جهت نیروی اصطکاک

عزت‌الله رضایی کردستان، قروه، دبیرستان استعدادهای درخشان شهید احمدی روشن
خاطره جعفری تهران، دانشگاه صنعتی شریف
مجتبی گلشنی دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

تعیین جهت نیروی اصطکاک یکی از مسائلی است که شاید در برخی موارد، به‌ویژه در حرکت دورانی، پیچیده باشد. در این مقاله یک روش کلی برای تعیین جهت نیروی اصطکاک بیان می‌شود. این روش نشان می‌دهد که جهت نیروی اصطکاک به شرایط اولیه مسئله و برخی پارامترهای دستگاه از جمله، مکان اثر نیرو، زاویه سطح، جرم و...بستگی دارد و در برخی موارد به سادگی قابل پیش‌بینی نیست.

کلیدواژه‌ها: نیرو، اصطکاک، جهت

۱. مقدمه

روند تدریجی آموزش و ساده‌سازی در یادگیری فیزیک، سبب می‌شود اغلب مطالب فیزیکی دورهٔ متوسطه به‌صورت سطحی و به دور از پیچیدگی مطرح شوند. محدود بودن مسئله به شرایط خاص و یا عدم تحلیل دقیق مسئله، می‌تواند پرسش‌های گوناگون و گاهی متناقض را در ذهن دانش‌آموزان باهوش به وجود آورد. از این‌رو، لازم است معلم در بیان مفاهیم به روابط دقیق توجه داشته باشد. یکی از مسائلی که معمولاً بنا به شرایط خاص مسئله و به سبب ساده‌سازی مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، جهت نیروی اصطکاک است[۲،۱].

با اینکه نیروی اصطکاک به‌عنوان عامل بازدارندگی و اتلاف انرژی شهرت دارد اما در پاسخ به این پرسش که چه عاملی باعث می‌شود انسان روی زمین راه برود، مشاهده می‌شود که نیروی اصطکاک می‌تواند عامل حرکت نیز باشد. پیدا کردن جهت نیروی اصطکاک در انواع حرکت‌ها می‌تواند پیچیده باشد[۳]. در این مقاله با بیان چند مثال مختلف، به بررسی روش‌های کلی تعیین جهت نیروی اصطکاک خواهیم پرداخت.

زمانی که به جلو راه می‌رویم، اصطکاک در چه جهتی به پای ما وارد می‌شود؟

اصطکاک چگونه باعث جلو رفتن اتومبیل و توقف آن می‌گردد؟ اگر به یک چرخ ساکن روی سطح افقی، نیروی افقی F را وارد کنیم، اصطکاک در چه جهتی بر آن اثر می‌کند؟ و آیا محل وارد کردن نیرو مهم است؟

زمانی که یک مهره به جرم m روی تسمه نقاله می‌افتد، اصطکاک چگونه و در چه جهتی باعث حرکت مهره می‌شود؟

در حرکت استوانه روی سطح شیب‌دار آیا جهت نیروی اصطکاک همیشه در خلاف جهت حرکت مرکز جرم استوانه است؟

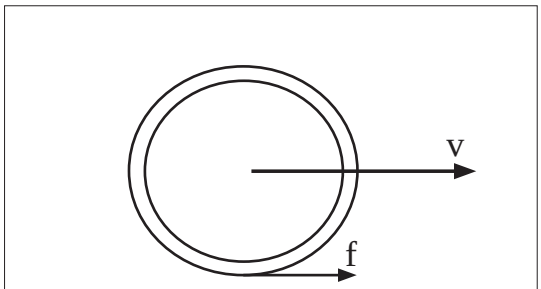
۲. راه رفتن

برای شروع بحث و به‌عنوان یک مثال ساده برای تعیین جهت نیروی اصطکاک، ابتدا راه رفتن را مورد بررسی قرار می‌دهیم.از آنجایی‌که نیروی اصطکاک تمایل دارد مانع لغزش سطوح روی یکدیگر شود[۳]، باید بررسی شود که زمان قدم برداشتن، کف پای ما به‌عنوان نقطه تماس بدن با سطح، تمایل دارد به کدام سمت حرکت کند؛ آنگاه نیروی اصطکاک در خلاف همان سمت است. با این توضیح، پا و سطح توسط نیروی اصطکاک به همدیگر نیرو (افقی) وارد می‌کنند به‌طوری‌که نیروی کنش به سطح و به سمت عقب وارد می‌شود و نیروی واکنش به پا و به سمت جلو وارد

می‌شـــود که هر دو نیروی کنـــش و واکنش از جنس نیروی اصطکاک هســـتند. به عبارت دیگر، مـــا در هنگام قدم زدن، زمین زیر پای خود را به ســـمت عقب هل می‌دهیم و سطح ما را به سمت جلو هل می‌دهد. این یک مثال ساده از تعیین جهت نیروی اصطکاک اســـت. در این حالت، اصطکاک رو به جلو و بســـته به نوع سطح می‌تواند از نوع اصطکاک ایستایی یا جنبشی باشـــد. مثلاً هنگامی که روی یک سطح معمولی بدون ســـر خوردن حرکت می‌کنید اصطکاک ایستایی است. در حالی‌که، وقتی روی یک ســـطح لیـــز مانند یخ می‌لغزید، اصطکاک از نوع جنبشی است.

