

### نیرو

#### ۱-۴- نیرو

نیرو عاملی است که باعث می‌شود، یک جسم از حالت سکون شروع به حرکت کند، یا جسمی که در حال حرکت است متوقف شود، یا باعث می‌شود یک جسم سریع‌تر یا آهسته‌تر حرکت نموده، یا مسیر حرکت جسم تغییر کند. نیرو یا نیروهایی که باعث ایجاد حرکت یا تمایل به حرکت در جسم می‌شوند نیروهای محرک می‌باشند و بالعکس نیرو یا نیروهایی که مانع از حرکت یا تمایل به توقف جسم می‌شوند، نیروهای مقاوم خوانده می‌شوند. برای مثال اگر اتومبیلی روی یک جاده افقی در حال سکون باشد، حتی بدون استفاده از ترمزها نیز در همین وضعیت توقف باقی خواهد ماند. اگر اتومبیل روی جاده افقی در حال حرکت باشد، تنها نیروهای مقاوم در مقابل حرکت، اصطکاک و مقاومت هوا می‌باشد که برای جبران آن‌ها باید نیرویی مساوی و مخالف جهت آن‌ها به وسیله موتور فراهم شود تا اتومبیل بتواند به حرکت یکنواخت خود ادامه دهد. اگر نیروی اعمال شده به وسیله موتور (نیروی محرک) از مجموع نیروهای مقاوم در مقابل حرکت (در این جا نیروی اصطکاک + نیروی مقاومت هوا) بیشتر باشد، اتومبیل در جهت نیروی بیشتر به طور یکنواخت شتاب می‌گیرد. همین طور اگر ترمز به کار گرفته شود (نیروی مقاوم دیگر) چون در این حالت نیروی محرک اتومبیل کمتر از نیروهای مقاوم حرکت آن است، بنابراین سرعت اتومبیل تحت برآیند این نیروها که در جهت مخالف حرکت اثر می‌کند، کم می‌شود تا این که کاملاً به حالت توقف درآید.

واحد نیرو در سیستم SI نیوتن (N) بوده و عبارت است از نیرویی که بتواند به جسمی به جرم یک کیلوگرم شتابی برابر  $1\text{ m/s}^2$  بدهد یا:

$$1\text{ N} = 1\text{ kg} \times 1\text{ m/s}^2$$

$$1\text{ N} = 1\text{ kg m/s}^2$$

واحد نیرو در سیستم M.K.S عملی کیلوگرم نیرو (kgf) و در سیستم انگلیسی پوند نیرو (lbf)

می‌باشد برای تبدیل واحدهای فوق به یکدیگر می‌توان از جدول پیوست استفاده کرد.

## ۲-۴- تعادل نیروها

هنگامی که چند نیرو بر یک جسم وارد می‌شوند برای تجزیه و تحلیل تأثیر نیروها روی جسم، سه نکته زیر را باید در نظر داشت :

۱- مقدار نیروها

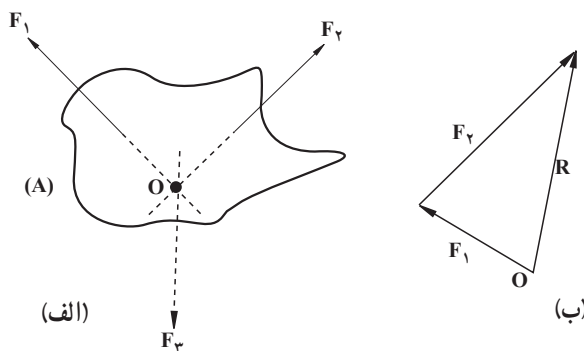
۲- نقطه‌ی اثر نیروها

۳- امتداد نیروها

با توجه به این که نیروها دارای مقدار، راستا و جهت می‌باشند، لذا کمیت‌های برداری بوده و باید آن‌ها را به صورت برداری با یکدیگر جمع نمود.

نکته دیگری که باید در مورد نیروهای وارد بر یک جسم ذکر نمود آن است که دو نیرو وقتی به حال تعادل قرار می‌گیرند که مقدار آن‌ها مساوی و جهت آن‌ها مخالف و هم‌راستا باشند. در شکل ۱-۴-الف نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  دو نیروی وارد بر جسم ساکن A و هم‌صفحه هستند ولی هم‌راستا نمی‌باشند.

دو نیروی  $F_1$  و  $F_2$  جسم را از حالت سکون (تعادل) خارج می‌نمایند، حرکت جسم هم‌راستا و هم‌جهت با برآیند دو نیروی  $F_1$  و  $F_2$  یعنی R خواهد بود (شکل ۱-۴-ب). برای این که جسم



شکل ۱-۴- اثر دو نیرو بر جسم A

متوقف شود باید نیروی  $F_3$  که مساوی، هم‌راستا و مخالف جهت نیروی R می‌باشد به جسم وارد شود. در واقع با اعمال نیروی  $F_3$  اثر دو نیروی  $F_1$  و  $F_2$  خنثی شده و برآیند نیروهای وارد بر جسم صفر شده است. به عبارت دیگر جمع برداری تمام نیروها صفر می‌شود. بیان ریاضی مطلب فوق به صورت زیر خواهد بود :

شرط تعادل  $\Sigma F = 0$

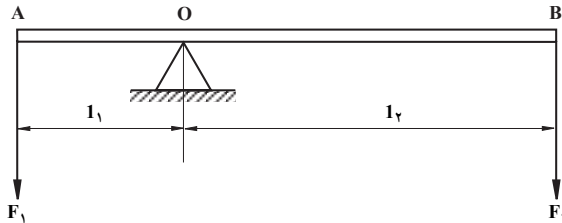
$$\Rightarrow \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0 \quad \text{یا} \quad \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -\vec{F}_3$$

