

نیروهای وارد بر یک چرخ صلب (Forces acting on a rigid wheel)

برای اینکه تغییر شکل چرخ را نادیده بگیریم، آن را یک **جسم صلب** فرض می‌کنیم. به عبارت دیگر، هر تغییری که اتفاق می‌افتد در داخل خاک صورت می‌گیرد (تغییر فرم) و بنابراین راحتتر آنالیز می‌شود.

چرخ ها چندین حالت می توانند داشته باشند:

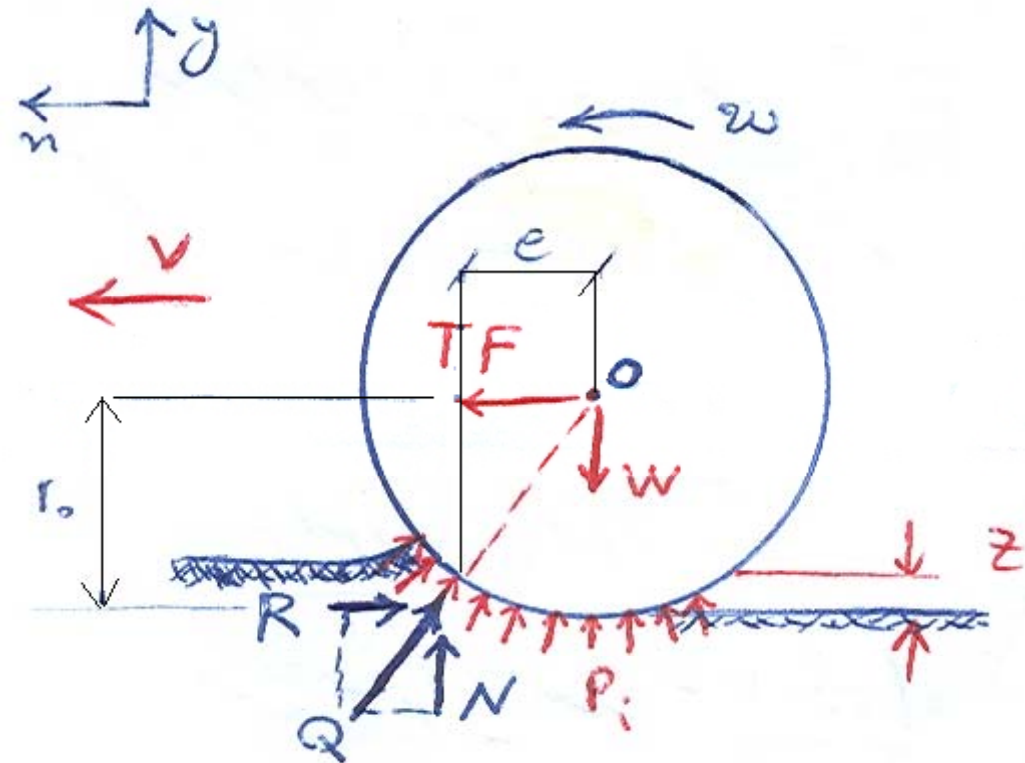
A- Wheel being towed

● چرخ بوکسیر شده

● در این حالت چرخ یا تایر یک وسیله زمین گیرایی نمی باشد و فقط **چرخ حمل و نقل** محسوب می شود (Transport wheel).

● به عنوان مثال وقتی تراکتور یک تریلی را می کشد، وضعیت چرخ های تریلی یک چرخ بوکسیر شده (حمل و نقل) می باشد.

● یا در تراکتورهای دو چرخ محرک (2WD)، چرخهای جلو که چرخهای فرمان هستند، جزء چرخهای بوکسیر شده محسوب می شوند. چون گشتاوری به محور آنها وارد یا اعمال نمی شود.



W =dynamic load

T_F = Towing force

T_F : نیرویی است که چرخ را بوکسیر کرده و سبب حرکت آن می شود.

P_i =soil pressure normal to wheel

P_i در اثر اعمال نیروها و در نتیجه عکس العمل زمین، یکسری فشار بین زمین و چرخ توزیع میشود که به آنها **فشار خاک عمود بر چرخ** می گویند که عمود بر چرخ بوده و امتداد تمام آنها از مرکز می گذرد.

- اگر برآیند نیروهای فشاری را تجزیه کنیم، به دو مولفه تبدیل می شود، که یکی عکس العمل بار دینامیکی عمودی اعمال شده است و برای تحمل نمودن آن است:

N= supporting force

- دیگری مولفه افقی است که عکس العملی است که در مقابل حرکت به سمت جلو مقاومت می کند:

R= rolling resistance

Q= resultant of all forces in the soil traction interface (contact surface)

Q برآیند تمام نیروهای فشاری از طرف خاک.

