی‌های مختلف مقاله به این نتیجه می‌رسد که ساختار سلولی چندضلعی^۲ عملکرد بهتری در پارامتر سفتی عمودی دارد و سپس بهینه‌سازی برای تعداد سلول‌های آگزتیکی آن انجام می‌شود که تعداد ۲۴ برای آن بهینه‌ترین بدست می‌آید.



شکل (۱۴-۲) مطالعه ساختارهای مختلف با تعداد اسپوک‌های متفاوت [۴۳]

گانیاری^۳ و همکارانش [۱] در سال ۲۰۲۰ یک تحلیل عددی برای بررسی تاثیر پارامترهای هندسی ساختار لانه زنبوری و رفتار مکانیکی آن و وزن تایر ارائه دادند. برای این کار یک مدل المان محدود پارامتری تحت

¹ Polyurethane

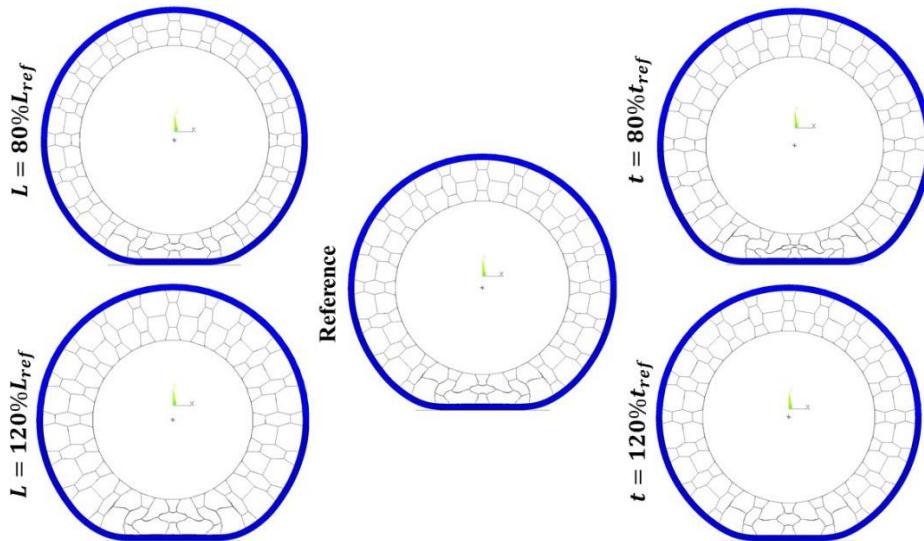
² Polygonal cellular

³ Ganniari

بارگذاری عمودی طراحی شد تا بیشترین تنש و فشار تماسی و همچنین بیشترین جابجایی عمودی به دست آورده شود.

برای شبیه‌سازی مدل ۳ بعدی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ANSYS ایجاد شده و خواص این مدل مشابه با مقالات پیشین است و تنها تفاوت سطح تماسی زمین هست که در این شبیه‌سازی تعریف شده و همچنین عاج بیرونی تایر هم از نوع هایپرالاستیک تراکم ناپذیر ایجاد شده. پس از انجام مطالعه همگرایی سایز المان‌ها، مطالعه پارامتری انجام شده است که ۵ پارامتر مدنظر این مقاله بوده است: این پارامترها به این شرح هستند: ۱. طول سلول‌ها ۲. عرض سلول‌ها ۳. زاویه سلول‌های لانه‌زنبوری ۴. ضخامت سلول‌ها ۵. چگالی سلول‌ها.

در این پژوهش منظور از چگالی سلول‌ها تعداد شش ضلعی‌ها در مدل است. برای هر کدام از این ۵ پارامتر، ۵ حالت مختلف در نظر گرفته شده است که از ۸۰ درصد مقدار رفرنس هر پارامتر را تغییر داده‌اند که در مجموع ۲۵ آزمایش انجام شده است. شکل (۱۳-۲) یک نمونه از این بررسی‌ها را نشان می‌دهد.

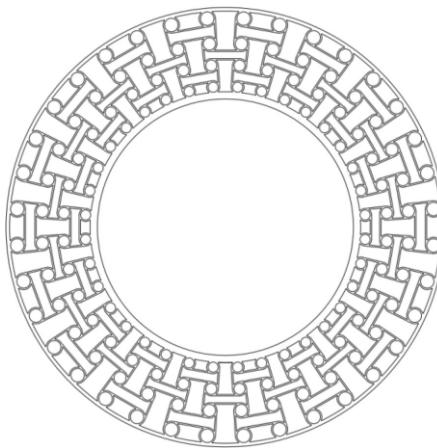


شکل (۱۳-۲) در نظر گرفتن پارامتر طول سلول برای بررسی و مقایسه آن با مقدار رفرنس [۱]

نتایج این تحلیل نشان داده که پارامتر سفتی عمودی به شدت به نسبت چگالی و ضخامت و زوایای داخلی ساختار لانه‌زنبوری بستگی دارد. زوایای داخلی ساختار لانه زنبوری همچنین نشان داده که می‌تواند منجر به تغییر پارامتر سختی عمودی، بدون این که وزن را تغییر دهد، بشود. همچنین این نتیجه حاصل شده که کاهش در طول سلول‌ها یا افزایش در چگالی آن باعث کاهش چشمگیر تنش در داخل ساختار می‌شود. سعی در بهینه کردن دقیق

ضخامت سلول‌ها یا طول سلول‌ها می‌تواند باعث کاهش بسیار زیاد فشار تماسی ناشی از تماس عاج بیرونی تایر با زمین شود.

وو^۱ و همکارانش [۴۴] در سال ۲۰۲۰ کار جدیدی انجام داد و با معرفی یک ساختار جدید آگزتیکی از نوع آنتی تراکایرال^۲ است و بر خلاف اغلب ساختارهای استفاده شده در تایرهای غیر بادی که معمولاً یا از نوع درون‌رو یا لانه‌زنبوری هستند از این ساختار استفاده کرده است. بارگذاری انجام شده به صورت فشاری بوده و نتایج حاصل شده به این صورت بوده که این ساختار آنتی تراکایرال ظرفیت حمل بار بالایی دارد و می‌تواند برای کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار بگیرد. شکل (۱۴-۲) یک نمونه از این ساختار را نشان می‌دهد.



شکل (۱۴-۲) - ساختار آنتی تراکایرال در تایر غیر بادی [۴۴]

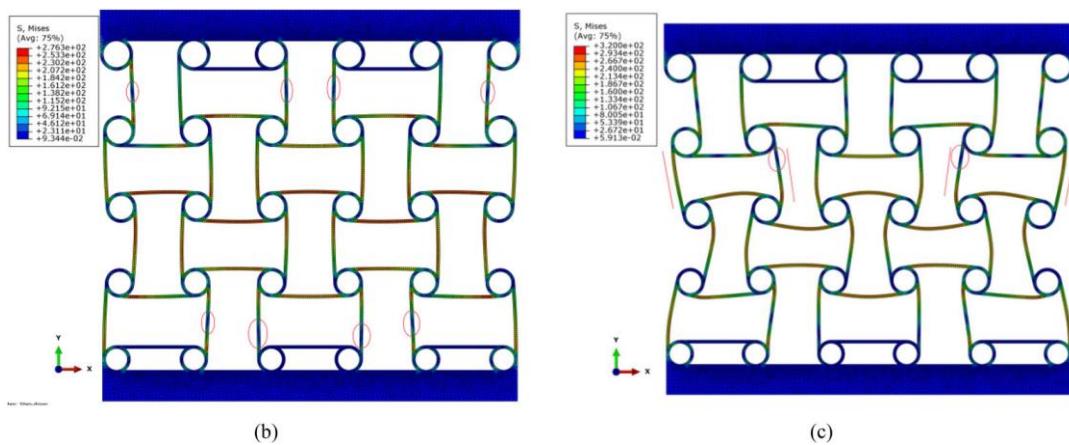
دلیل استفاده از این ساختار در این مقاله به این صورت توضیح داده شده است که ساختارهای آگزتیکی تراکایرال و آنتی تراکایرال همیشه ضریب پواسون منفی را منجر می‌شوند و همچنین توزیع چگالی در این ساختارها به طور نسبی کمتر است. مزیت عمدی این ساختار عدم ایجاد خمش در لیگامان‌هایی که وظیفه اتصال ساختار به لایه هاب^۳ یا لایه بیرونی دارند است و این تغییر شکل که در ساختارهای تراکایرال عادی و لانه‌زنبوری رخ می‌دهد را این ساختار آنتی تراکایرال به طور فاحش ندارد و تغییر شکل‌ها در شبیه‌سازی‌ها یکپارچگی بیشتری

¹ Wu

² Anti-tetrachiral

³ Hub

داشتند. نمودارهای بار- جابجایی برای این حالت ترسیم شده و نقاطی که در آنها تغییر جهت^۱ رخ داده مشخص شده است. شکل (۱۵-۲) جابجایی لیگامان‌ها تحت این تست را نشان می‌دهد.



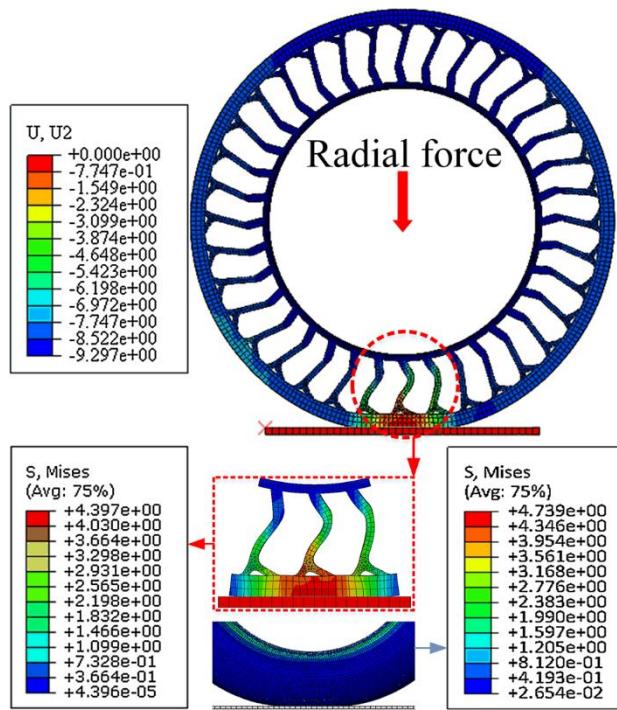
شکل (۱۵-۲) جابجایی لیگامان‌ها در ساختار تتراکایرال [۴۴]

دیگر مقالاتی که در زمینه بارگذاری استاتیکی وجود دارند معمولاً کارهای مشابهی را انجام داده‌اند. ژانگ^۲ در سال ۲۰۲۱ [۴۵] مطالعه‌ای را درباره بکارگیری یک ساختار الهام گرفته شده از طبیعت^۳ و با الهام از نحوه راه رفتن کانگروها ارائه داد که در شکل (۱۶-۲) نشان داده شده است.

¹ Turning point

² Zhang

³ Bio-inspired structures



شکل (۱۶-۲) مقایسه ساختار الهام گرفته شده از طبیعت با تایر بادی معمولی [۴۵]

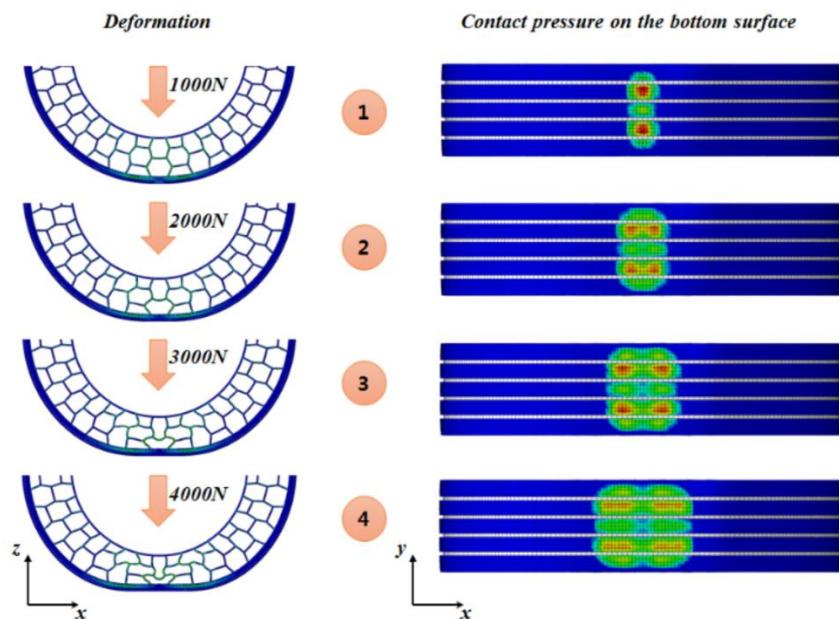
به جز مقالاتی که هدف اصلیشان طراحی و ارائه یک لایه اسپوک بهینه برای تایر بوده است، مقالات دیگری تمرکز خود را بر روی بهینه کردن فشار تماسی لایه عاج تایر گذاشته‌اند. کیم^۱ و همکارانش [۴۶] در سال ۲۰۱۳ این موضوع را بررسی کردند و تلاش کردند تحت بارگذاری استاتیکی تاثیر استفاده از اسپوک‌های متفاوت بر روی فشار تماسی را بررسی کنند.

توزیع فشار تماسی یک موضوع بسیار مهم در هنگام بررسی تایرهای غیر بادی هست. دلیل این امر این هست که فشار تماسی تاثیر مستقیمی بر روی راحتی سرنشینان خودرو، پایداری و کنترل خودرو و سروصدا و نویزهایی که به وجود می‌آید دارد. تماس فشاری بالا منجر به ساییدگی و فرسودگی لایه عاج تایر در دراز مدت می‌شود و عمر آن را کاهش می‌دهد. این پدیده به دلیل تنفس برشی سیکلی در جهت تماسی عرضی و طولی رخ می‌دهد [۴۷].

همچنین کم بودن مقدار فشار تماسی می‌تواند منجر به مشکلاتی دیگر شود [۴۸]. در واقع میزان نبودن فشار تماسی یکی از عوامل اساسی سر و صدا و نویز حاصل از تایرها است [۴۹]. به همین دلیل در این مطالعه، کیم و

¹ Kim

همکارانش به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. در این پژوهش، ابتدا یک تایر بادی در نرم‌افزار آباکوس مدل شده که در نهایت با نتایج حاصل از تایر غیر بادی مقایسه شده. سپس با معرفی سه نوع ساختار لانه‌زنیوری، فشار تماسی به عنوان یک تابعی از ۴ بار استاتیکی ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتن که به نقطه مرجع^۱ تایر وارد شده، بررسی شده. در نهایت مقادیر فشار تماسی این تایرهای غیربادی با مقادیر تایر بادی مقایسه شده و نتیجه‌گیری این بوده که فشار تماسی در تایرهای غیر بادی ارائه شده به طور کلی کمتر از تایرهای معمولی بادی بوده است و برای مثال در هنگام اعمال بار ۳۰۰۰ نیوتنی، فشار تماسی حدود ۳۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد. شکل (۱۷-۲) فشار تماسی را در هنگام اعمال ۴ بار مختلف در این پژوهش نشان می‌دهد.



شکل (۱۷-۲) نمایی از فشار تماسی در سطح زیرین تایر در هنگام اعمال بارهای ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتنی برای یک ساختار لانه‌زنیوری [۴۶]

۴-۲-۴- پژوهش‌های مرتبط با بارگذاری دینامیکی بر روی تایرهای غیر بادی

با مطالعه تاریخچه پژوهش‌های مربوط به تایرهای غیر بادی مشخص می‌شود که حجم مقاله‌هایی که رفتار تایرهای غیر بادی را تحت بارگذاری استاتیکی بررسی کرده‌اند، بسیار بیشتر از مقالاتی هست که تمرکز خود را

^۱ Reference point

بر روی رفتار دینامیکی آنها گذاشته‌اند. یکی از دلایل این موضوع می‌تواند پیچیدگی بیش از حد مطالعات دینامیکی باشد. در تایرهای غیر بادی به ویژه این موضوع بسیار مطرح است چون تایر دارای چند لایه می‌باشد که مدل‌سازی آنها پیچیدگی خاص خودش را دارد و همچنین لایه اسپوک تایر که هندسه غیر خطی و همچنین با توجه به این که آنها معمولاً به صورت هایپرالاستیک مدل می‌شوند، رفتار مکانیکی غیر خطی نیز دارند، بنابراین شبیه‌سازی‌های دینامیکی همیشه با این موضوع همراه بوده‌اند و بیشتر تمرکز بر روی بارگذاری‌های استاتیکی بوده است.

در بین پژوهش‌هایی که رفتار دینامیکی این تایرهای را بررسی کرده‌اند بررسی یک موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد و آن هم مقاومت غلطشی^۱ است. جو و همکارانش [۵۰] در سال ۲۰۱۱، مطالعه‌ای درباره خواص دینامیکی اسپوک‌ها و تاثیر استفاده از یک لایه کامپوزیت به عنوان شیر بند در تایر انجام دادند و سپس در همان سال [۵۱]

پژوهشی دیگر برای بهینه‌سازی تایرهای غیر بادی به منظور کاهش مقاومت غلطشی آن انجام دادند.

قاسمی در سال ۲۰۱۲ [۵۲] یک مدل دوبعدی تحلیلی دینامیکی برای غلطش تایرهای غیر بادی بر روی یک زمین صلب بدون اصطکاک با فرض اینکه اسپوک‌ها می‌توانند به عنوان یک فنر منعطف تحلیل شوند ارائه داد. در سال ۲۰۱۶ دنگ^۲ و همکارانش [۵۳] شبیه‌سازی حالت پایدار غلطش یک تایر سه‌بعدی را با روش المان محدود انجام دادند.

اما از مهم‌ترین مقالاتی که در سال‌های گذشته برای تحلیل دینامیکی این نوع از تایرهای ارائه شده، می‌توان به پژوهش جین^۳ و همکارانش [۵۴] اشاره کرد که آنها در این مطالعه سه نوع ساختار لانه‌زنی‌بوری را در دو حالت ثابت نگه‌داشتن ضخامت دیواره سلول و حالتی که میزان تحمل بار تایر ثابت نگه‌داشته شده است، ابتدا به صورت استاتیکی و سپس در حالت دینامیکی بررسی کرده‌اند. شکل (۱۸-۲) تغییرات ایجاد شده در لایه اسپوک تایر را با نتایج تجربی یک مقایسه ظاهری می‌کند.

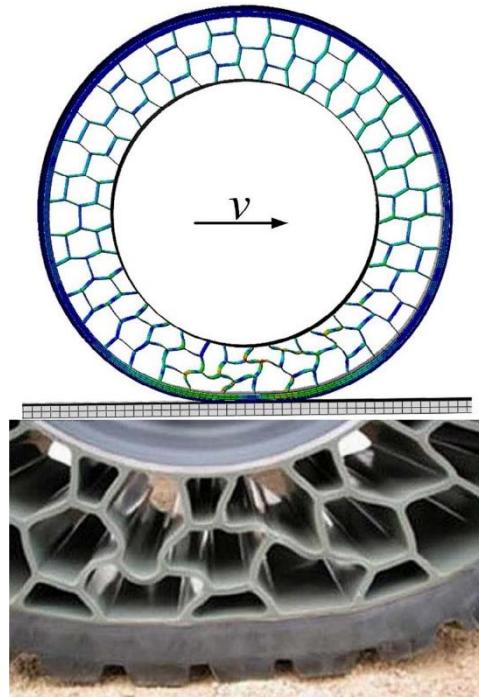
در این مطالعه ابتدا بارگذاری‌های عمودی ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتون به تایر وارد می‌شود و نتایج این بخش با نتایج رفرنس مقایسه می‌شود. همچنین بیشترین میزان تنش عمودی در اسپوک‌ها، لایه عاج تایر و میزان جابجایی

¹ Rolling resistance

² Deng

³ Jin

عمودی آن در اثر اعمال بار گزارش شده است. همچنین مقدار مقاومت غلطشی تایر که حاصل از غلطش تایر بر روی سطح صلب زمین و همچنین خاصیت ویسکوالاستیک^۱ اسپوک‌ها و لایه عاج تایر می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱۸-۲) مقایسه تغییر شکل در لایه اسپوک و مقایسه با نتایج آزمایش تجربی [۵۴]

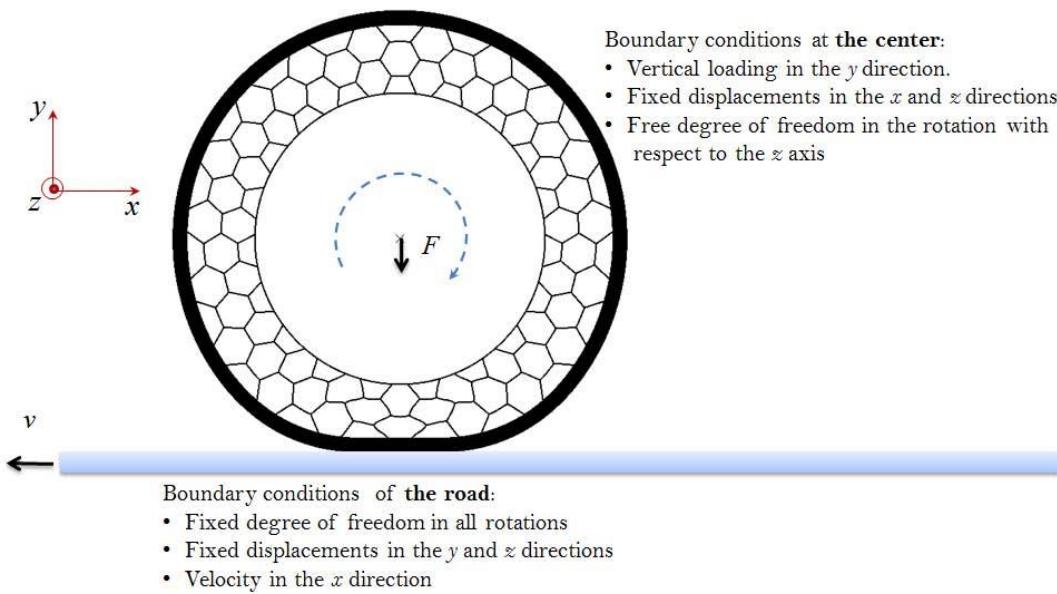
سپس مقایسه‌ای در زمان اعمال بار استاتیکی، بین حالتی که ضخامت دیواره سلول‌ها یکسان است و حالتی که میزان تحمل بار تایر ثابت است، صورت گرفته است. نتایج حاکی از این بوده که سطح تنش‌ها در حین بارگذاری دینامیکی بالاتر از استاتیکی است که لزوم بررسی دینامیکی بر روی این تایرها را نشان می‌دهد. همچنین مدل‌های ارائه شده در مقایسه با تایرها بادی معمولی نتایج بهتری را ارائه می‌دهند و بهترین مدل نیز، مدلی با زاویه داخلی کمتر و ضخامت کمتر است.

لی^۲ و همکارانش [۵۵] مطالعه دیگری بر روی تحلیل دینامیکی ارتعاشی تایرها غیر بادی ارائه دادند و در این مطالعه، خواص حالت پایدار چند ساختار لانه‌زنبری به کار رفته در تایر را با در نظر گرفتن سرعت‌های

¹ Viscoelastic

² Lee

غلطش مختلف با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحلیل کردند و نتایج حاصل از تایرهای بادی مقایسه کردند. شکل (۱۹-۲) شرایط مرزی این مطالعه را نشان می‌دهد.



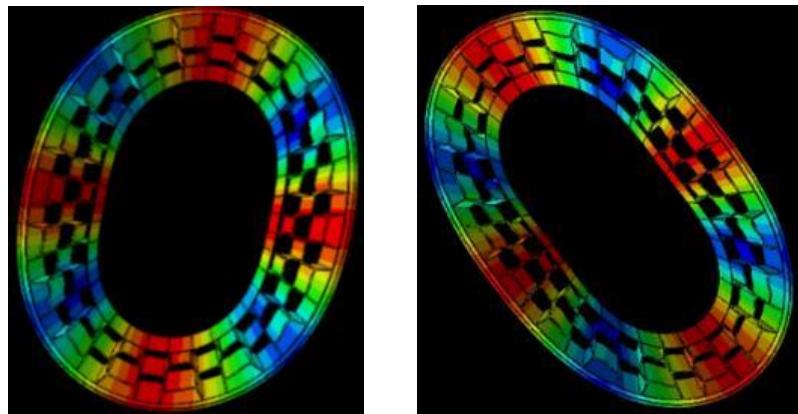
شکل (۱۹-۲) شرایط مرزی و نحوه شبیه سازی دینامیکی [۵۵]

در این مطالعه همچنین خواص ارتعاشاتی در دو حوزه زمان و فرکانس برای دو سرعت غلطش ۶۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت مورد مطالعه قرار داده شده. این کار به این صورت انجام شده که ابتدا نمودار نیرو – زمان برای نیروی عکس‌العمل بر روی زمین برای هر کدام از سرعت‌های غلطش گرفته شده (در حوزه زمان) و سپس با استفاده از تبدیل فوریه سریع^۱ این نمودار در حوزه فرکانس بدست آمده و سپس مقادیر بدست آمده از این نمودار با نتایج تئوری مقایسه و صحبت‌سنجدی می‌شوند.

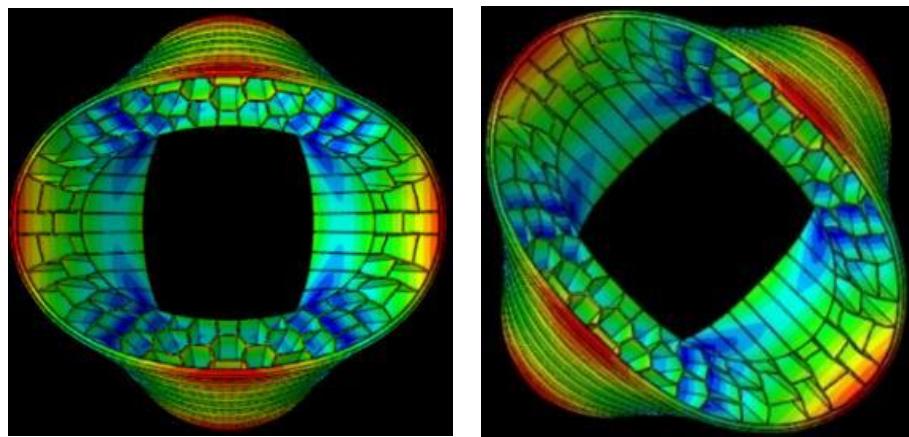
در ادامه مرور ادبیات برای تحلیل‌های ارتعاشی تایرهای غیر بادی، یکی از مقالات اخیر منتشر شده در سال ۲۰۲۱، مطالعه پنگی^۲ و همکارانش [۵۶] است که به بررسی استاتیکی و سپس ارتعاشاتی بر روی تایرهای غیربادی با اسپوک‌های شش ضلعی داشته‌اند. در این مطالعه سپس فرکانس طبیعی‌ها و مودهای ارتعاشاتی بررسی شده‌اند. شکل (۲۰-۲) مود شعاعی و شکل (۲۱-۲) مود خمی تایر را برای یکی از ساختارها نشان می‌دهد.