یعنی بردار  $F_3$  مساوی حاصل جمع بردارهای  $F_1$  و  $F_2$  بوده اما در خلاف جهت برآیند آن‌ها اثر گذاشته است، بدین ترتیب جسم A در حال تعادل قرار گرفته است. چنین شرطی (شرط در حالت تعادل قرار داشتن یک جسم) باید در مورد گشتاورهای وارد بر آن نیز صادق باشد یعنی باید:

$$\Sigma M = 0$$

### ۳-۴- گشتاور نیرو

لنگر یا گشتاور نیرو نسبت به یک نقطه انتخابی، مساوی است با حاصل ضرب نیرو در فاصله عمودی نقطه تا امتداد نیرو. میله AB را که روی تکیه‌گاه O قرار دارد در نظر بگیرید (شکل ۲-۴)، دو نیروی قائم بر راستای میله، و در دو انتهای آن اثر می‌دهیم. می‌خواهیم این میله را حول تکیه‌گاه O بچرخانیم. عواملی که در گشتن میله به دور تکیه‌گاه مؤثر می‌باشند عبارتند از نیروها و فاصله آن‌ها تا تکیه‌گاه O.



شکل ۲-۴- اثر نیروها بر میله AB که روی تکیه‌گاه O قرار گرفته است.

بدین ترتیب عوامل مؤثر در گشتن یک جسم به دور یک محور را گشتاور نیرو می‌نامند. با این

تعاریف می‌توان نوشت:

$$\text{گشتاور نیروی } F_1 \text{ حول نقطه } O = F_1 \times l_1$$

$$\text{گشتاور نیروی } F_2 \text{ حول نقطه } O = F_2 \times l_2$$

به‌طور کلی داریم:

$$M = F \times l \quad (۴-۱)$$

که در آن:

$$M = \text{گشتاور نیروی } F \text{ بر حسب نیوتن متر (N.m)}$$

$F$  = نیروی وارده بر جسم بر حسب نیوتن (N)

$l$  = فاصله‌ی نیرو تا مرکز دوران بر حسب متر (m)

واحد گشتاور در سیستم SI بر حسب نیوتن متر (N.m) می‌باشد.

فاصله نیروها تا تکیه‌گاه را بازوی نیرو یا بازوی مؤثر می‌نامند. زمانی که این دو گشتاور باهم

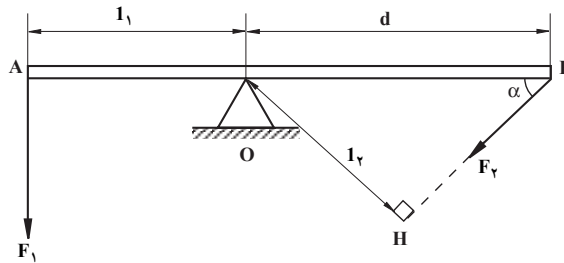
برابر باشند جسم در حال تعادل است: معادله تعادل به صورت زیر می‌باشد:

$$F_1 \times l_1 = F_2 \times l_2 \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

توجه: اگر یکی از نیروها بر امتداد میله‌ی AB عمود نباشد، در این حالت مقدار گشتاور نیرو

عبارت است از اندازه نیرو ضرب در فاصله عمودی نیرو تا تکیه‌گاه ( $l_2$ ) یعنی خطی که از تکیه‌گاه بر

امتداد نیرو عمود شود (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ - نمایش فاصله عمودی نقطه O تا نیروی  $F_2$  ( $l_2$ )

$$M_2 = F_2 \times l_2 = F_2 \times d \times \sin \alpha \quad (4-2)$$

مثال: در شکل ۳-۴ چنانچه  $F_1 = 20\text{N}$  و  $l_1 = 1\text{m}$  و  $d = 1/5\text{m}$  باشد مقدار نیروی

متعادل کننده  $F_2$  چه میزان باشد تا تیر حرکت نکند و در حالت تعادل بماند ( $\alpha = 30^\circ$ ).

حل: با توجه به روابط ۱-۴ و ۲-۴ به صورت زیر می‌توان  $F_2$  را به دست آورد:

$$F_1 \times l_1 = F_2 \times l_2 \Rightarrow F_2 = F_1 \times \frac{l_1}{l_2} = F_1 \times \frac{l_1}{d \sin \alpha}$$

$$\Rightarrow F_2 = 20\text{N} \times \frac{1\text{m}}{1/5 \sin 30^\circ \text{m}} = 26/6\text{N}$$

اگر بخواهیم این مسئله را با توجه به شرط تعادل جسم یعنی  $\sum M = 0$  حل کنیم صورت دیگر

نگارش حل مسئله به این ترتیب خواهد بود:

$$\begin{aligned}\Sigma M_o = 0 &\Rightarrow -(M_1) + (M_2) = 0 \Rightarrow M_1 = M_2 \\ \Rightarrow F_1 \times l_1 = F_2 \times l_2 &\Rightarrow F_2 = \frac{F_1 \times l_1}{l_2} = \frac{20 \times 1}{d \sin \alpha} = 26.6 \text{ N}\end{aligned}$$

باید توجه داشت که علامت گشتاور با جهت چرخش نیرو مشخص می‌شود و دوران در جهت عقربه‌های ساعت با علامت مثبت و خلاف جهت عقربه‌های ساعت با علامت منفی نشان داده می‌شود. به عبارت دیگر  $M_1$  گشتاور حاصل از نیروی  $F_1$  با علامت منفی و  $M_2$  گشتاور حاصل از نیروی  $F_2$  با علامت مثبت می‌باشد.

#### ۴-۴- گشتاور گردشی یا کوپل دورانی

اگر محوری، چرخشی را بگرداند یا چرخشی محوری را بچرخاند، بر هر دوی آن‌ها گشتاور گردشی وارد می‌شود و مقدار آن برابر است با نیروی مماسی<sup>۱</sup> وارد بر محیط چرخ ضرب در فاصله عمودی نیرو از مرکز دوران.

