طراحی سیستم‌های چرخ، ترمز، فرمان

دکتر ابراهیمی‌نژاد

چرخ و تایر

مبحث چرخ و تایر از اهمیت بالایی در خودرو برخوردار است و اگر چه در هر سه حوزه عملکردی خودرو، یعنی کیفیت سواری[۱]، فرمان پذیری[۲] و عملکرد[۳]، خودش را نشان می‌دهد، ولی اطلاعات مهندسی و طراحی کافی در مورد آن در کتابهای دانشگاهی وجود ندارد. تایر، ساختاری حلقه ای شکل است که بر روی رینگ چرخ سوار می شود و علاوه بر ایجاد نیروهای بین جاده و خودرو، نقش تکیه گاهی نرم را برای تحمل وزن خودرو ایفا می کند[۴].

تایر یک ماده‌ی مرکب (کامپوزیت) است که از فلز، پلیمر و مواد آلی و معدنی تشکیل شده است. مواد تشکیل دهنده تایرهای بادی[۵] مدرن شامل کائوچوی طبیعی، کائوچوی مصنوعی (از جمله استایرن بوتادین رابِر)، کربن (دوده)، الیاف طبیعی، الیاف مصنوعی و مواد شیمیایی می باشند[۶] که بسته به ترکیب و طراحی ساختار آنها عملکردهای متفاوتی در شرایط کاری متفاوت خواهند داشت.

دو عملکرد اصلی چرخ و تایر: ۱- تحمل نیروهای وزن ۲- تبادل نیروها با جاده

اولین مشخصه‌هایی که تایر برای آنها طراحی می‌شود: ۱- وزن ۲- سرعت ← performance

در این درس پس از توصیف مختصری از ساختار و اجزای تشکیل دهنده تایر و مواد تشکیل دهنده آن، به تحلیل نیروهای ایجاد شده در تایر می پردازیم. علوم و تکنولوژی طراحی تایر (درصد مواد و فرآیند اختلاط و پخت تایر) فراتر از موضوع این درس خواهد بود.

تایر ← تشکیل شده از پلیمرهایی که با ترکیبی مشخص و ترتیبی معین با هم مخلوط می شوند و آمیزه ای نیمه پخته را تشکیل می دهند ← کامپاوند[۷]

۱- Ride

۲- Handling

۳- Performance

۴- Tire (American English) or tyre (British English) is a ring-shaped vehicle component that is mounted on the wheel's rim to enable better vehicle performance. Tires provide traction between the vehicle and the road while providing a flexible cushion that absorbs shock.

۵- Pneumatic tire

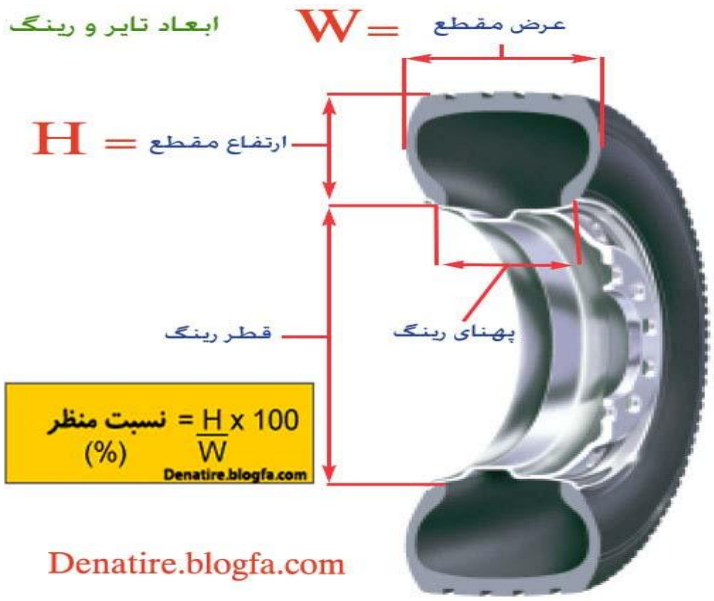
۶- The materials of modern pneumatic tires are natural rubber, synthetic rubber, fabric and wire, along with carbon black and other chemical compounds. Tires consist of a tread and a body (carcass); the tread provides traction while the body provides containment for a quantity of compressed air.

۷- Compound

علم طراحی تایر
- ۱- طراحی آج تایر
- ۲- یک بخش از دانش مربوط به ترکیب کامپاند تایر می‌شود.
- ۳- یک بخش از آن مربوط به زمان پخت و فشار وارده بر آن می شود.

عمر مفید انبارداری[۱] ⇐ مدت زمانی که می توان تایر را در انبار نگهداری کرد. متخصصان تایر معتقدند عمر مفید انبارداری تایر از زمان عمر تایر در زیر خودرو (که تایر با جاده در تماس ا ست) مهمتر ا ست. باید به این نکته توجه دا شت که معمولاً توصیه می شود در هنگام خرید نباید بیش از یکسال از تولید تایر گذ شته با شد که بیشـــتر از این زمان باعث می‌شـــود که مواد موجود در آن عملکرد خود را بخوبی انجام ندهند و تایر از هم گسیخته شود.