- بنابراین اگر چرخ بوکسیر شده باشد، تنها نیرویی که ظهور می کند همان تنش های عمودی یا فشاری هستند که امتداد آن ها از مرکز می گذرد.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow T_F - R = 0 \rightarrow T_F = R$$

- بنابراین برای اندازه گیری مقاومت غلتشی در یک شرایط خاص (**W معلوم و شرایط دیگر هم همان شرایط مورد نظر باشد**)، T_F را اندازه گیری می کنیم که برابر با مقاومت غلتشی **R** است.

- به عبارت دیگر، نیروی بوکسیر کننده ای که برای کشیدن و به حرکت در آوردن چرخ اعمال می کنیم، باید حداقل برابر مقاومت غلتشی چرخ باشد و در واقع هنگامی که نیروی اعمال شده بر مقاومت غلتشی غلبه کند، چرخ شروع به حرکت می کند.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow N - W = 0 \rightarrow N = W$$

- در نتیجه، مولفه عمودی برآیند نیروهای اعمال شده در سطح مشترک چرخ و زمین برابر است با بار دینامیکی وارد شده بر چرخ.

- پس تنش ها طوری در سطح مشترک اعمال می شوند که **N** (مولفه عمودی) برابر با **W** شود.

$$\sum M_o = 0 \rightarrow R \times r_o - N \times e = 0 \rightarrow R \times r_o - W \times e = 0 \rightarrow e = \left(\frac{R}{W} \right) \times r_o$$

R/W را نسبت مقاومت غلتشی (**rolling resistance ratio**) تعریف می کنیم و با ρ نمایش می دهیم:

$$\rho = \frac{R}{W} \longrightarrow e = \rho \times r_o$$

e: بیانگر آن است که برآیند نیروهای فشاری به این مقدار به سمت جلو جابجا میشود.

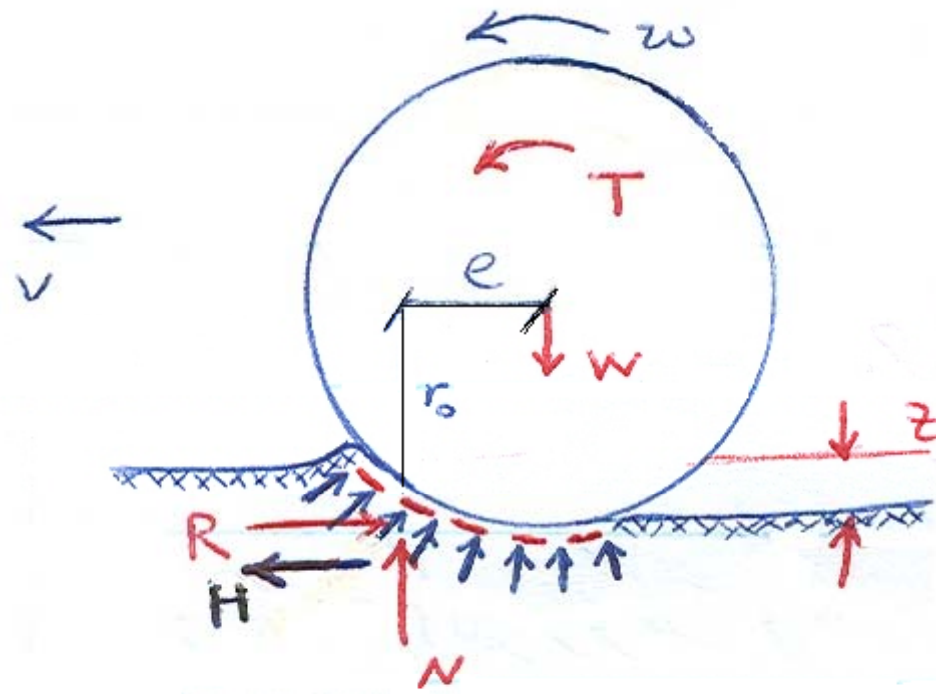
r_o: تفاوت چندانی با شعاع چرخ ندارد. به عبارت دیگر، وقتی چرخ صلب فرض می شود، شعاع غلتشی برابر با شعاع چرخ در نظر گرفته می شود.