گشتاور گردشی ممکن است به وسیله یک چرخ‌دنده، چرخ تسمه یا چرخ زنجیر به وجود آید. واحد گشتاور گردشی نیز نیوتن متر (N.m) است.

مثال: اگر گشتاور گردشی مطابق شکل ۴-۴ توسط چرخ‌دنده حاصل شده باشد مقدار آن روی محور چرخ‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

روی محور چرخ بزرگ‌تر (مخالف حرکت عقربه‌های ساعت)

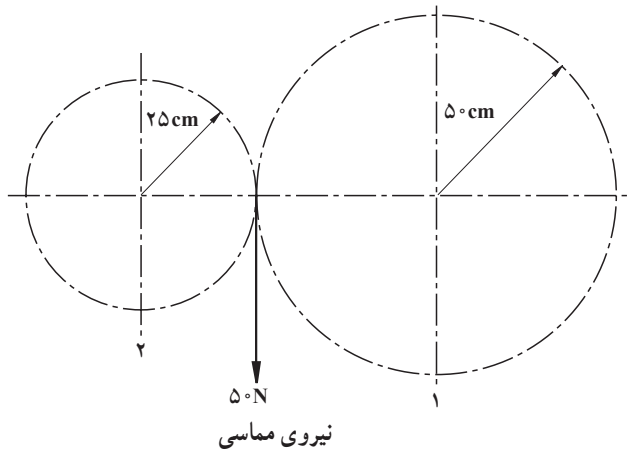
$$M_1 = F \times r_1 = \frac{50 \times 50}{100} = 25 \text{ N.m}$$

روی محور چرخ کوچک‌تر (موافق حرکت عقربه‌های ساعت)

$$M_2 = F \times r_2 = \frac{50 \times 25}{100} = 12.5 \text{ N.m}$$

---

۱- منظور از نیروی مماسی، نیرویی است که بر محیط چرخ مماس بوده و امتداد آن تنها در یک نقطه دایره محیط را قطع می‌کند. در چنین حالتی نیرو در نقطه تماس بر شعاع چرخ عمود خواهد بود.



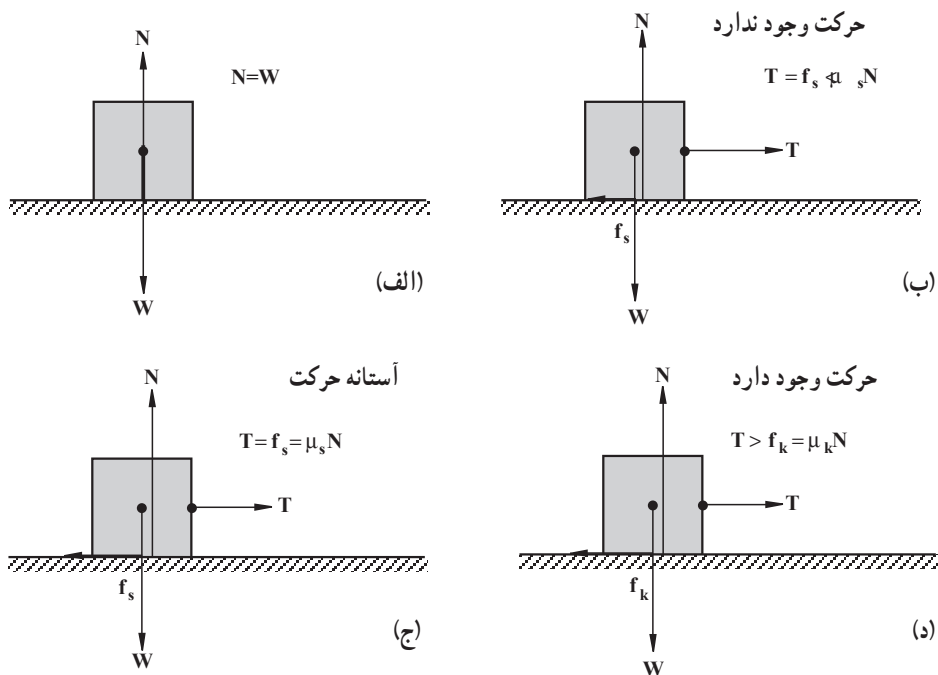
شکل ۴-۴- گشتاور گردش روی چرخ دنده

چنانچه نیروی مماسی بر محیط میله‌ای که یک سر آن به جایی گیر است وارد شود در این صورت گشتاور حاصل گشتاور پیچشی نامیده می‌شود.

### ۴-۵- نیروی اصطکاک

هرگاه جسمی روی سطح جسم دیگری بلغزد، هریک از دو سطح بر یکدیگر نیرویی وارد می‌کند که اولاً این نیرو در امتداد سطح است (شکل ۴-۵)، ثانیاً مانع حرکت دو جسم روی یکدیگر می‌شود. این نیرو را «نیروی اصطکاک» می‌نامند.

اگر جسم سنگین را روی زمین با نیروی کمی در امتداد افقی بکشیم، این نیرو برای به حرکت درآوردن جسم کافی نیست و جسم در حال سکون باقی می‌ماند. در این حال حتماً نیرویی مساوی و مخالف نیروی خارجی وارد بر جسم، آن را خنثی کرده است. این نیرو همان «نیروی اصطکاک در حال سکون» است. هرگاه نیروی وارد بر جسم بیشتر از نیروی اصطکاک در حال سکون باشد، جسم به حرکت درمی‌آید و در این حالت نیروی اصطکاکی را که با نیروی خارجی وارد بر جسم مقابله می‌کند «نیروی اصطکاک در حال حرکت» یا «اصطکاک جنبشی» می‌نامند (شکل ۴-۵).