مشخصات اعداد نوشته شده روی تایر:



۱- Tire shelf life: length of time that a tire may be stored without becoming unfit for use or sale

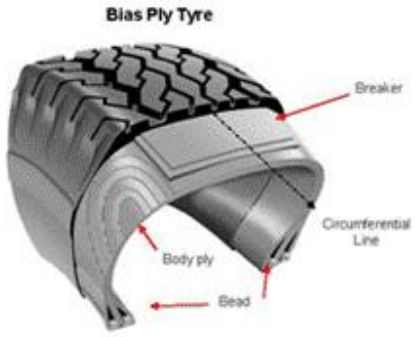
برخی تعاریف:

Ply: لایه‌های نخ و کامپاند

ساختار تایر: **Belted Bias**- **Radial – Bias**

اگر لایه‌ها با زوایای متفاوتی باشند ← بایاس[۱]

اگر لایه‌ها با زوایایی در جهت شعاعی ← رادیال[۲]



زاویه تاج[۳]: در تایرهای Bias ماکزیمم ۴۰ درجه و در تایرهای Radial ماکزیمم ۲۰ درجه است.

تایرهای passenger car tires ← عمدتاً Radial

Commercial (Truck / Bus) ← عمدتاً Radial

تایرهای کشاورزی ← عمدتاً Bias

OTR (off – the – road) ← عمدتاً Bias

آج[۴]: لایه ای از لاستیک با استحکام بالا ← وظیفه‌ی اصلی ← انتقال نیرو با زمین و دفع آب موجود در آن است که در غیر اینصورت دچار پدیده‌ی Hydroplaning می‌شود ← پدیده‌ایست که در طراحی آج تایر باید طوری باشد که بخشی از تایر بتواند آب را دفع کند و دارای اصطکاک خشک باشد (برای اینکه اصطکاک خشک به اصطکاک ویسکوز تبدیل نشود).

آج ← کائوچو طبیعی ← شیره‌ی یک سری درخت در شرق آسیا از مالزی و اندونزی

آج تایر بر روی carcass سوار می شود.

۱- Bias ply- have even numbers of plies with each ply in adjacent directions from bead to bead. The tires may additionally have narrower plies under the tread.

۲- Radial ply- casing cords are placed across tire from bead to bead. In addition radial tires have breaker plies running circumferentially around the tire under the tread.

۳- Crown angle

۴- Tread- tread consists of a thick layer of rubber which comes into direct contact with the road surface. It is highly resistant to fracture and shock in order to protect the carcass and belt located in the tire's interior. Also, rubber with strong anti-inner abrasion features is used to increase the tire's driving lifespan.

طوقه[۱] ← قسمتی است که باید به ring اتصال شود و ضخامتش بیشتر است و با لایه‌های نخ ساخته شده، که بتواند در محل تماس با ring جابجا نشود و ثابت بماند.

جداره تایر[۲] ← در جهت عرضی مقاومت ندارد و نیروهایی که بصورت قائم بر contact patch تایر وارد می‌شوند را تا حدودی دمپ می‌کند.

نکته: هر چقدر **profile** تایر کوتاه تر باشد ← اثر منفی روی **Ride** دارد ولی باعث سریع فرمان دادن خودرو می‌شود.

۱- Bead (in contact with the rim) wraps around the end of the cord and fixes the tire to the rim. It is made up of various parts including the bead wire, core, rubber and flipper. In general, the rim is slightly tightened so in the case of sudden reduction of air pressure while driving, the tire will not become unfastened from the rim.

۲- Sidewall: Located between the tire's shoulder and bead, the sidewall protects the carcass on the inside and provides a comfortable riding experience due to its flexibility during driving. Also, the type of tire, size, structure, tread pattern, manufacturer, brand name, and other detailed information are marked on the sidewall.

آستر داخلی [۱] ← جنسش مشابه Tube است و عمدتاً از natural rubber تشکیل شده و هوابندی داخلی تایر را پوشش می‌دهد ← باعث جلوگیری از عبور گازها می شود.

منجید[۲] ← به لایه های تشکیل دهنده لاشه یا جسد تایر گویند، که وظیفه نگهداری هوای فشرده در داخل تایر را برعهده دارند.

تسمه[۳] ← لایه‌ای که مانند کمربندی به دور تایر در محیط تایر زیر آج برای تحمل نیروها در جهت محیط تایر قرار دارد. یکی از وظایف تسمه ← قسمتی از تایر که با زمین در تماس است را خیلی مستحکم و صلب می‌کند ← اساساً تسمه فقط برای تایر Radial (بدلیل قرارگیری الیاف بصورت رادیال و کاهش مقاومت تایر در راستای محیطی) طراحی شده بود. اثر اصلی آن ← ایجاد استحکام در ناحیه تماس و برقراری تماس یکنواخت و مداوم و اصطکاک مناسب برای غلتش خوب. لایه‌های تسمه استحکام لازم در جهت حرکت طولی را به تایر می‌دهند.

لایه واسط[۴] ← باعث جلوگیری از لغزش آج روی منجید و جلوگیری از تماس مستقیم آنها می شود.

شانه تایر[۵] ← ناحیه واسط بین جداره تایر و آج ← این ناحیه دارای انحنایی است که دیواره تایر را به آج آن متصل می کند. ضخامت بالای ناحیه شانه تایر، در دفع حرارت داخل تایر موثر است.

