بسم الله الرحمن الرحیم

دینامیک خودروهای جاده‌ای

ترجمه:

علی رحمانی هنزکی

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

احد فروندی

سر شناسنامه	:	وانگ، جویانگ، ۱۹۳۴- م. (Wong, J.Y. (Jo Yang
عنوان و نام پدید آور	:	دینامیک خودروهای جاده‌ای/ [جویانگ وانگ]؛ ترجمه علی رحمانی هنزکی، احد فروندی.
مشخصات نشر	:	تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	:	۳۶۰ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	:	۹۷۸-۹۶۴-۲۶۵۱-۹۹-۳
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	عنوان اصلی: Theory of ground vehicles, 4th en, ۲۰۰۸.
یادداشت	:	کتاب حاضر تحت عنوان «تئوری خودروهای زمینی» با ترجمه مصطفی اسلامیان توسط دانشگاه تبریز در سال ۱۳۸۷ منتشر شده است.
عنوان دیگر	:	تئوری خودروهای زمینی
موضوع	:	وسایل نقلیه موتوری – طرح و ساختمان
موضوع	:	وسایل نقلیه موتوری – دینامیک
موضوع	:	هاورکرافت ها – طرح و ساختمان
شناسه افزوده	:	رحمانی هنزکی، علی، ۱۳۴۷-، مترجم
شناسه افزوده	:	فروندی، احد، ۱۳۶۴-، مترجم
شناسه افزوده	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
رده بندی کنگره	:	۱۳۹۳ ۹ت۲و/ ۲۴۰ TL
رده بندی دیویی	:	۶۲۹/۲۳
شماره کتابشناسی ملی	:	۳۶۰۰۶۴۳

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	:	دینامیک خودروهای جاده‌ای
ترجمه	:	دکتر علی رحمانی هنزکی، عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، احد فروندی
ویراستار علمی	:	سعید شجاعی
ویراستار ادبی	:	شهرام طهماسبی – نیلوفر صبوری
نوبت چاپ	:	اول- پاییز ۱۳۹۳
انتشارات	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	:	نگین سبز
چاپ	:	برهان
طراح جلد	:	شهرام طهماسبی
ناظر چاپ	:	محمد معتمدی نژاد
کارشناس	:	نیره فیروزی
شمارگان	:	۱۰۰۰ جلد
قیمت	:	۱۵،۰۰۰ تومان
شابک	:	۹۷۸-۹۶۴-۲۶۵۱-۹۹-۳ ISBN: ۹۷۸-۹۶۴-۲۶۵۱-۹۹-۳

کلیهٔ حقوق این اثر برای مؤلفین و مترجمین و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان – کد پستی ۱۶۷۸۸-۱۵۸۱۱ – صندوق پستی ۱۶۳ – ۱۶۷۸۵ – تلفن: (۲۶۳۲) ۹ – ۲۲۹۷۰۰۶۰، ۲۲۹۷۰۰۷۰، نمابر: ۲۲۹۷۰۰۰۳، پست الکترونیکی: Publish@srttu.edu، وب سایت: http://Publish.srttu.edu

پیش‌گفتار

درخواست جامعه برای حمل و نقل بهتر، سریع‌تر، و ایمن‌تر، همچنین حفظ محیط زیست و صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیاز جدیدی در توسعه فناوری خودروها را ایجاد نموده است. از این رو رشته تحصیلی مهندسی خودرو در مقطع کارشناسی و تحصیلات تکمیلی در دنیا در چند دهه گذشته و در کشور ما نیز در دو دهه اخیر رشد روز افزونی داشته است. همچنین صنایع خودروسازی داخل کشور نیز گام بلندی در مهندسی خودروهای جدید مانند سمند، تیبا، دنا و ... را برداشته‌اند. تجربه اینجانب در تدریس درس دینامیک خودرو در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد، و همکاری با برخی از صنایع خودروسازی، دسترسی به یک منبع فارسی روان و جامع را بصورت یک نیاز نمایان نمود.

در دوران فعالیت خود منابع مختلفی را مطالعه نموده و مورد استفاده قرار داده‌ام. در این بین من کمتر کتابی را در سطح کتاب "*تئوری خودروهای زمینی*[1]" نوشته "*جو یونگ ونگ*[2]" در زمینه دینامیک خودرو یافتم. از این‌رو این کتاب به عنوان پایه برای تدوین کتاب حاضر انتخاب گردید. از آنجا که کتاب اصلی مشتمل بر مطالبی مانند دینامیک خودروهای شنی‌دار، هاورکرافت و ... بوده که منجر به حجیم شدن کم‌کاربرد کتاب می‌گردید، فصل‌های اضافی حذف شد.

زبان این میراث پیشینیان و امانت آیندگان، ابتدا به‌واسطه انتقال فناوری و عدم وجود کلمات فنی فارسی مورد هجوم واقع شد. اما امروز بواسطه ارتباطات گسترده و همچنین عدم توجه مردم، مسئولین و حتی نخبگان به این داشته ارزشمند بشدت مورد بی‌مهری است، به‌گونه‌ای که استفاده گسترده‌تر از واژگان بیگانه به معنی سطح سواد بالاتر است، اما نویسندگان تمام تلاش خود را بکار بستند تا در حد توان از بکارگیری لغات بیگانه اجتناب ورزیده و همچنین با ساخت واژه‌های روان علاوه بر خودداری از بکارگیری لغات بیگانه، متنی سلیس و روان را در اختیار خواننده قرار دهند.

