

مقاومت غلتشی (Rolling Resistance)

- در مباحث قبل عنوان شد که چه مقدار از مقاومت برشی خاک (ظرفیت کشندگی خاک) (H_m) را می توانیم به کشش بالفعل (H) تبدیل کنیم. آن چیزی که کشش ناخالص بالفعل را تبدیل به کشش خالط می کند، **مقاومت غلتشی** (Rolling resistance) است. بنابراین، باید مقاومت غلتشی را برآورد نمود.
- در تعریف کلی، مقاومت غلتشی نیرویی است که روی یک سطح تغییر فرم پذیر با حرکت رو به جلوی وسیله هنگامی که روی یک سطح می غلتد، مخالفت می کند.

این نیرو از تلفات انرژی منتج می شود که بواسطه عوامل زیر ناشی می شود:

- ۱- تغییر شکل الاستیک، لیکن غیر ایده آل چرخ
- ۲- تغییر شکل پلاستیک و برگشت ناپذیر سطح: Non-recoverable plastic def
- ۳- اصطکاک در یاتاقان های چرخ (که معمولاً از آن صرفنظر می شود).

مقاومت غلتشی

در واقع مقاومت غلتشی بیانگر **نرخ تلفات انرژی** است که یا در خاک صورت می گیرد و یا در لاستیک، زیرا لاستیک هم بخاطر تغییر فرم پذیر بودن آن مقداری از انرژی را هدر می دهد. به عبارت دیگر، بین خاک و وسیله گیرایی تلفات انرژی داریم.

بطور کلی هرچه مقدار **بار عمودی روی چرخ** بیشتر شود و یا مقدار **فرو رفتگی یا نشست** بیشتر شود، مقدار مقاومت غلتشی چرخ نیز بیشتر می شود.

$$R = \frac{W \cdot e}{r_0}$$

در چرخ بوکسیر شده ثابت کردیم:

آن چیزی که قابل مشاهده است و رؤیت است، فرونشینی و تراکم خاک و همچنین جمع شدن خاک جلوی چرخ است که وجود مقاومت غلتشی را نشان می دهد.

لازم به توضیح است که چرخ فقط یک نوع تنش را دریافت و حس می کند، لیکن برای تفهیم بهتر، تنش و نیروها به صورت مجزا در نظر گرفته می شوند.

به عبارت دیگر، چرخ برآیند **نیروی کشش (Tractive Force)** و **مقاومت غلتشی (R)** را عملاً با هم حس می کند، ولی برای درک بهتر، یکبار کشش ناخالص را محاسبه می کند و یکبار هم مقاومت غلتشی را و سپس از یکدیگر کسر می کنند تا کشش خالص (Net Traction) بدست آید.

مقاومت غلتشی

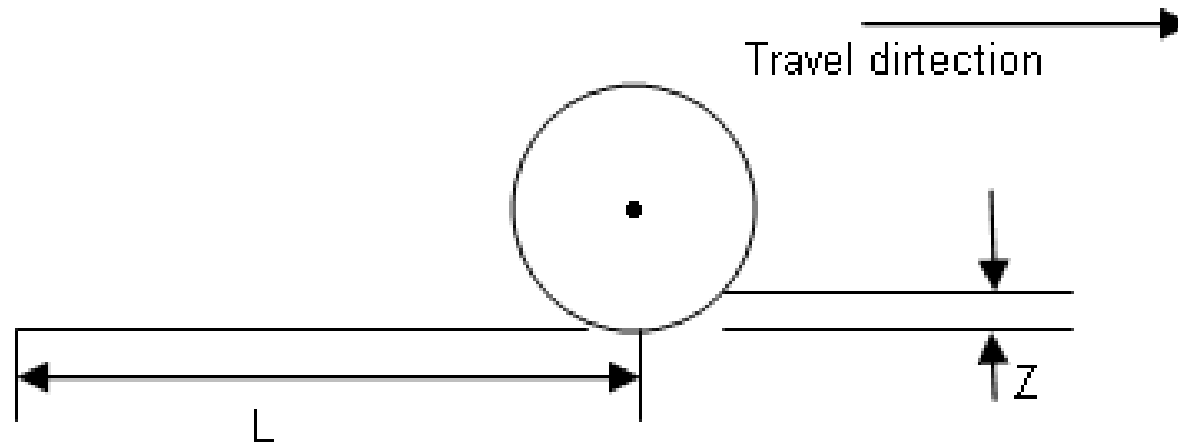
روش برآورد مقاومت غلتشی به شرح زیر است:

مقدار کاری که در مقابل مقاومت غلتشی انجام می شود تا وسیله گیرایی از یک نقطه به نقطه دیگر حرکت کند، مساوی مقدار انرژی قرار داده می شود که سبب تغییر فرم اعمال شده در خاک می شود.