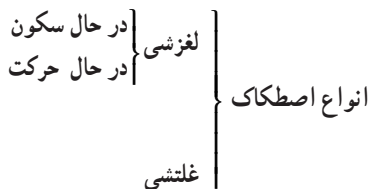
شکل ۵-۴- نمایش اصطکاک در حال سکون و در حال حرکت

نیروی اصطکاک به عوامل زیر بستگی دارد :

- ۱- اندازه نیروی عمود بر سطح تماس
- ۲- صافی یا زبری سطح تماس
- ۳- جنس دو قطعه در سطح تماس

۱-۴-۵- انواع اصطکاک جنبشی: به طور کلی، اصطکاک جنبشی را می توان به دو

دسته اصطکاک لغزشی و غلتشی تقسیم کرد. اصطکاک لغزشی مانند اصطکاک بین لنت ترمز و کاسه چرخ در تراجکتور یا حرکت جسم روی سطح افق یا سطح شیب دار می باشد. این اصطکاک بر دو نوع است : اصطکاک در حال سکون و اصطکاک در حال حرکت. اصطکاک غلتشی مانند اصطکاک چرخ با سطح تماس در وسایل نقلیه یا تراجکتور، اصطکاک در بلبینگ ها و امثال آن می باشد.



**الف - اصطکاک لغزشی:** در شکل ۴-۵ فرض کنید نیروی  $T$  به تدریج از صفر افزایش یابد. این نیرو یک نیروی عکس‌العمل اصطکاکی  $f_s$  را ایجاد کرده که در ابتدا مساوی و مخالف جهت  $T$  بوده، بنابراین هیچ‌گونه حرکتی اتفاق نمی‌افتد. اگر نیروی  $T$  زیادتر شود، به هر حال به مقداری خواهد رسید که با حداکثر  $f_s$  برابر خواهد بود. این مقدار نیرو را که بیشترین حد  $f_s$  است نیروی اصطکاک در حال سکون یا نیروی اصطکاک آستانه حرکت می‌نامند. با افزایش نیروی  $T$  جسم در جهت نیروی  $T$  شروع به حرکت خواهد کرد. همین که جسم شروع به حرکت کرد به‌طور واضح در خواهیم یافت که نیروی لازم  $T$  برای حرکت جسم به‌طور یکنواخت در امتداد صفحه کمی کاهش می‌یابد زیرا اصطکاک در حال حرکت ( $f_k$ ) معمولاً کمتر از اصطکاک در حال سکون ( $f_s$ ) می‌باشد.

روابط اصطکاک لغزشی:

$$f_s = \mu_s \cdot N \quad (4-3)$$

$$f_k = \mu_k \cdot N \quad (4-4)$$

در این روابط داریم:

$$f_s = \text{نیروی اصطکاک در حال سکون}$$

$$\mu_s = \text{ضریب اصطکاک در حال سکون}$$

$$f_k = \text{نیروی اصطکاک در حال حرکت}$$

$$\mu_k = \text{ضریب اصطکاک در حال حرکت}$$

$$N = \text{نیروی عکس‌العمل سطح بر جسم}$$

ضرایب اصطکاک  $\mu_s$  و  $\mu_k$  بستگی به اندازه‌های سطوح تماس ندارد بلکه به‌طور محسوسی تابع نوع، جنس و ماهیت مواد، درجه صیقلی بودن سطوح، دما، رطوبت و غیره است. جدول ۴-۱ مقادیر تقریبی ضرایب اصطکاک در حال سکون برای سطوح مختلف اجسام خشک را نشان می‌دهد.

۱- حداکثر  $f_s$  متناسب با ضریب اصطکاک ( $\mu_s$ ) و نیروی عمود بر سطح ( $N$ ) خواهد بود.



## جدول ۱-۴

ضریب اصطکاک	نام جسم
۰/۱۵ - ۰/۶۰	فلز روی فلز
۰/۲۰ - ۰/۶۰	فلز روی چوب
۰/۳۰ - ۰/۷۰	فلز روی سنگ
۰/۳۰ - ۰/۶۰	فلز روی چرم
۰/۲۵ - ۰/۵۰	چوب روی چوب
۰/۲۵ - ۰/۵۰	چوب روی چرم
۰/۴۰ - ۰/۷۰	سنگ روی سنگ
۰/۲۰ - ۱/۰۰	خاک روی خاک
۰/۶۰ - ۰/۹۰	لاستیک روی سیمان

**مثال:** نیروی لازم برای جابه‌جا کردن دستگاهی که نیروی وزن آن  $W = ۸۰۰۰\text{N}$  ( $۸۰۰\text{ kgf}$ ) است را به دست آورید. ضریب اصطکاک در حال سکون  $۰/۵$  در نظر گرفته شود.

$$N = W = ۸۰۰۰\text{N}$$

$$f_s = \mu_s \cdot N = ۰/۵ \times ۸۰۰۰ = ۴۰۰۰\text{N}$$

**مثال:** قطعه‌ای مطابق شکل ۴-۶ روی سطح شیب‌دار قرار گرفته است. محاسبه کنید زاویه سطح شیب‌دار را برای لحظه‌ای که جسم بخواهد در اثر نیروی وزن خود به سمت پایین حرکت کند.

**حل:** در این حالت اگر جسم به سمت پایین حرکت کند نیروی اصطکاک ( $f_s$ ) به سمت بالا اثر کرده و در لحظه تعادل این نیرو باید برابر مؤلفه نیروی وزن در امتداد سطح شیب‌دار ( $F$ ) باشد ( $N$  مؤلفه قائم نیروی  $W$ ).

$$F = f_s$$

$$f_s = \mu_s \times N$$

$$N = W \times \cos \alpha \text{ و } F = W \times \sin \alpha$$

$$۱ - ۱ \text{ kgf} = ۹/۸\text{N}$$

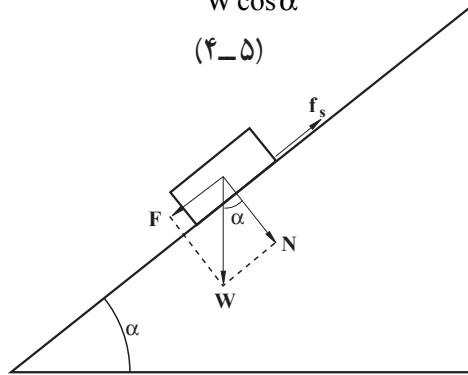
با جانشین کردن مقادیر محاسبه شده برای  $F$  و  $f_s$  خواهیم داشت :

$$F = \mu_s \times N$$

$$W \times \sin \alpha = \mu_s \times W \cos \alpha \Rightarrow \mu_s = \frac{W \sin \alpha}{W \cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$$