---

[1] Theory of Ground Vehicles
[2] Jo Yung Wong

این تجربه به نویسندگان نشان داد که استفاده گسترده از لغات بیگانه در متون و محاوره، به دلیل نقصان زبان فارسی نبوده بلکه به علت کم‌کاری، ضعف، و بی‌توجهی بکاربرندگان آن‌ها است. اگرچه برای تکمیل و رفع اشکالات این کتاب زمان زیادی صرف شد اما آن را خالی از اشکال ندانسته و اجازه می‌خواهم کلام تای تونگ، نویسنده کتاب تاریخ خط چینی در قرن سیزدهم را تکرار کنم که "اگر می‌خواستم آنقدر منتظر بمانم تا کتابم کامل شود هرگز از نوشتن آن فارغ نمی‌شدم." از این رو مشتاقانه از نظرات خوانندگان استقبال می‌گردد.

در پایان بایستی از تمام کسانی که در تدوین این کتاب مرا یاری رساندند، از جمله آقای سید مهدی فیض‌اله‌زاده، کارشناس ارشد مکانیک، خانم نیلوفر صبوری، دانشجوی دانشگاه شهید رجایی، دکتر آشنای قاسمی، رئیس اداره انتشارات دانشگاه، و از همه مهمتر خانواده خود که در این دوره مرارت‌های زیادی را تحمل کرده و صبوریشان پشتوانه بزرگی برای من بوده است، تشکر نمایم.

علی رحمانی هنزکی
۹۳/۱/۲۵-تهران

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار ..... ا
فهرست مطالب ..... ت
مقدمه ۱
فصل اول: مکانیک لاستیک‌های بادی ۳
۱-۱ نیروها و گشتاورهای لاستیک ۸
۱-۲ مقاومت غلتشی لاستیک‌ها ۱۰
۱-۳ نیروی کششی ترمزی و لغزش طولی (سُرش) ۲۰
۱-۴ ویژگی‌های دورزنی لاستیک‌ها ۳۵
۱-۴-۱ زاویه‌ی لغزش و نیروی دورزنی ۳۵
۱-۴-۲ زاویه‌ی لغزش و گشتاور همراستاساز ۴۴
۱-۴-۳ کمبر و رانش کمبر ۴۷
۱-۴-۴ توصیف رفتار دورزنی لاستیک‌ها ۵۰
۱-۵ عملکرد لاستیک‌ها روی سطوح خیس ۷۵
۱-۶ ویژگی‌های سواری لاستیک‌ها ۸۳
فصل دوم: مشخصه‌های عملکردی خودرو ۱۰۱
۲-۱ معادله حرکت و حداکثر نیروی کشش ۱۰۱
۲-۲ نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی ۱۰۷
۲-۳ مشخّصه‌های مولد قدرت و سیستم انتقال قدرت خودرو ۱۲۴
۲-۳-۱ موتورهای احتراق داخلی ۱۲۵

عنوان	صفحه

۲-۳-۳ موتورهای الکتریکی ۱۳۶
۳-۳-۳ محرک‌های هیبریدی ۱۴۱
۲-۳-۴ پیل‌های سوختی ۱۴۷
الکترودها ۱۴۸
الکترولیت ۱۴۸
لایه‌های کاتالیست ۱۴۸
لایه‌های نفوذ گاز ۱۴۸
صفحات دو قطبی ۱۴۹
۲-۳-۵ مشخّصه‌های مجموعه‌ی انتقال قدرت ۱۵۱
مجموعه‌ی انتقال قدرت چرخ‌دنده‌ایی دستی ۱۵۱
سیستم انتقال قدرت اتوماتیک ۱۶۰
سیستم انتقال قدرت متغیر پیوسته ۱۶۶
سیستم انتقال قدرت هیدرواستاتیک ۱۶۸
۲-۴ پیش‌بینی عملکرد خودرو ۱۷۱
۲-۴-۱ زمان و مسافت شتاب ۱۷۲
۲-۴-۲ قابلیت شیب‌روی ۱۷۶
۲-۵ مصرف سوخت اقتصادی ۱۷۷
۲-۶ انطباق انتقال قدرت و موتور ۱۸۲
۲-۷ کارآیی ترمز ۱۸۶
۲-۷-۱ مشخصه ترمز یک خودرو دو محوره ۱۸۶
۲-۷-۲ بازدهی ترمز و فاصله‌ی توقف ۱۹۸
۲-۷-۳ مشخصه‌های ترمزگیری یک کشنده – نیم‌تریلر ۲۰۱
۲-۷-۴ سیستم‌های ترمز ضدّ قفل ۲۰۷

عنوان | صفحه

۲-۷-۵ سیستم‌های کنترل نیروی کشش ۲۱۵
مسائل ۲۱۷
فصل سوم: مشخصه‌های فرمان‌پذیری خودرو ۲۲۱
۳-۱ هندسه‌ی فرمان ۲۲۲
۳-۲ مشخصه‌های فرمان‌پذیری یک خودروی دو محوره در حالت پایدار ۲۲۶
۳-۲-۱ خنثی فرمانی ۲۲۹
۳-۲-۲ کم‌فرمانی ۲۳۰
۳-۲-۳ بیش‌فرمانی ۲۳۲
۳-۳ پاسخ حالت پایدار به ورودی فرمان ۲۳۹
۳-۳-۱ پاسخ سرعت چرخشی ۲۳۹
۳-۳-۲ پاسخ شتاب جانبی ۲۴۱
۳-۳-۳ پاسخ انحنا ۲۴۳
۳-۴ آزمون مشخصه‌های فرمان‌پذیری ۲۴۵
۳-۴-۱ آزمون شعاع ثابت ۲۴۵
۳-۴-۲ آزمون سرعت ثابت ۲۴۶
۳-۴-۳ آزمون زاویه فرمان ثابت ۲۴۸
۳-۵ مشخصه‌های پاسخ گذرا ۲۴۹
۳-۶ پایداری جهتی ۲۵۵
۳-۶-۱ معیارهای پایداری جهتی ۲۵۵
۳-۶-۲ کنترل پایداری خودرو ۲۵۸
۳-۷ مشخصه‌های فرمان‌پذیری یک کشنده نیم-تریلر در حالت پایدار ۲۶۸
۳-۸ مدل‌هایی برای شبیه‌سازی رفتار جهتی خودروهای جاده‌ای مفصلی ۲۷۳
مسائل ۲۸۵