^۱ Fast Fourier Transform

^۲ Ponangi



شکل (۲۰-۲) مودهای شعاعی مرتبه دوم تایر غیر بادی با ساختار لانه زنبوری [۵۶]



شکل (۲۱-۲) مودهای خمی مرتبه دوم تایر غیر بادی با ساختار لانه زنبوری [۵۶]

هونگ^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۵۷] مقاله‌ای برای مطالعه خواص آئرودینامیک تایرهای غیر بادی ارائه کردند که در این پژوهش یک مدل از تایر را در نرم‌افزار کتیا^۲ شبیه‌سازی کرده و تاثیر پارامترهای ساختاری و خواص آئرودینامیکی آن را توسط نرم‌افزار فلوئنت^۳ بررسی کرده‌اند. نتایج شبی سازی نشان داده که کاهش عرض تایرها و طول اسپوک‌ها و افزایش ضخامت آن‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی منجر به کاهش ضریب آئرودینامیکی شود.

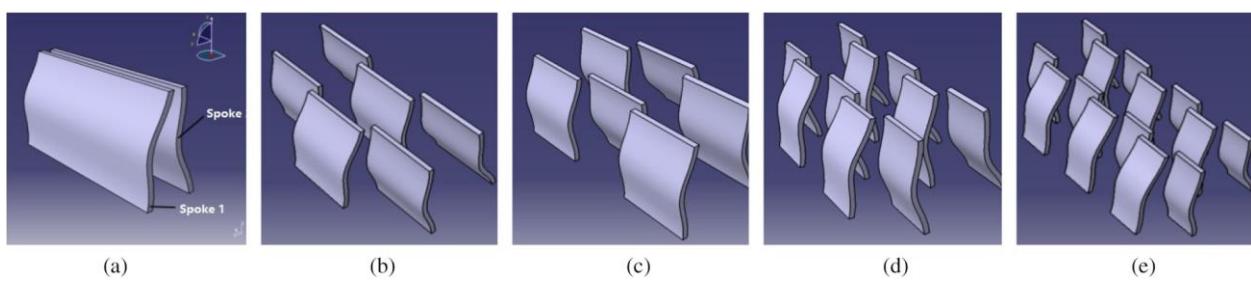
¹ Hung

² CATIA

³ FLUENT

در ادامه آنها از یک مدل میرا^۱ برای مطالعه تاثیر خواص آیرودینامیکی تایر بر روی کل خودرو در شرایط رانندگی استفاده شده و نتایج نشان داده که استفاده از تایرهای غیر بادی در این کاربرد باعث افزایش مقاومت کل خودرو می‌شود. در پایان نیز یک تست تونل باد برای مطالعه خواص آیرودینامیکی مدل بهینه‌سازی شده تایر در شرایط استاتیک انجام شده تا نتایج شبیه‌سازی را تایید کند. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها با شرایط مرزی تعیین شده، خواص آیرودینامیکی تایر در نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شده‌اند و در این مرحله از یک مدل توربولنس برای این بخش استفاده شده.

همچنین یک بررسی بر روی نحوه قرارگیری اسپوک‌ها در این تایر انجام شده که در شکل (۲۲-۲) این چیدمان‌ها آورده شده است. از این چیدمان‌ها برای بهینه‌سازی نحوه قرارگیری اسپوک‌ها استفاده شده است.



شکل (۲۲-۲) بررسی چیدمان‌های مختلف اسپوک‌ها برای مطالعه آیرودینامیکی تایر غیر بادی [۵۸]

برای هر کدام از حالت‌های شکل (۲۲-۲) ضربب درگ و لیفت بررسی شده و در نهایت حالت بهینه انتخاب شده. در مرحله پایانی مدل بهینه‌سازی شده در یک تونل باد برای تایید نتایج شبیه‌سازی آزمایش می‌شود که در این بخش هم ۹ مدل مختلف با طول و ضخامت اسپوک‌های متفاوت و عرض‌های تایر مختلف برای بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

با بررسی مقالات پیشین این موضوع مشخص می‌شود که مقالات زیادی تاثیر استفاده از ساختارهای مختلف مکانیکی را بر عملکرد تایر بررسی کرده‌اند اما اکثر این مقالات از ساختارهای لانه‌زنبوری برای بررسی استفاده شده است. در این پایان‌نامه ساختارهای آگزتیکی که تاکنون در مقالات پیشین بررسی نشده‌اند ارائه شده است و ؟ ساختار مختلف تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی بررسی و مقایسه شده‌اند. همچنین موارد دیگری که

^۱ MIRA

می‌توانند به طور بالقوه منجر به بهبود عملکرد مکانیکی تایر شوند، مانند مطالعه بر روی طبقات سلول‌های لانهزنبری، ضخامت دیواره سلول‌ها، چگالی یا تعداد سلول‌ها نیز بررسی شده‌اند.

فصل سوم: تایرهای غیربادی، تئوری‌ها و

تعاریف مهم

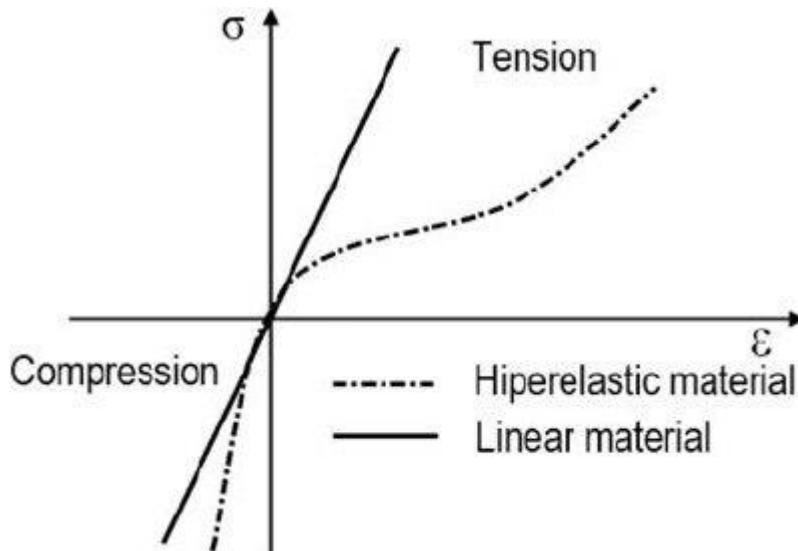
۱-۳ - مقدمه

در این فصل، تئوری‌ها، تعاریف مهم و روابطی که در تایرهای غیربادی و ساختارهای آگزتیک مطرح هستند توضیح داده می‌شوند و خواص فیزیکی و مکانیکی ساختارها و مواد مورد استفاده و روابطی که در طراحی لایه اسپوک تایر وجود دارند بیان می‌شوند.

۲-۳- خواص مواد مورد استفاده

۱-۲-۳- مواد هایپرالاستیک

مواد هایپرالاستیک یک نوعی از مدل‌های ساختاری هستند که به طور ایده‌آل روابط تنش-کرنش در آنها از یک تابع چگالی انرژی کرنشی^۱ تبعیت می‌کند. مواد هایپرالاستیک یک مورد خاص از مواد الاستیک کوشی^۲ هستند. برای توجیه رفتار این مواد می‌توان ماده لاستیک، که پرکاربردترین و معروف‌ترین ماده در این زمینه است را مثال زد. برخی از مواد مانند لاستیک از مدل‌های الاستیک خطی تبعیت نمی‌کنند و برای بیان دقیق رفتار غیرخطی آنها باید از مدل‌های پیچیده‌تر و تابع چگالی انرژی کرنشی استفاده کرد. در شکل (۶-۳)، مقایسه‌ای بین رفتار تنش-کرنش برای یک ماده الاستیک با رفتار خطی و یک ماده هایپرالاستیک به عنوان یک ماده غیرمتراکم ایزوتروپیک و الاستیک غیرخطی نشان داده شده است. هایپرالاستیسیتی کمک می‌کند تا بتوان رفتار اینگونه مواد را توجیه و مدل کرد. این مواد برای اولین بار توسط ریولین^۳ و موئنی^۴ ارائه شد.



شکل (۶-۳) مقایسه نمودار تنش-کرنش برای یک ماده با رفتار خطی و یک ماده هایپرالاستیک [۵۹]

¹ Strain energy density function

² Cauchy elastic material

³ Rivlin

⁴ Mooney

مواد هایپرالاستیک از نظر رفتار می توانند به هفت دسته فانگ^۱، موئی-ریولین^۲، اوگدن^۳، چند جمله‌ای^۴، سن-ونان و کرشیف^۵، یوه^۶ و مارلو^۷ طبقه‌بندی و توصیف شوند. از آنجاییکه در این پژوهه از مدل اوگدن برای توصیف رفتار غیرخطی منحنی تنش-کرنش لاستیک و پولی اورتان استفاده شده است، روابط مربوط به این مدل در این بخش آورده شده است. ریموند اوگدن در سال ۱۹۷۲ روابط مربوط به مدل اوگدن را ارائه داد [۶۰] که در رابطه (۱-۳) آورده شده. در این رابطه چگالی انرژی کرنشی به صورت کشش‌های اصلی λ که $\lambda = 1,2,3$ باشد است بیان شده است که در این رابطه μ_p و α_p ثابت‌های ماده و N مرتبه معادله هستند [۶۱].

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (1-3)$$

با فرض تراکم ناپذیری می توان به رابطه (۲-۳) رسید.

$$W(\lambda_1, \lambda_2) = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_1^{-\alpha_p} \lambda_2^{-\alpha_p} - 3) \quad (2-3)$$

به طور کلی مدول برشی^۸ از رابطه (۳-۳) نتیجه گرفته می شود.

$$2\mu = \sum_{p=1}^N \mu_p \alpha_p \quad (3-3)$$

به این صورت و با در نظر گرفتن $N=3$ و با تعیین پارامترهای ماده، توصیف رفتار ماده‌ای مانند لاستیک می تواند با دقت بسیار بالا انجام شود.

¹ Fung

² Mooney-Rivlin

³ Ogden

⁴ Polynimial

⁵ Sain Venant-Kirchhoff

⁶ Yeoh

⁷ Marlow

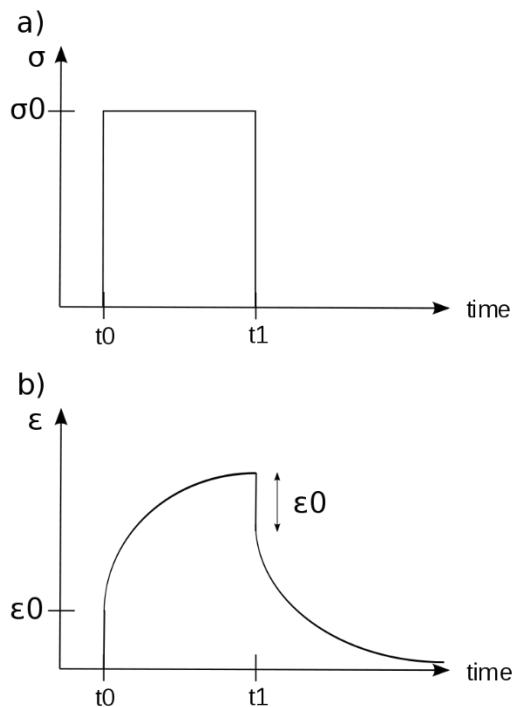
⁸ Shear modulus

۳-۲-۲- مواد ویسکوالاستیک

برای خروجی گرفتن مقاومت غلطشی در تحلیل دینامیکی تایرها غیربادی، باید خاصیت ویسکوالاستیک برای موادی که خاصیت هایپرالاستیک را دارند مانند اسپوک، لایه برشی و لایه لاستیک تایر تعریف شود تا نرم افزار آباکوس بتواند این خروجی را حساب کند.

به طور کلی به موادی خاصیت ویسکوالاستیسیته نسبت داده می شود که رفتار آنها بین رفتار مواد الاستیک و مواد ویسکوز باشد. این ویژگی از این مواد، زمانی اتفاق می افتد که یک نیروی خارجی یا یک تغییر شکل به ماده اعمال شود و در واکنش به این تنش ایجاد شده، ماده پاسخی به صورت جریان برشی و کرنش با تغییرات خطی نسبت به زمان از خود نشان می دهد.

اما اگر هدف مقایسه باشد، مواد الاستیک در صورت اعمال بار و در صورتی که این میزان بار وارد شده از محدوده الاستیک آنها بیشتر نشده باشد، به محض برداشتن نیرو دوباره به حالت اولیه خود بر میگردند. اما مواد ویسکوز یک مقاومت زمانی در برابر کرنش خواهند داشت به این صورت که این دسته از مواد اصطلاحاً حالت اولیه خود را فراموش کرده‌اند و در حالت تغییر شکل یافته باقی می‌مانند [۶۲].



شکل (۷-۳) a) تنش اعمال شده و b) کرنش ایجاد شده به عنوان تابعی از زمان در یک مدت زمان کم برای یک ماده ویسکوالاستیک [۶۳]

هدف اصلی از تعریف خاصیت ویسکوالاستیک برای ماده‌های پلی‌اورتان و لاستیک که به ترتیب برای لایه‌های اسپوک و عاج تایر غیر بادی تعریف می‌شوند، این بوده است که در نهایت محاسبه میزان انرژی تلف شده ناشی از غلطش امکان پذیر باشد. مدل عمومی مکسول^۱ برای رفتار ویسکوالاستیسیته با استفاده از سری پرونی^۲ و تئوری برگشت تدریجی به حالت اولیه کرنش^۳ ارائه می‌شود [۶۱، ۶۴]. رابطه‌ای که برای مدول برگشت تدریجی به حالت اولیه کرنش ارائه می‌شود در رابطه (۴-۳) آورده شده است [۵۴].

$$G_R(t) = G_0 \left[1 - \sum_{k=1}^N g_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \right] \quad (4-3)$$

¹ Maxwell

² Prony series

³ Shear relaxation

که در رابطه فوق، $G_R(t)$ مدول برگشت تدریجی به حالت اولیه کرنش است و G_0 مدول برشی آنی^۱ و g_i ضرایب زمانی بازگشت تدریجی ای هستند که برای تعیین و صحبت‌سنجی دیتاهای تجربی مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهه از $N=3$ مواد پولی اورتان و لاستیک استفاده شده.

۳-۳- مشخصات ساختاری تایر غیر بادی

از آنجایی که اسپوک‌های آگزتیکی ۶ ضلعی لانه‌زنبوری وزن بالاتری نسبت به سلول‌های معمولی ۶ ضلعی لانه‌زنبوری دارند و همچنین خواص مربوط به ساختارهای آگزتیکی ۶ ضلعی لانه‌زنبوری به مراتب پیچیده‌تر از آن‌ها است و در این پژوهه فقط خواص ساختارهای لانه‌زنبوری ۶ ضلعی بررسی شده است. مدول مؤثر داخل صفحه‌ای^۲ ساختارهای لانه‌زنبوری را می‌توان در تاریخچه ادبیات ساختارهای لانه‌زنبوری و با تئوری مواد و ساختارهای سلولی^۳ یافت [۶۵، ۶۶، ۵۸].

$$E^*_r = E_s \left(\frac{a}{l} \right)^3 \frac{\cos\theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta \right) \sin^2\theta} \quad (5-3)$$

$$E^*_\Omega = E_s \left(\frac{a}{l} \right)^3 \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta \right)}{\cos^2\theta} \quad (6-3)$$

$$G^*_{r\Omega} = E_s \left(\frac{a}{l} \right)^3 \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta \right)}{\left(\frac{h}{l} \right)^2 \left(1 + \frac{2h}{l} \right) \cos\theta} \quad (7-3)$$

در روابط فوق، E^*_r و E^*_Ω و $G^*_{r\Omega}$ به ترتیب مدول‌های مؤثر در راستای شعاعی، راستای محیطی و برشی هستند. مقادیر h و l و Θ ، مطابق با شکل (۸-۳) به ترتیب مقادیر میانگین طول عمودی سلول، طول مایل سلول

¹ Instantaneous shear modulus

² In-plane effective moduli

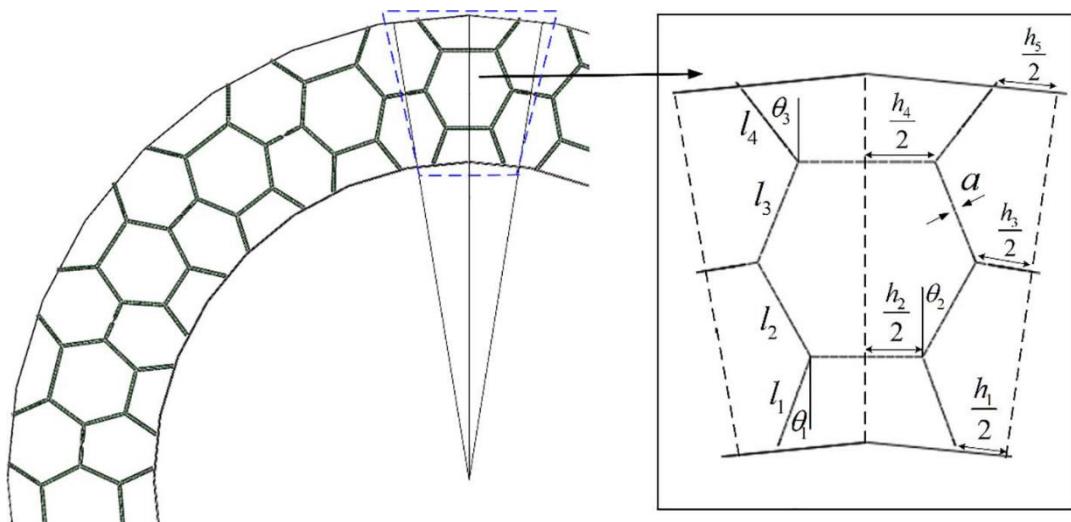
³ Cellular materials and structures

و زاویه‌ی بین آن‌ها هستند. E_s مدول یانگ پایه یک ماده هست و α نیز، ضخامت سلول است. همچنین چگالی

ساختار لانه‌زنبوری از رابطه زیر تعیین می‌شود. در این رابطه، ρ_s چگالی ماده پایه ساختار است.

$$\rho^* = \rho_s \frac{\frac{a}{l} \left(\frac{h}{l} + 2 \right)}{2 \cos \theta \left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right)} \quad (8-3)$$

همانطور که در روابط فوق نیز مشهود است، در ساختارهای لانه‌زنبوری همواره نسبت طول عمودی سلول به طول مایل سلول یک پارامتر تعیین کننده در این ساختارها و همچنین در تایرهای غیر بادی به شمار می‌روند چون این ساختارها و مخصوصاً در تایرهای غیر بادی و با غلطش تایر همواره ساختار به طور سیکلی تحت تنش‌های کششی و فشاری قرار می‌گیرد [۴۱].



شکل (۸-۳) نمایی شماتیک از نحوه قرارگیری سلول‌های لانه‌زنبوری در تایر غیر بادی و پارامترهای هندسی آن [۵۴]

۴-۳- تعاریف مهم

۱-۴-۳- سفتی عمودی

زمانی که یک بار استاتیکی به مرکز جرم تایر وارد می‌شود، تایر دچار تغییر شکل شده و در اثر این بار مرکز جرم در جهت اعمال بار جابجا می‌شود. این مقدار جابجایی در طراحی تایرهای غیر بادی پارامتر مهمی به شمار می‌رود که در اکثر پژوهش‌های مربوط به این تایرها مورد بررسی قرار گرفته و اصطلاحاً به آن سفتی عمودی گفته می‌شود که از رابطه (۹-۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه θ برابر با میزان جابجایی عمودی مرکز جرم و F میزان بار اعمالی به تایر و K نیز سفتی عمودی است [۴۲].

$$K = \frac{F}{\theta} \quad (9-3)$$

۲-۴-۳- مقاومت غلطشی

به طور کلی، به انرژی تلف شده یا صرف شده به ازای مسافت طی شده، مقاومت غلطشی گفته می‌شود و این مقدار از رابطه (۱۰-۳) بدست می‌آید.

$$F_R = \frac{w_d}{D} \quad (10-3)$$

در رابطه فوق، w_d میزان انرژی تلف شده یا صرف شده است و D هم مسافت طی شده توسط تایر می‌باشد. اگر تحلیل را به صورت عددی انجام شود، مقدار w_d را می‌توان به عنوان خروجی از نرم‌افزارهای المان محدود خروجی گرفت. برای مثال در نرم‌افزار آباکوس این مقدار به عنوان خروجی ALLCD قابل دسترس است. این

خروجی در واقع مقدار انرژی تلف شده به دلیل ویژگی خرسن^۱ ماده ویسکوالاستیک است. این ویژگی در تایر غیربادی و برای لایه‌های اسپوک، لاستیک و لایه برشی تعریف شده است [۶۱].

۳-۴-۳- فشار تماسی

به نسبت بار اعمالی به سطح مقطع واقعی^۲ که محل تماس در لایه لاستیک تایر با سطح زمین است، فشار تماسی گفته می‌شود. اگر از نرمافزارهای المان محدود برای شبیه‌سازی استفاده شود، این مقدار به طور مستقیم قابل خروجی گرفتن است. در نرمافزار آباکوس خروجی CPRSS این پارامتر را خروجی می‌دهد [۶۱].

^۱ Creep effect

^۲ True contact area

فصل چهارم: شبیه‌سازی عددی

۱-۴ - مقدمه

به طور کلی برای حل مسئله‌ی مربوط به این پژوهش، چند رویکرد وجود دارد که بنا به شرایط می‌توان هر کدام از آن‌ها را اتخاذ کرد و سعی در حل مسئله کرد. در این فصل، ابتدا روش حل اتخاذ شده شرح داده می‌شود و سپس توضیحاتی راجع به نحوه این حل و جزئیات آن داده می‌شود. سپس کلیات روند مدل‌سازی و شبیه‌سازی مسئله در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شرح داده می‌شود و مزایای این روش نسبت به دیگر روش‌ها توضیح داده می‌شود. توضیح فرضیات در نظر گرفته شده و صحه‌گذاری بر نتایج پژوهش حاضر مطابق با آخرین مقالات و مطالعه‌های اخیری که مشابه با این پایان‌نامه انجام شده‌اند نیز در این فصل مطرح خواهد شد.

۴-۲- روش حل مسئله

برای حل مسائل مهندسی به طور کلی سه رویکرد را می‌توان اتخاذ کرد و سعی در حل مسائل با استفاده از آن‌ها کرد که این روش‌ها به طور مختصر در این بخش ارائه می‌شوند.

۱. روش تجربی

این روش به طور سنتی روش پایه‌ای برای حل مسائل مهندسی به شمار می‌رود. در گذشته در بسیاری از حوزه‌های صنعتی برای ارزیابی عملکرد نمونه، قسمتی از کل سازه با ابعاد حقیقی یا نمونه‌ای با مقیاس کوچکتر مورد بررسی و آزمایش‌های عملی قرار می‌گرفت. مشکل عمدی این روش پرهزینه بودن آن و به علاوه اقدامات و مدت زمان آماده‌سازی زمان برای تست گرفتن از یک مدل است. همچنین برخی اوقات بررسی مسائل مهندسی که ابعاد و سایز بسیار بزرگی دارند مانند سدها یا پل‌های بزرگ، ساخت و تست تجربی اینگونه مسئله‌ها به سادگی امکان‌پذیر و منطقی نیست. بنابراین امروزه با پیشرفت تکنولوژی و با ظهور کامپیوترها و پیشرفته شدن هر چه بیشتر آن‌ها، مهندسین سعی در مدل‌سازی و تحلیل مسئله با روش‌های دیگر مانند روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی، پیش از تست فیزیکی مدل (به شرط آنکه فرضیات درست و اعتبارسنجی شده باشند) هستند.

۲. روش تحلیلی

در این روش، مهندسین با اتکا به دانش خود و با استفاده از قوانین مکانیکی و فیزیکی حاکم بر مسئله، رویکردی تحلیلی برای حل آن اتخاذ می‌کنند. به این صورت که با کمک این قوانین و بر حسب معادلات جبری، دیفرانسیلی یا انتگرالی که ارتباط دهنده‌ی اجزای مختلف مورد نظر هستند، تلاش به حل مسئله می‌کنند. تشکیل روابط به صورت ریاضی غالب منجر به معادلات دیفرانسیلی می‌شود که کمیت‌های مورد نظر را به یکدیگر مربوط می‌سازند [۶۷]. در حالت کلی در این روش با در نظر گرفتن جزئیات و شرایط حاکم بر مسئله و مدل‌های ریاضی، برای کل یا بخشی از مسئله،

روابط استخراج می‌شود و بدین ترتیب در حالت ایده‌آل می‌توان پاسخ مسئله را بدست آورده و یک رابطه نهایی برای آن استخراج کرد. در اینگونه مسائل اگر فرضیات دقیق و مطابق با واقعیت باشند، می‌توان پاسخ‌های بسیار خوبی را برای مسئله بدست آورد. اما این روش بسیار به میزان اطلاعاتی که از شرایط مسئله وجود دارد بستگی دارد و گاهی عدم دسترسی به کوچکترین جزئیات مسئله می‌تواند منجر به خطاهای غیر قابل چشم‌پوشی بشود که در نهایت از دقت حل می‌کاهمند. برخی اوقات نیز پیاده‌سازی مسئله و حل فیزیکی یا مکانیکی آن عملای غیرممکن است، برای مثال در این مسئله‌ای که در این پایان‌نامه وجود دارد به دلیل پیچیدگی‌های بیش از حد موضوع و همچنین غیرخطی بودن مسئله از چند بعد فیزیکی، هندسه‌ای و همچنین غیرخطی بودن مواد مورد استفاده در آن، عملای امکان حل تئوری و تحلیلی فراهم نیست و یا حل بسیار وقت‌گیر و با صرف منابع زیاد امکان‌پذیر است. بنابراین برای بسیاری از مسائل مشابه با این دسته، محققان و مهندسین رویکردی دیگر برای حل در نظر گرفته می‌گیرند که منطقی‌تر و با صرف منابع کمتر باشد.