با استفاده از این **تعالیل یا موازنه انرژی** (Energy balance)، مقاومت غلتشی (R) برآورد می شود. به بیان دیگر، مقدار انرژی صرف شده برای تغییر شکل خاک بازاء واحد مسافت پیموده شده تحت عنوان **مقاومت به حرکت** نامیده می شود:

$$\text{Motion resistance} = \frac{\text{Energy used to deform soil}}{\text{Distance moved}}$$

در این روش فرض بر این است که کار انجام شده فقط صرف فرورفتگی یا نشست ایجاد شده در خاک شده است.



مقدار کاری که در مقابل مقاومت غلتشی انجام شده تا وسیله گیرایی را به اندازه L در خاک جا به جا کند = مقدار انرژی که سبب فرونشینی در خاک شده است.

- با توجه به مطالب ذکر شده، واضح است که مقاومت غلتشی یک چرخ تابعی از خواص استحکام - تغییر شکل سطح و همچنین اندازه و مشخصه های تغییر شکل چرخ می باشد. در مورد چرخ های تایردار، عوامل مؤثر شامل فشار باد (inflation pressure)، ساختار گوشت تایر (tire carcass) که بصورت لایه شعاعی (radial ply) و یا لایه جانبی (bias ply) باشد و همچنین طرح آج (tread pattern) نیز می شوند.



Radial ply



Cross ply

Ply construction of tyres

با توجه به سرعت های مورد استفاده با تراکتورهای کشاورزی،
مقاومت غلتشی تقریباً مستقل از سرعت تغییر خاک و تایر و در
نتیجه سرعت پیشروی است.

مسئله تعیین مقاومت غلتشی یک چرخ محرک با وجود لغزش خیلی
پیچیده تر بوده و در این درس بحث نمی شود.

$$\int_0^Z F dz = Rl$$

با توجه به تعریف مقاومت غلتشی داریم:

به عبارت دیگر، وسیله گیرایی معادل یک صفحه با سطح A فرض می شود که A در اینجا همان bl است.

$$\int_0^Z PA dz = Rl$$

A که ثابت است و فقط باید تابع فشار P بر حسب Z معلوم باشد که از معادله Bekker استفاده می شود:

$$A \int_0^Z \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) Z^n dz = Rl$$

$$A=2bl$$

۱- تراكتورهاي چرخ زنجیری:

$$\longrightarrow 2bl \int_0^{Z_0} \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) Z^n dz = Rl$$

$$2(K_c + bK_\phi) \int_0^{Z_0} Z^n dz = R$$

$$R = \frac{2(K_c + bK_\phi) Z_0^{n+1}}{n+1} \quad \text{I}$$

این رابطه یک اشکال دارد، زیرا یک رابطه معمولاً برحسب پارامترهای قابل اندازه گیری نوشته می شود، البته هرچند مقدار فرونشینی قابل اندازه گیری است، ولی بهتر است برحسب ابعاد وسیله باشد تا قبل از وارد شدن در خاک (يك خاك مشخص) بتوان R را تعیین کرد. به عبارت دیگر، بهتر است برحسب پارامترهای ماشین و خاک باشد.

بنابراین، یک بار دیگر معادله Bekker را می نویسیم:

$$P_z = \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) Z^n$$

اما: $P = W/2bl$

$$\rightarrow Z_0 = \left[\frac{W}{2bl \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right)} \right]^{\frac{1}{n}}$$

در نتیجه Z_0 را بر حسب ابعاد وسیله و پارامترهای خاک بدست آوردیم.

$$\rightarrow R = \frac{2b}{2bl \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right)^{\frac{1}{n}}} \left(\frac{W}{2bl} \right)^{\frac{n+1}{n}}$$

$$R = \frac{2}{(n+1) \left(K_c + bK_\phi \right)^{\frac{1}{n}}} \left(\frac{W}{2l} \right)^{\frac{n+1}{n}}$$

مقاومت غلتشی

این رابطه در حالتی صادق است که توزیع فشار زیر چرخهای زنجیری **یکنواخت** باشد $(P=w/2bl)$ ، ولی در عمل اینطور نیست و توزیع فشار به صورت **خطی** تغییر می کند:

$$P_{max} = 2P_{ave} = 2 \left(\frac{W}{2bl} \right) = \frac{W}{bl}$$

همانطور که اشاره شد Z_0 بازاء P_{max} حاصل می شد و در رابطه Bekker بجای متغیر Z ، مقدار Z_0 را قرار دادیم. چون خطی بودن فشار واقعی تر است ، بهتر است $P_{max}=w/bl$ را در نظر بگیریم و Z_0 را بر مبنای این فشار بدست آورده و در رابطه **I** قرار دهیم.