عنوان	صفحه

فصل چهارم: مشخصه‌های سواری خودرو ۲۸۷

۴-۱ واکنش انسان به ارتعاشات ۲۸۷

اندازه‌گیری سواری بر اساس برداشت شخصی ۲۸۸

آزمون‌های میز لرزان ۲۸۸

آزمون های شبیه‌ساز سواری ۲۸۸

اندازه‌گیری سواری در خودرو ۲۸۸

۴-۱-۱ استاندارد بین‌المللی ISO 2631-1:1985 ..... ۲۹۰

۴-۱-۲ استاندارد بین‌المللی ISO 2631-1:1997 ..... ۲۹۴

۴-۲ مدل‌های سواری برای خودرو ۳۰۴

۴-۲-۱ مدل دو درجه‌ی آزادی خودرو برای جرم فنربندی شده و فنربندی نشده ۳۰۷

جداسازی ارتعاشات ۳۱۲

جابجایی سیستم تعلیق ۳۱۶

حفظ تماس با جاده ۳۱۹

۴-۲-۲ روش‌های عددی برای تعیین پاسخ یک مدل یک چهارم خودرو به تحریکات پروفیل نامنظم سطح جاده ۳۲۳

۴-۲-۳ مدل دو درجه‌ی آزادی برای حرکت ناوشی و جهشی ۳۲۵

۴-۳ مقدمه‌ای بر ارتعاشات تصادفی ۳۳۳

۴-۳-۱ پروفیل برآمدگی‌های سطح به صورت یک تابع تصادفی ۳۳۳

۴-۳-۲ تابع پاسخ فرکانسی ۳۴۲

۴-۳-۳ ارزیابی ارتعاشات خودرو با استفاده از معیار راحتی سواری ۳۴۴

۴-۴- سیستم‌های تعلیق فعال و نیمه‌فعال ۳۴۶

مسائل ۳۵۶

مقدمه

خودروهای زمینی، خودروهایی هستند که بر روی سطح زمین قرار دارند؛ بر خلاف هواپیماها و خودروهای دریایی که حین عملکرد، به ترتیب در هوا و آب قرار می‌گیرند.

خودروهای زمینی را می‌توان به دو گروه عمده‌ی مقید و نامقید[1] تقسیم نمود. خودروهای زمینی مقید، مجبور به حرکت در یک مسیر ثابت (مسیر هادی) می‌باشند، مانند خودروهای ریلی و خودروهای مقید معلق[2]. خودروهای نامقید قادرند طبق تصمیم راننده، در جهت‌های مختلف روی سطح زمین حرکت کنند، مانند خودروهای جاده‌ای و خودروهای برون جاده‌ای. موضوع این کتاب، مکانیک خودروهای زمینی جاده‌ای نامقید می‌باشد.

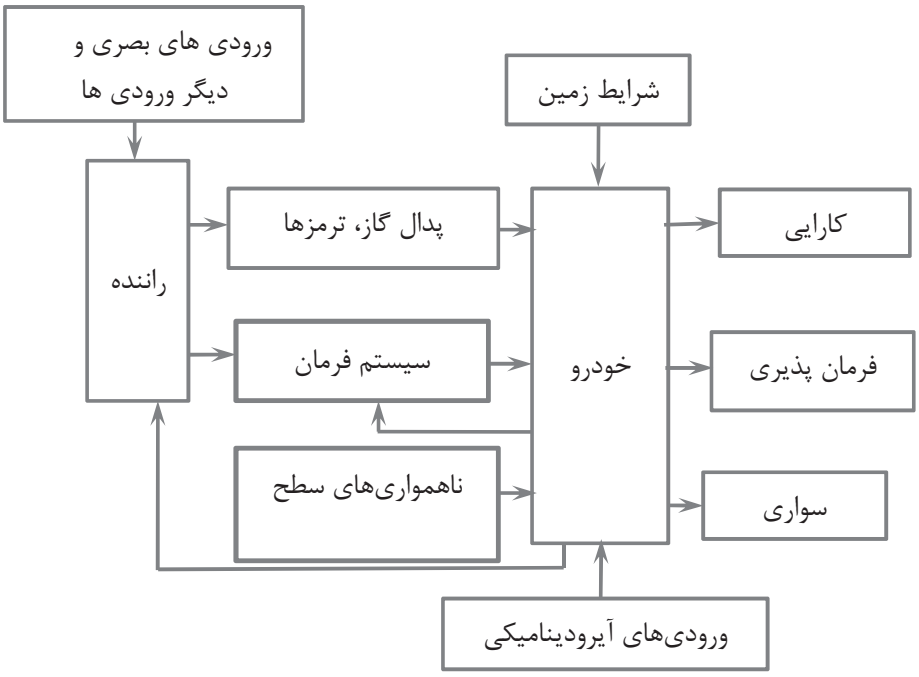
هدف اصلی از مطالعه‌ی مکانیک خودروهای زمینی، تدوین اصول راهنما برای توسعه‌ی منطقی، طراحی و انتخاب خودروها در پاسخ به نیازهای مختلف عملکردی است.

به طور کلی، مشخصه‌های یک خودروی زمینی را می‌توان بر حسب کارایی[3]، فرمان‌پذیری[4] و سواری[5] توصیف نمود. مشخصه‌های کارایی، عبارت است از توانایی خودرو برای شتاب‌گیری، ایجاد کشش یدک‌کشی، غلبه بر موانع، و ایجاد شتاب کاهنده. ویژگی‌های فرمان‌پذیری عبارت است از پاسخ خودرو به فرمان‌های راننده و توانایی آن در پایدار نمودن حرکت خود در برابر اغتشاشات خارجی. مشخصه‌های سواری به ارتعاشات خودرو ناشی از ناهمواری‌های سطح جاده مربوط می‌شوند و روی مسافران و کالاهای درون خودرو تأثیر می‌گذارد. تئوری خودروهای جاده‌ای به مطالعه‌ی کارایی، فرمان‌پذیری و سواری و ارتباط آن‌ها با طراحی خودروهای جاده‌ای تحت شرایط کاری مختلف می‌پردازد.