۳. روش عددی:

همانطور که در بخش تحلیلی توضیح داده شد، مهندسین برای حل مسائل موجود در طبیعت که به نسبت پیچیدگی‌های بیشتری دارند، سعی می‌کنند از روش‌هایی دیگر که نیازمند منابع زمانی و اقتصادی کمتری هستند استفاده کنند. از این جهت، در دهه‌های اخیر همواره این تلاش از جانب محققین برای دستیابی به یک حل بهینه وجود داشته است. آن‌ها به دنبال روشی بودند که با استفاده از تکنیک‌های محاسباتی به حل مشابه با حل تحلیلی دست بیابند. از جمله این روش‌ها، می‌توان به روش‌های تفاضل محدود و روش‌های وردشی مثل روش‌های ریلی-ریتز^۱ و گلرکین^۲ اشاره کرد. در تحلیل‌های عددی از یک روش عددی به خصوص و همچنین از یک رایانه برای ارزیابی مدل ریاضی و تخمین مشخصه‌های فرآیند استفاده می‌شود [۶۷]. این نوع مسائل در

¹ Rayleigh - Ritz

² Galerkin

مکانیک جامدات به کرات وجود دارند و از جمله مهم ترین روش‌های مورد استفاده روش اجزاء محدود است. در این روش حل برای دستیابی به پاسخ مسائل، از یک حل تقریبی معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی جزئی استفاده می‌شود که روند حل آن شامل گسترش سازی کل مسئله به قسمت‌های کوچکتر یا به طور کلی، ساده‌سازی مسئله به حالت معمولی است. تبدیل معادلات دیفرانسیل بوسیلهٔ یافتن حل تقریبی به صورت ترکیب خطی مقادیر گره‌ای و توابع تقریبی برای هر قسمت از آن و نهایتاً استخراج روابط جبری بین مقادیر گره‌ای هر قسمت و کل ناحیه است. این روش از چند مزیت ویژه بهره می‌برد. نخست اینکه قابلیت بررسی انواع مختلف هندسه مخصوصاً هندسه‌های به شدت پیچیده و با ساختارها و جنس‌های متفاوت را به دلیل تقسیم بندی ناحیه به اجزای بسیار کوچکتر دارد. دومین مزیت، بیان دقیق حل در محدوده‌ی هر المان برای مشخص نمودن اثرات محلی است. مزیت دیگر و مهم ترین دلیل استفاده روزافزون از این دست روش‌های عددی، انجام آزمایش بدون نیاز به آماده‌سازی‌های روش‌های تجربی را ممکن می‌سازد. به علاوه امکان ارزیابی مسائل به هر تعداد که نیاز باشد، بدون اینکه هندسه مورد بررسی دچار فرسایش عوامل محیطی و آزمایشگاهی گردد را ممکن می‌سازد.

۴-۳- شبیه‌سازی مساله

در این بخش، مطابق با آنچه که تاکنون گفته شده و مطابق با ادبیات و پژوهش‌های سالیان اخیر تایرهای غیربادی، مدل تایر شبیه‌سازی شده و پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر عملکرد تایر بررسی می‌شود. ابتدا مدل‌سازی مطابق با مقاله‌های مرجع که ساختاری مشابه با این پروژه را بررسی کرده‌اند، صورت می‌گیرد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایجی که این پژوهش‌ها بدست آورده‌اند مقایسه و اعتبارسنجی می‌شود. سپس جزئیات و نحوه شبیه‌سازی مدل‌های دیگری که در این پژوهش مد نظر هستند آورده می‌شوند. در این مطالعه، برای بررسی و شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۲۰۱۸ استفاده شده که نحوه ارزیابی مکانیکی و همچنین گرینه‌های استفاده شده در هر مازول نرم‌افزار شرح داده می‌شود.

۴-۳-۱- مدل سازی هندسی

برای مدل سازی از نوع ترکیبی پوسته های سه بعدی تغییر شکل پذیر^۱ و جامد سه بعدی تغییر شکل پذیر^۲ استفاده شده است. به این صورت که برای لایه های عاج تایر که از جنس لاستیک است و با زمین تماس دارد و همچنین لایه برشی که از جنس پلی اورتان است از المان جامد سه بعدی تغییر شکل پذیر استفاده شده است و لایه های تقویتی^۳ که شامل دو لایه رینگ داخلی^۴ و رینگ خارجی^۵ است و همچنین لایه های اسپوک و هاب^۶، از المان نوع پوسته هی سه بعدی تغییر شکل پذیر استفاده شده است. دلیل این انتخاب ها عمدتاً به خاطر تطبیق بیشتر با نتایج مقاله های مرجع و روش اتخاذ شده توسط آنها بوده است. همچنین از آنجا که این مواد به صورت های پر لاستیک مدل می شوند و این مورد مخصوصاً برای لایه عاج تایر که با زمین تماس دارد، باعث غیرخطی شدن مدل می شود. از این جهت بهتر است این بخش ها به صورت سه بعدی مدل شوند تا دقیق تر شبیه سازی بالاتر بروند. برای لایه برشی نیز، با توجه به اینکه این لایه از ماده پلی اورتان ساخته می شود به صورت سه بعدی مدل شده. در ادبیات مربوط به تایرهای غیر بادی ذکر شده که نبود این لایه باعث کمانش در لایه اسپوک تایر می شود و خواص غیرخطی نامطلوبی را منجر می شود [۴۱، ۴۲]. شکل (۱-۴) یک سلول لانه زنبوری استفاده شده در این تایر را نشان می دهد.

¹ 3D Deformable Shell

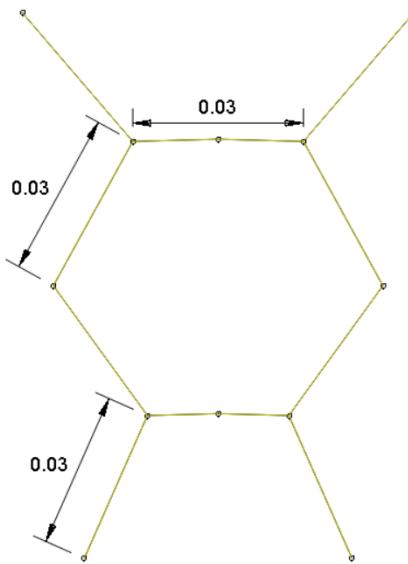
² 3D Deformable Solid

³ Reinforcement layers

⁴ Inner ring

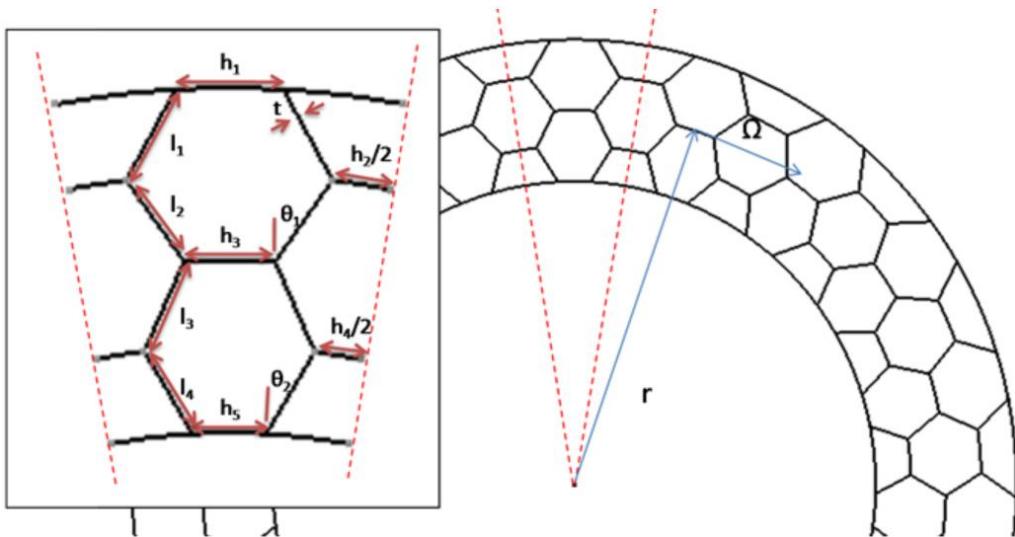
⁵ Outer ring

⁶ Hub



شکل (۱-۴) یک سلول لانه زنبوری نوع B استفاده شده در لایه اسپوک تایر غیر بادی

در این بخش، ۴ نوع ساختار مختلف برای لایه اسپوک که از هندسه‌های متفاوت تشکیل شده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای رسم این هندسه‌ها و برای سادگی رسم، مطابق با شکل (۲-۴) کافیست که قطاعی از دایره را رسم کرده و سپس به صورت الگوی دایره‌ای^۱ حول مرکز دایره، هندسه را تکرار کرد.



شکل (۲-۴) نحوه رسم و الگوی دایره‌ای هندسه لایه اسپوک [۴۶]

¹ Radial Pattern

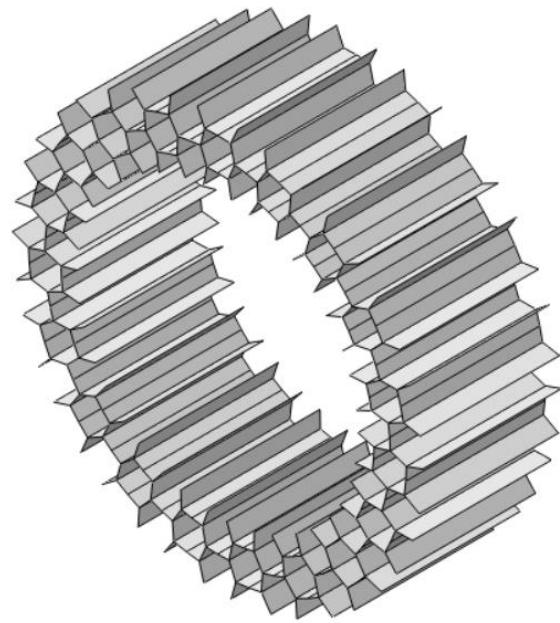
در کل، ۴ نوع هندسه اسپوک متفاوت ارائه می‌شود و تاثیر آن‌ها بررسی می‌شود. دو هندسه اول لانهزنبوری هستند و با مطالعه ادبیات تایرهای غیر بادی انتخاب شده که یکی از آن‌ها آگزتیکی و دیگری لانهزنبوری ساده است که در ادامه جزئیات بیشتری از آن‌ها شرح داده می‌شود. هندسه سوم ساختار درون رو است که با بررسی ساختارهای مختلف آگزتیکی که قابلیت پیاده سازی در محیط دایروی را داشتند انتخاب شده است. در نهایت این سه هندسه مختلف با یک هندسه عادی غیر لانهزنبوری مقایسه شده است. هندسه چهارم مربوط به شرکت کومهو تایر^۱ است، که با بررسی مدل‌هایی که تاکنون به طور تجربی پیاده‌سازی شده‌اند و هم‌اکنون استفاده می‌شوند، انتخاب شده است [۶۸].

برای دو ساختار اول، که NPT-A1 و ساختار آگزتیکی لانهزنبوری هستند، مقادیر h و l و Θ در جدول (۴-۱) آورده شده است. برای رسم این ساختارها، به دلیل این که در محیط دایروی پیاده‌سازی می‌شوند و همیشه می‌توان از تقارن‌های دایروی و خطوط راهنمایی که برای جداسازی سلول‌های مختلف از مرکز دایره مطابق با شکل (۴-۲) رسم می‌شود، تنها پارامترهایی که مورد نیاز هستند همین مقادیر هستند. شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴)، هندسه سه‌بعدی ساختارهای NPT-A1 و ساختار لانهزنبوری آگزتیکی را نشان می‌دهند.

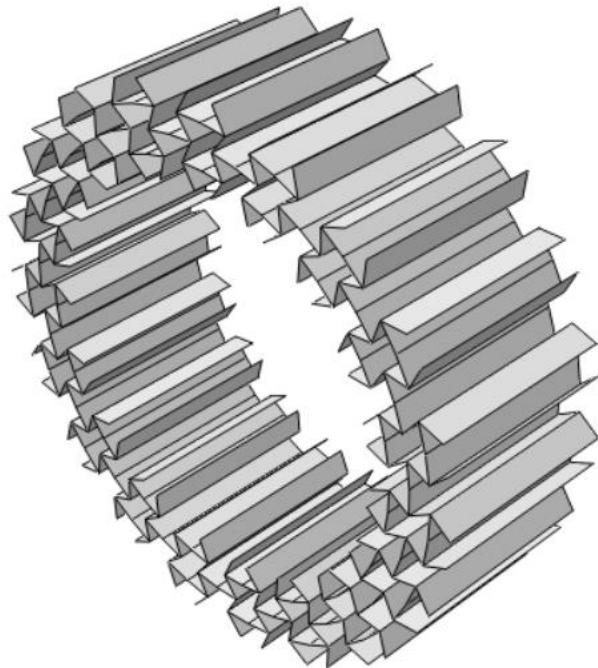
جدول (۱-۴) مشخصات هندسی ساختارهای مختلف لایه اسپوک

t (mm)	Θ (degree)	h (mm)	l (mm)	نوع مدل
۵	۱۵.۷۶	۳۶.۶۶	۲۶.۲۵	NPT-A1
۵	-۳۱.۵	۵۹.۴۳	۲۹.۶۵	آگزتیکی لانهزنبوری
۵	-۴۷.۳۲	۲۴.۵۱	۱۶.۶۶	درون رو

^۱ Kumho Tire Inc

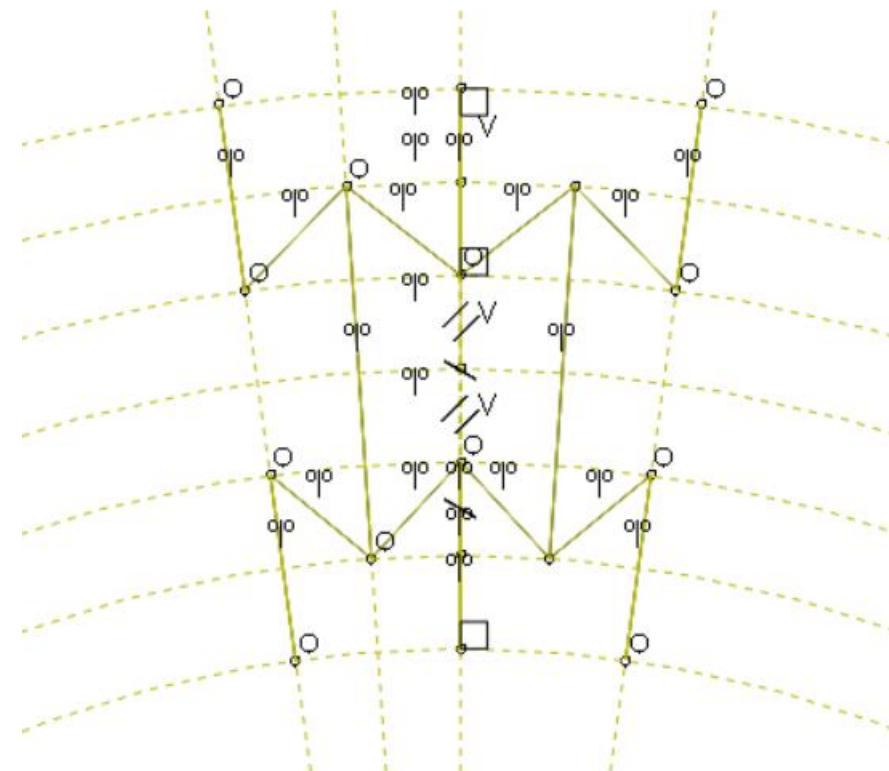


شکل (۳-۴) نمایی سه بعدی از لایه اسپوک ساختار NPT-A1

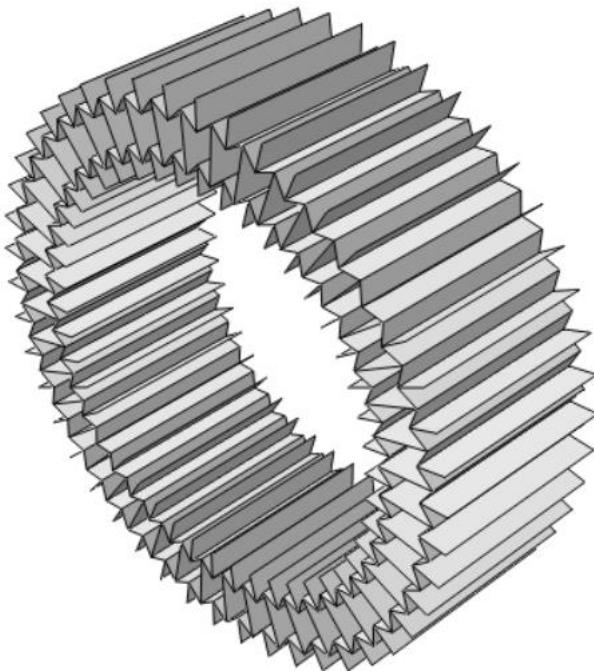


شکل (۴-۴) نمایی سه بعدی از لایه اسپوک ساختار لانه زنبوری آگرتیکی

برای رسم ساختار سوم از ساختار آگزتیکی درون رو که در فصل مرور ادبیات نیز معرفی شده بود استفاده شده است. شکل (۴-۵) جزئیات رسم این ساختار را نشان می‌دهد و در جدول (۱-۴) نیز اندازه‌های مربوط به این ساختار آورده شده است. شکل (۶-۶) نیز نمای سه بعدی از این ساختار را نشان می‌دهد.

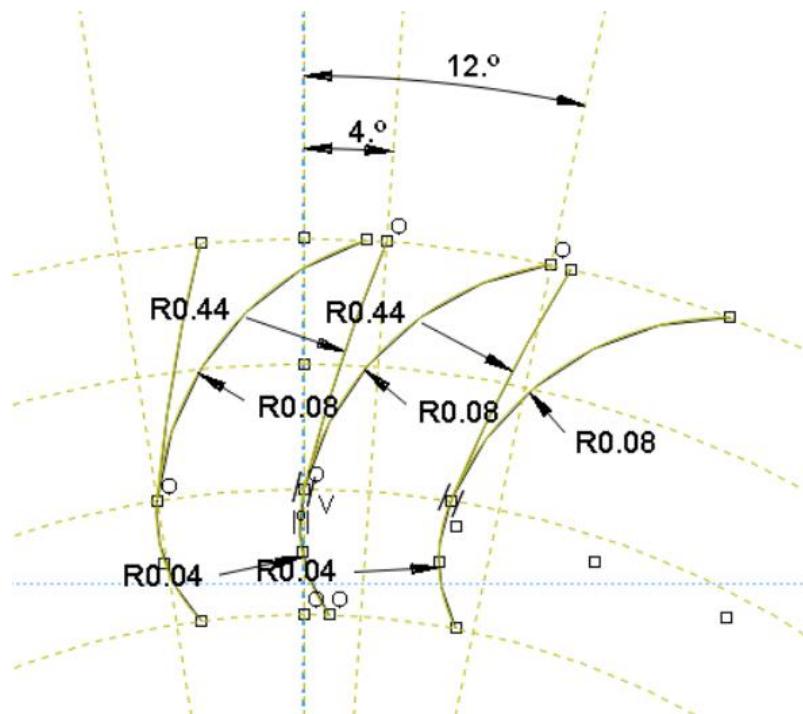


شکل (۴-۵) جزئیات رسم ساختار درون رو

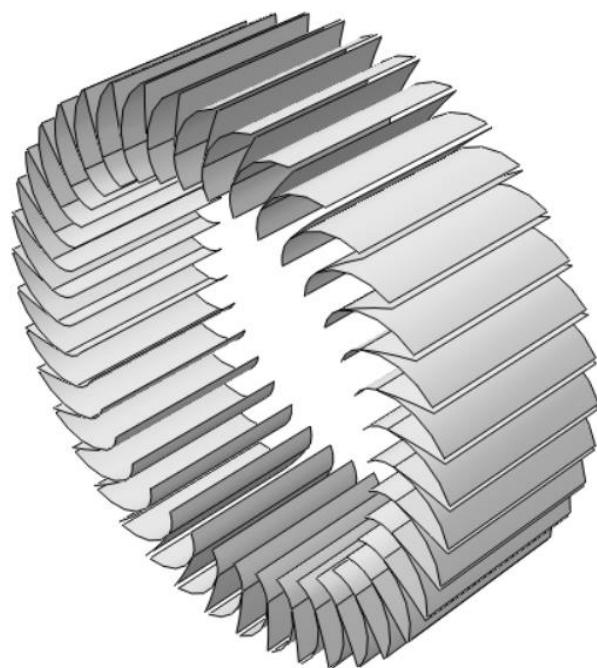


شکل (۶-۴) نمایی سه بعدی از لایه اسپوک ساختار درون رو

ساختار چهارم، با الهام گرفتن از یک نمونه تجربی مدل سازی شده، ترکیبی از منحنی های مماس بر هم است و با رسم خطوط راهنمایی که در شکل (۷-۴) نشان داده شده است و همچنین تکرار این سلول ها به صورت الگوی دایره ای، رسم می شود. این ساختار غیر آگزتیکی و لانه زنبوری است و مزیت آن این است که تراکم کمتری از سلول ها در آن دیده می شود.

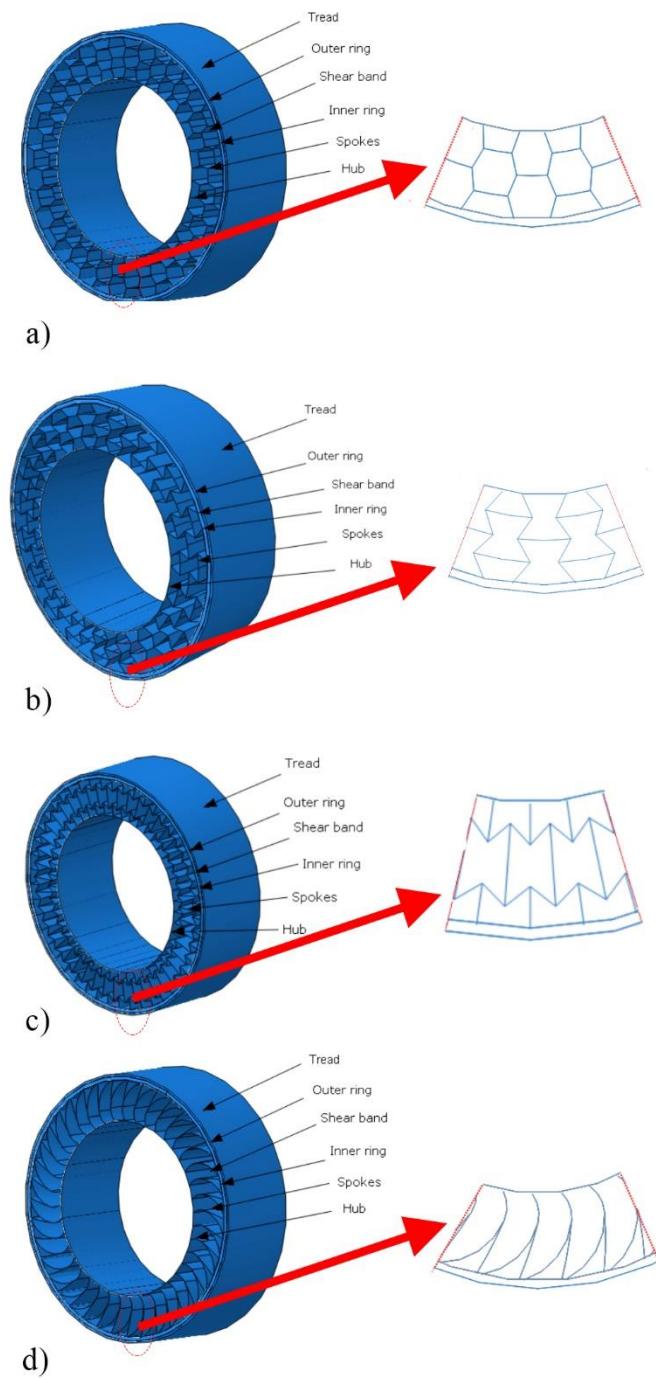


شکل (۷-۴) جزئیات رسم ساختار چهارم



شکل (۸-۴) نمایی سه بعدی از ساختار چهارم

در نهایت در شکل (۹-۴) مقایسه‌ای کلی بین همه ساختارهای بررسی شده ارائه شده است.



شکل (۹-۴) مقایسه‌ای بین همه‌ی ساختارهای ارائه شده: a) ساختار آگزتیکی لانه زنبوری، b) ساختار NPT-A1، c) ساختار درون spoke pair رو، d) ساختار

۴-۳-۴- مشخصات مواد استفاده شده

به دلیل وجود لایه‌های مختلف در تایرها غیر بادی، مواد مختلفی نیز در این نوع از تایرها استفاده می‌شود. به طور کلی از چهار نوع ماده مختلف در یک تایر غیر بادی استفاده می‌شود. برای این که بیشترین تطابق‌پذیری با نتایج پژوهش‌های مرجع وجود داشته باشد، مواد دقیقاً مطابق با کارهای پیشین انجام شده در حوزه تایرها غیربادی انتخاب شده‌اند تا هم از پیچیدگی‌هایی که ممکن است به وجود بیاید جلوگیری شود و هم بتوان اعتبارسنجی با این مقالات پیشین انجام داد. به طور کلی، برای لایه‌های تقویتی رینگ داخلی و رینگ خارجی از آهن استحکام بالای ANSI 4340، برای لایه هاب از آلومینیوم T6-7075، برای لایه عاج تایر از خواص هایپر الستیک و برای لایه‌های برشی و اسپوک از ماده پلی اورتان استفاده شده است. خواص مکانیکی این مواد شامل چگالی، مدول یانگ، ضریب پواسون، مدول برشی، استحکام تسلیم^۱ در جدول (۲-۴) آورده شده است.

جدول (۲-۴) مشخصات مواد مورد استفاده در لایه هاب و لایه‌های تقویتی [۴۶]

مدول برشی (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (MPa)	چگالی (Kg/m ³)	ماده
27	503	0.33	72	2800	آلومینیوم T6
76	1240	0.29	210	7800	آهن ANSI 4340

اما برای تعریف مواد پلی اورتان و لاستیک در نرم‌افزار آباکوس باید خواص هایپرالاستیک را در مژول خواص^۲ این نرم‌افزار وارد کرد. همانطور که در فصل ۲ نیز بحث شد و در روابط (۱-۳) تا (۳-۳) توضیح داده شد، برای تعریف این مواد در این پایان‌نامه و همچنین در تاریخچه ادبیات مربوط به تایرها غیر بادی، معمولاً

¹ Yield strength

² Property

از روابط انرژی کرنشی اوگدن استفاده شده است که ضرایب مربوط به مواد پلی اورتان در جدول (۴-۳) و خواص مربوط به لاستیک در جدول (۴-۴) آورده شده است [۴۸].