در نهایت با بدست آوردن **R** و کسر آن از **کشش ناخالص** (gross traction) که قبلا توضیح داده شد، **کشش خالص** بدست می آید.

مقاومت غلتشی

۲- تراکتورهای چرخ لاستیکی:

اکنون سؤال مطرح شده این است که آیا می توان از این روابط برای چرخهای لاستیکی هم استفاده کرد؟

دلیل مطرح شدن این سؤال این است که روابط ارائه شده برای سطح صاف بودند. در مورد چرخهای لاستیکی عاملی که تعیین می کند سطح تماس چرخ با خاک صاف است یا خیر، فشار باد لاستیک است.

به عبارت دیگر، عامل دیکته کننده که چرخ را بتوان صلب فرض کرد یا اینکه چرخ دچار خوابیدگی شده و بر روی سطح خاک پهن می شود، **فشار باد لاستیک** است.

روش نیمه تجربی

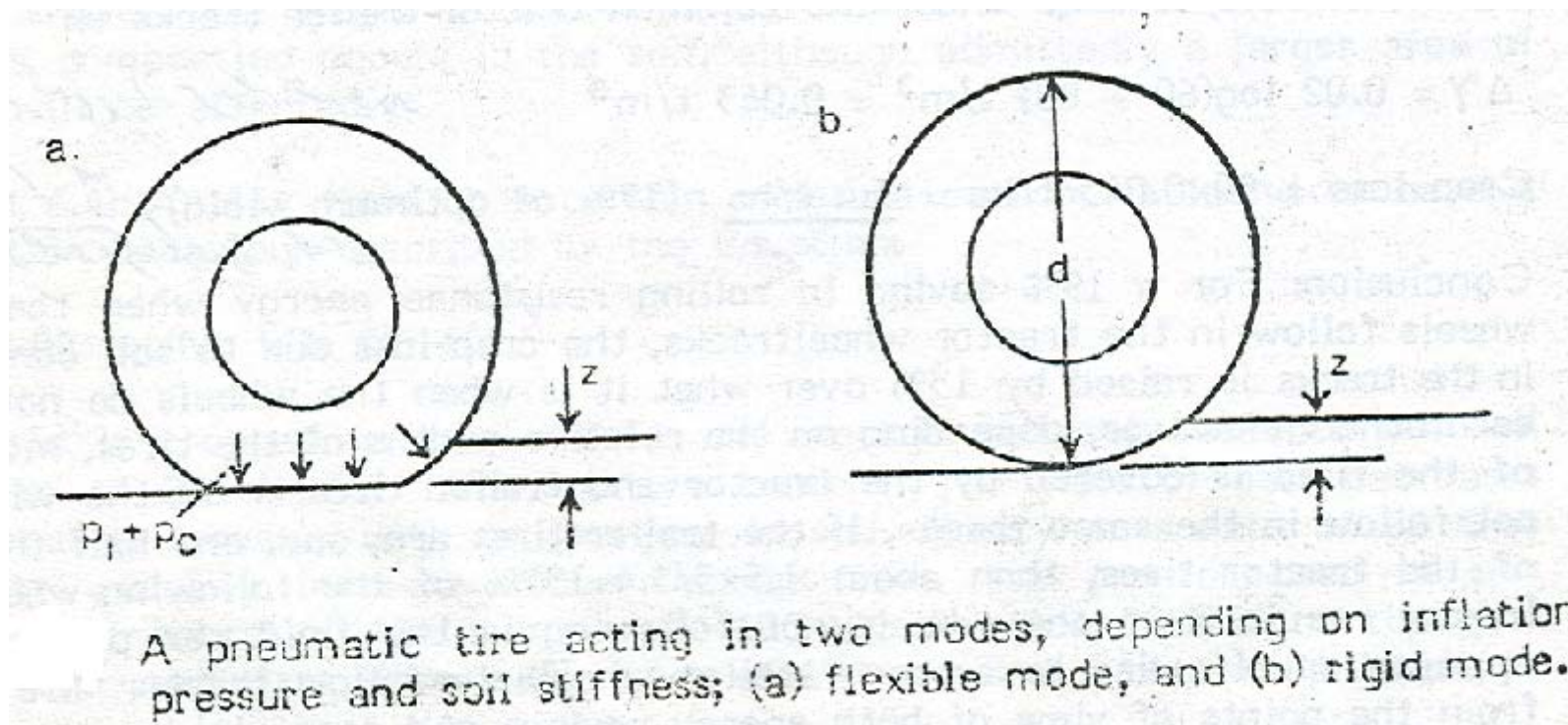
برای این منظور Bekker یک **فشار بحرانی** به صورت زیر تعریف کرده است:

$$P_{critical} = \frac{(n+1)W}{b\sqrt{dZ_0 - Z_0^2}}$$

$$P = P_i + P_c$$

where, P_c is the tire body or carcass stiffness pressure

روش نیمه تجربی



اگر فشار کمتر از فشار بحرانی باشد، **چرخ انعطاف پذیر (flexible tire)** فرض می شود (شکل a) و در غیر این صورت، **چرخ صلب (rigid tire)** فرض می شود (شکل b).