---

[1] Guided and nonguided
[2] Tracked levitated
[3] Performance
[4] Handling
[5] Ride

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، رفتار یک خودروی جاده‌ای نشان‌دهنده‌ی نتایج برهم‌کنش بین راننده، خودرو و محیط می‌باشد. بنابر این برای طراحی و ارزیابی سیستم‌های موجود در خودروهای زمینی، درک رفتار راننده، مشخصه‌های خودرو و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی سطح زمین ضروری است.



شکل ۱ سیستم راننده-خودرو-زمین

مکانیک لاستیک‌های بادی

به جز نیروهای آیرودینامیکی و گرانشی، بقیه‌ی نیروها و گشتاورهای اصلی که روی حرکت یک خودروی زمینی تأثیر می‌گذارند، از محل تماس جزء محرک و زمین به خودرو اعمال می‌شوند. بنابراین، برای مطالعه‌ی مشخصه‌های کارایی، کیفیت سواری و رفتار فرمان‌پذیری خودروهای زمینی که خودروهای جاده‌ای نیز از زمره آنها است، درک مشخصه‌های برهم‌کنش بین جزء محرک و زمین ضروری است.

به طور کلی، جزء محرک در یک خودروی زمینی می‌بایست کارایی‌های زیر را داشته باشد:

- بتواند وزن خودرو را تحمل کند
- بتواند اثرات نامطلوب ناهمواری‌های سطح را بر خودرو تعدیل کند
- بتواند نیروی کششی کافی برای حرکت دادن یا ترمز کردن خودرو ایجاد کند
- بتواندکنترل فرمان و پایداری جهتی مناسبی را برای خودرو فراهم کند

لاستیک‌های بادی می‌توانند کارایی‌های بالا را به نحوی مؤثر و مفید داشته باشند؛ بنابراین، از آن‌ها بطور گسترده‌ای در خودروهای جاده‌ای استفاده می‌شوند. از این رو برای درک کارایی و مشخصه‌های خودروهای زمینی، مطالعه‌ی مکانیک لاستیک‌های بادی دارای اهمیتی اساسی است. دو مسأله در مکانیک لاستیک‌ها به طور خاص مورد توجه مهندسان خودرو است. یکی مکانیک لاستیک‌ها روی سطوح سخت، که برای مطالعه‌ی مشخصه‌های خودروهای جاده‌ای ضروری است. دیگری مکانیک لاستیک‌ها روی سطوح ناهموار که برای مطالعه‌ی کارایی خودروهای برون جاده‌ای دارای اهمیتی اساسی است، که در این فصل مکانیک لاستیک‌ها روی سطوح سخت بحث می‌شود.

لاستیک بادی عبارت است از یک ساختار انعطاف‌پذیر چنبره‌ای شکل که با هوای فشرده پر می‌شود. مهم‌ترین بخش ساختاری لاستیک، زیردوزی[1] آن است. این بخش، همانطور که در

[1] Carcass

شکل ۱-۱ نشان داده شده‌است، از لایه‌هایی از رشته‌های انعطاف‌پذیر با مدول الاستیسیته‌ی بالا تشکیل شده‌است که ماتریسی از ترکیبات لاستیکی با مدول الاستیسیته‌ی پایین آن‌ها را در بر گرفته‌اند. رشته‌ها به صورت بافتی از ترکیبات طبیعی، مصنوعی یا فلزی ایجاد می‌شوند و دور حلقه‌های[1] ساخته شده از سیم‌های فولادی با استحکام کششی بالا مهار می‌گردند. این حلقه‌ها به عنوان شالوده‌ی زیردوزی عمل می‌کنند و باعث می‌شوند لاستیک روی رینگ محکم بنشیند. مواد تشکیل دهنده لاستیک طوری انتخاب می‌شوند که ویژگی‌های خاصی به آن بدهند. مواد لاستیک در قسمت دیواره‌های کناری معمولاً می‌بایست در مقابل خستگی و خراشیدگی بسیار مقاوم باشند. که برای این منظور از ترکیبات استایرن- بوتادین[2] به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. ترکیبات مواد لاستیکی مورد استفاده برای آج‌ها بسته به نوع لاستیک متفاوت است. به عنوان مثال، در لاستیک کامیون‌های سنگین، شدت بیشتر بار لازم می‌دارد که از ترکیباتی برای آج استفاده شود که در مقابل خراش، پاره شدن و رشد ترک مقاومت بالا ولی هیسترزیس کمی داشته باشد تا تولید گرما داخلی و مقاومت غلتشی آن کمتر باشد. در نتیجه، مواد لاستیک طبیعی بطور گسترده در لاستیک کامیون‌ها به کار می‌رود. علی‌رغم اینکه ترکیبات لاستیکی طبیعی نسبت به انواع ترکیبات لاستیکی مصنوعی که عموماً در لاستیک خودروهای سواری و مسابقه از آن‌ها استفاده می‌شود دارای ضریب چسبندگی به جاده‌ی کمتری، به ویژه روی سطوح خیس هستند. در لاستیک‌های بدون تیوب که فراگیر شده‌اند، یک لایه‌ی نازک لاستیک با قابلیت نفوذ ناپذیری بالا در برابر هوا (مانند ترکیبات لاستیکی بوتیل[3]) به سطح داخلی زیردوزی متصل می‌شود.