جدول (۴-۳) خواص انرژی کرنش اوگدن هایپرالاستیک ماده پلی اورتان [۴۶]

α_i	μ_i (MPa)	i
1.513	13.546	1
2.212	- 2.338	2
- 2.471	0.093	3

جدول (۴-۴) خواص انرژی کرنش اوگدن هایپرالاستیک ماده لاستیک مصنوعی^۱ [۴۶]

α_i	μ_i (MPa)	i
13.356	1.633	1
- 6.631	1.9	2
0.058	-2.456	3

در بررسی‌های دینامیکی و همانطور که در فصل ۳ این پایان‌نامه به آن اشاره شد، برای دستیابی به پارامتر مقاومت غلطشی در نرم‌افزار آباکوس، نیاز به تعریف خواص ویسکوالاستیک برای ماده‌های پلی اورتان و لاستیک است. رابطه (۴-۳) مدل برگشت تدریجی به حالت اولیه را درباره این مواد نشان می‌دهد. برای تعریف این خواص ویسکوالاستیک از همان ماثول خواص نرم‌افزار آباکوس، از مقادیری که در جدول‌های (۴-۵) و (۴-۶) آورده شده است استفاده شده. این مقادیر با بررسی مطالعات پیشین و پژوهش‌هایی که قبلاً درباره بارگذاری‌های دینامیکی روی تایرهای غیر بادی اجرا شده‌اند، انتخاب شده است.

^۱ Synthetic rubber

جدول (۴-۵) خواص سری پرونی ویسکوالاستیک ماده پلی اورتان [۵۴]

τ_i	g_i	i
0.002	0.125	1
0.02	0.125	2
0.2	0.125	3

جدول (۶-۴) خواص سری پرونی ویسکوالاستیک ماده لاستیک مصنوعی [۵۴]

τ_i	g_i	i
0.002	0.2	1
0.02	0.2	2
0.2	0.2	3

۴-۳-۳- نوع حلگر و شرایط برهم‌کنش میان اجزا

در بخش اول و در تحلیل استاتیکی، از حلگر عمومی استاتیک^۱ برای گرفتن نتایج استفاده شده است. به طور کلی، در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، برای تحلیل موادی که خاصیت هایپرالاستیک دارند باید از این حلگر استفاده شوند. مسئله‌ی مدنظر این پژوهش به صورت اساسی غیرخطی است. این غیرخطی بودن به سه دلیل رخ می‌دهد. اولین دلیل این است که ماده‌ی ما رفتار غیرخطی دارد، دومین دلیل، شرایط مرزی غیرخطی مسئله به دلیل تماس تایر با زمین است و سومین دلیل، هندسه غیرخطی و هندسه ویژه اسپوک‌ها در این مدل است. به همین دلیل باید تحلیل غیرخطی^۲ نیز انجام شود و در حلگر نرم‌افزار این موضوع باید تعیین شود [۶۱]. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، بهتر است که از دو حلگر استاتیکی استفاده شود. به این صورت که ابتدا یک حلگر

¹ Static general

² Nlgeom

استاتیکی اعمال می شود که فقط ۱ تا ۵ درصد از کل باری که قرار است در نهایت اعمال شود، در این بخش تعیین می شود و در این گام^۱، شرایط برهم‌کنشی و مرزی نیز به طور کامل تعیین می شود.

گام اول که روالی معمول و اصولی برای تحلیل‌های برهم‌کنشی است، عموماً با نام گام پایداری^۲ شناخته می شود. از طرف دیگر به دلیل تماس تایر با سطح زمین باید شرایط برهم‌کنشی نیز برای تایر تعریف شود. برای همین منظور باید یک تماس سطح به سطح^۳ بین سطح خارجی تایر که لایه عاج تایر است و سطح زمین که به صورت یک سطح صلب^۴ تعریف شده است، ایجاد شود. فرمولاسیون این شرایط برهم‌کنشی از نوع غلطش محدود^۵ است. همچنین شرایط کلی تماس به صورت رفتار مماسی^۶ و با تعریف فرمولاسیون بر مبنای روش پنالتی و ضریب اصطکاک^۷ ایجاد شده است. استفاده از گام پایداری برای تحلیل‌های دینامیکی به دلیل اینکه این نوع از تحلیل‌ها نیازمند جزئیات تماس بیشتری هستند، اهمیت بیشتری نسبت به تحلیل‌های استاتیکی دارد.

برای تحلیل‌های دینامیکی، به دلیل استفاده از مواد هایپرالاستیک باید از حلگر استفاده شود که از حلگر عمومی استاتیک استفاده می‌کند. به همین منظور برای تحلیل‌های دینامیکی از حلگر دینامیکی ضمنی^۸ استفاده شده است. با مطالعه مقالات پیشین، دیده می شود که در برخی از پژوهش‌ها از حلگر شبه استاتیکی^۹ برای تحلیل استفاده شده است اما با بررسی‌هایی که در این پژوهه انجام شد، تفاوت عمدہ‌ای بین استفاده از این دو حلگر در نتایج حاصل شده، مشاهده نشد و به همین دلیل و برای سادگی روند حل از همان حلگر دینامیکی ضمنی استفاده شد.

برای اعمال بار استاتیکی به مرکز جرم تایر، یک نقطه مرجع در مرکز تایر تعیین شده و به سطح خارجی لایه هاب به وسیله قید کوپلینگ^۹ متصل شده است. همچنین، همه‌ی لایه‌های این تایر یعنی لایه‌های هاب و اسپوک، اسپوک و رینگ داخلی، رینگ داخلی و لایه برشی، لایه برشی و رینگ خارجی، رینگ خارجی و لایه

¹ Step

² Stabilization

³ Surface-to-Surface contact

⁴ Discrete rigid

⁵ Finite sliding

⁶ Tangential behaviour

⁷ Dynamic implicit

⁸ Quasi-static

⁹ Coupling constraint

عاج، به وسیله قید گره^۱ به همدیگر متصل شده‌اند. به این صورت با اعمال بار به نقطه مرکز جرم تایر، همه‌ی لایه‌ها از این اعمال بار تاثیر می‌پذیرند.

۴-۳-۴- بارگذاری و شرایط مرزی

برای اعمال بار به تایر در کارهای پیشین دو روش اتخاذ شده است. روش اول این است که معادل ربع وزن خودرو (که در واقع نیرویی است که به طور عمودی به هر تایر خودرو وارد می‌شود) بار متumerکز به نقطه مرجع تایر وارد شود. روش دوم این است که یک جابجایی از ۲۰ میلی‌متر به این نقطه وارد شود. در بخش استاتیکی این پروژه و برای تطابق پذیری با نتایج مقالات مرجع روش اول اتخاذ شده است.

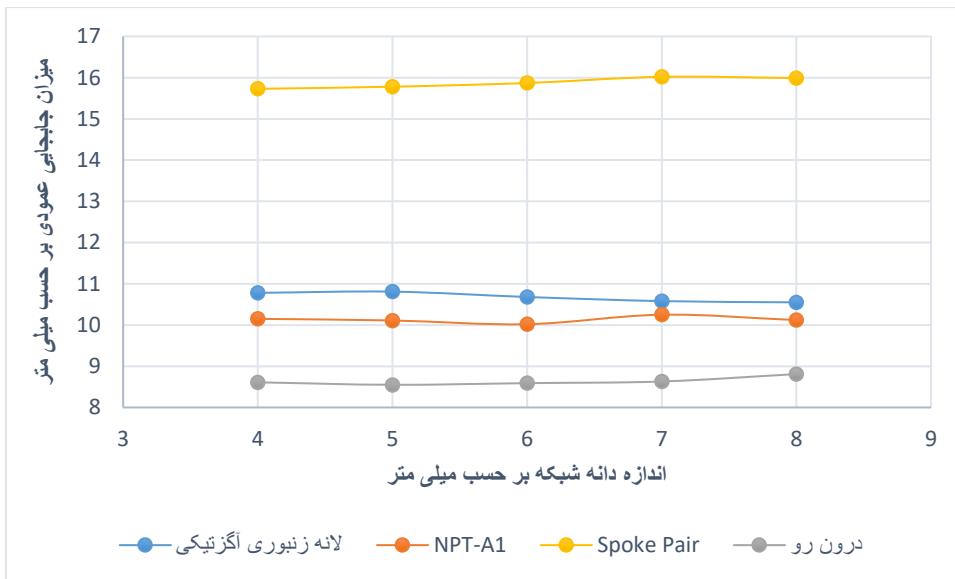
در تحلیل استاتیکی و برای جلوگیری از غلط‌شدن تایر یا حرکت تایر در راستاهای دیگر محورهای مختصات، درجهات آزادی نقطه مرجع تایر در همه راستاهای به جز راستای y گرفته شده است. به این صورت، فقط مودهای تغییر شکل تایر در اثر اعمال بار عمودی قابل مشاهده است.

برای تحلیل دینامیکی، پس از دو گام پایداری و گامی که برای اعمال بار استاتیکی ایجاد می‌شود، باید یک گام دیگر برای اعمال سرعت زاویه‌ای به تایر ایجاد شود تا غلط‌شدن تایر روی سطح زمین مشاهده شود. برای این کار نیز دو گزینه وجود دارد که اولین گزینه، اعمال سرعت زاویه‌ای به کل تایر و گزینه دوم، اعمال بار استاتیکی عمودی به تایر است تا تماس بین تایر و سطح زمین ایجاد شود و سپس یک گام جدید دینامیکی از نوع ضمنی ایجاد می‌شود تا به سطح زمین سرعت داده شود و اصطکاک بین تایر و زمین منجر به غلط‌شدن تایر شود.

¹ Tie

۴-۳-۵- مطالعه حساسیت مش

یکی از اقدامات لازم در شبیه‌سازی‌هایی که توسط نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود باید انجام شود مطالعه اندازه شبکه‌های مساله و بررسی همگرایی آن است. در این مساله نیز پس از شبکه‌بندی جداگانه لایه‌های مدل، همانطور که در شکل (۱۰-۴) نشان داده شده است، مطالعه حساسیت مش مدل برای ساختارهای مختلف انجام شد.



شکل (۱۰-۴) مطالعه حساسیت مش برای ساختارهای مختلف تایر غیر بادی تحت بار ۲۰۰ نیوتنی

مطابق با شکل (۱۰-۴)، برای ساختار NPT-A1 و درون‌رو به دلیل این که میزان جابجایی عمودی با ریزتر کردن اندازه مش تغییرات محسوسی نسبت به گام بعدی ندارد، اندازه شبکه انتخاب شده برابر با ۶ میلی‌متر است و برای ساختارهای Spoke pair و لانه‌زنبوری آگرتهیکی، برابر با ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده. شکل (۱۱-۴)^۱ نمای نهایی این شبکه‌های اتخاذ شده را نشان می‌دهد. نوع المان‌های انتخاب شده برای هر لایه متفاوت است. برای سطح زمین که از نوع صلب انتخاب شده است، المان^۱ R3D4 انتخاب شده. برای لایه‌های هاب، رینگ‌های داخلی و خارجی و اسپوک از المان^۲ S4R استفاده شده. برای لایه‌های برشی و عاج تایر از المان^۳ C3D8RH

¹ A 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral

² A 4-node doubly curved shell, reduced integration, hourglass control

³ An 8-node linear brick, hybrid, constant pressure, reduced integration, hourglass control

استفاده شده است. نکته قابل توجه در استفاده از این المان‌ها این است که المان‌های مخصوص برای لایه برشی و عاج تایر چون با مواد هایپرالاستیک مدل شده‌اند، باید از المان‌های هیبریدی استفاده شود.



مدل لانه زنبوری آگزتیکی



مدل NPT-A1



Spoke pair مدل

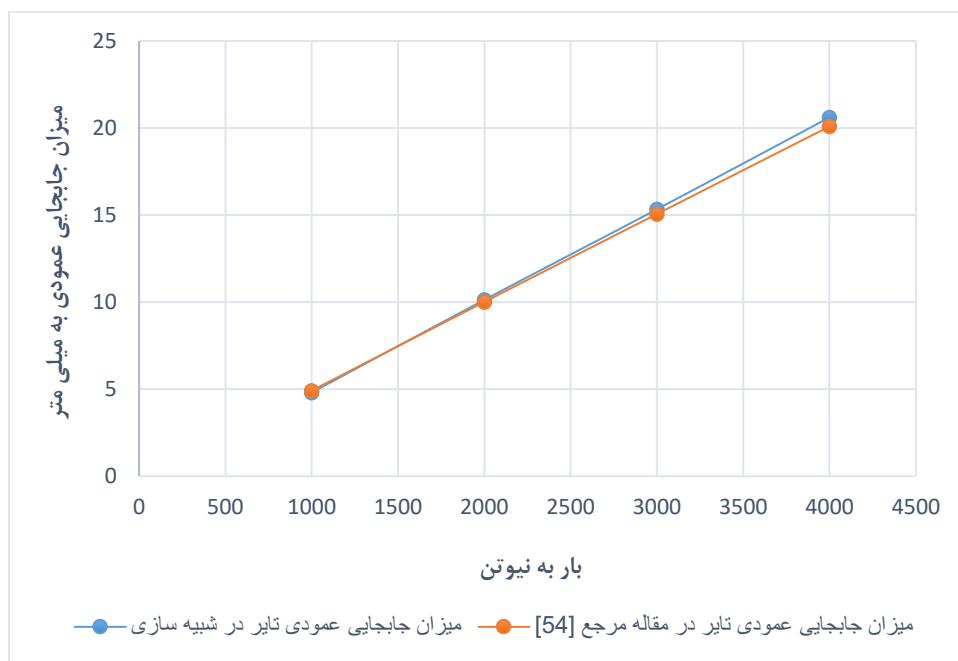


مدل درون رو

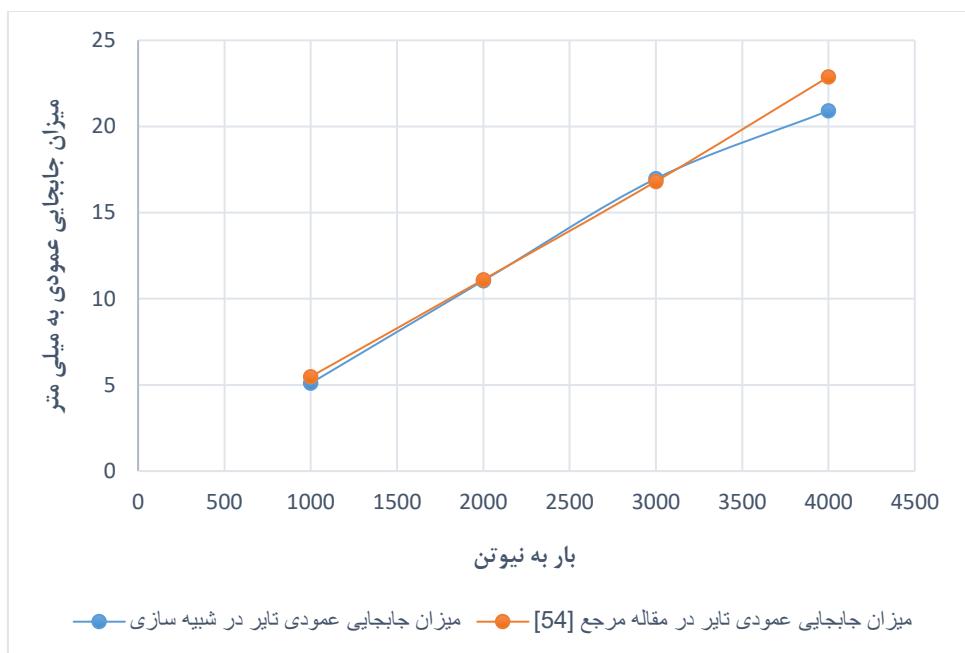
شکل (۱۱-۴) نمایی از شبکه بندی ۴ مدل مختلف استفاده شده

۴-۴- اعتبارسنجی

اکثر مطالعه‌هایی که تاکنون برای تایرهای غیربادی انجام شده، برای لایه اسپوک از ساختارهای لانهزنبری استفاده کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین مقالاتی که در این حوزه وجود دارد و محققین ارجاعات زیادی به آن داده‌اند و کار خود را با آن اعتبارسنجی کرده‌اند، مطالعه جین و همکارانش [۵۴] است که با مرور ادبیات تایرهای غیربادی، مشابه‌ترین موضوع را به این پایان‌نامه دارد. اشکال (۱۲-۴) و (۱۳-۴) اعتبارسنجی انجام شده برای تحلیل‌های استاتیکی را با این مقاله نشان می‌دهد. برای این اعتبارسنجی دو مدل NPT-A1 و NPT-B1 تحت بارگذاری‌های ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتونی شبیه‌سازی شده و با نتایج مقاله جین و همکاران مقایسه شده است.



شکل (۱۲-۴) اعتبارسنجی با نتایج پژوهش مرجع برای مدل NPT-A1



شکل (۱۳-۴) اعتبارسنجی با نتایج پژوهش مرجع برای مدل NPT-B1

فصل پنجم: نتایج

۱-۵- مقدمه

فصل نتایج، به طور کلی به چهار بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول و مطابق با مقالات مرجع و صحه‌گذاری که در فصل چهارم به آن پرداخته شد، ساختارهای مختلف تحت بارگذاری استاتیکی قرار می‌گیرند و عملکرد تایر طبق پنج پارامتر طراحی تایرهای غیر بادی که شامل سفتی عمودی، تنش فون میسز^۱ در اسپوک‌ها و در کل مدل، وزن و فشار تماسی هستند، بررسی و مقایسه می‌شوند.

در بخش دوم و برای تحلیل دینامیکی، مطابق با آنچه که در فصل مدل‌سازی به آن اشاره شد، بارگذاری به نحوی بر مدل اعمال می‌شود تا تایر دچار غلطش شود و رفتار تایر با ساختارهای اسپوک متفاوت حین غلطش تحلیل می‌شود. در بخش سوم، تحلیل کمانشی بر روی ساختار ایجاد شده و کانتورهای جابجایی برای مود اول کمانشی و همچنین بار بحرانی مربوط به هر کدام از ساختارها بدست آورده و مقایسه می‌شود.

¹ Von mises

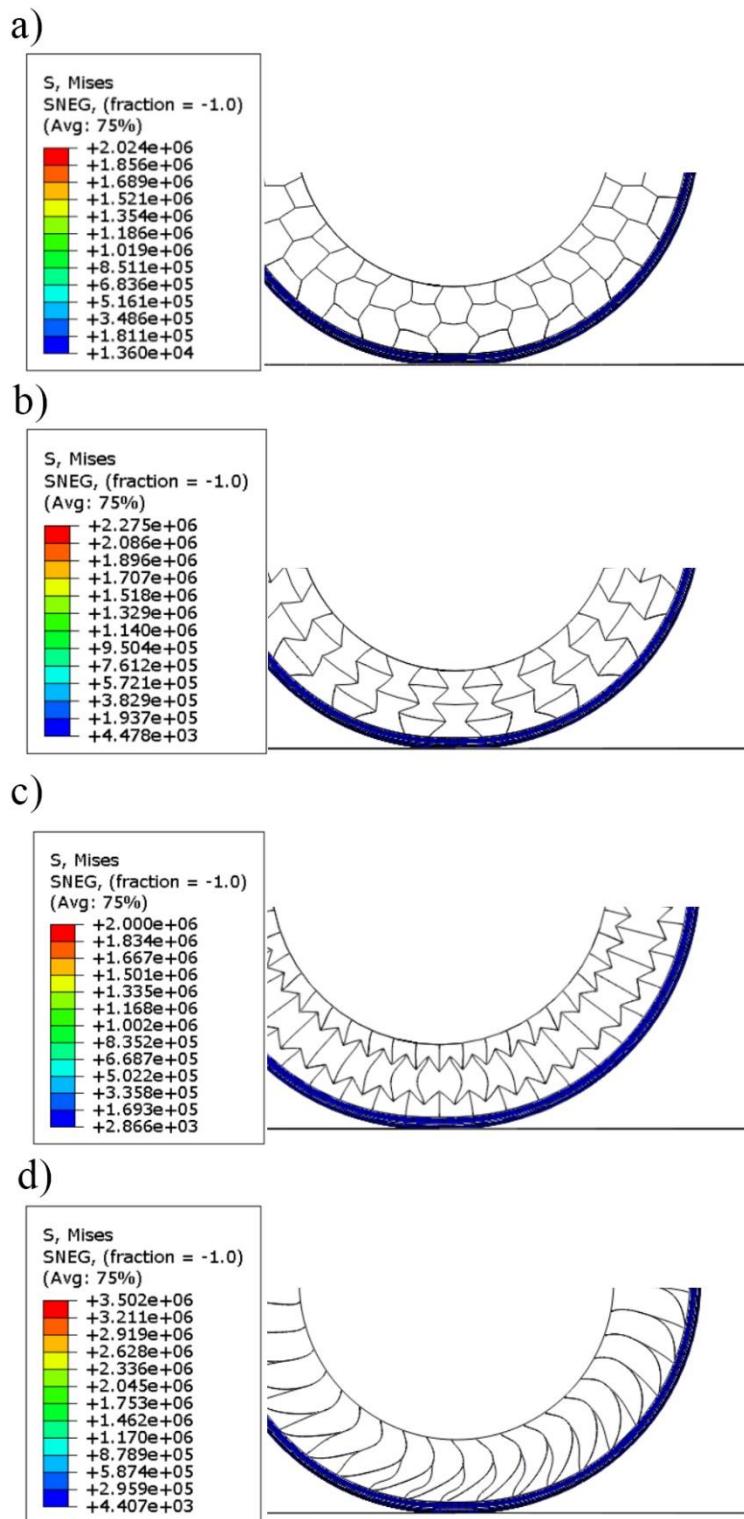
در بخش چهارم و پایانی، عوامل دیگری که می‌توانند به طور بالقوه منجر به بهبود عملکرد تایر شوند بررسی می‌شوند. از جمله این موارد می‌توان به تاثیر استفاده از ضخامت‌های مختلف برای دیواره سلول لانه‌زنبری، مطالعه تاثیر استفاده از تعداد سلول‌ها و چگالی بیشتر آن‌ها و بررسی بر روی تعداد طبقات سلول‌های لانه‌زنبری استفاده شده در لایه اسپوک، تاثیر استفاده از ضخامت‌های مختلف برای لایه برشی و عاج تایر و بررسی بر روی تاثیر استفاده یا عدم استفاده از لایه برشی، اشاره کرد.

۵-۲-۱- استفاده از ساختارهای اسپوک متفاوت بر خواص تایر تحت بارگذاری استاتیکی

در این بخش و برای بررسی تاثیر استفاده از ساختارهای اسپوک مختلف در یک تایر غیر بادی ابتدا مودهای تغییر شکل ساختارهای مختلف بررسی می‌شود و سپس عواملی که بر عملکرد تایرهای غیربادی تاثیرگذار هستند و پارامتر طراحی آن به شمار می‌روند که شامل بیشترین تنفس ایجاد شده در کل تایر و اسپوک‌ها، سفتی عمودی و فشار تماسی هستند، بررسی و مقایسه می‌شوند.

۵-۲-۱- بررسی مودهای تغییر شکل و بیشترین تنفس‌های ایجاد شده در ساختارهای مختلف

در این بخش با اعمال یک بارگذاری استاتیکی به نقطه مرجع تایر که رنجی بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتن دارد (این مقدار معادل ربع وزن یک خودروی معمولی است) مودهای تغییر شکل لایه اسپوک تایر در اثر اعمال این نیرو و همچنین بیشترین تنفس ایجاد شده در تایر و بیشترین تنفس ایجاد شده در لایه اسپوک تایر بررسی و مقایسه می‌شود.



شکل (۵-۱) مودهای تغییر شکل و بیشترین تنش ایجاد شده در لایه اسپوک تایر تحت بار ۲۰۰۰ نیوتون به ترتیب برای ساختارهای (a) NPT-A1، (b) آگزتیکی لانه زنborی، (c) درون رو، (d) مدل spoke pair

همانطور که در شکل (۱-۵) مشاهده می‌شود، بیشترین تنש ایجاد شده بین ساختارهای مختلف تحت بارگذاری ۲۰۰۰ نیوتن، متعلق به ساختار غیر آگزتیکی spoke pair است که این موضوع نشان‌دهنده این است که استفاده از ساختارهای آگزتیکی و لانهزنبوری می‌تواند منجر به تنش‌های کمتری در لایه اسپوک شود.

جدول (۱-۵) بیشترین تنش‌های ایجاد شده در تایر تحت بارگذاری ۲۰۰۰ نیوتن را در کل تایر نشان می‌دهد. مطابق با این جدول، ساختار درون‌رو که یک ساختار آگزتیکی است کمترین تنش را بین دیگر ساختارها در کل مدل دارد. همچنین از آنجاییکه این ساختار تراکم بیشتری از سلول‌ها در خود دارد، می‌توان به این موضوع پی بردن که استفاده از ساختارهای متراکم‌تر و سلول‌های لانهزنبوری بیشتر برای لایه اسپوک تایر غیر بادی می‌تواند بیشترین تنش وارد بر تایر (که معمولاً در لایه رینگ داخلی که وظیفه اتصال لایه اسپوک به لایه برشی را به عهده دارد، رخ می‌دهد و بدین ترتیب کل تایر تنش‌های کمتری را متحمل شود).