سطح تماس تایر با زمین بصورت بیضی شکل است که هرچه تماس غیریکنواخت‌تر باشد به بیضی نزدیک‌تر است و هر چه تماس یکنواخت باشد، برعکس آن، سطح تماس به مستطیل نزدیک‌تر است.

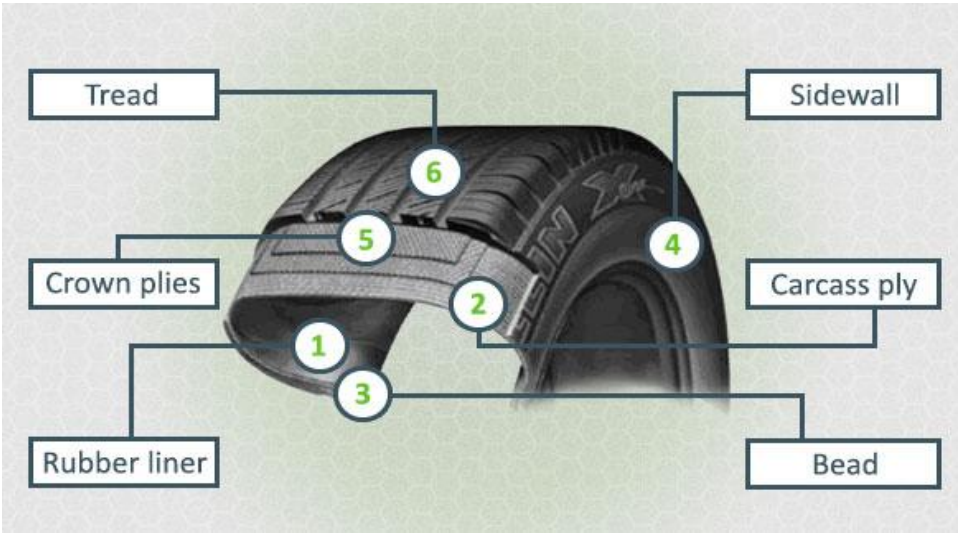
۱- Inner Liner: substitutes for the tube in the tire’s interior and consists of rubber layer with low air permeability. The rubber layer generally consists of butyl, synthetic rubber, or polyisoprene type. The main function of the inner liner is to hold high-pressure air inside.

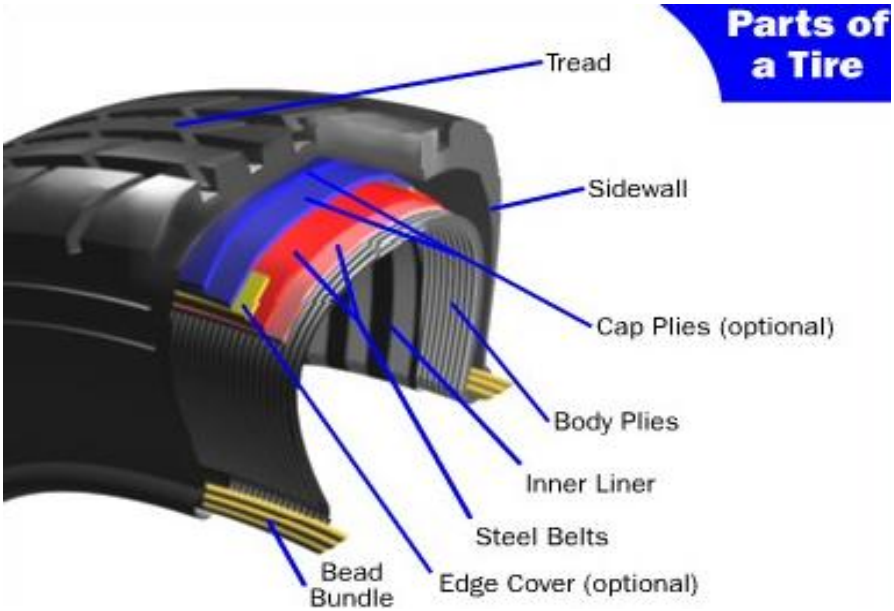
۲- Carcass: the framework of the tire. The carcass refers to all layers made up of tire cord. It absorbs the tire’s internal air pressure, weight and shock.

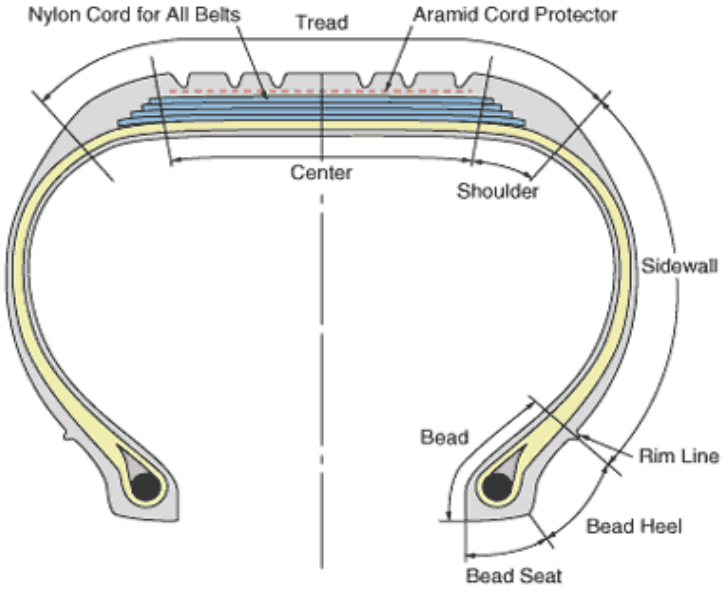
۳- Belt: a strong reinforcement layer located in the circumference in between the tread and carcass in radial tires. The belt’s function is to reinforce the tread by firmly tightening the carcass.