• وقتی گشتاور به محور چرخ اعمال نشود، امتداد برآیند نیروهای فشاری (**Q**) از مرکز چرخ می گذرد، چون باید:

$$\sum M_o = 0$$

چرخ خود گردان

B- Self-propelled wheel (traction wheel with zero pull)



مطابق شکل، در این حالت دو سری تنش در سطح مشترک چرخ و زمین اعمال می شود: **تنش های مماسی و تنش های شعاعی.**

در حالت قبل (چرخ بوکسیر شده)، فقط تنش شعاعی داشتیم.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow H - R = 0 \rightarrow H = R \quad \text{pull}=0$$

- **H** هنگامی ایجاد شد که گشتاور به محور چرخ اعمال شد که به آن گشتاور ورودی (**input torque**) می گویند.

- بنابراین، **H** هرچه هست ، همان عکس العمل زمین در برابر چرخ است، در مقابل گشتاور ورودی و به عبارت دیگر همان **tractive force** یا نیروی کشندگی است که در سطح تماس چرخ و زمین به وجود می آید.

- بنابراین، در حالت چرخ خودگردان برای به حرکت در آمدن، کافی است نیروی کشندگی برابر مقاومت غلتشی شود و یا به قدری تنش مماسی تولید شود که **H=R** شود.

نکات به صورت خلاصه:

H منبعث از گشتاور اعمالی یا ورودی به محور چرخ است.

در وضعیت خودگردان به قدری تنش مماسی تولید میشود که **H** برابر **R** شود.

و این نیروی پیش برنده زمانی ظهور پیدا کرد که تنش مماسی بوجود آمد و تنش مماسی هم وقتی ظهور کرد که گشتاور به محور چرخ اعمال شد.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow N - W = 0 \rightarrow N = W$$

این رابطه مشابه چرخ بوکسیر شده است.

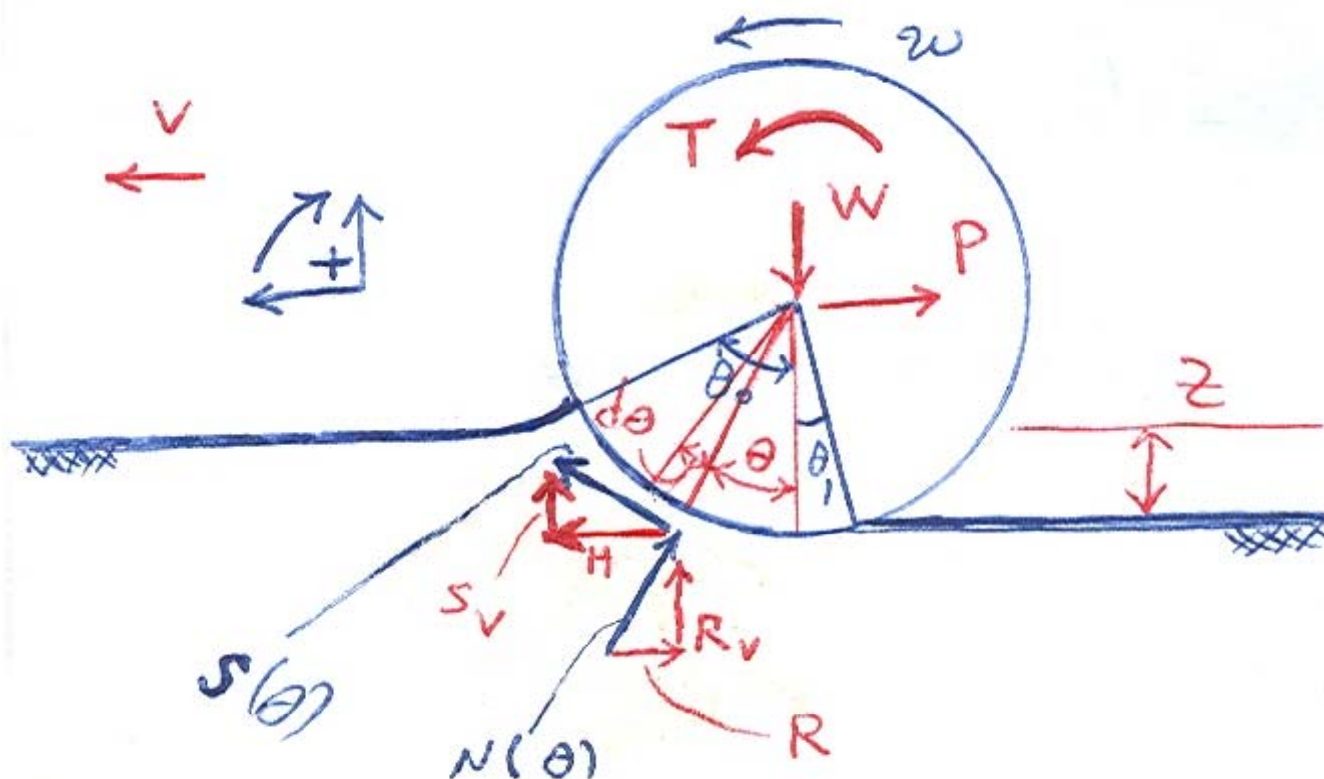
$$\sum M_o = 0 \rightarrow T - N \times e + R \times r_o = 0 \rightarrow T - N \times e = 0 \rightarrow T = N \times e = W \times e$$