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha$$

(۴-۵)



شکل ۴-۶- حرکت جسم روی سطح شیبدار

از حل این مسئله نتیجه می‌گیریم که اگر ضریب اصطکاک دو قطعه روی هم، برابر با تانژانت زاویه سطح شیبدار باشد جسم در حال تعادل است، اما هنگامی که تانژانت زاویه سطح شیبدار کوچک‌تر از ضریب اصطکاک باشد، جسم در محل خود در حال سکون بوده و اگر تانژانت زاویه سطح شیبدار بزرگ‌تر از ضریب اصطکاک باشد جسم به سمت پایین به حرکت درمی‌آید. بنابراین می‌توان نوشت :

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha \quad \text{حالت تعادل}$$

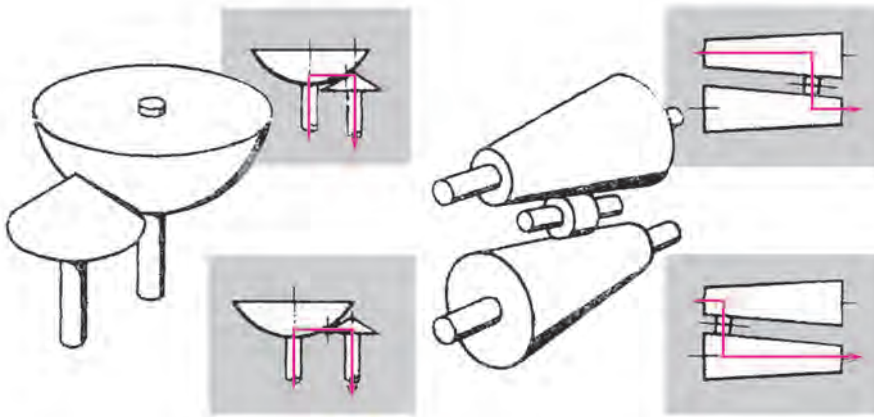
$$\mu > \operatorname{tg} \alpha \quad \text{حالت سکون}$$

$$\mu < \operatorname{tg} \alpha \quad \text{وضعیت حرکت}$$

ب- **اصطکاک غلتشی:** از اصطکاک برای انتقال نیرو استفاده می‌شود. بعضی از کاربردهای

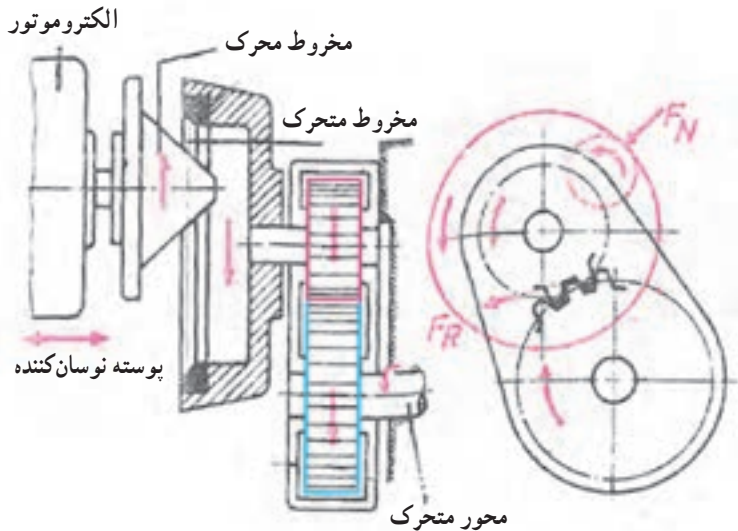
آن عبارتند از :

۱- چرخ‌های اصطکاکی مخروطی: این وسایل ممکن است که از دو مخروط خارجی و یک استوانه منتقل‌کننده حرکت، یک مخروط و یک نیم‌کره و یا یک مخروط خارجی و یک مخروط داخلی (PK) تشکیل شده باشند.



الف - دو مخروط خارجی و استوانه‌ای منتقل‌کننده حرکت      ب - یک مخروط و یک نیم کره

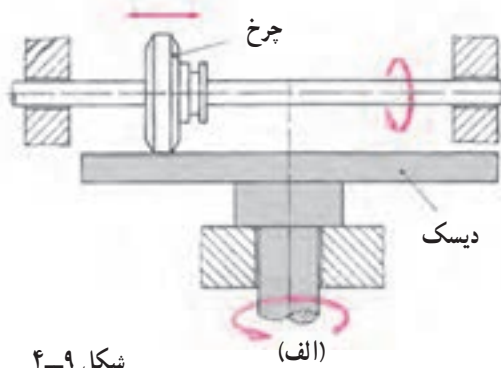
شکل ۴-۷



شکل ۴-۸

۲- چرخ‌های اصطکاکی بشقابی: ساده‌ترین فرم انتقال حرکت غیرپله‌ای به وسیله چرخ‌های اصطکاکی، استفاده از یک استوانه لغزانی است که با پیشانی یک دیسک در تماس می‌باشد. در این وسایل ممکن است که استوانه محرک بوده و یا متحرک واقع شود. اما به دلیل غیرموازی بودن حرکات، استهلاک آن‌ها زیاد و ضریب بهره این نوع دستگاه‌ها کم می‌باشد. در پاره‌ای از این گونه

دستگاه‌ها می‌توان با تغییر محل استوانه از یک سمت به سمت دیگر، علاوه بر تغییر سرعت دوران، جهت حرکت را نیز عوض کرد. وقتی یک چرخ یا یک استوانه روی سطحی بغلتد، چون در عمل جسم صلب کامل و مطلوب وجود ندارد، چرخ یا سطح یا هر دو تغییر شکل می‌دهند. مقدار این تغییر شکل‌ها به جنس چرخ و نوع سطح اتکا بستگی دارد.



