

1 اصطکاک

دُ جامد که با هم در تماس نند، به هم نیرو وارد میکنند. بخش ی از این نیرو عمود بر سطح تماس است. این نیرو مانع آن میشود که دُ جسم در هم فرو روند. (اگر دُ-جسم به هم چسبیده باشند، مثلن با چسب، این نیرو ضمنن مانع آن میشود که دُ-جسم از هم جدا شوند.) جز این نیرو ی عمود-بر-سطح، یک نیرو ی مماس بر سطح هم هست. این نیرو ی ممکاس-بر-سطح، مانع لغزش دُ-سطح بر هم میشود (تا آنجا که بتواند). به این نیرو ی مماسی اصطکاک میگویند.

یک جعبه ی ساکن رو ی یک میز افقی است. به این جعبه یک نیرو ی افقی F وارد میکنم. دیده میشود اگر اندازه ی این نیرو از حد ی کمتر باشد، جعبه حرکت نمیکند. چون جعبه حرکت نمیکند، شتاب آن صفر است. پس برایند نیروها ی وراد بر آن باید صفر باشد. وزن و نیرو ی عمود-بر-سطح، هیچ کدام مثلغه ی افقی ندارند. پس باید یک نیرو ی دیگر باشد که افقی (مماس بر سطح) باشد و اثر F را خنثا کند. به این نیرو ی مماس-بر-سطح (که میز به جعبه وارد میکند) اصطکاک میگویند. البته قانون سوم نیوتن میگوید جعبه هم عکس العمل این نیرو را به میز وارد میکند. آن هم اصطکاک است. ولی به جعبه وارد نمیشود. به اصطکاک در حالت ی جعبه نسبت به میز حرکت نمیکند اصطکاک ایستایی (یا سکون) میگویند.

نیرو ی اصطکاک ایستایی ی وراد بر جعبه (از سو ی میز) را با f_s نشان میدهم. از این که جسم ساکن میماند، نتیجه میشود

$$f_s = -F. \quad (1)$$

اما F را میشود تغییر داد. رابطه ی بالا میگوید f_s هم تغییر میکند، چنان که در هر حالت قرینه ی F باشد. پس اصطکاک ایستایی یک نیرو ی قیدی ست. مثل نیرو ی عمود-برسطح که چنان تنظیم میشود که جسم بر سطح بماند، اصطکاک ایستایی هم چنان تنظیم میشود سطحها بی که با هم در تماس نند، نسبت به هم حرکت نکنند.

نیرو ی عمود-بر-سطح، در این که دُ-سطح را کنار هم نگه دارد محدودیت دارد. نیرو ی عمود بر سطح نمیتواند مانع دور-شدن دُ-سطح از هم شود (مگر این که دُ سطح به هم چسبیده باشند). این یعنی مثلغه ی نیرو ی عمود-بر-سطح در جهت جسم ی که بر آن اثر میکند نامنفی ست. نیرو ی عمود-بر-سطح از سو بی دیگر هم محدودیت دارد: اگر جسم بسیار-سنگین ی بر یک میز گذاشته شود،

سطح میز جسم را تحمل نمی‌کند و می‌شکند. این یعنی جسم در جهت عمودی حرکت میکند. پس وزن جسم از نیروی عمود-بر-سطحی که میز به آن وارد می‌کرده بیشتر است. نیروی عمود-بر-سطحی که هر سطح وارد میکند یک محدودیت از بالا دارد. اگر نیروی عمود-بر-سطح به این حد برسد، قید این که دُ-جسم در هم نروند شکسته می‌شود.

اصطکاک ایستایی هم هم‌ین طُر است. به هم‌ان مثال پیش برگردم. اگر اندازه‌ی نیروی افقی را زیاد کنم، به جایی میرسم که جعبه روی میز حرکت میکند. پس نیروی اصطکاک ایستایی از حدی بیشتر نمی‌شود. به این حد، بیشینه‌ی اصطکاک ایستایی می‌گویند. بیشینه‌ی اصطکاک ایستایی را با f_m نشان می‌دهم. تجربه نشان می‌دهد در بسیاری از موارد بیشینه‌ی اصطکاک ایستایی با نیروی عمود-بر-سطح متناسب است. به ضریب تناسب ضریب اصطکاک ایستایی می‌گویند. این را با μ_s نشان می‌دهم:

$$f_m = \mu_s N, \quad (2)$$

که N نیروی عمود-بر-سطح است. ضریب اصطکاک ایستایی به جنس دُ-سطح بستگی دارد. این نکته مهم است که f_m خُد اصطکاک ایستایی نیست، بیشترین مقدار ممکن برای آن است. در مثال جعبه و میز، ممکن است F برابر با $(0.5 f_m)$ باشد. در این صورت اصطکاک ایستایی f_m نیست بل که $(0.5 f_m)$ است. اگر اصطکاک ایستایی f_m می‌بود، برآیند نیروها ی وارد بر جعبه ناصفر می‌شد و جعبه شتاب می‌گرفت، بر خلاف جهت F . اگر جعبه ساکن باشد و F زیاد شود، تا جایی که F کمتر از f_m است، f_s (نیروی اصطکاک) برابر با F می‌شود و جعبه ساکن می‌ماند. اما وقت ی F بزرگتر از f_m شود، دیگر اصطکاک نمیتواند با آن برابر بماند و جعبه حرکت می‌کند. در این حالت اصطکاک همچنان هست، اما ایستایی نیست: قید ساکن-بودن جعبه نسبت به میز شکسته شده. به اصطکاک در این حالت، اصطکاک جنبشی می‌گویند.