انتقال بار در یک لاستیک بادی مشابه انتقال بار در چرخ دوچرخه است. در چرخ دوچرخه، توپی به پره‌های قسمت بالایی طوقه آویزان است و طوقه هم از قسمت پایین خود بر روی زمین قرار دارد. در یک لاستیک باد شده، فشار باد باعث ایجاد کشش در رشته‌هایی زیردوزی می‌شود. نیرویی که به طوقه منتقل می‌شود، ابتدا از طریق رشته‌های موجود در دیواره‌ها و سپس سیم طوقه لاستیک آویزان می‌شود.

طراحی و ساخت زیردوزی تا حد زیادی مشخصه‌های لاستیک را تعیین می‌کند. در بین پارامترهای طراحی متعددی موجود، چگونگی استقرار هندسی لایه‌های رشته‌ایی پوشیده شده

---

[1] Beads
[2] Styrene-butadiene
[3] Butyl

با لاستیک (لایی[1])، و به ویژه جهت آن‌ها، نقش مهمی در رفتار لاستیک ایفا می‌کند. زاویه‌ی تاج[2]، که در شکل ۱-۱ نشان داده شده‌است، عبارت است از زاویه‌ی بین رشته و خط مرکزی محیطی لاستیک و معمولاً جهت رشته‌ها را تعیین می‌کند. زمانی که زاویه‌ی تاج رشته‌ها کم باشد، لاستیک دارای مشخصه‌های دورزنی خوب ولی خوش‌سواری بد خواهد بود. از سوی دیگر، اگر رشته‌ها نسبت به خط مرکزی آج عمود باشند، لاستیک می‌تواند سواری خوبی ارائه دهد ولی مشخصـه‌های فرمان‌پذیریش ضعیف خواهد شد.

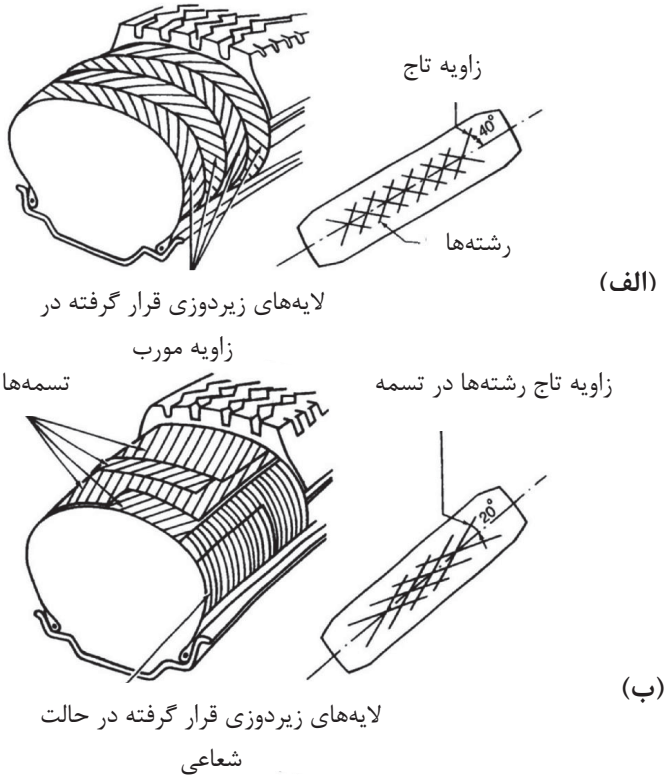
در لاستیک لایی مورب[3]، تعادلـی بین این دو جنبه برقـرار شده‌است. همانطـور که در شکل ۱-۱ (الف) نشان داده شده‌است، در آن رشته‌ها به صورت قطری سرتاسر زیردوزی، از یک لبه به لبه‌ی دیگر با زاویه‌ی تاج تقریباً ۴۰° کشیده شده‌اند. یک لاستیک لایی مورب تعداد دو لایی (در لاستیک‌های مخصوص بار سبک) یا بیشتر (در لاستیک‌های با بار سنگین) دارد. جهت رشته‌های لایی‌های مجاور، معکوس هم می‌باشند. بنابراین رشته‌ها به صورت لوزی (ضربدری) نسبت به هم قرار می‌گیرند. در عمل، لایی‌های قطری خمیده و بر هم مالیده شده، و در نتیجه المان‌های لوزی شکل و پرکننده‌ی لاستیکی دچار افزایش طول می‌شوند. این عمل خمیده‌شدن باعث ایجاد حرکتی جاروبی بین آج و جاده می‌گردد، که یکی از اصلی‌ترین علل سایش لاستیک و همچنین مقاومت غلتشی بالای آن می‌باشد.

از سوی دیگر، لاستیک لایی شعاعی[4] ساختار کاملاً متفاوتی نسبت به لاستیک لایی مورب دارد. این نوع لاستیک برای اولین بار توسط میشلین[5] در سال ۱۹۴۸ ارائه شد و امروزه اغلب لاستیک خودروهای سواری و کامیون‌ها از این نوع است و به طور فزاینده‌ای در ماشین‌های سنگین خاکبرداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، لاستیک لایی مورب هنوز هم در موارد خاصی مانند دو یا سه چرخه‌ها، موتورسیکلت‌ها، ماشین آلات کشاورزی و برخی تجهیزات نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل ۱-۱ (ب) نشان داده شده‌است، لاستیک لایی شعاعی شامل یک یا چند لایه در زیردوزی خود است که رشته‌های آن به صورت شعاعـی از یک لبه به لبه‌ی دیگر کشـیده شده‌اند و منجر به ایجاد زاویه‌ی تاج ۹۰° مـی‌شوند.

---

[1] Ply
[2] Crown
[3] Bias-ply
[4] Radial-ply
[5] Michelin

تسـمه‌ای چندلایه از رشته‌هایی با مدول الاستیسیته‌ی بالا (معمولاً فولاد یا دیگر مواد پر استحکام) زیر آج قرار می‌گیرد که در شکل ۱-۱ (ب) نشان داده شده‌است.