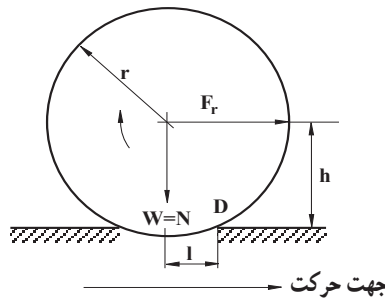
شکل ۴-۹

چنانچه در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود برای ایجاد حرکت غلتشی یک چرخ روی سطح، باید چرخ بتواند برجستگی حاصل از تغییر شکل را خنثی نماید. برای محاسبه نیروی محرک لازم برای این کار نسبت به نقطه  $D$  (مرکز دوران) گشتاور گرفته و شرط تعادل را برای آن می‌نویسیم:

$$\sum M_D = 0$$

$$F_r \times h - N \times l = 0$$

$$F_r \times h = N \times l$$



شکل ۴-۱۰ اصطکاک غلتشی مؤثر روی یک چرخ

در این روابط داریم:

$$F_r = \text{نیروی اصطکاک غلتشی بر حسب نیوتن}$$

$$h = \text{طول مؤثر گشتاور محرک بر حسب سانتی متر}$$

$$N = \text{نیروی عمود بر سطح بر حسب نیوتن}$$

$l = 1$  = طول مؤثر گشتاور مقاوم برحسب سانتی متر

چون در عمل اختلاف اندازه  $r$  و  $h$  بسیار ناچیز است می توان به جای  $h$  مقدار  $r$  را قرار داد :

$$F_r \times r = N \times l$$

حال اگر از این رابطه مقدار نیروی اصطکاک غلتشی موردنظر باشد می توان آن را به صورت

زیر به دست آورد :

$$F_r = \frac{l}{r} \times N \quad (4-6)$$

مقدار طول مؤثر گشتاور مقاوم ( $l$ ) به جنس چرخ و جنس سطح اتکا بستگی دارد.

نسبت  $\frac{l}{r}$  در اصل همان ضریب اصطکاک غلتشی ( $\mu_i$ ) می باشد.

مثال: نیروی لازم برای به حرکت درآوردن یک تریلر مطابق شکل ۱۱-۴ را حساب کنید، اگر

نیروی وزن وارد بر محور بارکش  $W = 10000 \text{ N}$  و قطر چرخ های آن  $47/5$  سانتی متر و طول مؤثر

گشتاور مقاوم آن  $l = 4$  سانتی متر باشد.

$$N = \frac{W}{2} = 5000 \text{ N}$$

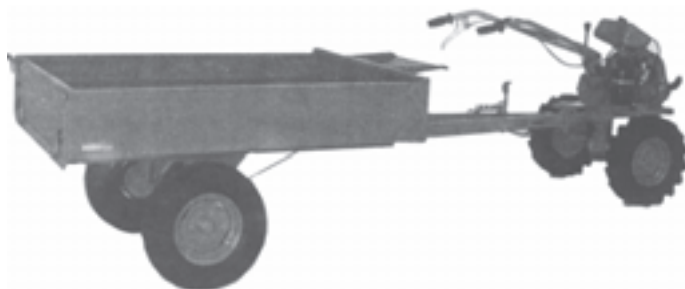
نیروی عمود بر سطح هر چرخ

$$F_r = \frac{l}{r} \times N = \frac{4}{47/5} \times 5000 = 421/05 \text{ N}$$

نیروی اصطکاک غلتشی هر چرخ

$$F_r \times 2 = 421/05 \times 2 = 841/1 \text{ N}$$

نیروی اصطکاک غلتشی دو چرخ



شکل ۱۱-۴- تریلر متصل به تراکتور دو چرخ (تریلر)

## ۴-۶- کار (یادآوری)

اگر جسمی تحت اثر نیرو جابه جا شود کار انجام شده است. اگر نیرو به جسم ساکن وارد شود

و در آن حرکت ایجاد نکند، کاری صورت نمی گیرد. بنا به تعریف، کار برابر است با حاصل ضرب نیرو

در فاصله جابه جایی نیرو.

$$W = F \times d \quad (4-6)$$

در این فرمول داریم :

$$W = \text{کار برحسب ژول (J)}$$

$$F = \text{نیرو برحسب نیوتن (N)}$$

$$d = \text{جابه‌جایی برحسب متر (m)}$$

واحد کار در سیستم بین‌المللی SI، نیوتن متر (N.m) است که ژول (J) نامیده می‌شود. وقتی نیروی یک نیوتنی جسم را در راستای خود یک متر جابه‌جا کند یک ژول کار انجام شده است. اگر راستای بردار نیرو با راستای بردار جابه‌جایی یکی نباشد (زاویه‌دار باشد) کار از رابطه ۴-۷ محاسبه می‌شود.

$$W = F \times d \cos \theta \quad (4-7)$$

$\theta$  زاویه بین راستای بردار نیرو و راستای جابه‌جایی

## ۴-۷ - انرژی (یادآوری)

انرژی به‌عنوان عامل انجام دهنده کار تعریف می‌شود و واحد آن ژول می‌باشد. انرژی می‌تواند به‌صورت‌های مختلف وجود داشته باشد مانند: انرژی حرارتی، انرژی الکتریکی و انرژی مکانیکی. انواع انرژی مکانیکی: انرژی مکانیکی بر دو نوع است.