مقاومت غلتشی

- در مورد **چرخ انعطاف پذیر** مشابه روند قبل برای تراکتورهای چرخ زنجیری عمل می شود و برای يك چرخ لاستیکی رابطه به صورت زیر در می آید:

$$R = \frac{b}{(n+1) \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right)^{\frac{1}{n}}} \left(\frac{W}{bl} \right)^{\frac{n+1}{n}}$$

- اما در مورد **چرخ صلب**، Bekker نشان داد که مقدار نشست بیشتر از مقدار آن برای چرخ انعطاف پذیر است و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Z_0 = \left[\frac{3W}{(3-n)b \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) d^{1/2}} \right]^{\frac{2}{2n+1}}$$

روش نیمه تجربی

بنابراین، در مورد تایلر صلب دیگر نمی‌توان از روابط قبل برای محاسبه مقاومت غلتشی استفاده کرد و در نتیجه R یک تایلر صلب از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\left[\frac{3W}{\sqrt{d}} \right]^{\frac{2n+2}{2n+1}}}{\left[(3-n)^{\frac{2n+2}{2n+1}} \right] (n+1) (K_c + bK_\phi)^{\frac{1}{2n+1}}}$$

البته سطح تماس بستگی به مقاومت نسبی سطح خاک و مقاومت چرخ دارد. اگر خاک نرم باشد، تایلر انحنای خودش را حفظ می‌کند و صلب می‌ماند، ولی اگر خاک سخت باشد، چرخ تغییر فرم می‌دهد.

● تئوری McKyes

- رهیافت دیگر برای توسعه یک رابطه پیش بینی کننده (برآورد کننده) مقاومت غلتشی توسط McKyes ارائه شد. بر طبق این تئوری مقاومت غلتشی که از آن به عنوان انرژی تلف شده حین درگیری تعبیر می شود، متناسب است با بار وارده بر چرخ، نشست خاک و نسبت معکوس دارد با قطر خارجی چرخ.
- این تئوری بر اساس تجارب Mckibben و Davidson توسعه یافت. هم چنین یک مولفه دیگر برای در نظر گرفتن تاثیر تغییر شکل تایلر و مقاومت بر روی سطح سخت به صورت زیر اضافه شده است:

$$R = \left[\frac{Z + \delta_t}{d} \right] W$$

که δ_t بیشینه خوابیدگی تایلر است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{cases} \delta_t \cong 0.02 d \\ \delta_t \cong 0.04 d \end{cases}$$

$(P_t \gg 100 \text{ kPa})$ برای تایلرهای کامیونی خارج از جاده

$(P_t \leq 100 \text{ kPa})$ برای تایلرهای با فشار کم

- با استفاده از معادله Bekker برای نشست تیرهای انعطاف پذیر، معادله فوق برای محاسبه R می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$P = KZ^n \Rightarrow \frac{W}{bl} = KZ^n \Rightarrow Z = \left(\frac{W}{blk}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\Rightarrow R = \left\{ \frac{1}{d} \left[\frac{W}{blk} \right]^{\frac{1}{n}} + \frac{\delta_t}{d} \right\} W = \frac{W^{\left(\frac{n+1}{n}\right)}}{d(blk)^{1/n}} + \frac{\delta_t W}{d}$$

- در حقیقت اولین بخش از معادله فوق که شامل سفتی خاک است، همان معادله Bekker خواهد بود در صورتی که:

$$l = \frac{d}{n+1}$$

$$\xrightarrow{d=(n+1)l} R = \frac{\left(\frac{W}{l}\right)^{\frac{n+1}{n}}}{(n+1)(K_c + bK_\phi)^{\frac{1}{n}}} + \frac{\delta_t W}{d}$$

روش نیمه تجربی

از طرف دیگر اگر طول سطح تماس تایر (l) نصف قطر تایر (d) در نظر گرفته شود، معادله فوق به صورت زیر در خواهد آمد:

$$l = \frac{d}{2} \Rightarrow R = \frac{\left(\frac{2W}{d}\right)^{\frac{n+1}{n}}}{(bk)^{\frac{1}{n}}} + \frac{\delta_t}{d} W = \frac{b p^{\frac{n+1}{n}}}{2k^{\frac{1}{n}}} + \frac{\delta_t W}{d}$$

این روابط معادله های ساده ای برای پیش بینی و برآورد R هستند که همان روند رفتار فیزیکی که قبلا بدان اشاره شد را نشان می دهند، به طوری که مقاومت غلتشی با نیروی عمودی، نرمی خاک ($1/k$) و پهنای تایر در شرایط فشار تماس ثابت (P)، افزایش می یابد. همچنین مقاومت غلتشی با قطر تایر کاهش می یابد.