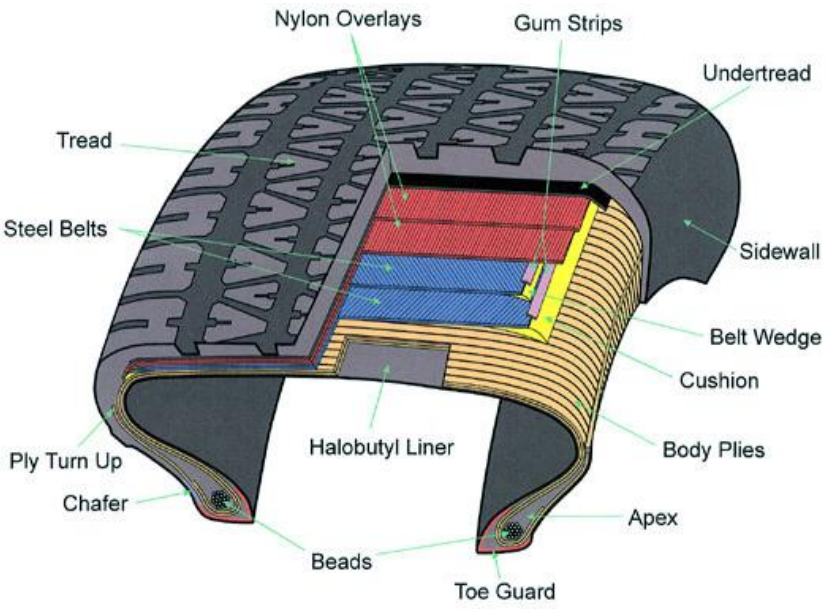
۴- Breaker: the layer in between the tread and carcass. The breaker is a cord layer placed in between the tread and carcass in a bias tire to protect the carcass. It absorbs external shock and prevents splintering or injury to the tread from coming into direct contact with the carcass. At the same time, the breaker prevents the separation of the rubber layer and carcass.

۵- Shoulder: Located between the tread and sidewall, the shoulder is the thickest part in a tire designed to quickly and easily dissipate heat that accumulates inside the tire while driving.


Tread
Sidewall
6
5
4
Crown plies
Carcass ply
2
1
3
Rubber liner
Bead


Parts of a Tire
Tread
Sidewall
Cap Plies (optional)
Body Plies
Inner Liner
Steel Belts
Bead Bundle
Edge Cover (optional)

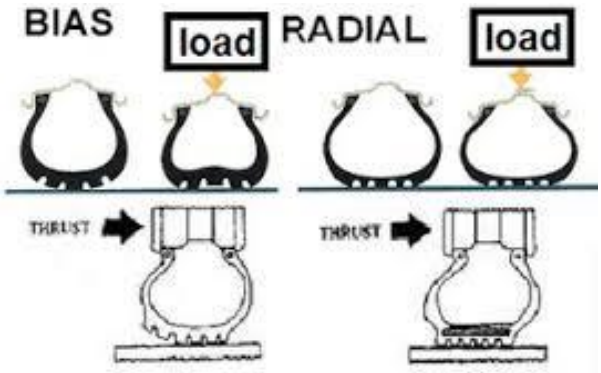

Nylon Cord for All Belts
Tread
Aramid Cord Protector
Center
Shoulder
Sidewall
Bead
Rim Line
Bead Heel
Bead Seat

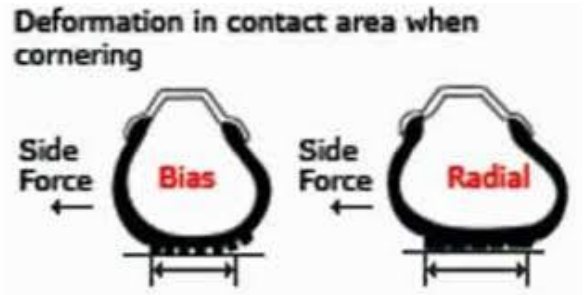


در تایر رادیال ← سطح تماس آج تایر همواره بصورت تخت و توزیع فشار یکنواخت تر است.

در Bias ← فشار بیشتری روی contact patch

در Radial ← فشار کمتری روی contact patch ← عمر بهتر





نکته: زاویه ی caster نسبت به camber در عملکرد تایر مهم‌تر است، از این جهت که تمام بارها بصورت عمودی به تایر وارد می‌شوند.