الف - انرژی پتانسیل یا نهانی      ب - انرژی جنبشی

**الف - انرژی پتانسیل:** هر جسمی که در ارتفاعی قرار بگیرد دارای انرژی پتانسیل است پس انرژی پتانسیل به دو عامل، یکی ارتفاع جسم از زمین و دیگری وزن جسم مربوط است. اگر جسمی به جرم  $m$  کیلوگرم به‌طور عمودی تا ارتفاع  $h$  متر نسبت به سطح زمین بالا برده شود، نیروی لازم برای انجام چنین عملی برابر نیروی جاذبه زمین که بر جسم اثر می‌کند یعنی، وزن آن  $W = mg$  نیوتن خواهد بود. کار انجام شده برای بالا بردن جسم با استفاده از رابطه‌ی ۴-۶ برابر خواهد بود با:

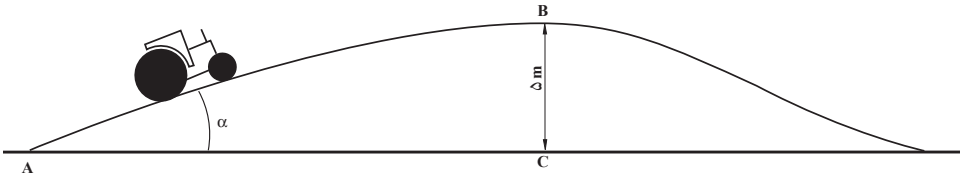
$$W_p = mgh \quad (J) \quad (4-8)$$

این مقدار کار انجام شده به‌هدر نرفته و در جسم به‌صورت انرژی پتانسیل ذخیره شده است. بدین ترتیب فرمول انرژی پتانسیل به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$E_p = W \times h \quad (4-9)$$

که در آن  $E_p$  انرژی پتانسیل و  $W$  نیروی وزن جسم و  $h$  ارتفاع جسم از زمین است.

مثال: تراکتوری به جرم  $2200$  کیلوگرم مطابق شکل ۴-۱۲ روی تپه‌ای حرکت کرده و به نقطه B می‌رسد که ارتفاع آن نقطه از پای تپه (نقطه A)  $5$  متر است. انرژی پتانسیل تراکتور را به خاطر موقعیتش از پای تپه محاسبه کنید.



شکل ۴-۱۲

$$E_p = W \times h = mgh$$

$$= 2200 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 5 \text{ m} = 107800 \text{ Nm} = 107800 \text{ J} = 107.8 \text{ kJ}$$

ب- انرژی جنبشی: هر جسمی که در حال حرکت باشد یعنی سرعت داشته باشد، دارای انرژی جنبشی است. انرژی جنبشی به دو عامل بستگی دارد: ۱- جرم جسم، ۲- مجذور سرعت جسم. در فرمول انرژی جنبشی، ضریب تناسب عدد  $\frac{1}{2}$  می‌باشد. بنابراین فرمول انرژی جنبشی به صورت زیر درمی‌آید:

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4-10)$$

در این رابطه  $E_C$  انرژی جنبشی (J) و  $m$  جرم (kg) و  $v$  سرعت جسم ( $\frac{m}{s}$ ) می‌باشد.

انرژی جنبشی اجسامی که حرکت دورانی دارند را نیز می‌توان با رابطه ۴-۱۰ محاسبه کرد.

مثال: اگر سرعت دورانی یک دروگر بشقابی  $3000$  دور بر دقیقه باشد و تیغه دروگر به جرم  $100$  گرم بوده و در فاصله  $210$  میلی‌متری از محور بشقاب قرار گرفته باشد (شکل ۴-۱۳) برای

محاسبه انرژی جنبشی این تیغه که یک جسم چرخان است به ترتیب زیر عمل می‌شود:

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2$$

در این رابطه جرم تیغه مشخص است اما سرعت محیطی تیغه باید تعیین شود. می‌دانیم که:

$$v = r\omega \quad (\text{m/s}) \quad \text{و} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (\text{rad/s})$$

$$\omega = \frac{2 \times 3 / 14 \times 3000}{60} = 314 \text{ rad/s}$$

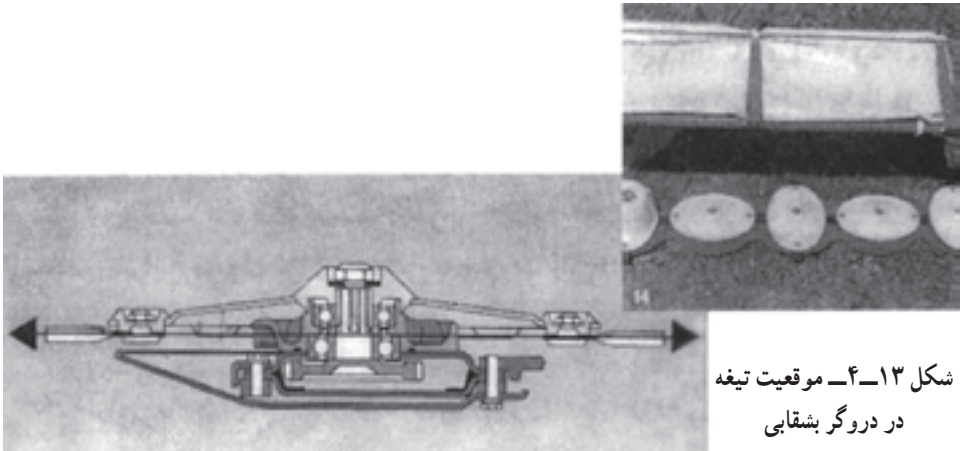
سرعت محیطی تیغه برابر خواهد بود با:

$$r = 210 \text{ mm} = 0.21 \text{ m}$$

$$v = 0.21 \times 314 = 65.94 \text{ m/s}$$

بدین ترتیب انرژی جنبشی تیغه برابر خواهد شد با :