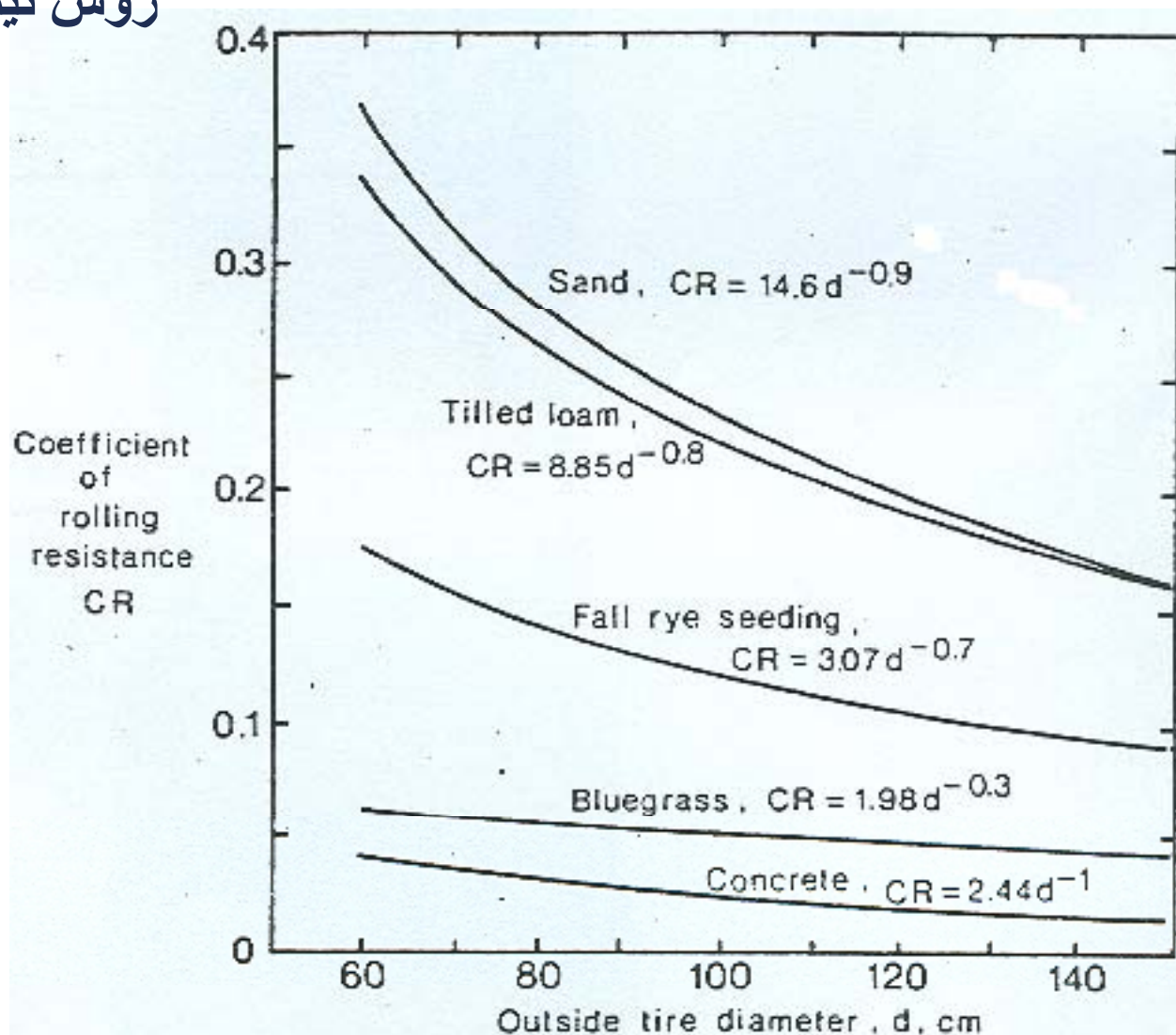
- به طور کلی این تئوری ها برای چرخهای صلب و یا غیر صلب (انعطاف پذیر) ارائه شده اند. برای حالت بینابین از جداول و منحنی ها استفاده می شود که در آنها ضریب مقاومت غلتشی (coefficient of Rolling Resistance) یا CR داده شده است و با ضرب کردن در W ، مقاومت غلتشی به دست می آید:

- $\rho = CR = R/W$

Industry guidelines for the coefficient of rolling resistance (ratio of rolling force to wheel load) on soils of different stiffness (Caterpillar, 1968).