نکته: در برگشت فرمان ← نقش اصلی ← زاویه‌ی caster angle

Advantages of radial tires:

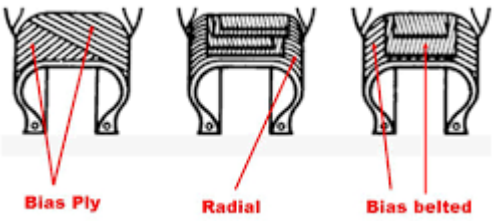
- Good steering and better road contact
- Improved driving comfort thanks to flexible side wall
- Little heat generated in tire at high speeds
- Higher resistance against tread-related damage

Disadvantages of radial tires:

- The tire generates more noise and vibration due to its harder tread
- The soft side walls are susceptible when, for example, vehicles collide with curbstones
- Minor bumps on road surfaces are dealt with less effectively because radial tires feature a steel belt

RADIAL TIRE	BIAS TIRE
Sidewall flex is not transmitted to the tread. The footprint only lengthens. There is little transversal slip. The radial tire allows the car to transfer more power to the ground.	All sidewall flex is transmitted to the tread. The footprint deforms and there is an increase in tire slip. The tire does not contact the ground as much as a radial tire, leading to a loss of engine power transmission.

در تایرهای بایاس، بلند شدن و تماس غیریکنواخت تایر با سطح جاده را با گذاشتن یک Belt تا حدودی اصلاح کرده‌اند که به این نوع تایرها Belted – Bias می‌گویند.



وظایف تایر:

۱- تحمل وزن خودرو

۲- جذب ضربات در سطوح ناهموار← که بیشتر تاثیر روی Ride دارد.

Air cushion

۳- فراهم آوردن نیروهای رانشی و ترمزی ←تاثیر روی performance

۴- فراهم آوردن کنترل مناسب عرضی و فرمان‌پذیری ← Handling

Ground vehicles

مسیر حرکت معین ← قطار و ...

مسیر حرکت آزاد ← خودروهای سواری سنگین، دوچرخه، ...

(خودروهایی که روی زمین حرکت می‌کنند)

از لحاظ نوع چرخ‌ها

تایر بادی pneumatic Tire

شنی و track و ...(برای سطوح طبیعی، نه جاده سخت)

بررسی مکانیک خودروهای دارای تایر بادی

سطح سخت (آماده شده) ← جاده ← Road (آسفالت، بتن، ...)

سطح زمین طبیعی و عوارض زمین ← off-road

(Terramechanics) ←intraction چرخ با سطح طبیعی و خاک

مباحث این درس عمدتاً متمرکز بر مکانیک تایر روی جاده است - Mechanics of Road Tires

تایر بایاس	crown angle $38-40^{\circ}$	y ↓ Handling	↑ Ride z	توزیع فشار نامناسب	Hysteresis ↑	دمای کاری بالاتر
تایر رادیال	crown angle 20°	y ↑ handling ↑ performance	↓ Ride z	توزیع فشار یکنواخت تر	Hysteresis ↓	دمای کاری پایین‌تر

تایر بایاس ← انعطاف‌پذیری بیشتر و جذب انرژی بیشتر ← Ride بهتر

تایر بایاس عمر کمتر	← خستگی بیشتر و دمای کاری بالاتر ساختار نرم و انعطاف پذیر	ارزانتر	F_{rr} ↑
تایر رادیال عمر بیشتر	ساختار صلب	گرانتر	F_{rr} ↓

نکات جدول: اتلاف توان تایرهای رادیال 60% اتلاف تایرهای بایاس است.

عمر مفید تایرهای رادیال حدود ۲ برابر تایرهای بایاس است.

Deformation یک ماده‌ی لاستیکی که تحت اعمال و برداشتن بار قرار میگیرد، پدیده‌ای را تجربه می‌کند ← **Hysteresis** یعنی اتلاف انرژی، لزوماً با تنش‌های پسماند در ارتباط نیست.

بنابراین همه‌ی انرژی که از طرف Drive train به تایرها منتقل می‌شود، بشکل انرژی جنبشی تبدیل نمی‌شود بلکه بخشی از آن بشکل سروصدا و گرما تلف می‌شود ← باعث بالا رفتن دمای تایرها می‌شود.

تایر بصورت آزاد می‌غلتد $\Rightarrow f_{rr}$ Rolling resistance ratio $f_{rr} = \frac{F_{rr}}{F_z}$ نسبت مقاومت غلتشی

سر خوردن یا لغزیدن تأثیرش بیشتر روی f_{rr} است, بخش عمده‌ای از f_{rr} مربوط به Hysteresis است.

1. Hysteresis (90-95%)
2. Sliding Friction (2-10%)
3. Movement of Air inside tire (1.5-3%)
4. Air pumping outside tire (1.5-3%)

نکته: در شروع حرکت Rolling Resistance زیاد است ولی با افزایش سرعت، کاهش می‌یابد و با ادامه افزایش سرعت، در سرعت‌های زیاد ممکن است مجدداً افزایش یابد.

تایر = کائوچو + الیاف (Rubber)

- طبیعی نخ – پنبه (cotton)
- مصنوعی Synthetic fibers
- فلزی steel / metal cords

کاهش crown angle باعث بهبود فرمان‌پذیری ولی در عین حال بدتر شدن Ride کیفیت سواری می‌شود.