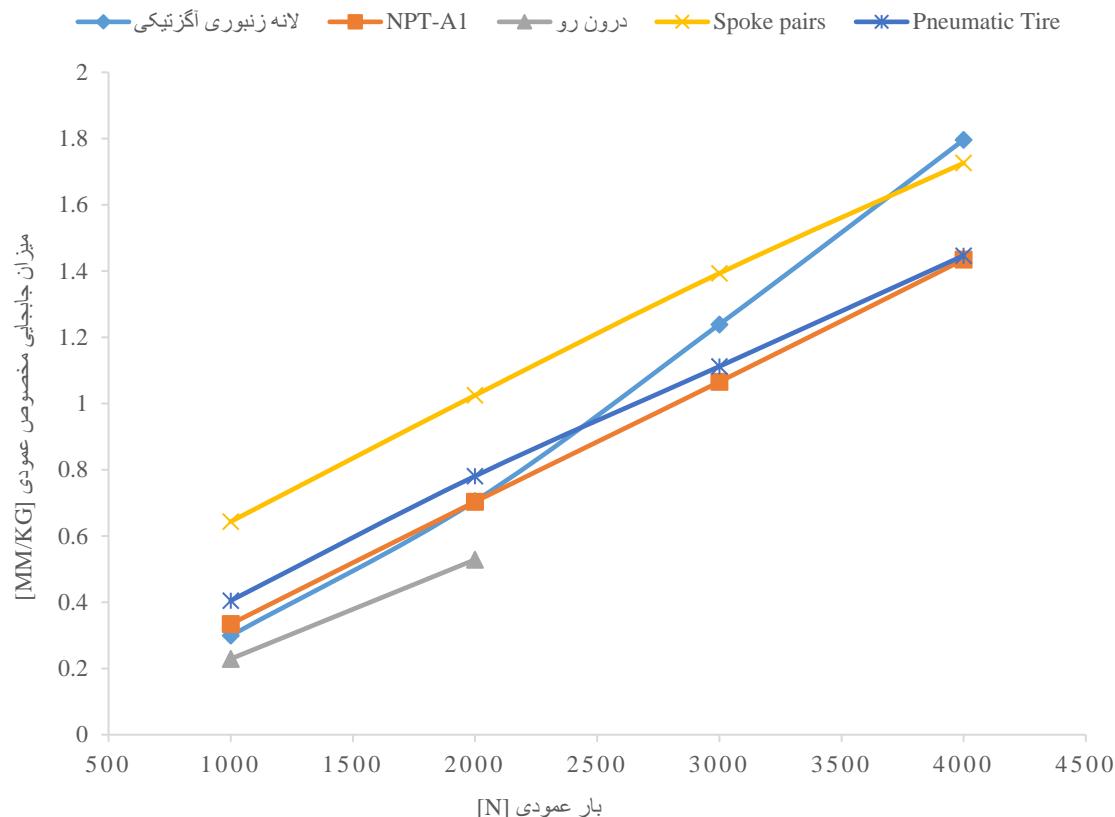
جدول (۱-۵) بیشترین تنش ایجاد شده در تایر برای ساختارهای اسپوک متفاوت تحت بار فشاری ۲۰۰۰ نیوتن

نوع ساختار در لایه اسپوک	بیشترین تنش ایجاد شده در کل تایر (MPa)
NPT-A1	۲۳۱.۳
لانهزنبوری آگزتیکی	۲۳۲
درون‌رو	۱۸۶.۲
Spoke pair	۲۶۱.۴

۲-۲-۵- بررسی سفتی عمودی مخصوص

از دیگر پارامترهای مهم طراحی برای تایرهای غیر بادی، سفتی عمودی مخصوص است که عامل مهمی در سنجش عملکرد تایرها به شمار می‌رود، همچنین این پارامتر میزان تحمل بار تایر را نیز نشان می‌دهد و از حاصل تقسیم میزان بار وارد شده به نقطه مرجع تایر بر میزان جابجایی عمودی در جرم ساختار این نقطه بدست می‌آید.

سفتی عمودی بالا به چسییدن موثر تایر به سطح زمین یا اصطلاحا جاده چسی^۱ تایر کمک می‌کند و منجر به حفظ دایروی بودن تایر در بارهای بالا می‌شود و همچنین می‌تواند از فرسودگی آن در طول زمان بکاهد [۶۹] [۷۰]. از طرف دیگر مقادیر بسیار بالای سفتی عمودی مخصوص، منجر به ارتعاشات بالا در وسیله نقلیه و سیستم تعليق خودرو می‌شود.

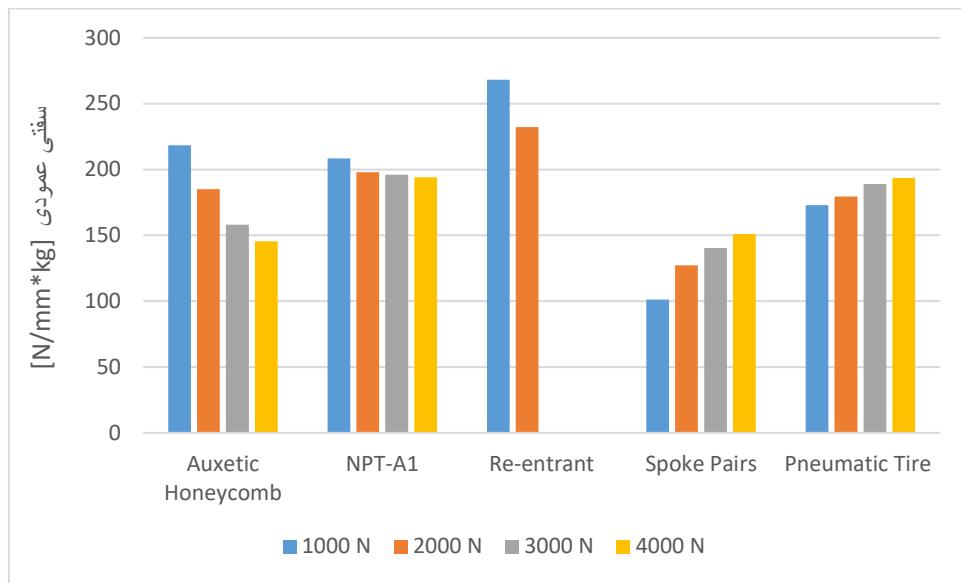


شکل (۲-۵) مقایسه میزان جابجایی مخصوص عمودی در ساختارهای مختلف

شکل (۲-۵) میزان جابجایی مخصوص عمودی تایر تحت بارگذاری فشاری عمودی که رنجی بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتون دارد را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ساختار NPT-A1 و دو ساختار آگزتیکی درون رو و ساختار لانه‌زنبری آگزتیکی کمترین میزان جابجایی در اثر اعمال بار و متعاقبا بیشترین مقدار سفتی عمودی و میزان تحمل بار را دارا هستند. از بین این سه ساختار نیز، ساختار درون رو کمترین میزان جابجایی عمودی در اثر بار اعمالی را دارد. اما با توجه به شکل‌های (۲-۵) و (۳-۵) این موضوع مشخص می‌شود که برای ساختار درون رو

^۱ Road-Holding

فقط نتایج تحت بارهای ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ نیوتنی ارائه شده است. دلیل این موضوع این است که ظرفیت حمل بار این ساختار ۲۰۰۰ نیوتن است و زمانی که بار فشاری‌ای بالاتر از بار ۳۰۰۰ نیوتن به این ساختار وارد شود، از آنجایی که این ساختار متراکم‌تر از ساختار لانه‌زنبوری آگزتیکی است، در صورت اعمال بار فشاری، جمع و متراکم شده و به دلیل اینکه موضوع خودتماسی^۱ در لایه اسپوک رخ می‌دهد، تنش‌های ایجاد شده در لایه اسپوک افزایش چشمگیری می‌یابند و به همین دلیل خواص مکانیکی تایر به شدت افت می‌کنند. بنابراین این ساختار برای مصارفی که نیاز به ظرفیت حمل بار بیشتر از ۳۰۰۰ نیوتن ندارند، مناسب‌ترین مدل، بین ساختارهای معرفی شده است.



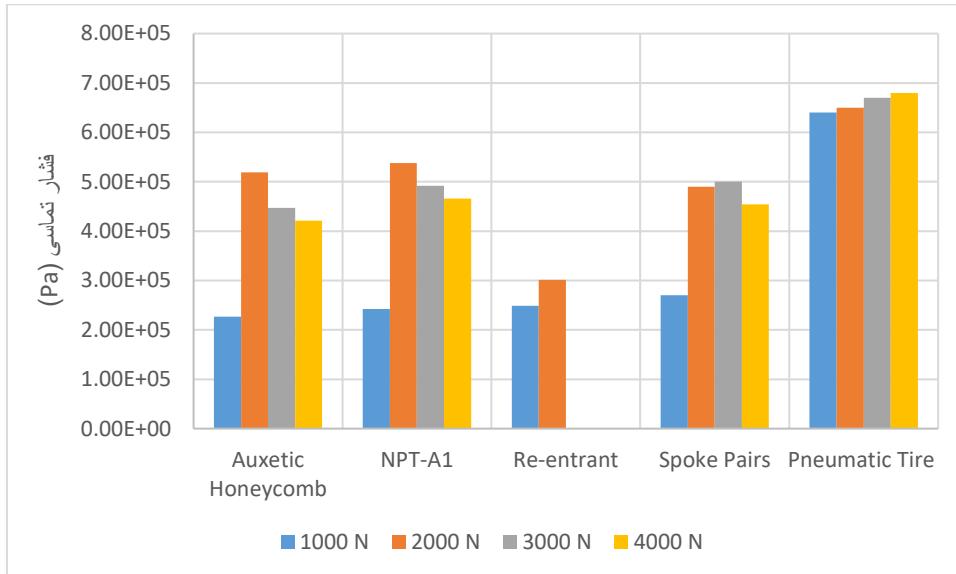
شکل (۳-۵) سفتی عمودی مخصوص برای ساختارهای اسپوک متفاوت تحت بارگذاری فشاری ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ نیوتن و مقایسه آن با مقادیر یک تایر بادی معمولی مشابه [۴۶]

شکل (۳-۵) مقادیر سفتی عمودی مخصوص را برای ساختارهای اسپوک مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، بیشترین مقدار سفتی عمودی مربوط به ساختار درون‌رو است که همانند بخش پیشین، تراکم بیشتر سلول‌های لانه‌زنبوری منجر به بالاتر رفتن سفتی عمودی تایر شده و این مدل به همراه مدل NPT-A1 سفتی عمودی بیشتری را نسبت به تایرهای بادی معمولی از خود نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که نتایج مربوط به تایربادی از مقالات مرجع استخراج شده است [۴۶].

^۱ Self-contact

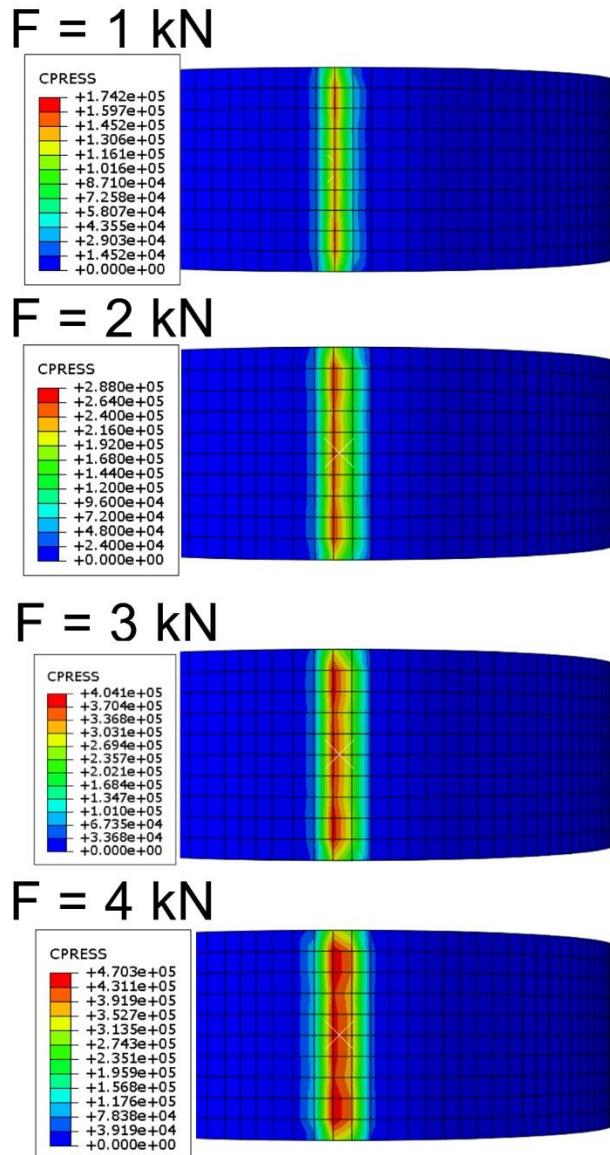
۳-۲-۵- بررسی فشار تماسی

فشار تماسی، همانطور که در فصول پیشین نیز به آن اشاره شد یکی دیگر از مواردی است که اهمیت زیادی در طراحی تایرهای غیر بادی دارد.



شکل (۴-۵) مقایسه فشار تماسی بین ساختارهای اسپوک متفاوت تایر غیر بادی و تایر بادی معمولی

همانطور که از شکل (۴-۵) مشخص است، در تمامی موارد تایرهای غیربادی ارائه شده در این پایاننامه دارای فشار تماسی به نسبت کمتری از تایر بادی است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از ساختارهای مکانیکی به جای فشار باد می‌تواند منجر به ایجاد فشار تماسی کمتر شود. مقادیر فشار تماسی مربوط به تایر بادی از مقالات مرجع استخراج شده است [۵۶]. همچنین شکل (۴-۵) نشان می‌دهد که ساختار درون رو که در بخش-های پیشین نیز نتایج بهتری نسبت به دیگر ساختارها داشت، فشار تماسی کمتری را در لایه عاج تایر ایجاد می‌کند و می‌تواند گزینه بهتری در مقایسه با دیگر ساختارهای ارائه شده برای جایگزینی با تایر بادی معمولی باشد. در ساختار درون رو با افزایش بار از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ نیوتن، بر خلاف دیگر ساختارها، تغییرات چشمگیری در فشار تماسی به وجود نمی‌آید. برای ظرفیت‌های حمل بار بزرگتر از ۲۰۰۰ نیوتن نیز، ساختار لانه‌زنبوری آگزتیکی به همراه ساختار NPT-A1، به طور میانگین فشار تماسی کمتری را در لایه عاج تایر ایجاد می‌کنند. شکل (۵-۵) تغییرات فشار تماسی در اثر افزایش بار اعمال شده به نقطه مرجع تایر را نشان می‌دهد.

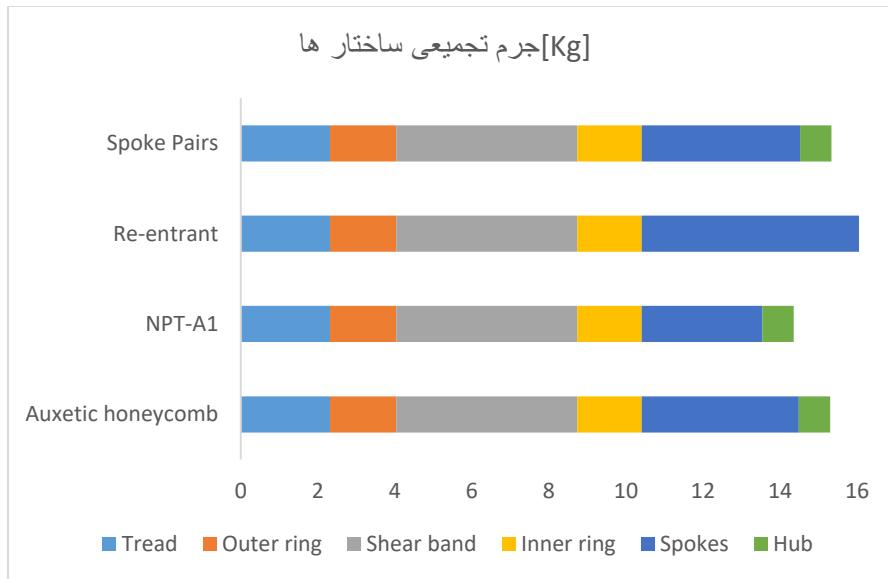


شکل (۵-۵) نمایی از گسترش فشار تماسی در محل تماس لایه عاج تایر با سطح زمین با افزایش بار در ساختار لانه زنبوری

۴-۲-۵- مقایسه جرم ساختارها

از دیگر عوامل مهم طراحی تایرهای غیر بادی برای مهندسین، بررسی و مقایسه جرم ساختارها و متعاقباً هزینه صرف شده برای ساخت و تولید ساختار است. برای بررسی این موضوع جرم ساختارها با توجه به چگالی

تعریف شده برای آنها، در نرم افزار آباکوس خروجی گرفته شده است و شکل (۶-۵) این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۵) مقایسه ای بین وزن تجمیعی ساختارهای اسپوک

شکل (۶-۵) وزن را به تفکیک هر لایه از تایر نشان می‌دهد و گویای این نکته است که بالاترین وزن بین ساختارهای معرفی شده در این پایان‌نامه متعلق به ساختار درون رو است. این موضوع از آنجایی قابل توجیه است که این ساختار بیشترین تراکم سلول‌های لانه‌زنبوری را دارد.

۳-۵- تحلیل دینامیکی و اعمال غلطش به تایر

در این بخش تحلیل دینامیکی روی ساختارهای معرفی شده بررسی می‌شود تا بتوان آنها را به عنوان یک جایگزین برای تایرهای بادی معمولی در نظر گرفت. با مرور ادبیات مربوط به تایرهای غیر بادی این نکته مشخص می‌شود که متاسفانه پژوهش‌هایی که تحلیل دینامیکی را انجام داده‌اند بسیار محدود هستند. دلیل این موضوع می‌تواند پیچیدگی زیاد شبیه‌سازی باشد. شبیه‌سازی تایرهای غیر بادی به خودی خود، با در نظر گرفتن هندسه و مواد غیر خطی پیچیده هستند و شبیه‌سازی دینامیکی و ایجاد غلطش در تایر می‌تواند حل را پیچیده‌تر و مدت

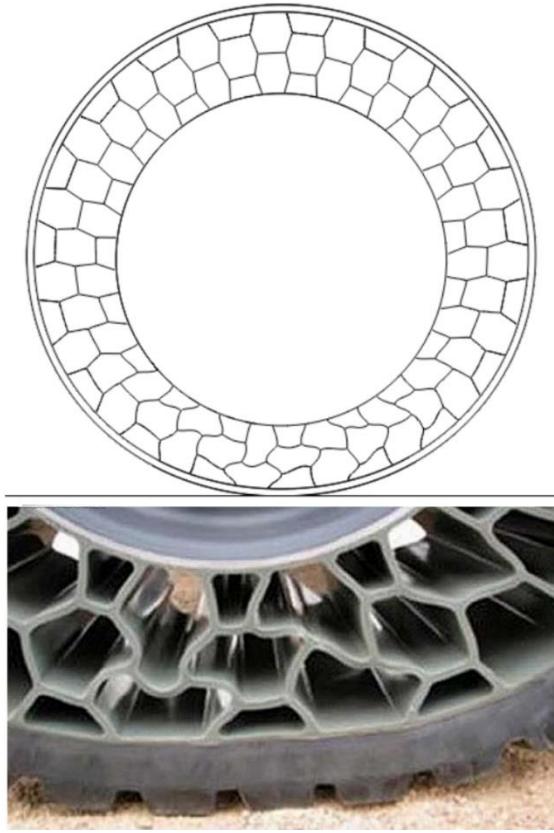
زمان مورد نیاز برای گرفتن پاسخ را به طور نمایی طولانی تر کند، همچنین همگرایی نتایج در تحلیل دینامیکی این نوع از تاییرها مستلزم دقت بالا در مدلسازی و توجه به جزئیات است.

برای بررسی رفتار دینامیکی ساختارهای معرفی شده، بارگذاری به تاییر به نحوی اعمال می‌شود که تاییر روی سطح زمین غلطش داشته باشد. بدین منظور بارگذاری به نحوی اعمال می‌شود که تاییر ابتدا با سرعت زاویه‌ای کم شروع به غلطش کرده و با اعمال شتاب زاویه‌ای این سرعت در نهایت به 10 رادیان بر ثانیه می‌رسد که با در نظر گرفتن ابعاد تاییر معادل 3.32 متر بر ثانیه است. مقدار تا زمان 4.0 ثانیه ادامه خواهد داشت.

برای این منظور از سه گام برای حل استفاده شده و نوع حلگر نیز آباکوس استاندارد و از نوع ضمنی انتخاب شده است. این حلگر دقت بالایی در مدلسازی سازه‌هایی که از مواد هایپرالاستیک ساخته شده‌اند دارد و طی پژوهشی که در سال 2007 انجام شد [۷۱]، دو حلگرهای استاتیک جنرال و دینامیک صریح^۱ بررسی شدند و نتیجه این بود که استفاده از حلگر آباکوس استاندارد نیازمند زمان حل کمتری نسبت به حلگر دینامیک صریح است.

در گام اول که گام پایداری نیز به آن گفته می‌شود، تاییر فقط در صد ناچیزی از باری که قرار است به آن وارد شود را متحمل می‌شود تا شرایط مرزی و شرایط تماسی در نرمافزار آباکوس تعریف شود و سپس در گام دوم یک جابجایی 10 میلی‌متری به نقطه مرجع تاییر اعمال می‌شود (که تقریباً معادل با اعمال بار 2000 نیوتونی است) و سپس در گام سوم و پایانی، بارگذاری به نحوی که پیشتر توضیح داده شد اعمال می‌شود تا تاییر روی سطح صلب تعریف شده غلطش کند.

¹ Dynamic explicit



شکل (۷-۵) مقایسه ظاهری تغییر شکل شبیه سازی شده تحت بار عمودی ۴۰۰ نیوتنی و با اعمال سرعت زاویه ای در ساختار NPT با نتیجه تجربی مود تغییر شکل

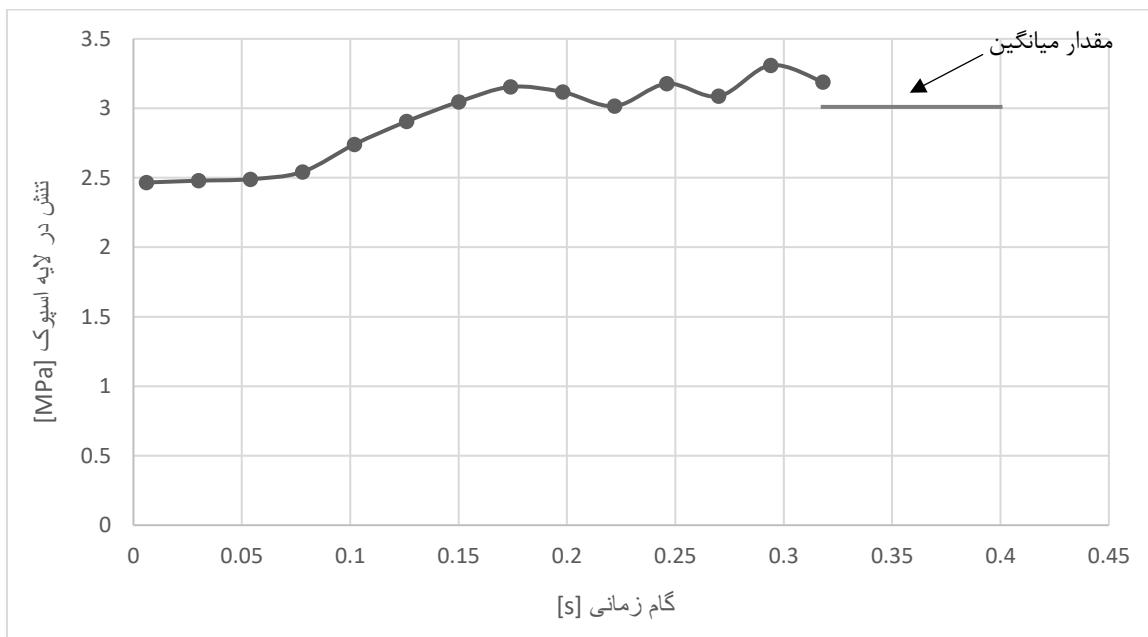
شکل (۷-۵) مقایسه‌ای ظاهری از نتیجه شبیه‌سازی، با نتیجه تجربی تغییر شکل در اثر اعمال بار و سرعت زاویه‌ای را نشان می‌دهد که با توجه به این شکل می‌توان تشابه تغییر شکل‌ها را مشاهده کرد . با توجه به اینکه کاربرد ساختارهای لانه‌زنیبوری در تایرهای غیر بادی همچنان در مراحل ابتدایی خود هستند، تنها ساختار- NPT-A1 به صورت تجربی پیاده‌سازی شده است و دیگر ساختارها هنوز به صورت تجربی تست نشده‌اند.

۵-۳-۱- بررسی تنش‌ها در لایه اسپوک

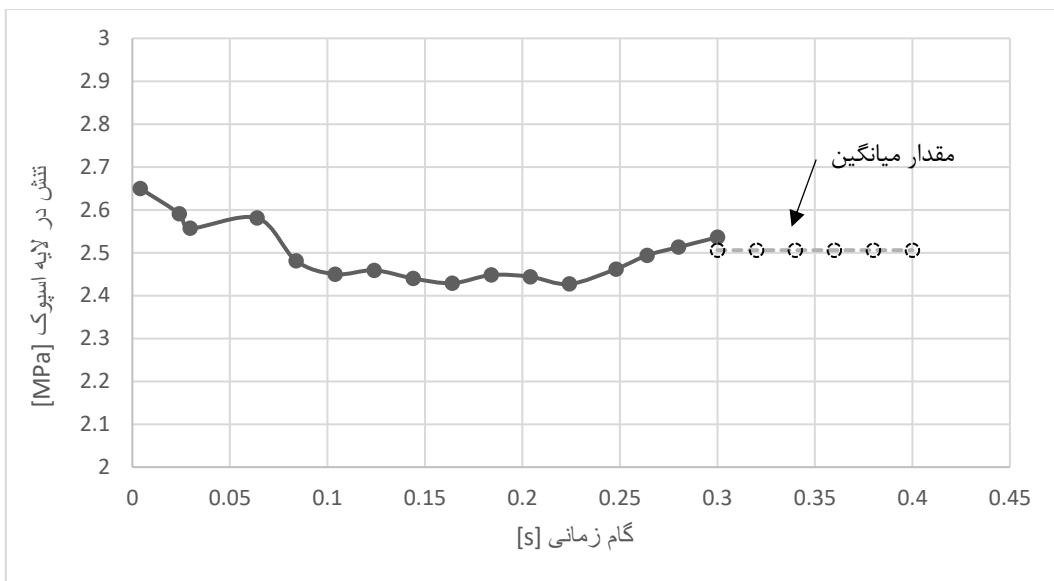
بررسی‌های دینامیکی انجام شده نشان دهنده این موضوع هستند که در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی استاتیکی، تغییر شکل‌های بزرگتری در لایه اسپوک رخ می‌دهد. ساختارهای اسپوک طراحی شده به طور سیکلی تحت یک

بارگذاری فشاری - کششی قرار می‌گیرند. در این بارگذاری، بیشترین تغییر شکل کششی در بالاترین سلول و بیشترین تغییر شکل در اثر فشار و خمش نیز در پایین‌ترین سلول این ساختار رخ می‌دهد.