اصطکاک جنبشی، بر خلاف اصطکاک ایستایی، نیروی قیدی نیست. بر خلاف اصطکاک ایستایی که ن مقدار ش معین است (جز این که از حدی بیشتر نمی‌شود)، و ن جهت ش معین است (جز این که مماس بر سطح است)، اصطکاک جنبشی هم مقدار ش معنی است و هم جهت شو نیروی اصطکاک جنبشی را با f_k نشان می‌دهم. جهت نیروی اصطکاک جنبشی ی وارد بر یک جسم به خاطر تماس آن با یک سطح، قرینه ی جهت حرکت نقطه ی تماس جسم با سطح نسبت به نقطه ی

تماس سطح با جسم است. تجربه نشان میدهد در بسیاری از موارد اندازه ی نیروی اصطکاک جنبشی با نیروی عمود-بر-سطح متناسب است. به ضریب تناسب ضریب اصطکاک جنبشی میگویند و آن را با μ_k نشان میدهم:

$$f_k = \mu_k N. \quad (3)$$

ضریب اصطکاک جنبشی هم به جنس دُ-سطح بستگی دارد. روابط (2) و (3) خیلی شبیه هم نند. اما مهم است که (2) بیشینه ی اصطکاک ایستایی را میدهد، ن خُد آن را، در حال ی که (3) خُد اصطکاک جنبشی را میدهد. برای خیلی از موارد (ون همه ی موارد) ضریب اصطکاک ایستایی و ضریب اصطکاک جنبشی به هم نزدیک نند، و ضریب اصطکاک جنبشی کم ی کوچکتر از ضریب اصطکاک ایستایی ست. به مثال جعبه بر میز برگردم. محور x را در جهت F میگیرم. از این که جعبه حرکت عمودی ندارد، معلوم میشود نیروی عمود-بر-سطح با وزن جسم برابر است:

$$N = m g. \quad (4)$$

که m جرم جعبه است. به این ترتیب،

$$f_m = \mu_s m g. \quad (5)$$

$$f_k = \mu_k m g. \quad (6)$$

جعبه ساکن است و F کمتر از f_m است. چه میشود؟ جعبه ساکن میماند و بر ایند نیروها ی وارد بر آن صفر است. پس،

$$f_s = -F \hat{x}. \quad (7)$$

نیروی F را زیاد میکنم. وقت ی F از f_m بیشتر شد، جعبه دیگر ساکن نمیماند: در جهت \hat{x} شروع به حرکت میکند. پس اصطکاک جنبشی میشود:

$$f_k = -\mu_k m g \hat{x}. \quad (8)$$

جهت اصطکاک جنبشی از سرعت جعبه تعیین شده: جعبه در جهت \hat{x} حرکت میکند. پس اصطکاک جنبشی بر خلاف جهت \hat{x} است. a (شتاب جسم) چنین میشود.

$$a = \frac{F - \mu_k m g}{m} \hat{x}. \quad (9)$$

اگر μ_k کوچکتر از μ_s باشد، وقت F از $(\mu_s m g)$ میگذرد شتاب جسم از مقدار y بیش از صفر شروع میکند. در این حالت اگر F از $(\mu_s m g)$ کمتر شود، ولی از $(\mu_k m g)$ بیشتر بماند، جعبه همچنان در جهت \hat{x} شتاب دارد.

ولی همیشه چنین نیست که اندازه y نیروی وارد بر یک جسم ساکن زیاد شود و جسم شروع به حرکت کند. گیرم جسم نسبت به سطح در حال حرکت است، و به آن یک نیروی خارجی y افقی وارد میشود. در این حالت اصطکاک جنبشی است، چون جسم دارد نسبت به سطح حرکت میکند. مقدار نیروی اصطکاک از (3) به دست میآید. اما جهت نیروی اصطکاک بر خلاف جهت y است. $x - y$ است، نیروی $x - y$ بر خلاف جهت y است. مثلاً اگر سطحی که جسم بر آن است صفحه $x - y$ است، نیروی خارجی y افقی در جهت \hat{x} است، و سرعت در جهت \hat{y} است، نیروی اصطکاک جنبشی در جهت $(-\hat{y})$ است. این به یک پدیده مینجامد: جسمی که در حال بر یک سطح است را میشود خیلی راحت در جهت عمود بر حرکتش تکان داد. یک آدم دارد با مشقت یک صندوق سنگین را روی یک سطح پر-اصطکاک هل میدهد، و صندوق در حال حرکت است. یک آدم دیگر میتواند به سادگی صندوق در-حال- حرکت را روی هم آن سطح در جهت عمودی جا-به-جا کند.