$$e = \frac{T}{N} = \frac{T}{W}$$

- **Rotational energy = Torque $\times$ Rotational displacement**

$$\longrightarrow E_R = W \times e \times 2\pi.r_0$$

چرخ محرک با کشش



- وقتی تراکتور حرکت می کند و یک بار را می کشد، چرخ بار را به عنوان یک نیروی مقاوم احساس می کند و چون اتصال مالمبندی (وسایل کششی) و اتصال سه نقطه (وسایل نیمه سوار و سوار) به شاسی تراکتور وصل است، مثل این است که یک نیروی مقاوم به چرخ اعمال می شود.

P= net tractive force (NT)

- نیرویی است که روی اتصال سه نقطه و مالبند است و برای ما کار انجام می دهد و مفید است، ولی همین نیروی P برای چرخ یک نیروی مقاوم است، به عبارت دیگر:

R= resisting force experienced by the wheel from vehicle (tractor) itself

H= gross thrust or gross tractive force (GT)

- نیروی پیش برنده ای است که در سطح تماس چرخ و زمین (soil traction interface) ایجاد می شود و **نیروی کشش ناخالص** نامیده می شود. آن چیزی که در پشت تراکتور قابل دریافت است ، نیروی کشش خالص است.

T= torque driving the wheel

r_o = static rolling radius

e= moment arm of the supporting force about wheel center

- بازوی گشتاور نیروهای حمایت کننده (N) نسبت به مرکز چرخ

Z= depth of rut made by the wheel (sinkage)

- در شکل مبدا اندازه گیری زاویه ها خطی است که مرکز را به صورت عمودی به پایین چرخ وصل می کند.

زاویه ورود چرخ $\theta_0 = \text{entry angle of the wheel}$

زاویه خروج چرخ $\theta_1 = \text{exit angle of the wheel}$

- این دو زاویه حدود سطح تماس چرخ با زمین را نشان می دهند. چون برای تبدیل تنش به نیرو، باید سطح را مشخص کنیم و در آن ضرب کنیم.
- همچنین حدود انتگرال معین را در موقع انتگرال گیری سطح مشخص می کنند.

- در بحث های قبل اشاره شد که دو نوع تنش ایجاد می شود: یکی **تنش عمودی** و دیگری **تنش مماسی**:

$S(\theta)$ = tangential stress

$N(\theta)$ = normal stress

تنش های **$N(\theta)$** و **$S(\theta)$** مقادیر ثابتی نمی باشند و در هر لحظه بستگی به مقدار **θ** دارند.

تنش های مماسی در واقع ناشی از عکس العمل زمین در مقابل گشتاور ورودی به محور چرخ هستند.

$N(\theta)$ و **$S(\theta)$** در هر نقطه متوسط تنش در عرض چرخ می باشند.

- $S(\theta)$ تنش مماسی است، ولی به علت ویژگی سطح دو مولفه دارد، یکی H (مولفه افقی) و دیگری S_v (مولفه عمودی).
- وقتی گشتاور به محور چرخ اعمال می شود، عکس العمل زمین در مقابل گشتاور اعمالی، به صورت تنش مماسی ظاهر می شود، که یکی از مولفه های این تنش مماسی، یعنی مولفه افقی آن (H) به صورت نیروی پیش برنده عمل می کند:

$H = \text{tractive force (thrust)}$

کشش ناخالص

$$H = b \times r \int_{\theta_1}^{\theta_0} (s(\theta) \cos \theta) d\theta$$

- مولفه دیگر تنش مماسی نیز به صورت نیروی حمایت کننده در می آید:

$S_v = \text{tangential supporting force}$

نیروی حمایت کننده مماسی

$$S_v = b \times r \int_{\theta_1}^{\theta_0} (s(\theta) \sin \theta) d\theta$$

تنش عمودی $N(\theta)$ هم دو مولفه دارد، یکی افقی هست (R) که در مقابل حرکت مقاومت می کند و دیگری عمودی است (R_v) :