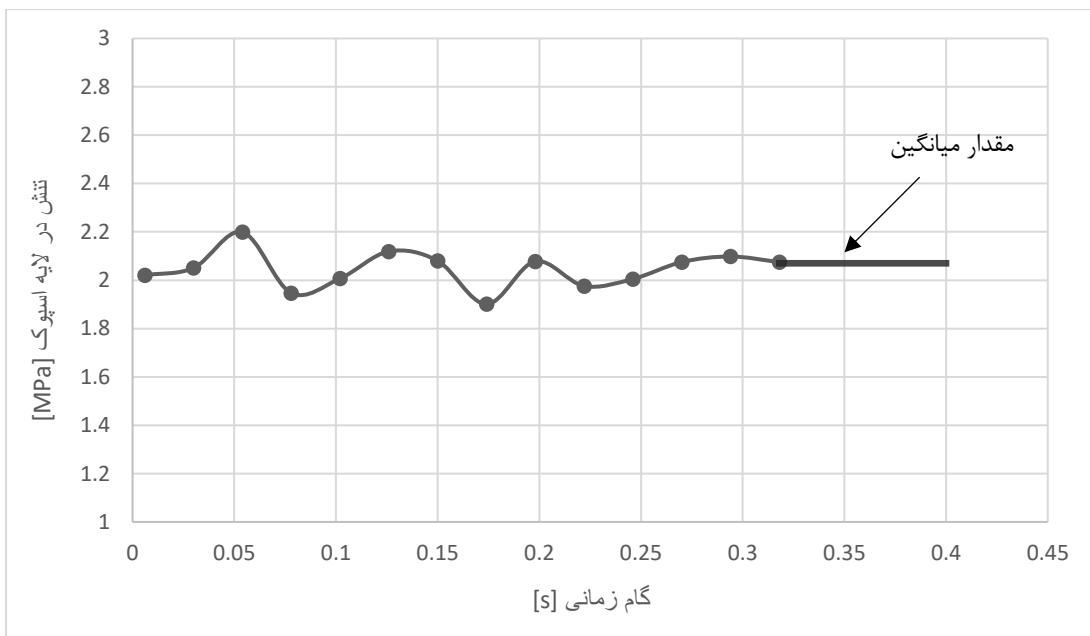
در محل تماس ساختار با سطح زمین تغییر شکل خمشی در راستای شعاعی در ساختار اسپوک مشاهده می‌شود. همچنین، کمانش الستیک نیز در سلول‌های پایینی اسپوک‌ها مشاهده می‌شود که این موضوع در ادامه این فصل بحث خواهد شد. بیشترین تنش در اسپوک‌ها به دلیل سیکلی بودن بارگذاری روی آن‌ها دائماً در حال تغییر است. شکل‌های (۸-۵) تا (۱۱-۵) بیشترین تنش ایجاد شده در لایه اسپوک ساختارهای مختلف را تحت شرایط مرزی‌ای که پیشتر توضیح داده شد نشان می‌دهد.



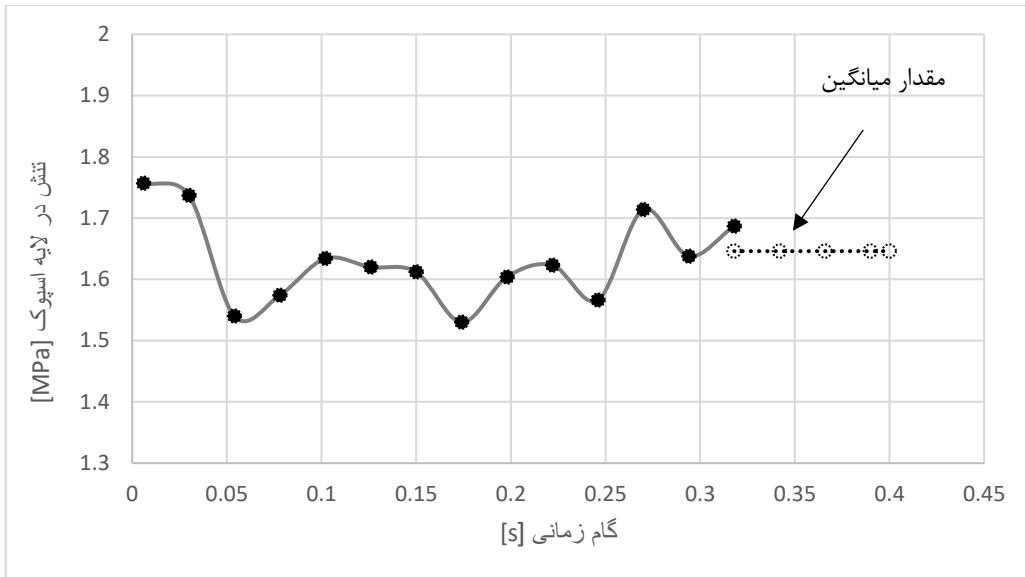
شکل (۸-۵) تغییرات تنش لایه اسپوک در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل NPT-A1



شکل (۹-۵) تغییرات تنش لایه اسپوک در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل آگزتیکی لانه زنبوری



شکل (۱۰-۵) تغییرات تنش لایه اسپوک در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل Spoke pair

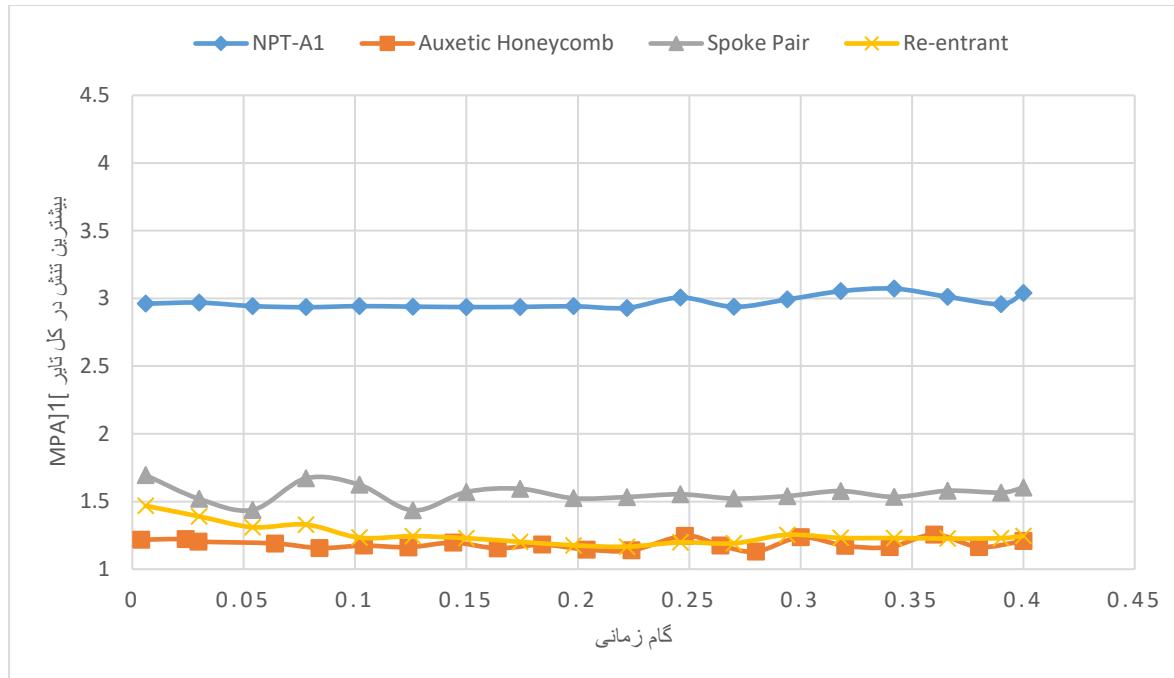


شکل (۱۱-۵) تغییرات تنش لایه اسپوک در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای مدل درون رو

با مقایسه شکل های (۸-۵) تا (۱۱-۵) این موضوع مشخص می شود که کمترین تنش ها همانند بخش استاتیکی، در ساختار درون رو ایجاد می شود که به نظر می رسد تراکم بالای سلول ها و خاصیت آگزتیکی این ساختار منجر به افزایش جذب انرژی و ظرفیت حمل بار آن و همچنین کاهش تنش ها و تغییر شکل ها در این ساختار می شود.

۲-۳-۵- بررسی تنش ها در کل مدل

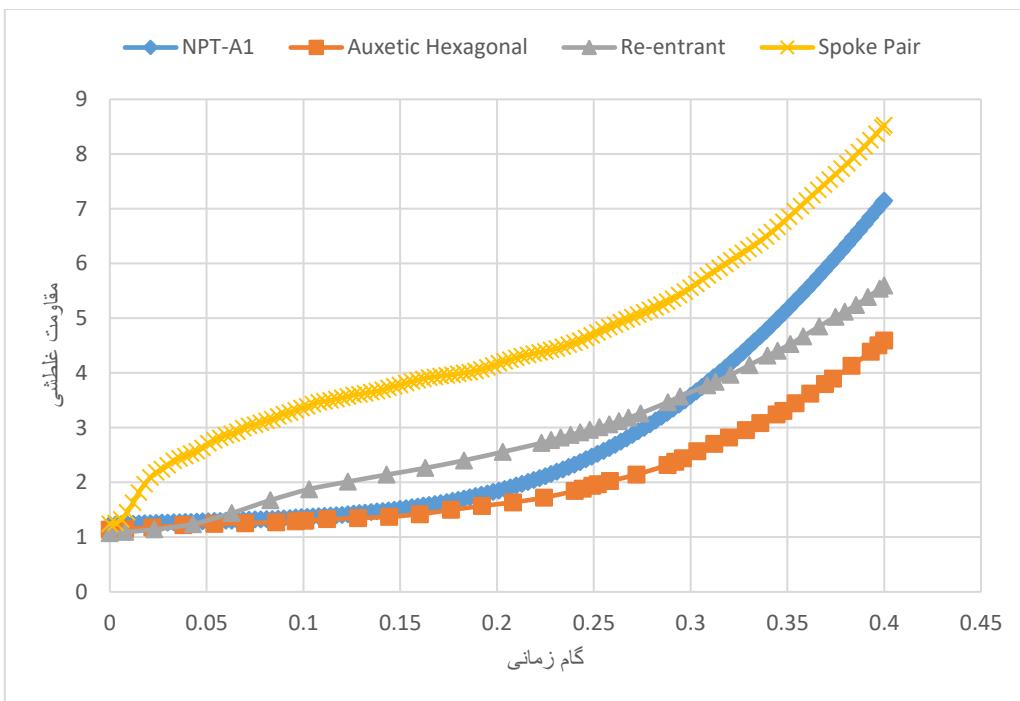
در این بخش و برای بررسی بیشترین تنش های ایجاد شده در کل مدل، مقایسه ای بین همه ساختارهای ارائه شده صورت گرفته است. شکل (۱۲-۵) بیشترین تنش در کل مدل را در ساختارهای مختلف نشان می دهد. این شکل که به طور تقریبی از الگوی اشکال (۸-۵) تا (۱۱-۵) پیروی می کند، این موضوع را نشان می دهد که به جز در ساختار NPT-A1، در دیگر ساختارها، تنش های کمتری در کل مدل ایجاد می شود. دو ساختار آگزتیکی معروفی شده در این پایان نامه همانطور که از شکل (۱۲-۵) مشخص است، از بروز تنش های بالا در مدل جلوگیری کرده اند.



شکل (۱۲-۵) مقایسه تغییرات تنش در کل تایر در هنگام غلطش تایر و با افزایش تدریجی سرعت برای ۴ مدل ارائه شده

۳-۳-۵- بررسی مقاومت غلطشی

مقاومت غلطشی، یکی دیگر از پارامترهای مهم در تحلیل دینامیکی رفتار تایرهای غیر بادی به شمار می‌رود. این پارامتر به عنوان مجموع اتلاف انرژی ویسکوالاستیک در اثر غلطش بر روی سطح زمین تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، مجموع این انرژی در پابان گام حل دینامیکی تقسیم بر میزان مسافتی که تایر در آن غلطش داشته برابر با مقاومت غلطشی است. برای بدست آوردن میزان مسافت طی شده می‌توان سطح زیر نمودار سرعت-زمان را محاسبه کرد. اشکال (۱۳-۵) تا (۱۶-۵) مقاومت غلطشی تایر را با افزایش سرعت در آن در طول گام حل دینامیکی را نشان می‌دهند. مطابق با این اشکال، کمترین مقاومت غلطشی مربوط به ساختار لانه‌زنبوری آگزتیکی و سپس ساختار آگزتیکی درون رو است. از آنجایی که مقاومت غلطشی تایر در بارگذاری‌های دینامیکی نسبت مستقیمی با مصرف سوخت خودرو دارد، این دو ساختار نسبت به ساختارهای دیگر مناسب‌تر هستند. از دلایل تأثیرگذار در بالاتر بودن مقاومت غلطشی ساختار درون رو نسبت به ساختار آگزتیکی لانه‌زنبوری، جرم بالاتر و متراکم‌تر بودن آن است.



شکل (۱۳-۵) مقاومت غلطشی با افزایش سرعت دورانی تایر برای ساختار NPT-A1

۴-۵- تحلیل کمانشی و فرکانس‌های طبیعی ساختارها

در این بخش، برای بررسی جامع‌تر ساختارهای ارائه شده در این پایان‌نامه، تحلیل کمانشی لایه اسپوک این ساختارها با یکدیگر مقایسه شده و با استفاده از مقادیر ویژه بدست آمده، بار بحرانی مربوط به هر کدام از این مودها بررسی و مقایسه می‌شوند و همچنین فرکانس طبیعی‌های هر کدام از ساختارها بررسی و با مقادیر مربوط به تایربادی معمولی مقایسه شده‌اند.

۵-۴-۱- مقایسه مود اول کمانشی هر کدام از ساختارها

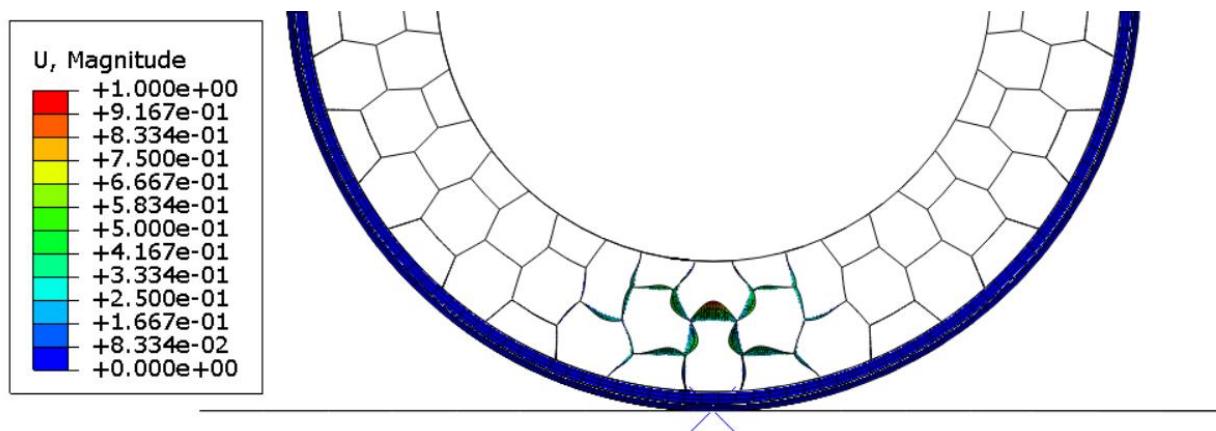
برای بدست آوردن مودهای کمانشی ساختارها از حلگر مقادیر ویژه ساب اسپیس^۱ استفاده شده و مود اول کمانشی برای آن استخراج شده است. ساختارهای لانه زنبوری ارائه شده و همچنین ساختار spoke pair که یک ساختار غیرآگزتیکی است، به دلیل هندسه خاص خود که دارای سلول‌های متراکم هستند، با اعمال بار فشاری بر نقطه مرجع تایر، همواره از طرف سلول‌های مجاور خود و همچنین از طرف لایه بالایی هاب و لایه پایینی رینگ داخلی تحت فشار قرار می‌گیرند. به همین دلیل، با اعمال باری مانند ۲۰۰۰ نیوتن که نسبتاً بار زیادی در این نوع تایرها نیست، باز هم پدیده کمانش در حین اعمال این بار در لایه اسپوک مشاهده می‌شود. این موضوع به این معناست که بار بحرانی باید مقداری کمتر از ۲۰۰۰ نیوتن باشد و در نهایت مقدار ویژه‌ای که باید در بار اعمال شده ضرب شود تا بار بحرانی بدست آورده شود، باید مقداری کمتر از ۱ داشته باشد که این موضوع با نتایجی که در این بخش گزارش شده مطابقت دارد. در نرم‌افزار آباکوس علاوه بر مودهای کمانشی، می‌توان خروجی مقدار ویژه^۲ را نیز گرفت که این خروجی در واقع بار بحرانی‌ای است که در آن بار، این مود کمانشی حاصل شده است و برای بدست آوردن این بار بحرانی، باید این مقدار ویژه را در بار اعمال شده به نقطه مرجع تایر ضرب کرد.

شکل‌های (۱۴-۵) تا (۱۷-۵) مود اول کمانشی را به صورت مقیاس شده^۳ برای ۴ ساختار نشان می‌دهد. مطابق با این نتایج، مودهای اول کمانشی در بخش پایینی تایر رخ می‌دهد که با در نظر گرفتن بار فشاری، بدیهی به نظر می‌رسد.

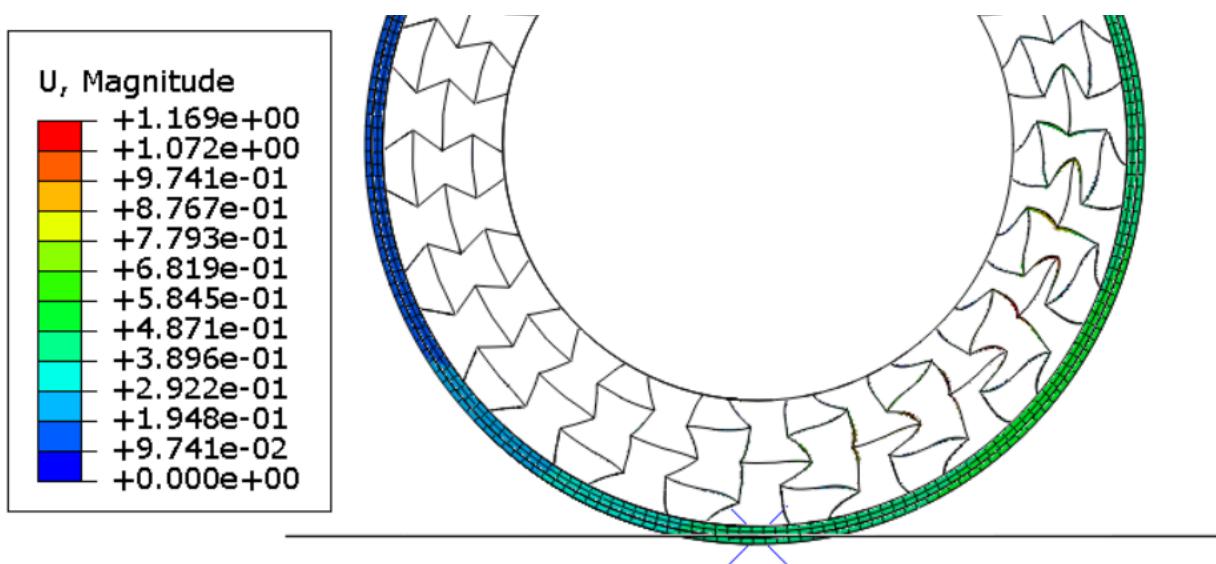
¹ Subspace

² EigenValue

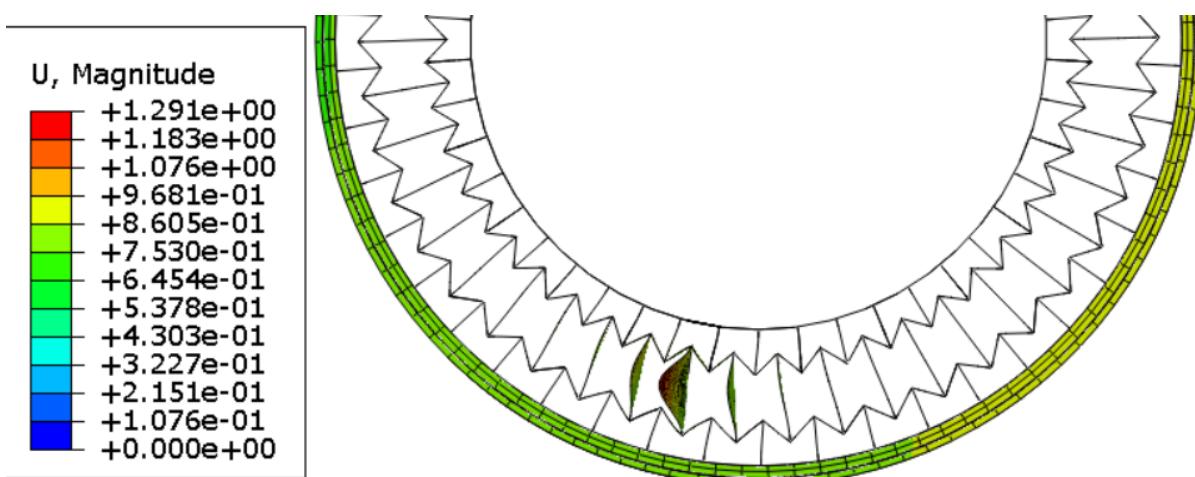
³Scaled



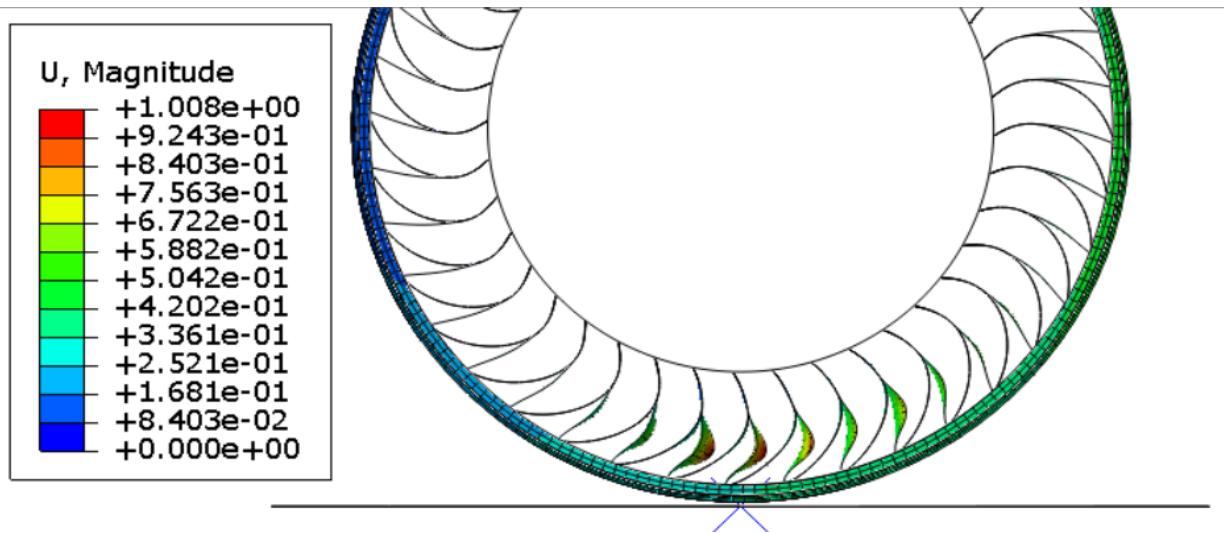
شکل (۱۴-۵) مود اول کمانشی برای ساختار NPT-A1



شکل (۱۵-۵) مود اول کمانشی برای ساختار آگزتیکی لانه زنپوری



شکل (۱۶-۵) مود اول کمانشی برای ساختار درون رو



شکل (۱۷-۵) مود اول کمانشی برای ساختار Spoke pair

۲-۴-۵- بررسی بار بحرانی مربوط به مود کمانشی

همانطور که پیشتر گفته شد، برای بدست آوردن بار بحرانی مربوط به هر کدام از مودهای کمانشی که در شکل‌های (۱۴-۵) تا (۱۷-۵) نشان داده شده است، باید مقدار ویژه مربوط به هر کدام از این مودها را در باری که در نقطه مرجع تایر اعمال شده است ضرب شود. از آنجایی که مدل پایه انتخاب شده، همان مدلی بود که بار ۲۰۰۰ نیوتنی به آن وارد می‌شود، همه مقادیر ویژه در این بار ضرب شده است. در جدول (۲-۵) مقادیر بار بحرانی مربوط به مود کمانشی اول برای ۴ ساختار ارائه شده آورده شده.

جدول (۲-۵) مقایسه بار بحرانی مربوط به مود کمانشی اول ساختارهای ارائه شده

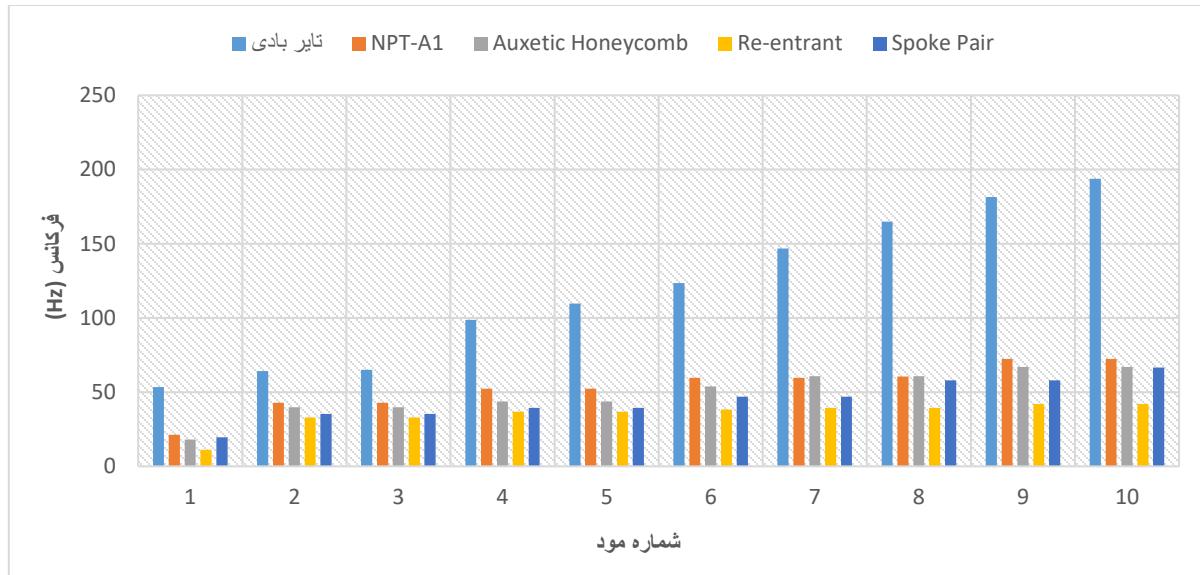
نوع ساختار در لایه اسپوک	مقدار بار بحرانی مربوط به مود کمانشی اول (N)
NPT-A1	۴۷۵
لانهزنبوری آگزتیکی	۱,۳۴۳

۱۳۴.۸	درون رو
۳۸۳	Spoke pair

۴-۳-۵- بررسی فرکانس‌های طبیعی

در این بخش ابتدا برای هر یک از ساختارها، فرکانس‌های طبیعی با استفاده از حلگر مقادیر ویژه لانکزووس^۱ نرم‌افزار آباکوس برای ۱۶ مود اول ارتعاشی اخذ شده است. فرکانس طبیعی این ساختارها که در شکل (۱۸-۵) نشان داده شده است، فرکانسی است که در آن تایر بدون اعمال نیروی خارجی تمایل به نوسان در آن دارد. از آنجاییکه ۶ مود اول فرکانسی به ترتیب مربوط به حرکت‌های انتقالی و چرخشی تایر هستند و فرکانس زیر ۱ هرتز دارند، در شکل (۱۸-۵) آورده نشده‌اند و مودهای فرکانسی ۷ تا ۱۶ در این شکل آورده شده. سپس ۱۰ مود ارتعاشی باقی مانده با مقادیر مربوط به یک تایر بادی مشابه که لی و همکارانش [۵۵] گزارش کرده‌اند مقایسه شده است. شکل مودها و فرکانس‌های بدست آمده در تحلیل‌های ارتعاشی تایرها به دو عامل هندسه تایر بادی مورد بررسی و همچنین مواد ساختاری آن‌ها بستگی دارند [۷۲]. این مورد برای تایرهای غیربادی، هندسه لایه اسپوک مورد استفاده در آن است.