* در خودروهای سنگین handling در راستای y مهم‌تر است و می‌توان Ride در جهت z را با صندلی‌های هیدرولیکی بهبود بخشید.

نیروهای اعمال شده روی تایر:

از دیدگاه تنش:

مؤلفه عمودی F_z

مؤلفه طولی F_x

مؤلفه عرضی F_y

F_Z: نیروهای عمودی که از سمت جاده به تایر وارد می شود که در اثر ضربه از طرف جاده به تایر نیروی F_Z افزایش می‌یابد.

نکته: تایر یک مقدار زاویه حول محور x دارد و لزوماً قائم نیست، راستای قرارگیری تایر با راستای خودرو یکی نیست.

α **زاویه‌ی side slip** ← زاویه‌ی چرخ با مسیر حرکت خودرو که امکان دارد صفر باشد ولی در بسیاری از اوقات صفر نیست.

Tire operation

- تفاوت‌های خودروهای on – Road و off – Road:

۱- رد پایی که از خودشان روی جاده می‌گذارند.

۲- تفاوت در جنس نیروهای بین زمین و تایر

الف) نیروهای چسبندگی بین تایر و زمین ← ناشی از تنش سطحی بین لاستیک و جاده

ب) نیروهایی که ناشی از یکسری گیرهای مکانیکی بوجود می ایند.

۳- الاستیسیته Elasticity ← اثر زبری جاده

در خودروهایOff – road ⇐ مقداری شکل adhesion و Elasticity تغییر می‌کند، که اثر Elasticity آن زیاد بالا نیست چون مقاومت و زبری جاده زیاد بالا نیست.

در این خودروها اگر رطوبت خاک در تماس با لاستیک از یک حدی بیشتر شود، خاک ما رفتار سیالاتی پیدا می کند.

نکته: نیروهای بین مولکولی زمانی که جنس دو ماده‌ی در تماس با هم تغییر کند این نیروها نیز تغییر می‌کنند، در خودروهای On Road Driving یکی از پدیده‌هایی که در قسمت adhesion روی آن بحث می‌کنند پدیده‌ی Hydroplaning است.

پدیده‌ی Hydroplaning: آج‌های روی تایر خودرو که وظیفه‌ی دفع آب را دارند، اگر این آب موجود روی جاده زیاد باشد یا آج ها ساییده شده باشند، به گونه ای که این Tread ها نتوانند آب سطح جاده را دفع کنند لذا یک لایه از آب دورتادور تایر بوجود می‌آید که در اینصورت اصطکاک لاستیک با سطح خشک به اصطکاک لاستیک با سطح خیس تبدیل می‌شود.

- ویژگی‌های مهم جاده‌های Off. Road:

۱- granulometry

۲- apparent density ← نمونه‌ای از خاکی که زیاد متراکم نشده و دارای ذرات هوا است.

۳- water content ← به جنس خاک هم بستگی دارد.

- **liquid limit** ← در اثر تنش برشی خاک حرکت می‌کند ← مقاومت برشی ندارد و اثر adhesion بین ذرات خاک از بین می‌رود ← مثل سیال عمل می‌کند.

حد بالایی water content 80% : در صدی که باعث می شود از این مقدار بیشتر, خاک ما رفتار سیال مانند داشته باشد.

- **Plastic limit** ← اگر رطوبت خاک از یک مقداری کمتر باشد، حالت پلاستیکی خود را از دست می‌دهد مثل یک جامد رفتار می‌کند که رد پای تایر رویش قرار نمی گیرد.

حد پایینی water content 30%

نکته: بین این دو حد, رد پای تایر روی خاک می تواند قرار بگیرد.

نکته: اگر **Plastic limit** رو بعنوان مبدأ در نظر بگیریم, از این مقدار بیشتر را با عنوان water humidity بیان می‌کنند.

- **Rolling Resistance** ← تعریف آن بصورت نیروی مقاومی است که به چرخ خودرو وارد می‌شود.

$\frac{F_{RR}}{F_z} = f_{rr}$ Rolling Resistance Ratio

در یک سرعت مشخص و با یک فشار باد تایر مشخص بعبارتی در یک شرایط خاص مثلاً می‌گویند f_{rr} برابر 0.002 است که مهم‌ترین عوامل مؤثر فشار باد تایر و سرعت خودرو است و به F_z هم بستگی دارد که چون تقسیم بر F_z می‌کنند اثر آن تقریباً از بین می‌رود.

نکته: F_{RR} و F_z را روی ۴ چرخ می‌شکنیم، که F_{RR} در محل contact patch در راستای طولی به تایر وارد می‌شود.

$T = F_x \times r$

نیروی F_{RR} را می‌توان به گشتاور مقاومت غلتشی تبدیل کنیم.

در مقاومت غلتشی تایر از سه پدیده سخن به میان می‌آید که جدا از هم نیستند و می‌توان گفت ماهیت آنها یکی هستند.

۱. FRR Rolling Resistance Force

۲. $\frac{F_{RR}}{F_Z} = f_{rr}$ Rolling Resistance ratio

۳. $T_{RR}=F_{RR}*r_{eff}$ Rolling Resistance Torque

نکته: تست F_{RR} را روی یک مسیر مستقیم (بدون حرکت جانبی) و مسطح (بدون شیب) انجام می‌دهند.