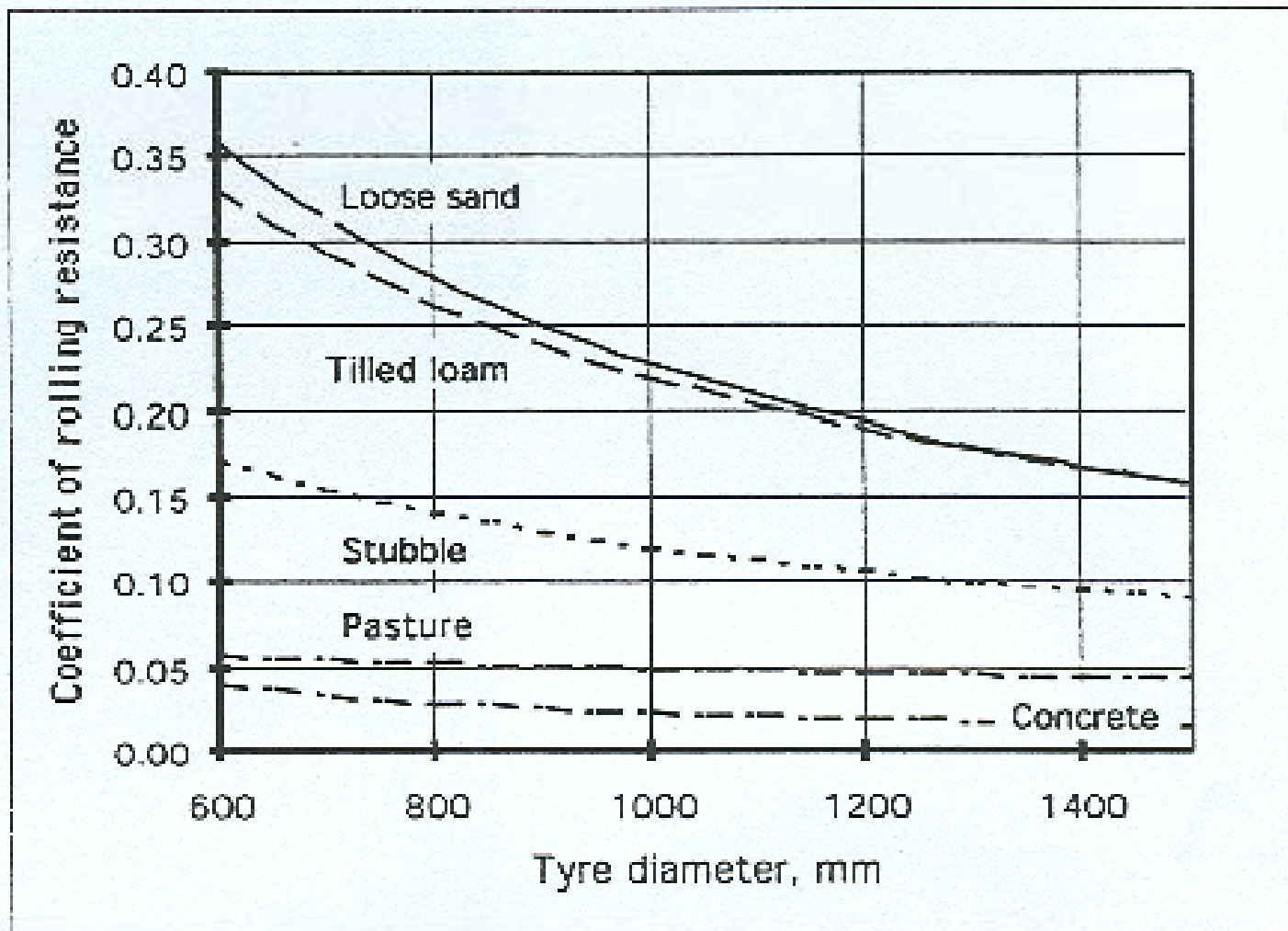
Surface	Sinkage cm	R/N
Hard smooth roadway	0	0.020
Firm dirt roadway	Slight	0.035
Dirt roadway	2.5-5	0.050
Rutted dirt roadway	10-15	0.075
Soft muddy road or sand	20	0.1-0.2