^۱ Lanczos



شکل (۱۸-۵) مقایسه فرکانس طبیعی های یک تایر بادی معمولی با مدل های مختلف تایر غیر بادی

مطابق با شکل (۱۸-۵) این موضوع مشهود است که مودهای فرکانسی مربوط به تایر بادی به مرتب بیشتر از مقادیر مربوط به تایرهای غیربادی است. در این شکل با این که چند مود اول ارتعاشی، فرکانس های تقریباً مشابهی دارند اما در مودهای ارتعاشی بالاتر تفاوت فاحشی بین این مقادیر وجود دارد. در بین این مودهای ارتعاشی، ابتدا مودهای شعاعی مرتبه دوم، سپس مودهای بررشی، پس از آن مودهای خمشی مرتبه دوم و سپس مودهای شعاعی مرتبه سوم رخ می دهند. در این تحلیل های ارتعاشی باید به این نکته توجه شود که فرکانس های مودال و شکل مودها، تحت تاثیر شرایط مرزی هستند، به این صورت که اگر شرایط مرزی تغییراتی جزئی داشته باشند و یا درجات آزادی نقطه مرجع تایر و سطح تماس آزاد باشد، شکل مودها و فرکانس های بدست آمده لزوماً مشابه با این نتایج حاصل شده نخواهند بود [۷۳].

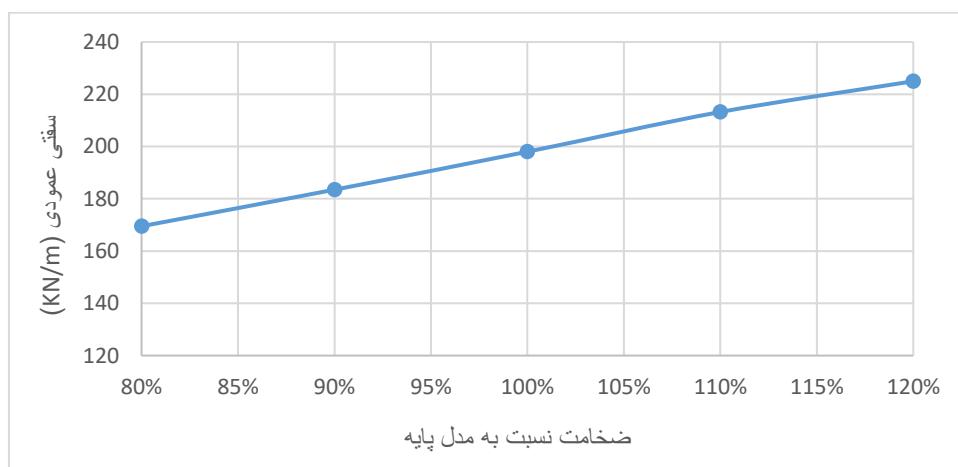
۵-۵- مطالعه دیگر عوامل تاثیرگذار بر تایرهای غیر بادی

تاکنون تاثیر استفاده از لایه های اسپوک با شرایط هندسی متفاوت طی بارگذاری های مختلف بررسی شد و مشخص شد که نحوه چیدمان و شرایط هندسی اسپوک ها تاثیر بسزایی در پارامترهای طراحی تایرهای غیر بادی

دارند. اما علاوه بر شرایط هندسی اسپوک‌ها، عوامل دیگری نیز بر سفتی عمودی، فشار تتماسی و میزان تنش‌های ایجاد شده تاثیر می‌گذارند که در این بخش چند مورد از این دسته عوامل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای انجام این بررسی‌ها، به منظور تطبیق‌پذیری با مطالعات پیشین، مدل NPT-A1 انتخاب شده و از این مدل برای شبیه‌سازی استاتیکی همراه با اعمال بار ۲۰۰۰ نیوتنی استفاده شده است.

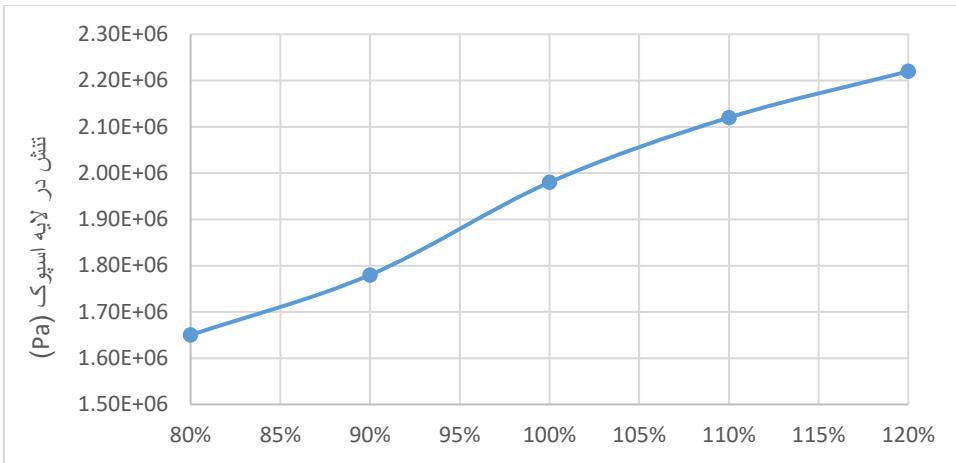
۱-۵-۵- مطالعه بر روی ضخامت دیواره سلول لانه‌زنبوری

در این بخش برای مطالعه بر روی ضخامت دیواره سلول لانه‌زنبوری، ابتدا یک مدل پایه^۱ برای مقایسه حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده که این مدل، همانطور که پیشتر نیز توضیح داده شد، مدل ۱ NPT-A1 است که تحت بارگذاری استاتیکی و فشاری ۲۰۰۰ نیوتن قرار می‌گیرد. برای این تحلیل، ضخامت دیواره سلول‌ها از ۸۰ تا ۱۲۰ درصد ضخامت مدل پایه تغییر می‌کند و برای هر کدام از آن‌ها شبیه‌سازی انجام شده. در این بخش خروجی‌های سفتی عمودی، تنش فون میسز در لایه اسپوک و فشار تتماسی به عنوان پارامترهای بررسی انتخاب شده‌اند.

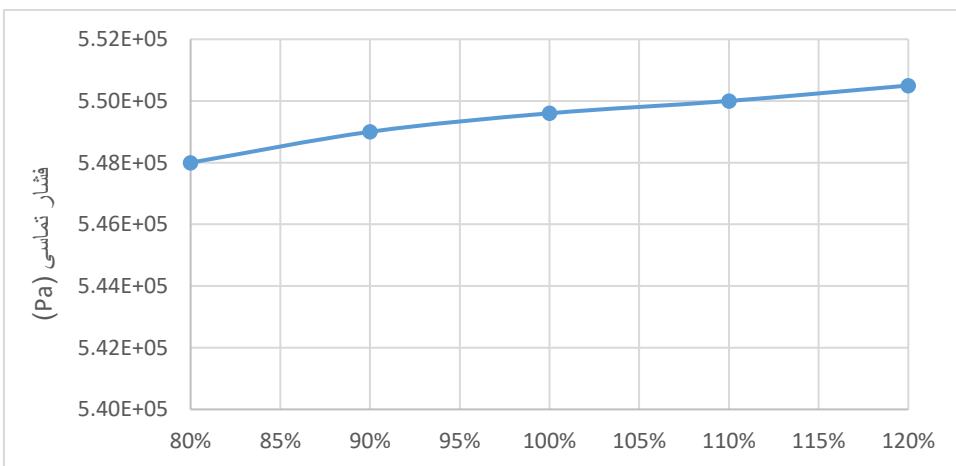


شکل (۱۹-۵) تاثیر تغییرات سفتی عمودی بر اثر تغییر ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری

¹ Base model



شکل (۲۰-۵) تاثیر تغییرات تنش در لایه اسپوک بر اثر تغییر ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری



شکل (۲۱-۵) تاثیر تغییرات فشار تماسی بر اثر تغییر ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری

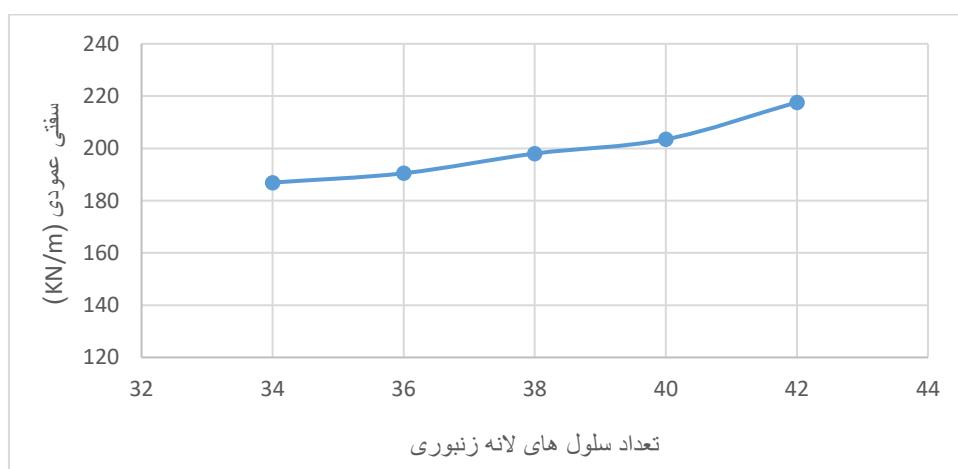
با توجه به اشکال (۱۹-۵) تا (۲۱-۵) این موضوع مشهود است که با تغییر ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری در لایه اسپوک تایر غیر بادی، می‌توان به سفتی عمودی بیشتری دست یافت که در واقع این موضوع به این معناست که در اثر اعمال بار، با افزایش ضخامت، میزان جابجایی عمودی تایر کاهش می‌یابد که البته این امر در ازای افزایش تنش در لایه اسپوک است. با توجه به شکل (۲۰-۵) می‌توان به این موضوع پی برد که افزایش ضخامت منجر به افزایش تنش در لایه اسپوک خواهد شد که این موضوع در کنار افزایش جرمی که قاعده‌تا در ازای افزایش ضخامت به وجود می‌آید، هزینه‌هایی هستند که باید در ازای رسیدن به سفتی عمودی بیشتر پرداخت. همچنین مطابق با شکل (۲۱-۵) افزایش ضخامت، تاثیر چندانی بر روی فشار تماسی تایر نمی‌گذارد و فقط

تغییراتی جزئی و قابل چشم پوشی را برای این پارامتر می توان مشاهده کرد به طوری که با افزایش ۲۰ درصدی ضخامت، فشار تماسی فقط حدود ۰.۲ درصد افزایش پیدا کرده.

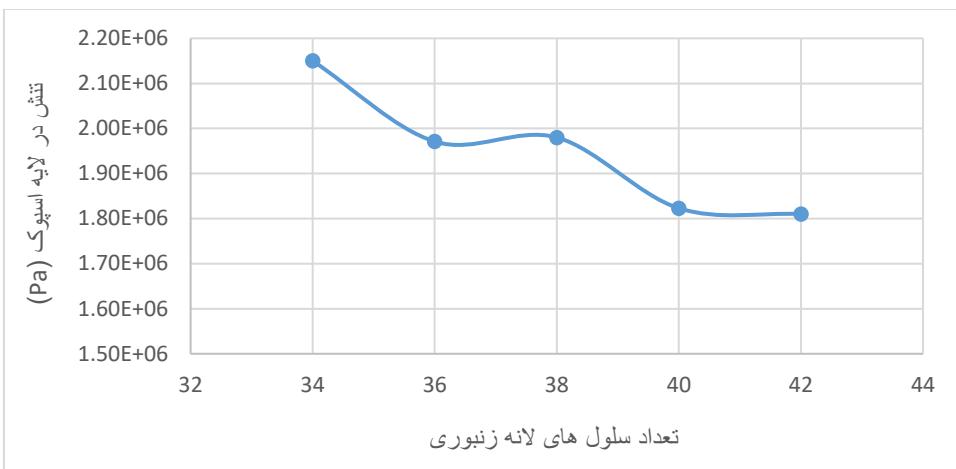
۲-۵-۵- بررسی تاثیر استفاده از چگالی سلول های بیشتر

در این بخش، برای بررسی تاثیر استفاده از چگالی های مختلف از سلول های لانه زنبوری بر روی عملکرد مکانیکی تایر غیر بادی، از تعداد و توزیع های مختلفی از سلول های لانه زنبوری در لایه اسپوک آن استفاده و سپس شبیه سازی و بررسی شده است.

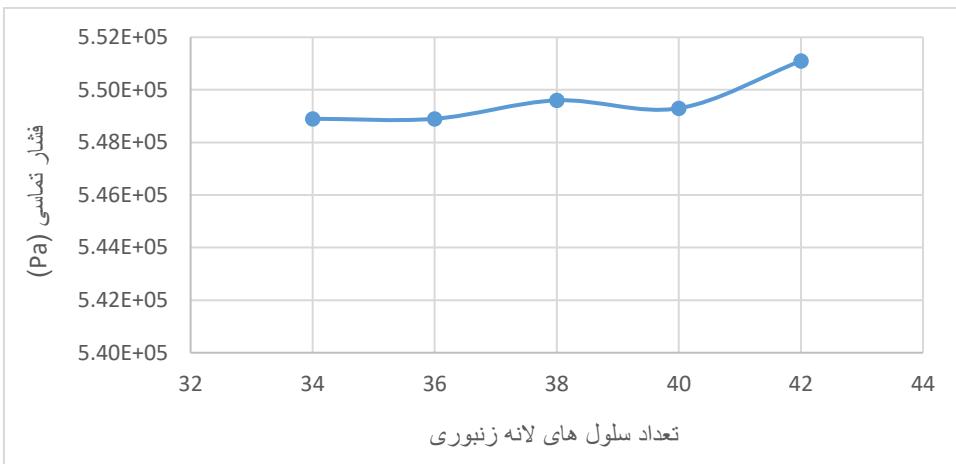
برای این کار، روشی مشابه با بخش پیشین اتخاذ شده است. به این صورت که ابتدا یک مدل پایه (ساختار NPT-A1) انتخاب شده و سپس توزیع های مختلفی از سلول های لانه زنبوری در آن تکرار شده است. به این ترتیب که در هر شبیه سازی، از تعداد متفاوتی از سلول های لانه زنبوری استفاده شده است. برای این کار، تعداد سلول ها در کل ساختار از ۳۴ تا ۴۲ و برای هر کدام از این شبیه سازی ها سه پارامتر بیشترین تنش فون میسز ایجاد شده در لایه اسپوک، سفتی عمودی و فشار تماسی تحت بارگذاری ۲۰۰۰ نیوتونی و به صورت استاتیکی بررسی و مقایسه شده اند. اشکال (۲۲-۵) تا (۲۴-۵) نتایج حاصل از این بررسی را برای سه پارامتر سفتی عمودی، تنش فون میسز در لایه اسپوک و فشار تماسی نشان می دهند.



شکل (۲۲-۵) تاثیر تغییرات سفتی عمودی بر اثر تغییر تعداد سلول های لانه زنبوری



شکل (۲۳-۵) تاثیر تغییرات تنش در لایه اسپوک بر اثر تغییر تعداد سلول های لانه زنبوری



شکل (۲۴-۵) تاثیر تغییرات فشار تماسی بر اثر تغییر تعداد سلول های لانه زنبوری

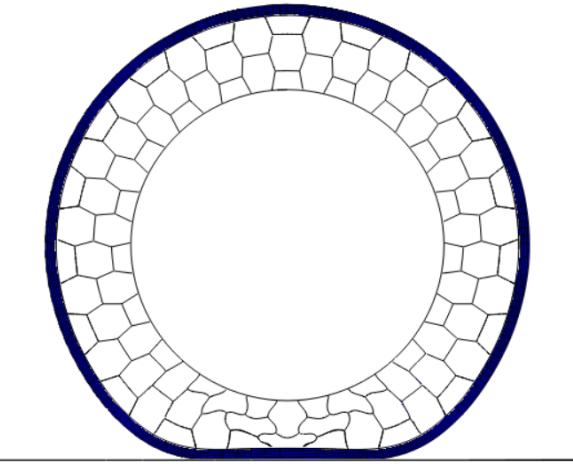
شکل (۲۲-۵) نشان می دهد که با افزایش چگالی سلول های لانه زنبوری و افزایش تعداد آنها، سفتی عمودی تایر افزایش پیدا می کند که این موضوع به دلیل متراکم تر شدن ساختار در لایه اسپوک قابل توجیه است. این نتیجه گیری مشابه با بخش پیشین است که با افزایش ضخامت سلول های لانه زنبوری شاهد افزایش سفتی عمودی بودیم اما تفاوت عمده نتایج در این بخش نسبت به بخش پیشین این است که در بخش قبل با افزایش ضخامت علی رغم افزایش سفتی عمودی تایر، تنش ها در لایه اسپوک افزایش می یافت. در صورتی که نتایج این بخش نشان می دهند که با افزایش تعداد سلول های لانه زنبوری نه تنها افزایشی در تنش های لایه اسپوک رخ نمی دهد که کاهش آن مشاهده می شود.

این موضوع بدین معناست که در صورتی که پارامتر طراحی مورد نظر کاهش جابجایی عمودی یا افزایش سفتی عمودی تایر باشد، راهکار بهتر این است که به جای افزایش ضخامت سلول‌های لانه‌زنبوری، تعداد آن افزایش یابد. شکل (۲۴-۵) نیز نشان می‌دهد که همانند بخش پیش، افزایش تعداد سلول‌ها تاثیر چندانی بر روی فشار تماسی نمی‌گذارد.

۳-۵-۵- بررسی تاثیر استفاده از لایه برشی

همانطور که بیان شد، تایرهای غیر بادی به طور کلی به ترتیب از لایه‌های هاب، اسپوک، رینگ داخلی، لایه برشی، رینگ خارجی و لایه مربوط به لاستیک که در تماس با زمین است تشکیل می‌شوند. با مرور ادبیات مربوط به این نوع از تایرهای می‌توان به این موضوع پی برد که در اکثر پژوهش‌های مربوط به این موضوع ترتیب ذکر شده دقیقاً رعایت شده و تحلیل‌ها بدین صورت انجام شده‌اند.

کیم و همکارانش [۴۶] به این موضوع اشاره کردند که نبود لایه‌های تقویتی منجر به کمانش سلول‌های لانه زنبوری لایه اسپوک می‌شوند و نتایج غیرخطی نامطلوبی را ایجاد می‌کنند اما برای اینکه بررسی جامع‌تری بر روی عوامل تاثیرگذار بر عملکرد تایرهای غیر بادی انجام شود، در این بخش تاثیر استفاده از لایه برشی و متعاقباً لایه رینگ خارجی، بررسی می‌شود. در این بخش نیز برای تطابق بیشتر با مطالعات پیشین، از همان مدل NPT-A1 و بار استاتیکی ۲۰۰۰ نیوتن استفاده شده است و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند و فقط لایه برشی و رینگ خارجی حذف شده است. با حذف لایه برشی، شبیه‌سازی در مدت زمان به مراتب کمتری اجرا می‌شود که دلیل آن وجود المان‌ها برای تحلیل توسط نرم‌افزار آباکوس است و همچنین از آنجایی که برای لایه برشی از المان‌های سه‌بعدی استفاده شده بود، حذف این لایه به حل سریع‌تر مسئله کمک شایانی می‌کند. همچنین با حذف لایه برشی به دلیل بیشتر بودن ضخامت آن نسبت به دیگر لایه‌ها، جرم تایر نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. شکل (۲۵-۵) تغییر شکل این مدل را تحت بار استاتیکی ۲۰۰۰ نیوتن نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، ساختار لانه زنبوری در این مدل تغییر شکل‌های بسیار زیادی را متحمل می‌شود و ظرفیت حمل بار این تایر نسبت به مدل‌هایی که تاکنون بحث شده بود بسیار پایین‌تر است.

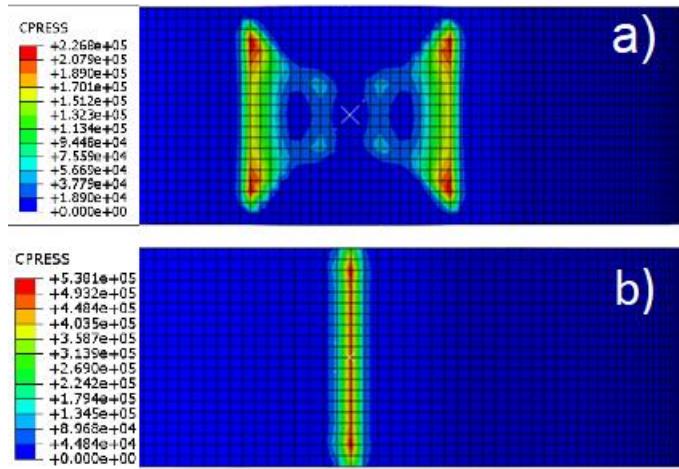


شکل (۲۵-۵) تغییر شکل تایر غیر بادی بدون لایه برشی تحت بار استاتیکی

جدول (۳-۵)، پارامترهای طراحی ای که در این پایان نامه بحث شده است را برای این مدل نشان می‌دهد. مطابق با این جدول، بیشترین تنش ایجاد شده در لایه اسپوک به مرتب بیشتر از تنش‌هایی بود که در دیگر مدل‌های این پایان نامه به وجود می‌آمد. همچنین بیشترین تنش ایجاد شده در کل مدل و همچنین میزان جابجایی عمودی تایر، بسیار بیشتر از مدل‌های پیشین است، اما در این مدل مطابق با شکل (۲۵-۵)، به دلیل اینکه سطح تماس با زمین بیشتر است، فشار تماسی کمتری در لایه tread به وجود می‌آید به طوری که این مقدار نسبت به مدل‌های پیشین حدود ۶۰ درصد کاهش داشته است.

جدول (۳-۵) نتایج مربوط به تایر غیر بادی بدون لایه برشی تحت بار ۲۰۰۰ نیوتنی

پارامتر مورد بررسی	بدون لایه برشی	همراه با لایه برشی
بیشترین تنش در لایه اسپوک (MPa)	۶.۲	۲.۰۲
بیشترین تنش در کل مدل (MPa)	۲۹۷	۲۳۱
فشار تماسی (MPa)	۲۲۶	۵۳۸
میزان جابجایی عمودی (mm)	۳۸.۸	۱۰.۰۱
سفتی عمودی (KN/m)	۵۱.۵	۱۹۸



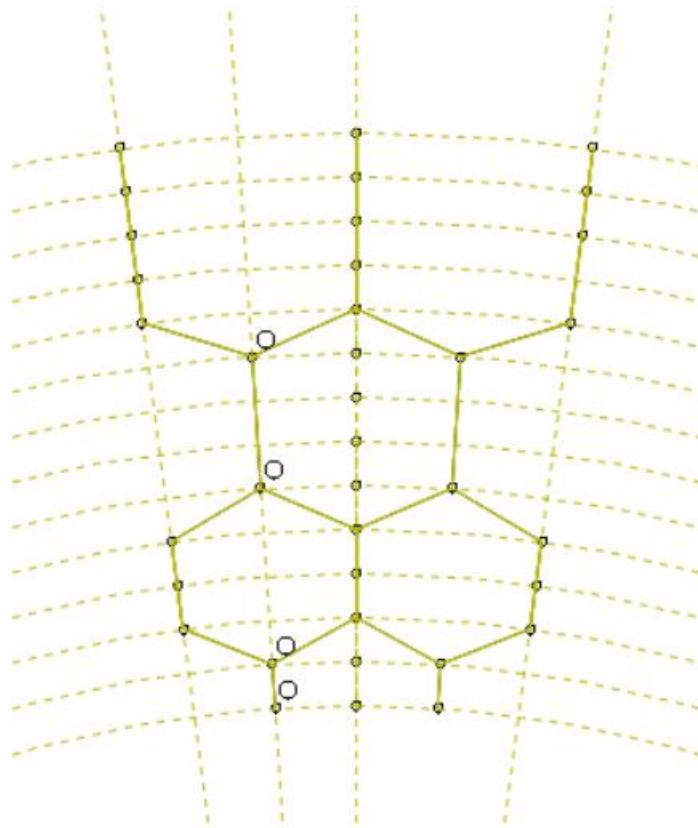
شکل (۲۶-۵) مقایسه فشار تماسی در مدل (a) بدون لایه برشی و (b) مدل دارای لایه برشی

شکل (۲۶-۵) توزیع فشار تماسی در یک مدل بدون لایه برشی و مقایسه آن با مدل دارای لایه برشی را نشان می‌دهد که در این شکل تمامی پارامترها و شرایط ثابت نگه داشته شدند و فقط لایه برشی حذف شده است.