تایر خودرو در هنگام شتاب گیری و ترمز گیری در جهت x دچار تغییر شکل (فشردگی و کشیدگی) می‌شود که این باعث می‌شود توزیع نیروی عمودی در سطح contact patch بصورت غیریکنواخت باشد و لذا باعث ایجاد توزیع نامتقارنی از تنش عمودی در جهت z می شود که از همین تغییر شکل ماده‌ی لا ستیکی بوجود می‌آید. تغییر شکل لا ستیک، ایجاد پدیده‌ی هیسترزیس را به دنبال دارد که منجر به اتلاف انرژی و افزایش دمای تایر می‌شود. بدلیل توزیع نامتقارن نیروی عمودی در طول سطح تماس، می‌توان گشتاور مقاومی که حول مرکز تایر ایجاد می‌کند را بصورت گشتاور Rolling Resistance بیان نمود. تایر بطور مرتب تحت انقباض و انبساط قرار دارد و بدلیل مقاومت تایر، حتی در زمانی که بدون شتاب‌گیری و ترمزگیری با سرعت ثابت در حال حرکت است، دارای یک مقاومت غلتشی است که تمایل به کاهش سرعت خودرو دارد و این مقاومت غلتشی باید با گشتاوری از طرف قوای محرکه جبران شود تا سرعت خودرو ثابت بماند.

نکته: برای بدست آوردن محل اعمال برآیند نیروهای وارده به contact patch در حرکت تایر در مسیر مستقیم و هنگام دور زدن سر پیچ از این فرمول‌ها می توان استفاده کرد.

Longitudinal shift = rolling resistance moment (T_{RR}) / Normal Load (F_z)
(در مسیر مستقیم توزیع عرضی نیرو یکنواخت است)
Lateral shift = overturning moment (M_x) / Normal Load (F_z)
(سر پیچ توزیع عرضی غیر یکنواخت است)

نکته: اینکه در هنگام پیچ بسمت راست overturning moment تمایل به چرخاندن ماشین بسمت کدام طرف را دارد بستگی به زاویه ی caster و camber دارد.

سهم اجزای تایر در پدیده ی Hysterysis: (مطالعه روی کامیون با لاستیک رادیال)

- 75% ← carcass + Belt
- 13% ← Side wall
- 12% ← Shoulder
- 2% ← Bead

بنابر این می‌توان اینگونه جمع‌بندی نمود که نسبت مقاومت غلتش به عوامل زیر بستگی دارد:

۱- ساختار تایر؛ ۲- شرایط کاری (باد تایر، سرعت، دما، زبری جاده، جنس تایر)

نیروی مقاومت غلتشی فقط مربوط به اصطکاک جاده نیست. اگر چه بخش عمده‌ای از آن مربوط به تغییر شکل‌های تایر است، ولی مربوط به اصطکاک بلبرینگ، نیروهای ایرودینامیکی و ... نیز هست. برای محاسبه نیروی مقاومت غلتشی، خودرو در حالت خلاص قرار می‌گیرد و با بررسی تغییرات کاهشی سرعت خودرو در حالت غلتش آزاد تایرها می‌توان آن را حساب کرد.

در شروع حرکت از حالت سکون، مقدار ضریب مقاومت غلتشی افزایش می‌یابد و با سرعت گرفتن کاهش می‌یابد که برای تایرهای بایاس بیشتر است، و به دلیل آیرودینامیک هوا افزایش می‌یابد.

نکته: ضریب اصطکاک در سرعت بالای $20\frac{km}{h}$ فقط به جنس و ساختار تایر بستگی دارد.

Rolling power: میزان توانی که در اثر غلتش تایر هدر می‌رود (انرژی در واحد زمان)، در سرعت‌های معمول (تا 120 Km/h) لاستیک‌هایی که آج آنها از کائوچو مصنوعی درست شده است، نیروی مقاومت غلتشی، اصطکاک و در نهایت توان غلتشی آنها بیشتر است.

Grip ⇐ چسبندگی (چنگ زنی) تایر به جاده را می‌گویند. در تایرهایی با کائوچو مصنوعی چنگ زنی تایر بیشتر است که در نتیجه Road holding آن بیشتر است. البته معمولاً هر چقدر چسبندگی تایر به جاده بیشتر باشد، توان هدر رفته در اثر مقاومت غلتشی افزایش می‌یابد.

نکته: Grip منجر به Road holding می شود که مربوط به نیروی عمودی است.

Green Tire ← تایرهای مقاومت غلتشی پایین که باعث کاهش مصرف سوخت و آلایندگی کمتر می‌شوند.

نکته: درکامیون‌ها چون پروفایلشان ایرودینامیکی نیست، با افزایش سرعت، مقاومت غلتشی افزایش می‌یابد.

seal coat ← پلیمرهای بعضاً رنگی هستند که معمولاً در پیست‌های مسابقه‌ای از آنها استفاده می شود، پایه آنها قیر است ولی بعضی انواع آنها رنگی و بر پایه پلیمرهای دیگر هستند. برای افزایش ضریب اصطکاک، در نقاطی مثل سطح استادیوم‌های ورزشی، در نزدیکی محل عبور عابرین پیاده، برای سُر نخوردن خودرو، به دلیل سطح بسیار زبر آنها، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نکته: افزایش مقاومت غلتشی ← به افزایش باد تایرها و همچنین بار نامی آنها بستگی دارد.