روش نیمه تجربی



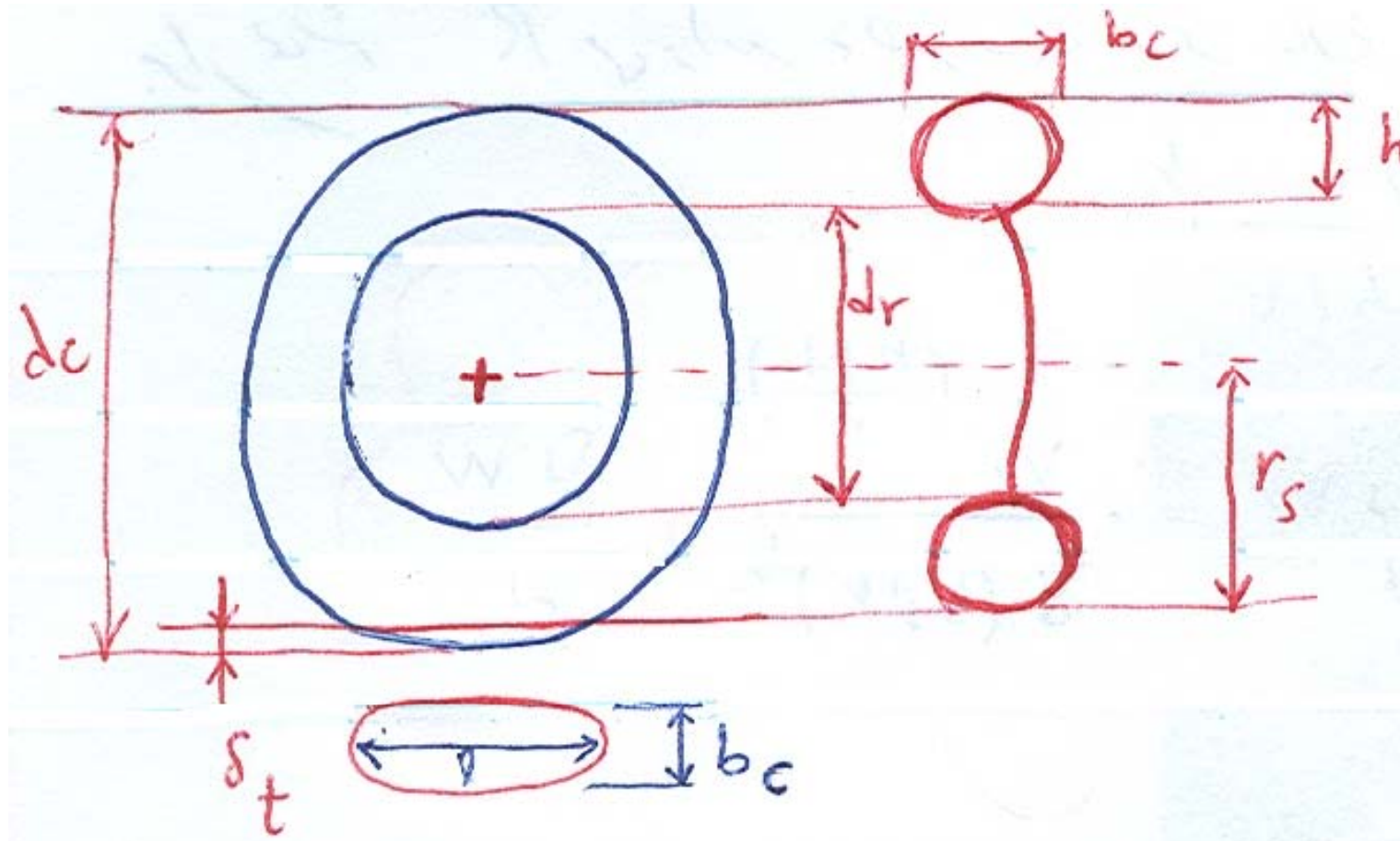
Average coefficients of rolling resistance, R/N , for 16 tires on five field and road surfaces, versus tire outside diameter. Most of the tests were conducted at a tire inflation pressure of 100 kPa (McKibben and Davidson, 1940b). By permission of the Publisher.

روش نیمه تجربی



Rolling resistance of agricultural tyres of different diameter on various surfaces.
Reproduced from McKibben and Davidson (1940) with permission of the
American Society of Agricultural Engineers

- **Terminology for tractor tires and rims**



d_c : **overall tire diameter or catalogue diameter**

b_c : **tire width**

h : **section height**

δ_t : **tire deflection**

خوابیدگی تایر که معمولا برحسب درصدی (۲۰ تا ۲۵٪) از بلندی مقطع لاستیک داده می شود.

d_r : **rim diameter**

r_s : **static rolling radius $\approx 0.5 d_r + 0.8 h$**

h/b_c : **aspect ratio**

نسبت مقاطع که اگر نداده باشند برای تایرهای معمولی تقریبا برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می شود.

l : **contact length**

b_c : **contact width**

چنانچه ذکر نشود، برای برآورد طول سطح تماس l از رابطه تجربی زیر استفاده می شود:

$$l \approx 0.31d_c$$

- اینکه گفته شد، اندازه لاستیک روی Traction موثر است، بخاطر همین روابط تجربی است، چون اندازه لاستیک روی I موثر است و H_f هم وابسته به I بود.