شکل ۱- ۱ ساختار لاستیک. (الف) لایی مورب. (ب) لایی شعاعی

رشته‌های موجود در تسمه با زاویه‌ی تاج کم در حدود $^{\circ}$۲۰ قرار گرفته‌اند. در لاستیک لایی شعاعی، تسمه نقشی اساسی در عملکرد آن دارد. بدون وجود تسمه، ممکن است زیردوزی لایی شعاعی ناپایدار شود زیرا ممکن است به دلیل غیریکنواختی فواصل بین رشته‌ها زمانی که لاستیک پر باد است، در پیرامون لاستیک یک سری چروک ایجاد شود. در لاستیک خودروهای سواری، معمولاً در زیردوزی دو لایی شعاعی ساخته شده از مواد مصنوعی، مانند ریون[1] یا پلی‌استر، دو لایی از رشته‌های فولادی و دو لایی از رشته‌های ساخته شده از مواد مصنوعی مثل نایلون وجود دارد. در لاستیک کامیون‌ها، معمولاً در زیردوزی یک لایی فولادی شعاعی و

[1] Rayon

چهار لایی فولادی در تسمه وجود دارد. در لاستیک لایی شعاعی، کشیده و رها شدن زیردوزی باعث ایجاد حرکت نسبی کمی بین رشته‌های تسمه می‌شود. از آنجا که حرکت جاروب کردن بین لاستیک و جاده وجود ندارد، مقدار هدر رفت توان می‌تواند تا ۶۰٪ هدر رفت توان در لاستیک لایی مورب در شرایط مشابه باشد و عمر لاستیک لایی شعاعی می‌تواند تا دو برابر عمر لاستیک لایی مورب مشابه خود برسد. در لاستیک لایی شعاعی فشار زمین در سطح تماس نسبتاً یکنواخت است. بر خلاف آن، فشار زمین در لاستیک لایی مورب از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر به مقدار قابل توجهی متفاوت است زیرا اجزای آجی که از سطح تماس عبور می‌کنند، دارای حرکت جاروبی پیچیده‌ای هستند.

همچنین لاستیک‌هایی وجود دارند که در آج خود دارای تسمه بوده، که به صورت لایی مورب ساخته می‌شوند. این نوع لاستیک، معمولاً لاستیک تسمه مورب[1] گفته می‌شود. رشته‌های داخل تسمه از موادی ساخته می‌شوند که مـدول الاستیسیته‌ی شان نسبت به مدول الاستیسیته‌ی رشته‌های لایی مورب بیشتر است. تسمه باعث می‌شود آج در برابر اعوجاج، صلبیت بالایی پیدا کند و سایش آج و مقاومت غلتشی را نسبت به لاستیک لایی مورب متداول کاهش می‌دهد. به طور کلی، لاستیک تسمه مورب مشخصه‌هایی بین مشخصه‌های لاستیک لایی مورب و لایی شعاعی دارد.

در ایالات متحده، دپارتمان حمل و نقل، تولیدکنندگان لاستیک را ملزم کرده‌است تا اطلاعات راجع به ابعاد لاستیک و درجه‌بندی آن‌ها را روی دیواره‌های جانبی هر لاستیک درج کنند. به عنوان نمونه، برای یک لاستیک "P185/70R14 87S"، حرف "p" نشان دهنده‌ی لاستیک خودروی سـواری است، "۱۸۵" پهنای نامی مقطع بر حسب میلی‌متر است؛ "۷۰" نسبت منظر[2] می‌باشد که عبارت است از نسبت ارتفاع دیواره‌ی کناری به عرض سطح مقطع؛ "R" حرف اول لاستیک لایی شعاعی می‌باشد، "۱۴" قطر رینگ بر حسب اینچ بوده؛ و "۸۷" کُدی است که نشان دهنده‌ی حداکثر باری می‌باشد که لاستیک می‌تواند در حداکثر سرعت نامی خود تحمل کند. "S" درجه‌بندی سرعت است که نشان دهنده‌ی حداکثر سرعتی است که لاستیک می‌تواند بدون آسیب دیدن تحمل کند، که S-۱۸۰km/h، T-۱۹۰km/h، H-۲۱۰km/h، V-۲۴۰km/h، Z-۲۴۰km/h یا بیشتر را تحمل می‌نمایند. قابلیت‌های کششی و دمایی به صورت مقیاسی از A تا C بیان می‌شود که در آن A بهترین و C بدترین است.

[1] Bias-belted
[2] Aspect ratio

درجه‌ی کشش بر اساس توانایی متوقف کردن خودرو در مسیر خط راست روی سطح خیس می‌باشد. درجه‌ی دمایی نمایانگر توانایی لاستیک برای مقاومت در برابر حرارتی است که در سرعت‌های بالا، بارهای زیاد و رانندگی سنگین تولید می‌شود. درجه‌ی سایش آج، نمایانگر عمر مورد انتظار برای لاستیک است. این درجه، با مقایسه با یک لاستیک مرجع با درجه‌ی ۱۰۰ اندازه‌گیری می‌شود. به عنوان مثال، اگر درجه‌ی سایش آج ۴۲۰ باشد به این معنی است که این لاستیک باید ۴/۲ برابر لاستیک مرجع عمر کند. درجه‌ی سایش آج برابر با ۱۸۰، نسبتاً کم و درجه‌ی ۵۰۰ نسبتاً بالا محسوب می‌شود.