نکته: با افزایش باد تایر ضریب مقاومت غلتشی کاهش و مقدار نیروی مقاومت غلتشی هم کاهش می‌یابد.

نکته: مهم‌ترین پارامترهای موثر در مقاومت غلتشی یک تایر میزان بار و سرعت آن است.

- ✓ Temperature index $A-C$
- ✓ Tread wear index $420 \rightarrow$ reference 100 (هرچقدر بیشتر باشد عمر آج تایر بیشتر است)

  Tread wear Index 500 خیلی خوب

  Tread wear Index 180 خیلی بد ← پایین‌تر از آن ← کاربردهای خاص ← مسابقه‌ای
- ✓ traction index A-C $A \rightarrow$ چسبندگی بالا
- ✓ rolling resistance این‌ها مهم‌ترند ولی بقیه بحث تجاری است ← بحث رقابتی

معمولاً هرچه traction بیشتر ⇐ wear index کاهش می‌یابد ← عمر کمتر

نکته: گاهی با افزایش باد تایر، تایر سفتر می‌شود و در خاک نفوذ می‌کند و اتلاف انرژی بیشتری دارد.

نکته: در مورد خاک‌های انعطاف‌پذیر که با افزایش بار، مقدار R.R افزایش می‌یابد برعکس جاده‌های سخت و غیرقابل نفوذ. خاک بتنی بهتر است.

Tread wear ←میزان سایش آج تایر

نکته: در تایر Bias با افزایش باد تایر، Tread wear آن کاهش می‌یابد.

نکته: مقاومت غلتشی می‌تواند مستقیماً باعث افزایش دمای تایر و درنتیجه باعث افزایش سایش آج شود.

نکته: در سرعت های بالا، تایر ممکن ا ست با پدیده‌ای بنام موج ای ستا[1] روبه رو شود. ساختار تایر پس از خارج شـــدن از تماس با زمین، زمانی را نیاز دارد تا تنش خود را آزاد کند و دوباره در دور بعدی تحت کشش و فشار قرار بگیرد که ممکن است در سرعت های بالا این فرصت را پیدا نکند. اگر تغییرات تنشهای وارده به تایر را بصورت موج تنش در نظر بگیریم، در سرعت مشخصی، محیط دور تایر ضریب صحیحی از طول موج تنش در دور تایر می شود و ا صطلاحاً موج تنش ساکن می شود؛ بنابراین مثلاً در پشت تایر که معمولاً تحت فشار ا ست، یک تغییر شکل دائمی بشکل فرورفتگی بوجود می‌آید. البته لازم به ذکر ا ست که در هر سرعتی، فرکانس موج مقدار مشخصی دارد و با کم یا زیاد شدن سرعت این پدیده رفع می‌شود. سـرعت آسـتانه[2] ایجاد موج ایسـتا V_{th} به جنس، سـفتی و فرکانس طبیعی تایر بسـتگی دارد. از آنجا که سفتی تایر به چگالی و میزان نیروی طولی (کششی) اعمال شده در تایر وابسته است، سرعت آستانه ایجاد موج ایستا از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$V_{th} = \sqrt{F_t / \rho_t}$$

۱- standing wave

۲- threshold velocity

از آنجا که تایر یک محیط پیوســـته اســـت، بی‌نهایت درجه آزادی دارد، لذا از آنجا که فرکانس طولی تایر با فرکانس موج تنش تداخل پیدا می‌کند و باعث ایجاد موج ایستا و تغییر شکل حاصل از آن می شود، در رابطه فوق فرکانس طبیعی محیطی تایر و نیروی طولی تایر مد نظر قرار می‌گیرد.

نکته: با افزایش دمای Shoulder، ضریب مقاومت غلتشی کاهش می‌یابد (مقاومت غلتشی بیشتر در سرما).

مقدار عددی ضریب مقاومت غلتشی در خودروهای سنگین کوچکتر است، چون بار وارد بر تایرها به مراتب بیشتر است، با تقسیم نیروی مقاومت غلتشی بر بار تایر، مقدار کوچکتری برای f_{rr} آن بدست می‌آید.

$f_{rr} \rightarrow C_{RR}$

خودروهای سواری

$$\text{Passenger Car Tires}\begin{cases}\text{Radial} & f_{rr} = 0.0136 + 0.40\times10^{-7}\,V^2\left(\text{Km}/\text{h}\right) \\ \text{Bias-ply} & f_{rr} = 0.0169 + 0.19\times10^{-6}\,V^2\left(\text{Km}/\text{h}\right)\end{cases}$$

$$\text{up to } 150\,\text{Km}/\text{h} = 93\ \text{mph}$$

خودروهای سنگین

$$\text{Truck Tires}\begin{cases}\text{Radial} & f_{rr} = 0.006 + 0.23\times10^{-6}\,V^2 \\ \text{Bias-ply} & f_{rr} = 0.007 + 0.45\times10^{-6}\,V^2\end{cases}$$

$$\text{up to } 100\,\text{Km}/\text{h} = 62\,\text{mph}$$