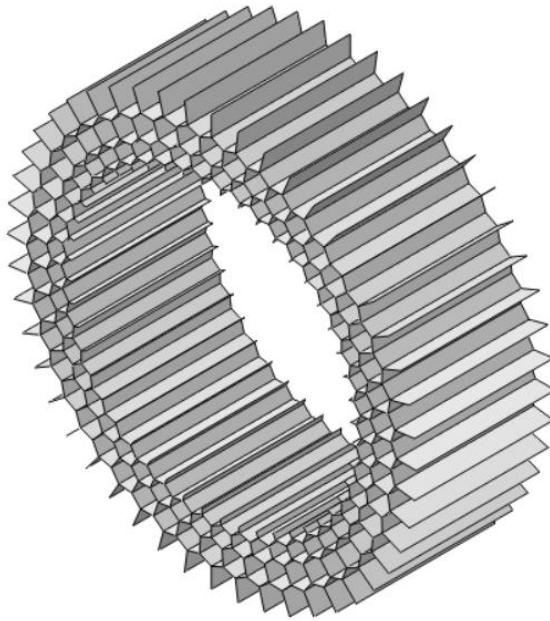
۴-۵-۵- استفاده از تعداد طبقات بیشتر برای ساختار لانه زنبوری

به عنوان آخرین بخش این فصل، مطالعه‌ای بر روی ساختار لانه زنبوری همراه با طبقات بیشتر انجام شده. این ساختار به ترتیب، از بالا به پایین با نسبت ۲ برابر کوچک‌تر می‌شوند، به نحوی که بالاترین سلول، تقریباً ۲ برابر بزرگ‌تر از پایین‌ترین سلول است. دلیل رسم این ساختار به این شیوه این است که مخصوصاً هنگام بارگذاری دینامیکی، لایه بالایی این سلول که در شکل (۲۷-۵) مشخص است، در تماس با زمین قرار می‌گیرد و نسبتاً تنش‌ها و مودهای تغییر شکلی بیشتری ایجاد می‌شود و بنابراین تراکم سلول‌ها بنا به آزمون و خطاهایی که برای این پروژه صورت گرفت، باید در این قسمت کمتر از قسمت پایانی شکل (۳۰-۵) باشد تا پارامترهای طراحی تاییر بهتر و مناسب‌تر باشد. شکل (۲۸-۵) نمایی سه‌بعدی از این ساختار همراه با ۴۸ سلول لانه زنبوری و دارای طبقات بیشتر را نشان می‌دهد. در این چهار پارامتر بیشترین تنش فون میسز در لایه اسپوک و در کل تاییر، سفتی

عمودی و فشار تماسی بین مدل پایه و مدل دارای طبقات بیشتر مقایسه شده‌اند و در جدول (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل (۲۷-۵) جزئیات رسم ساختار سوم دارای ۴۸ سلول لانهزنبری



شکل (۲۸-۵) نمایی سه بعدی از لایه اسپوک ساختار لانه زنبوری با ۴۸ سلول

نتایج حاصل از این بارگذاری در جدول (۴-۵) آورده شده است و این نتایج با مقادیر مدل پایه بخشهای پیشین که از ساختار NPT-A1 تشکیل شده بود مقایسه شده است، مطابق با داده‌های این جدول، می‌توان به این موضوع پی برد که در این مدل علی‌رغم این که تنש‌های بیشتری در لایه اسپوک آن ایجاد می‌شود، میزان جابجایی عمودی آن کمتر از مدل NPT-A1 و متعاقباً سفتی عمودی بالاتری دارد. همچنین فشار تماسی این مدل ۴۶.۴ درصد کمتر از مدل NPT-A1 است که بنابراین، این مدل، برای مصارفی که نیاز به فشار تماسی کم و میزان سفتی عمودی بالایی دارند می‌تواند مناسب باشد.

جدول (۴-۵) نتایج مربوط به استفاده از ساختار آگزتیکی درون رو به عنوان لایه اسپوک تحت بار ۲۰۰۰ نیوتون

درصد اختلاف	NPT-A1 ساختار	ساختار لانه زنبوری همراه با طبقات بیشتر	پارامتر مورد بررسی
۵۲.۴٪.	۲.۰۲	۳.۰۸	بیشترین تنش در لایه اسپوک (MPa)
- ۲۲٪.	۲۳۱	۱۸۰	بیشترین تنش در کل مدل (MPa)

- ۴۶.۴٪	۵۳۸	۲۸۸	فشار تماسی (MPa)
- ۱۵.۶٪	۱۰.۰۱	۸.۴۴	میزان جابجایی عمودی (mm)
۱۹.۷٪	۱۹۸	۲۳۷	سفتی عمودی (KN/m)

فصل ششم: بحث و نتیجه‌گیری

۱-۶- جمع‌بندی

در این پایان‌نامه، مطالعه‌ای هندسی بر روی ساختارهای متفاوت آگزتیکی و لانه‌زنبوری در لایه اسپوک تایر غیر بادی و مطالعه‌ی پارامتری بر روی عوامل و شرایط تاثیرگذار بر رفتار مکانیکی این تایرها بررسی و انجام شد. برای بررسی جامع‌تر بر روی تاثیر استفاده از ساختارهای مکانیکی متفاوت در لایه اسپوک این تایرها، ۴ ساختار متفاوت ارائه شد و هر کدام از این ساختارها ابتدا تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند و طی پنج پارامتر طراحی تایرهای غیر بادی که سفتی عمودی، فشار تماسی، بیشترین ایجاد شده در لایه اسپوک و کل تایر و جرم هر کدام از آن‌ها هست، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

سپس رفتار هر کدام از این ساختارها طی بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت و بارگذاری بر روی آن‌ها به صورتی اعمال شد تا تایر بر روی سطح صلب زمین غلطش داشته باشد و سرعت زاویه‌ای همراه با شتاب زاویه‌ای به آن‌ها اعمال شد. تنش‌های ایجاد شده در لایه اسپوک و کل تایر تحت این بارگذاری و همچنین پارامتر مقاومت غلطشی مورد بررسی قرار گرفت. سپس تحلیل‌های کمانشی و فرکانسی بر روی این تایرها انجام شد. در بخش پایانی، دیگر عوامل تاثیرگذار بر تایرهای غیر بادی مانند ضخامت دیواره سلول‌های لانه‌زنبوری، تعداد

سلول‌های لانه‌زنبوری مورد استفاده و تأثیر استفاده از لایه برشی و بررسی استفاده از طبقات بیشتر سلول‌های لانه‌زنبوری مورد بررسی قرار گرفت.

مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این تحقیق به شرح زیر است:

۱. تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی بر روی ساختارهای اسپوک متفاوت نشان داد که استفاده از ساختارهای مختلف برای این لایه، اهمیت بسیار زیادی در طراحی تایرهای غیربادی دارند، به این صورت که حتی ایجاد کوچکترین تغییرات، مثل تغییرات زاویه، تغییر در ضخامت سلول‌ها یا استفاده از سلول‌های بیشتر منجر به تغییراتی غیر قابل چشم‌پوشی در عملکرد این نوع تایرها دارند و برای طراحی بهینه، همه‌ی این عوامل باید مورد مطالعه قرار گیرند.

۲. علی‌رغم محدود بودن تاریخچه ادبیات بررسی‌های دینامیکی تایرهای غیر بادی، طی تحلیل‌های دینامیکی انجام شده مشخص شد که بررسی رفتارهای دینامیکی ساختارهای ارائه شده اهمیت بالایی دارند، با بررسی‌های دینامیکی انجام شده مشخص شد که استفاده از یک ساختار آگزتیکی به عنوان لایه اسپوک منجر به تنش‌های کمتری هم در لایه اسپوک و هم در کل مدل می‌شود و میزان مقاومت غلطشی برای این ساختارهای آگزتیکی کمتر از دیگر ساختارهای غیر آگزتیکی است.

۳. طی بررسی‌های استاتیکی انجام شده، پنج پارامتر سفتی عمودی، فشار تماسی، بیشترین ایجاد شده در لایه اسپوک و کل تایر و جرم ساختارهای ارائه شده بررسی شد که بین ساختارهای لانه‌زنبوری عادی ارائه شده، ساختار NPT-A1 که یک ساختار لانه‌زنبوری است، سفتی عمودی بالاتر و تنش کمتر را نتیجه می‌دهد. اما بالاترین سفتی عمودی که در نتیجه‌ی کمترین جابجایی عمودی تایر است، مربوط به ساختار درون‌رو می‌باشد که دلیل آن طراحی ویژه و تراکم بالای سلول‌ها در این ساختار است.

۴. با بررسی بیشترین تنش‌های اعمال شده به کل تایر که معمولاً در لایه تقویتی رینگ داخلی که وظیفه اتصال اسپوک‌ها به لایه برشی را به عهده دارند رخ می‌دهد، این موضوع را می‌توان متوجه شد استفاده از ساختارهای آگزتیکی می‌تواند نه تنها منجر به بالاتر رفتن ظرفیت حمل بار مدل می‌شود بلکه تنش‌های به نسبت کمتری را هم در لایه اسپوک و هم در کل مدل ایجاد می‌شود.

۵. بررسی های کمانشی نشان می دهد که مود اول کمانشی در باری کمتر از بار اعمال شده به تایر رخ می دهد که این موضوع به این جهت قابل توجیه است که با اعمال بار فشاری سلول های لانه زنبوری دائم از طرف سلول های مجاور خود و همچنین از لایه بالایی هاب و لایه پایینی رینگ داخلی تحت فشار قرار می گیرند و کمانش در آنها رخ می دهد.
۶. با مطالعه بر روی ضخامت دیواره سلول های لانه زنبوری این موضوع مشخص شد که با افزایش ضخامت دیواره سلول ها، علی رغم افزایش تنش واردہ بر لایه اسپوک، سفتی عمودی تایر افزایش پیدا کرده و میزان جابجایی عمودی آن کاهش می یابد و همچنین این موضوع مشخص شد که با تغییر ضخامت تغییر چشمگیری در فشار تماسی تایر ایجاد نمی شود.
۷. استفاده از چگالی های بالاتری از سلول های لانه زنبوری و تعداد بیشتر سلول ها، همانند افزایش ضخامت، منجر به بالاتر رفتن سفتی عمودی تایر می شود، اما این بالاتر رفتن سفتی عمودی همراه با بالاتر رفتن تنش ایجاد شده در لایه اسپوک نیست و افزایش تعداد سلول های لانه زنبوری می تواند باعث کاهش تنش واردہ به آنها نیز شود. این موضوع به این معناست که اگر هدف طراحی تایرهای غیر بادی افزایش سفتی عمودی و ظرفیت حمل بار آنها باشد بهتر است که به جای افزایش ضخامت سلول های لانه زنبوری از تعداد سلول های بیشتری در لایه اسپوک استفاده کرد.
۸. عدم استفاده از لایه برشی منجر به افزایش قابل توجه جابجایی ها و تنش های سلول های لانه زنبوری می شود اما حذف این لایه باعث کاهش جرم تایر و همچنین کاهش قابل توجه فشار تماسی می شود.
۹. استفاده از طبقات بیشتر سلول های لانه زنبوری به طور چشمگیری منجر به بهبود عملکرد مکانیکی تایر می شود. بدین صورت که بیشترین تنش ایجاد شده در کل مدل ۲۲ درصد کاهش پیدا کرد و فشار تماسی نیز ۴۶.۴ درصد کاهش یافت و در عین حال میزان سفتی عمودی تایر ۱۹.۶ درصد افزایش پیدا کرد.

۱۰. ساختار درون‌رو، در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی بهترین ساختار از نظر پارامترهای طراحی تایرهای غیر بادی است و برای کاربردهایی که نیاز به ظرفیت حمل بار بیشتر از ۳۰۰۰ نیوتن ندارند بهترین مدل معروفی شده است، اما اگر نیاز به ظرفیت حمل باری بیش از این مقدار است، مدل‌های دیگر معروفی شده مثل سلهالر آگزتیکی لانه‌زنبوری و ساختار لانه‌زنبوری همراه با طبقات بیشتر، ساختار مدل‌های مناسب‌تری هستند.

۲-۶- محدودیت‌ها

۱. به علت هزینه‌ی زیاد ساخت تایر و ساختارهای لایه اسپوک که نیاز به دقت بسیار بالا در طراحی دارند و همچنین دشواری ایجاد شرایط مناسب برای انجام کارهای آزمایشگاهی در این زمینه، به نتایج حل عددی بستنده شده است.

۲. در نظر گرفتن تمامی متغیرها در کنار یکدیگر نظیر تعداد سلول‌های لانه‌زنبوری، تعداد طبقات لایه‌ها، ضخامت سلول‌ها و زاویه سلول‌ها و غیره امری زمان‌بر و ناممکن بود.

۳. استفاده از نرم‌افزارهای مهندسی متفاوت و همچنین تحلیل‌های دینامیکی بیشتر و در نظر گرفتن شرایط مربوط به آن‌ها و شبکه‌بندی‌های ریزتر، نیازمند سخت‌افزار قوی با حافظه‌ی زیاد است.

۳-۶- نوآوری

در این تحقیق ساختار آگزتیکی درون‌رو برای تایر غیر بادی معروفی و همراه با سلول‌های لانه‌زنبوری آگزتیکی و عادی مورد بررسی قرار گرفت که ساختار درون‌رو با در نظر گرفتن همه شرایط، عملکرد بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها داشت که البته این امر بستگی به پارامتر طراحی مورد نیاز و کاربرد خاصی که تایر قرار است برای آن طراحی شود دارد. همچنین مطالعه پارامتری بر روی طبقات سلول‌های لانه‌زنبوری، ضخامت و تعداد سلول‌ها و

عواملی که ممکن هستند به طور بالقوه منجر به بیبود عملکرد تایر شوند، انجام شد و برای نخستین بار، این ساختارها تحت تحلیل‌های مختلف دینامیکی و کمانشی و فرکانسی بررسی شدند.

۶-۴- پیشنهادات

۱. ساختارهای آگزتیکی و غیر آگزتیکی دیگر که قابلیت پیاده‌سازی در محیط دایروی را دارند را می‌توان همانند کاری که در این پژوهش مطالعه شد، بررسی کرد و نتایج را با تایرهای بادی مقایسه کرد.

۲. می‌توان نوآوری را در بعد سوم در نظر گرفت به نحوی که ساختار پیچیدگی و نوآوری‌هایی در جهت \mathbb{Z} محور مختصات داشته باشد و همچنین می‌توان ترکیبی از ساختارهای آگزتیکی که توانایی جذب انرژی بالایی دارند را برای این بخش در نظر گرفت.

۳. نوآوری می‌تواند در لایه برشی تایر غیر بادی اعمال شود و در این لایه می‌توان به جای یک لایه متراکم، یک لایه آگزتیکی یا یک ساختار لانه‌زنبوری ساده را در نظر گرفت.

۴. با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌توان یک یا چند متغیر طراحی انتخاب کرد و با استفاده از روش‌هایی مثل مدل جایگزین^۱ برای آن یک تابع هدف که می‌تواند سفتی عمودی یا فشار تماسی باشد را بهینه‌سازی کرد.

¹ Surrogate model

منابع

-
- [1] E. Ganniari-Papageorgiou, P. Chatzistergos and X. Wang, "The Influence of the Honeycomb Design Parameters on the Mechanical Behavior of Non-Pneumatic Tires," *International Journal of Applied Mechanics*, vol. 12, no. 3, p. 15, 2020.
 - [2] P. a. A. A. a. J.-M. N. a. L. M. C. Mardling, "The Use of Auxetic Materials in Tissue Engineering," *Biomaterials Science*, vol. 8, 2020.
 - [3] K. Evans, "Tailoring the negative Poisson ratio," *Chemistry and Industry (London)*, pp. 654-657, 1990.
 - [4] T. Bitzer, Honeycomb Technology, Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing, London, England: Chapman & Hall, 1997, pp. 10-42.
 - [5] L. a. R. M. a. T. P. Mazzarella, "Wave Propagation in Sandwich Plates with Periodic Auxetic Core," *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, vol. 13, pp. 654-664, 2002.
 - [6] A. A. E. K. Grima JN, "Negative Poisson's ratios from rotating rectangles," *Comput Methods Sci Technol*, p. 137–145, 2004.
 - [7] M. a. A. M. N. a. A. U. a. S. J. Mir, "Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures," *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
 - [8] D. P. a. R. Lakes, "Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of — 1," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 39, pp. 305-314, 1997.
 - [9] Y. a. H. H. Liu, "A review on auxetic structures and polymeric materials," *Scientific research and essays*, vol. 5, pp. 1052-1063, 2010.
 - [10] K. E. E. a. K. L. Anderson, "Auxetic materials: the positive side of being negative," *Engineering Science and Education Journal*, pp. 148-154, 2000.
 - [11] X. J. R. C. W. S. J. N. G. a. K. E. E. N. Gaspar, "Novels honeycombs with auxetic behavior," *Acta Materials*, vol. 53, pp. 2439-2445, 2005.
 - [12] K. E. E. a. A. Anderson, "Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking," *Advanced Materials* , vol. 12, no. 9, pp. 161-167, 2000.
 - [13] M. Koc, "Hydroforming for advanced manufacturing," *Illustrated Elsevier*, 2008.
 - [14] Z. R. W. Z. T. W. Y. X. a. K. B. C. S. H. Zhang, "Some new features in the development of metal dorming technology," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 151, pp. 39-47, 2004.
 - [15] A. A. a. K. E. J. N. Grima, "An alternative explanation for the negative Poisson's ratios in auxetic foams," *Journal of the Physical Society of Japan*, pp. 1-10, 2005.
 - [16] H. &. O. H. &. K. S. &. H. G. Wan, "A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model," *European Journal of Mechanics A-solids - EUR J MECH A-SOLID*, no. 23, pp. 95-106, 02 2004.
 - [17] K. Evans, "Design of doubly curved sandwich panels with honeycomb cores," *Composite Structures - COMPOS STRUCT*, vol. 17, pp. 95-111, 1991.

- [18] L. a. A. M. a. S. G. a. R. C. Gibson, "The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials," *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 382, pp. 25-42, 1982.
- [19] E. a. L. T. a. G. R. Martz, "Re-entrant Transformation Methods in Closed Cell Foams," *Cellular Polymers*, vol. 15, 1996.
- [20] A. a. R. M. a. S. F. Spadoni, "Global and local linear buckling behavior of a chiral cellular structure," *physica status solidi (b)*, vol. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssb.200460387/abstract, p. 695, 2005.
- [21] B. a. S. F. a. R. C. D, "Evaluation of Hexagonal Chiral Structure for Morphing Airfoil Concept," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*, vol. 10.1243/095441005X30216, p. 185, 2005.
- [22] D. Wang, "Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 110-114, 2009.
- [23] C. S. a. E. B. B. L. Buitrago, "Modeling of composite sandwich structures with honeycomb core," *Composite Structures*, vol. 92, pp. 2090-2096, 2010.
- [24] S. F. a. M. H. N. Pour, "An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, pp. 2439-2447, 2012.
- [25] C. a. V. H. a. C. Y. Yang, "Application of Auxetic Polymeric Structures for Body Protection," *ASME Conference on smart materials, adaptive structures and intelligent systems*, pp. 1-5, 2016.
- [26] C. a. V. H. a. C. Y. Yang, "Evaluation of Auxetic Polymeric Structures for Use in Protective Pads," *ASME international mechanical engineering Congress and Exposition*, pp. 1-7, 2016.
- [27] A. H. a. R. L. A. Ingrole, "Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for inplane property enhancement," *Materials and Designs*, pp. 72-83, 2017.
- [28] J. Z. a. H. F. ZH. Zhou, "Plastic analysis of thin-walled steel honeycombs with re-enterant deformation styles," *Materials Science and Engineering A*, pp. 123-133, 2017.
- [29] C. CP, "Spring wheel". US Patent US 2502,908, 1924.
- [30] A. RV, "Airless tire". US Patent US 3,329192, 1967.
- [31] P. G. Palinkas RL, "Non-pneumatic tire with supporting and cushioning members". US Patent US 4832,098, 1989.
- [32] K. JB, "Lightweight, safe and damage resistant tire having honeycomb core". US Patent US 5685,926, 1997.
- [33] C. S. P. J. Rhyne T, "Development of a non-pneumatic wheel," *Tire Sci Technol*, p. 150–169, 2006.
- [34] J. J. S. J. Berglind L, "Method to design honeycombs for a shear flexible structure," *SAE Int J Passenger Cars – Mech Syst*, vol. 3, no. 11, pp. 588-97, 2010.
- [35] S. J. Z. J. F. G. Ju J, "Design of honeycomb meta-materials for high shear flexure", *Proceedings of the ASME international design engineering technical conferences*, 2009.
- [36] G. a. Y. T. Lu, "Energy absorption of structures and materials.,," *Cambridge: Woodhead Publishing Ltd*, pp. 1-403, 2003.

- [37] J. D. S. Jaehyung Ju, "Compliant Hexagonal Periodic Lattice Structures Having Both High Shear Strength and High Shear Strain," *Materials & Design*, vol. 32, no. 2, pp. 512-524, 2010.
- [38] J. D. S. Jaehyung Ju, "Hyperelastic Constitutive Modeling of Hexagonal Honeycombs Subjected to In-Plane Shear loading," *Transactions of the ASME: Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 133, 2011.
- [39] A. F. H. M. A. B. G. Y. Li YM, "Analytical homogenization for in-plane shear, torsion and transverse shear of honeycomb core with skin and thickness effects," *Compos Struct*, vol. 140, pp. 453-462, 2016.
- [40] W. B. P. N. W. B. D. Q. Sun YT, "In-plane stiffness of the anisotropic multifunctional hierarchical honeycombs," *Compos Struct*, vol. 131, pp. 616-624, 2015.
- [41] J. Ju, D.-M. Kim and K. Kim, "Flexible cellular solid spokes of a non-pneumatic tire," *Composite Structures*, vol. 94, no. 8, pp. 2285-2295, 2012.
- [42] A. M. Aboul-Yazid, M. A. A. Emam, S. Shaaban and M. A. El-Nashar, "EFFECT OF SPOKES STRUCTURES ON CHARACTERISTICS PERFORMANCE OF NON-PNEUMATIC TIRES," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 11, pp. 2212-2223, 2015.
- [43] R. a. S. C. Rugsaj, "Study of geometric effects on nonpneumatic tire spoke structures using finite element method," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, pp. 1-21, 2020.
- [44] T. a. L. M. a. Z. X. a. L. X. Wu, "Research on non-pneumatic tire with gradient anti-tetrachiral structures," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 28, pp. 1-9, 2020.
- [45] Z. a. H. F. a. Z. Q. a. T. D. a. Y. K. Zhang, "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, 2021.
- [46] K. Kim, J. Ju and D. M. Kim, "Static Contact Behaviors of a Non-Pneumatic Tire with Hexagonal Lattice Spokes," *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems*, vol. 6, pp. 1518-1527, 2013.
- [47] S. Kim, "A Comprehensive analytical model for pneumatic tires," *The University of Arizona, Ph.D. Dissertation*, 2002.
- [48] D. P. I. Y. H. S. K. K. S. Kim, "Effect of Shearing Force on the Contact Stresses of the Tread Rubber Block with Slip," in *Proceedings of the 21th Annual Meeting Conference on Tire Science & Technology*, 2002.
- [49] J. A.-L. F. a. D. D. Cesbron, "Experimental study of tyre/road contact forces in rolling conditions for noise prediction," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 320, pp. 125-144, 2009.
- [50] "Rolling Resistance of a Non-Pneumatic Tire having a Porous Elastomer Composite Shear Band," *Tire Science and Technology*, 2011.
- [51] M. a. T. L. a. S. J. Veeramurthy, "Optimization of Non-Pneumatic Tire (NPT) for Reducing Rolling Resistance," in *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2011.

- [52] A. a. J. P. a. R. T. a. C. S. Gasmi, "Development of a two-dimensional model of a compliant non-pneumatic tire," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, p. 1723–1740, 2012.
- [53] Y. a. Z. Y. a. L. F. a. X. Z. a. Z. M. a. L. H. Deng, "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.
- [54] X. Jin, C. Hou, X. Fan, Y. Sun, J. Lv and C. Lu, "Investigation on the static and dynamic behaviors of non-pneumatic tires with honeycomb spokes," *Composite Structures*, vol. 187, pp. 27-35, 2017.
- [55] C. a. K. D.-M. Lee, "Vibration Analysis of Non-Pneumatic Tires With Hexagonal Lattice Spokes," in *{Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference}*, 20012.
- [56] K. a. C. R. a. S. B. a. N. A. a. P. B. a. M. A. M., "Structural Analysis of Non-pneumatic Tires with Hexagonal Spokes," in *Automotive Technical Papers*, 2021.
- [57] H. a. X. Y. a. S. C. a. Y. Y. Li, "A research on aerodynamic characteristics of non-pneumatic tire," *Mechanics & Industry*, vol. 22, p. 27, 2021.
- [58] J. J. K. D. Heo H, "Compliant cellular structures: application to a passive morphing airfoil," *Compos Struct*, vol. 106, pp. 560-9, 2013.
- [59] J. a. B. P. a. G. R. a. M. Ł. Malachowski, "Rubber Structure under Dynamic Loading – Computational Studies," *Engineering Transactions*, vol. 61, p. 33–46, 2013.
- [60] R. W. Ogden, "Large Deformation Isotropic Elasticity – On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 326, pp. 565-584, 1972.
- [61] A. V. 6.18, *Abaqus analysis user's guide*. Dassault Systèmes Simulia Corp, 2018.
- [62] G. P. a. S. Zaoutsos, "Composites, Viscoelastic constitutive modeling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix," in *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites*, R. M. Guedes, Ed., Woodhead Publishing, 2011, pp. 3-47.
- [63] R. Gedney, "An Introduction to Viscoelasticity Dynamic Mechanical Analysis," 1 February 2019. [Online]. Available: <https://www.qualitymag.com/articles/95253-an-introduction-to-viscoelasticity-dynamic-mechanical-analysis>.
- [64] V. M. S. J. T. L. Ju J, "Rolling resistance of a non-pneumatic tire having a porous elastomer composite shear band," *Tire Sci Technol*, vol. 41, no. 3, pp. 154-73, 2013.
- [65] A. J. Balawi S, "The effect of honeycomb relative density on its effective in-plane elastic moduli: an experimental study," *Compos Struct*, vol. 84, pp. 293-9, 2008.
- [66] C. Y. H. L. Fu MH, "A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength," *Compos Struc*, vol. 160, pp. 574-85, 2017.
- [67] ج. ا. ردی, مقدمه ای بر روش اجزا محدود, جلد جلد اول, تهران, تهران: دانشگاه تهران, ۱۳۸۸, pp. 3 - 20.
- [68] J. a. H. J. a. C. I. a. L. J. Sim, "Analysis of Vertical Stiffness Characteristics Based on Spoke Shape of Non-Pneumatic Tire," *Applied Sciences*, vol. 11, 2021.
- [69] A. P. P. S. S. P. P. a. K. M. M. Shirahatti, "Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 66-76, 2008.

- [70] L. a. Z. Y. a. L. B. a. W. J. a. D. X. Zang, "Mechanical elastic wheel improving road holding and wear resistance of tire," *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 30, pp. 56-63, 2014.
- [71] K. a. K. k. R. Rao, "Simulation of Tire Dynamic Behavior Using Various Finite Element Techniques," *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 8, 2007.
- [72] G. a. B. C. a. C. L. a. R. T. Potts, "Tire Vibrations," *Tire Science and Technology*, vol. 5, pp. 202-225, 1977.
- [73] B. Kao, "Tire Vibration Modes and Tire Stiffness," *Tire Science and Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 136-155, 2002.
- [74] D. R. C. M. C. R. Kopyt P, "Dielectric properties of chiral honeycombs modelling and experiment," *Compos Sci Technol*, p. 1080–1088.