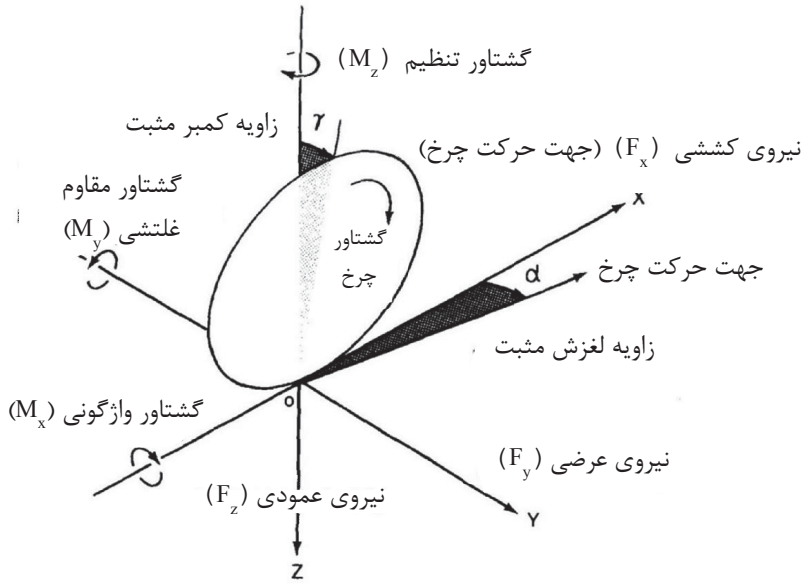
علی‌رغم اینکه ساختار لاستیک‌های بادی از نوعی به نوع دیگر متفاوت است، مشکلات پایه‌ای آن‌ها به هم بی‌شباهت نیستند. در بخش‌های آتی، اصول مکانیکی که اساس تمام انواع لاستیک می‌باشد مورد بحث قرار می‌گیرد. مشخصه‌های ویژه و منحصر به فرد مربوط به یک نوع به خصوص از لاستیک نیز ارائه می‌شود.

۱–۱ نیروها و گشتاورهای لاستیک

به منظور توصیف مشخصه‌های یک لاستیک، نیروها و گشتاورهایی که به آن وارد می‌شود، لازم است یک دستگاه مختصات تعریف شود که به عنوان مرجع تعریف پارامترهای مختلف بتوان از آن بهره برد. یکی از دستگاه‌های مختصات مرسوم که توسط انجمن مهندسین خودرو (SAE[1]) پیشنهاد شده، در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌است. مرکز دستگاه مختصات، مرکز سطح تماس لاستیک است. محور X محل تلاقی صفحه‌ی چرخ و صفحه‌ی زمین بوده که جهت مثبت آن رو به جلو می‌باشد. محور Z بر صفحه‌ی زمین عمود، و جهت مثبت آن رو به پایین می‌باشد. محور Y در صفحه‌ی زمین قرار دارد و جهت آن طوری انتخاب می‌شود که دستگاه مختصات، متعامد و راستگرد باشد.

سه نیرو و سه گشتاور از زمین به لاستیک وارد می‌شوند. نیروی کششی (یا نیروی طولی) F_x مؤلفه‌ی X، نیروی برآیندی است که از سمت جاده به لاستیک وارد می‌شود. نیروی جانبی F_y مؤلفه‌ی Y، و نیروی عمودی F_z مؤلفه‌ی در جهت Z هستند. گشتاور واژگون‌ساز M_x عبارت است از گشتاوری که از زمین به لاستیک حول محور X وارد می‌شود. گشتاور مقاومت غلتشی M_y گشتاور حول محور Y و گشتاور هم‌راستاساز M_z گشتاور حول محور Z می‌باشد.

[1] Society of Automotive Engineers



شکل ۱- ۲ دستگاه مختصات لاستیک

با وجود این دستگاه مختصات، بسیاری از عوامل کارایی لاستیک را می‌توان به راحتی تعریف نمود. به عنوان مثال، جابجایی طولی[۱] مرکز فشار عمودی، به صورت نسبت گشتاور مقاومت غلتشی به بار عمودی تعیین می‌شود. جابجایی عرضی[۲] مرکز فشار عمودی به صورت نسبت گشتاور واژگون‌ساز به بار عمودی تعریف می‌شود. انتگرال تنش‌های برشی طولی روی تمام سطح تماس، نشان‌دهنده‌ی نیروی کششی یا ترمزی می‌باشد. اعمال گشتاور محرک حول محور دوران لاستیک، باعث ایجاد نیرویی برای شتاب دادن به خودرو و اعمال گشتاوری ترمزی باعث ایجادی نیرویی برای شتاب کاهشی به خودرو می‌شود.

در مورد لاستیک در حال غلتش، دو زاویه‌ی مهم وجود دارد: زاویه‌ی لغزش و زاویه‌ی کمبر[۳]. زاویه‌ی لغزش α، زاویه‌ای است که جهت حرکت چرخ با خط محل تلاقی صفحه‌ی چرخ و سطح جاده می‌سازد. زاویه‌ی کمبر γ عبارت است از زاویه‌ی بین صفحه‌ی XZ و صفحه‌ی چرخ. نیروی جانبی در سطح تماس لاستیک با زمین، هم تابعی است از زاویه‌ی لغزش و هم زاویه‌ی کمبر.