R =rolling resistance

$$R = -b \times r \int_{\theta_1}^{\theta_0} (N(\theta) \sin \theta) d\theta$$

R_v =radial supporting force

$$R_v = b \times r \int_{\theta_1}^{\theta_0} (N(\theta) \cos \theta) d\theta$$

$$\sum M_o = 0$$

$$\sum T = b \times r^2 \int_{\theta_1}^{\theta_0} s(\theta) \cos^2 \theta d\theta + b \times r^2 \int_{\theta_1}^{\theta_0} s(\theta) \sin^2 \theta d\theta - b \times r^2 \int_{\theta_1}^{\theta_0} N(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta + b \times r^2 \int_{\theta_1}^{\theta_0} V(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta$$

رابطه آخر نشان می دهد که تنش های شعاعی (عمودی) هیچ نقشی در برابر گشتاور اعمال شده به محور چرخ ندارد. به عبارت دیگر تنها تنش های مماسی هستند که به عنوان عکس العمل خاک در مقابل گشتاور اعمالی ظاهر می شوند.

$$T = b \times r^2 \int_{\theta_1}^{\theta_0} s(\theta) [\cos^2 \theta + \sin^2 \theta] d\theta = b \times r^2 \int_{\theta_1}^{\theta_0} s(\theta) d\theta$$



$$\frac{T}{r} = b \times r \int_{\theta_1}^{\theta_0} s(\theta) d\theta \quad \text{I}$$

- با توجه به رابطه اخیر، اگر از کل تنش های مماسی در سطح مشترک چرخ و زمین انتگرال بگیریم، مقدارش مساوی است با خارج قسمت گشتاور ورودی به شعاع غلتشی دینامیکی چرخ.

r=dynamic rolling radius

T=driving torque (breaking torque)

- همین روابط برای **ترمز کردن** نیز هستند (گشتاور در جهت عکس) و فقط جهت گشتاور و نیروها عوض می شود، یعنی جهت **H** تغییر کرده و بعنوان نیروی ترمز کننده یا نگهدارنده عمل می کند.

$$\sum F_x = 0$$

$$\longrightarrow P = b \times r \left(\int_{\theta_1}^{\theta_0} (s(\theta) \cos \theta) d\theta - \int_{\theta_1}^{\theta_0} (N(\theta) \sin \theta) d\theta \right) \quad \text{II}$$

کشش مالبندی: (Drawbar pull) on non-gross tractive force

$$\sum F_y = 0$$

$$\longrightarrow W = b \times r \left(\int_{\theta_1}^{\theta_0} (N(\theta) \cos \theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_0} (s(\theta) \sin \theta) d\theta \right) \quad \text{III}$$

روابط **I**، **II** و **III** به ترتیب مربوط به محاسبه **T**، **P** و **W** را پیدا کردیم که روابطی مهم بوده، لیکن برای بدست آوردن این ۳ پارامتر (حتی اگر چرخ صلب باشد)، باید توزیع تنش ها را در سطح چرخ بدانیم که موضوعی پیچیده است. به همین دلیل از روش های نیمه تجربی یا تجربی استفاده می شود.

با مراجعه به شکل چرخ محرک با کشش:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow P = H - R$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow S_v + R_v = N = W$$

$$\sum M_o = 0 \rightarrow T = Q \times L$$

$$\rightarrow \frac{P}{W} = \frac{H}{W} - \frac{R}{W} \text{ طرفین رابطه اول را بر } W \text{ تقسیم می کنیم:}$$

$$\mu_{nt} = \frac{P}{W}$$

نسبت (ضریب) کشش خالص: Net traction ratio

$$\mu_{gt} = \frac{H}{W}$$

نسبت (ضریب) کشش ناخالص: Gross traction ratio

$$\rho = \frac{R}{W}$$

نسبت (ضریب) مقاومت غلتشی: Motion (rolling) resistance ratio

$$\sum M_o = 0 \rightarrow -T + (H - R) \times r_o + N \times e = 0$$

از روابط اول و دوم در اسلاید قبل داریم:

$$T - P \times r_o - W \times e = 0 \rightarrow e = \frac{T}{W} - \left(\frac{P}{W} \right) \times r_o$$

$$\longrightarrow e = \frac{T}{W} - \mu_{nt} \times r_o$$

این رابطه نشان می دهد که امتداد برآیند نیروهای عمودی، چه فاصله ای از مرکز دارد و بیان می دارد که این فاصله به T ، W و **شعاع غلتشی** وابسته است.

$$e = \frac{T}{W} \quad \text{چنانچه } p=0$$