چند مثال در مورد اندازه لاستیکها در سیستم های ابعادی مختلف:

13.6/12 - 38

- h و b_c را داده است، بنابراین نسبت مقاطع مشخص است، اگر نداده بود برابر 0.85 می گرفتیم تا h بدست آید (حالت پائین)

13.6 - 38

- عدد اول b_c و عدد آخر d_r است.

480/70 R 34

- قطر طوقه 34 اینچ است. زیرا منطقی نیست که 34 سانتی متر، میلی متر یا متر باشد.

عدد 70 نسبت مقاطع را نشان می دهد که 70 درصد یا 0.7 است.

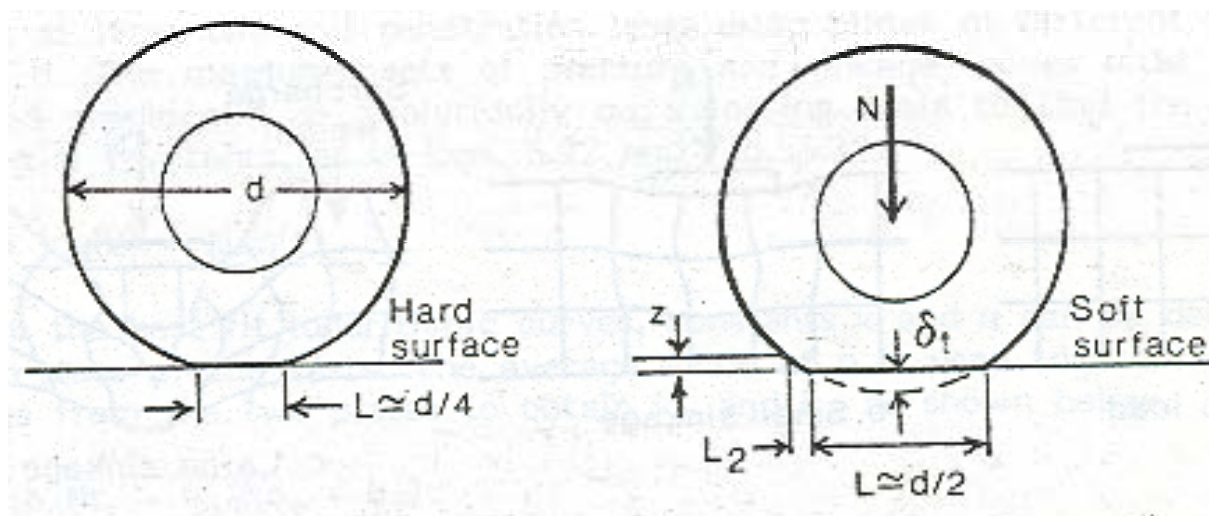
600 - 26.5

عدد اول عرض تایر برحسب میلی متر و عدد دوم قطر طوقه برحسب اینچ است.

برآورد سطح تماس (estimation of contact area)

در مورد وسایل چرخ زنجیری (tracked vehicles)، سطح تماس بین ماشین و سطح زمین نسبتاً با تغییر نشست در خاک ثابت است و تغییر نمی کند و برابر است با طول شنی بر روی زمین سخت ضربدر پهنای شنی.

اما در مورد چرخ لاستیکی ها، یک تایلر انعطاف پذیر، دارای سطح تماس کوچکتری بر روی سطوح سخت در مقایسه با زمین نرم دارد که در شکل زیر نشان داده شده است:



- به عنوان یک قانون سرانگشتی می توان از رابطه زیر برای محاسبه سطح تماس می توان استفاده کرد:

$$A=bl$$

که b ، پهنای مقطع تایر (tire section width) است.

$l=d/4$ برای سطوح سخت و $l=d/2$ برای سطوح نرم ($z>0.05d$)

- Bekker پیشنهاد کرد که طول تماس تایر با زمین را می توان به صورت تقریبی زیر برآورد نمود:

$$l = \frac{w}{b(P_i + P_c)} - \frac{l_2}{(n + 1)}$$

که P_i ، فشار باد تایر و P_c مولفه فشار تماسی ناشی از سفتی گوشت لاستیک است.

- علاوه بر این، Wong در سال ۱۹۷۸ و Bekker در سال ۱۹۸۵ یک روش تقریبی برای محاسبه طول l برحسب بیشینه خوابیدگی تایلر (شکل فوق) ارائه کردند:

$$l = 2\sqrt{(d\delta_t - \delta_t^2)}$$

یکی از این روش ها برای برآورد نمودن طول تماس تایلر به منظور پیش بینی Traction thrust و هم چنین پیش بینی نشست تایلر لازم و مورد احتیاج است.