---

[1] Longitudinal shift
[2] Lateral shift
[3] Camber

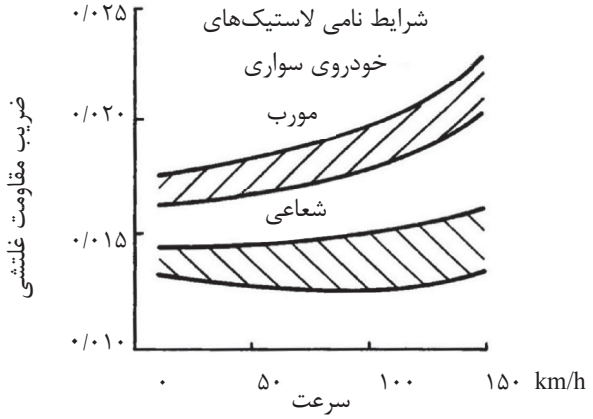
۱–۲ مقاومت غلتشی لاستیک‌ها

مقاومت غلتشی لاستیک‌ها روی سطوح سخت اساساً به دلیل خاصیت هیسترزیس مواد لاستیک است که از تغییر شکل زیردوزی حین غلتیدن رخ می‌دهد. اصطکاک بین لاستیک و جاده که ناشی از سر خوردن می‌باشد، مقاومت ناشی از هوایی که داخل لاستیک جریان می‌یابد و اثر بادبزنی لاستیک در حال چرخش بر هوای اطرافش در مقاومت غلتشی لاستیک نقش ایفا می‌کنند، اما در درجه‌ی دوم اهمیت قرار دارند. طبق نتایج تجربی موجود می‌توان تلفات لاستیک را در بازه‌ی سرعتی ۱۲۸ تا ۱۵۲ km/h به چند قسمت ۹۰ تا ۹۵٪ به دلیل هیسترزیس داخلی در لاستیک، ۲ تا ۱۰ ٪ به دلیل اصطکاکی بین لاستیک و زمین، و ۱/۵ تا ۳/۵٪ به دلیل مقاومت هوا تقسیم نمود. از کل تلفات انرژی در ساختار لاستیک، مشخص شده است که برای لاستیک رادیال کامیون، سهم هیسترزیس در ناحیه‌ی آج، شامل تسمه، ۷۳٪ ، دیواره‌های کناری ۱۳٪، نواحی بین آج و دیواره‌های کناری، که معمولاً با عنوان ناحیه‌ی شانه گفته می‌شود، ۱۲٪ و لبه‌ها ۲٪ می‌باشد.

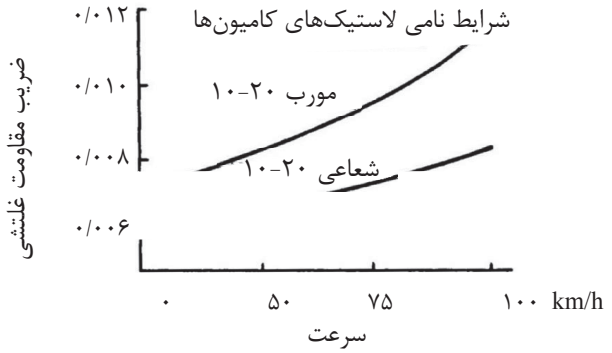
زمانی که لاستیک می‌غلتد، زیردوزی درناحیه‌ی تماس با زمین تغییر شکل می‌یابد. در نتیجه‌ی تغییر شکل لاستیک، فشار عمودی در نیمه‌ی جلویی لاستیک در سطح تماس بیشتر از این فشار در نیمه‌ی عقبی آن است. مرکز فشار عمودی در جهت غلتش جابجا می‌شود. این جابجایی باعث ایجاد یک گشتاور حول محور دوران لاستیک می‌شود که گشتاور مقاومت غلتشی است. در لاستیکی که آزادانه می‌غلتد، گشتاور اعمالی به چرخ صفر است؛ بنابراین، یک نیروی افقی در محل تماس زمین و لاستیک باید وجود داشته باشد تا تعادل حفظ شود. این نیروی افقی برآیند معمولاً مقاومت غلتشی نامیده می‌شود. ضریب مقاومت غلتشی به صورت نسبت مقاومت غلتشی به بار عمودی بر لاستیک تعریف می‌شود.

عواملی وجود دارد که بر مقاومت غلتشی لاستیک بادی تأثیر می‌گذارد. این عوامل عبارتند از ساختار لاستیک (ساختمان اجزا و مواد) و شرایط کاری آن (شرایط سطح، فشار باد لاستیک، سرعت، دما و غیره). ساختار لاستیک تأثیر بسزایی بر مقاومت غلتشی آن دارد. شکل ۱-۳ ضریب مقاومت غلتشی را در سرعت‌های مختلف انواعی از لاستیک‌های لایی شعاعی و لایی مورب خودروی سواری روی جاده‌ی صاف نشان می‌دهد. تفاوت ضریب مقاومت غلتشی یک لاستیک لایی شعاعی و لایی مورب کامیون با اندازه‌ی یکسان تحت شرایط نامی در شکل ۱-۴ نشان داده شده‌است. آج‌ها و دیواره‌های کناری ضخیم‌تر و تعداد لایه‌های بیشتر زیردوزی، مقاومت غلتشی را به دلیل تلفات هیسترزیس بیشتر، افزایش می‌دهد. لاستیک‌هایی که با

ترکیبات مصنوعی ساخته می‌شوند معمولاً مقاومت غلتشی بیشتری از لاستیک‌های ساخته شده از لاستیک طبیعی دارند. مقاومت غلتشی لاستیک‌های ساخته شده از مواد لاستیکی دارای ترکیبات بوتیل که ویژگی‌های کشش و چسبندگی به جاده‌ی بهتری دارند، حتی بیشتر از لاستیک‌هایی است که از لاستیک‌های مصنوعی متداول ساخته می‌شوند. چنین یافت شده است که مقاومت غلتشی لاستیک‌های دارای آج‌های ساخته شده از ترکیبات لاستیک مصنوعی و آن‌هایی که از ترکیبات لاستیک بوتیل ساخته می‌شوند تقریبا به ترتیب ۱/۰۶ و ۱/۳۵ برابر لاستیک‌هایی است که از ترکیبات لاستیک طبیعی ساخته می‌شوند.



شکل ۱- ۳ تغییرات ضریب مقاومت غلتشی لاستیک‌های لایی شعاعی و لایی مورب خودروی سواری بر حسب سرعت، روی جاده‌ای مسطح و هموار تحت بار و فشار باد نامی



شکل ۱- ۴ تغییرات ضریب مقاومت غلتشی لاستیک‌های لایی شعاعی و لایی مورب کامیون بر حسب سرعت تحت بار و فشار باد نامی