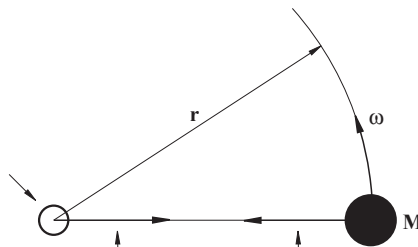
$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 0.1 \times (65.94)^2 = 217.4 \text{ J}$$



شکل ۴-۱۳- موقعیت تیغه در دروگر بشقابی

### ۸-۴- نیروی گریز از مرکز

اگر جسمی را به انتهای ریسمان نازکی وصل کنیم سپس ریسمان و جسم متصل به آن را روی صفحه افقی، بچرخانیم، جسم یک نیروی کششی به طرف خارج از مرکز دوران، روی ریسمان اعمال خواهد کرد. این کشش شعاعی، نیروی گریز از مرکز نام داشته و عکس العمل آن، نیروی مایل به مرکز نامیده می شود.



نیروی گریز از مرکز به سمت بیرون  
بر محور اثر می کند یا  $mr\omega^2$  یا  $\frac{mv^2}{r}$

نیروی مایل به مرکز به سمت داخل  
بر جسم اثر می کند یا  $mr\omega^2$  یا  $\frac{mv^2}{r}$

شکل ۴-۱۴- نمایش نیروهای گریز از مرکز و مایل به مرکز در جسم متصل به ریسمان و در حال گردش حول محور آن



نیروی گریز از مرکز، از مقاومت جسم در مقابل تغییر در جهت حرکت ناشی شده و به وسیله نیروی مایل به مرکز نشان داده می شود بنابراین داریم :

$$F = \frac{mv^2}{r} = mr\omega^2 \quad (4-11)$$

در شکل ۴-۱۴ اگر جسمی به جرم  $m$  در شعاع  $r$  به محور متصل باشد و محور با سرعت  $\omega$  ( $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ) بچرخد، آن گاه نیرویی به سمت خارج بر یاتاقانی که محور داخل آن می چرخد، اثر می کند.

مثال: دروگر بشقابی شکل ۴-۱۰ را در نظر بگیرید چنانچه تیغه ی  $۸^\circ$  گرمی این بشقاب در فاصله  $۲۱^\circ$  میلی متری از مرکز آن با سرعت  $۳۰۰۰$  دور بر دقیقه بگردد، نیروی گریز از مرکز وارد بر بین نگهدارنده تیغه را حساب کنید.

حل:

$$m = ۸^\circ \text{gr} = ۰/۰۸ \text{kg} \quad \text{و} \quad r = ۲۱^\circ \text{mm} = ۰/۲۱ \text{m}$$

$$n = ۳۰۰۰ \text{rpm} \Rightarrow \omega = \frac{۲\pi n}{۶۰} = \frac{۲ \times ۳/۱۴ \times ۳۰۰۰}{۶۰} = ۳۱۴ \text{rad/s}$$

$$F = mr\omega^2 = ۰/۰۸ \times ۰/۲۱ \times ۳۱۴^2 = ۱۶۵۶/۱۴ \text{N}$$

بنابراین در حین کار مقدار  $۱۶۵۶/۱۴$  نیوتن نیرو به صورت برشی بر بین نگهدارنده تیغه در روی بشقاب وارد می شود.

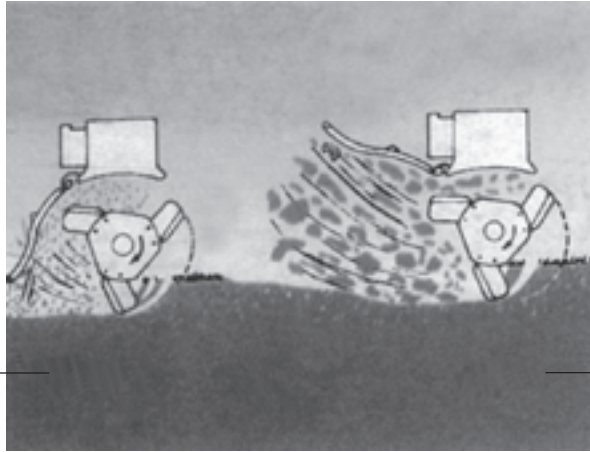
در مثال فوق بررسی کنید با تغییر سرعت حرکت دورانی و جرم جسم نیروی وارد بر بین به چه نسبتی تغییر می کند.



تمرین

- ۱- نیروی مقاوم و نیروی محرک را تعریف کنید.
- ۲- مفهوم اصطکاک لغزشی و اصطکاک غلتشی را با رسم شکل بیان کنید.
- ۳- عوامل مؤثر بر نیروی اصطکاک را نام ببرید.
- ۴- یک خاک همزن دوار در عمق  $۲۵$  سانتی متری خاک را خرد می کند محور تیغه ها با سرعت  $n = ۲۰۰$  دور بر دقیقه می گردد و فاصله نوک تیغه تا مرکز محور دوران  $۳۰$  سانتی متر می باشد. مطلوب است :

الف - سرعت زاویه‌ای تیغه‌ها  
 ب - سرعت محیطی در نوک تیغه‌ها



الف) دور محور تند

ب) دور محور کند

شکل ۱۵-۴

۵- در مسئله ۶ اگر جرم تیغه‌ها  $1000$  گرم فرض شود و در فاصله  $20^\circ$  سانتی متری از مرکز دوران اثر کند انرژی جنبشی هر تیغه را حساب کنید. مسئله را با  $n = 300$  و  $n = 100$  دور بر دقیقه حل کنید.

۶- در یک آسیاب چکشی که با سرعت  $n = 500$  rpm می‌گردد اگر جرم تیغه‌ها  $200$  گرم باشد نیروی گریز از مرکز وارد بر محور نگهدارنده تیغه‌ها (چکش‌ها) را حساب کنید. فاصله مرکز ثقل تیغه تا محور دوران  $20$  cm است.