۳. حرکت رو به جلوی اتومبیل

اتومبیلی را در نظر بگیرید که از حال ســـکون در یک جاده افقی شـــروع به حرکت می‌کند، پـــس از مدت زمان کوتاهی که ســـرعت اتومبیل به اندازه کافی افزایش یافت، اتومبیل با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. لحظاتی بعد راننده مانعی را در جلوی مســـیر می‌بیند و ترمز می‌گیرد و اتومبیل پس از طی مســـافتی متوقف می‌شود. این یک مثال ساده از انواع حرکت‌های دورانی است که در زندگی روزمره ما به وقوع می‌پیوندد. حال فرض کنید در این مسئله از مقاومت هوا و هر نیروی اتلافی دیگری به‌جز اصطکاک بین چرخ‌های اتومبیل و جاده چشم‌پوشی شود. جهت نیروی اصطکاک وارد بر چرخ‌ها در هـــر یک از مراحل حرکت اتومبیل چگونه اســـت؟ در این مثال، سعی می‌کنیم با اســـتفاده از قانون دوم نیوتون جهت نیروی اصطکاک را تعیین کنیم. ابتدا حرکت اتومبیل شتابدار تندشونده است از این رو نیروی اصطکاک بین چرخ‌ها و جاده هم‌جهت با حرکت اتومبیل و رو به جلو است (شکل ۱)، زیرا نیروی اصطکاک تنها نیروی خارجـــی افقی وارد بر اتومبیل است که باعث افزایش سرعت آن می‌شود.

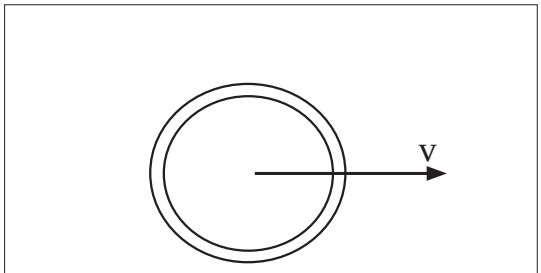


▲ شکل ۱. شکل(۱) چرخ اتومبیل در حرکت تندشونده

البته توجه به این نکته ضروری اســـت که نیروی اصطکاک هیچ‌گاه به دســـتگاه انرژی نمی‌دهد! و فقط انرژی جنبشـــی دورانی چرخ‌ها را به انرژی جنبشـــی انتقالی اتومبیل تبدیل می‌کند.

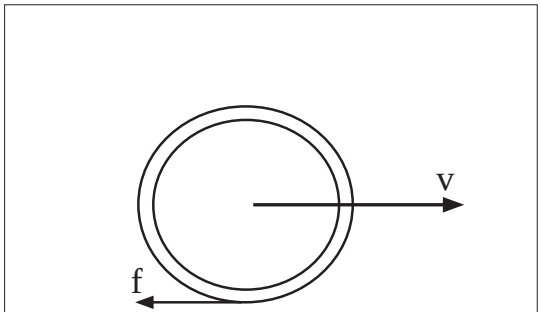
نکتـــهٔ دیگری که باید در نظر گرفت این اســـت که در این حالت نیروی اصطکاک رو به جلو، بســـته به شرایط، می‌تواند از نوع اصطکاک ایستایی یا جنبشی باشد. وقتی که اتومبیل بدون سر خوردن شروع به حرکت کند (مثلاً در جاده آسفالت که ضریب اصطکاک ایســـتایی آن بالا است) اصطکاک از نوع ایستایی است اما وقتی‌که اتومبیل در شروع به حرکت لغزش داشته باشـــد (مانند شـــروع حرکت در جاده گل‌آلود، یا در حرکت به اصطلاح "تیک آف")، اصطکاک از نوع جنبشی است.

در ادامه، وقتی که اتومبیل با ســـرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد، نیروی اصطکاک (ایســـتایی و جنبشـــی) بین چرخ‌ها و جاده صفر می‌باشـــد. زیرا طبـــق قانون دوم نیوتون برایند نیروی افقی وارد بر اتومبیل صفر است (شکل ۲).



▲ شکل (۲) چرخ اتومبیل در حرکت با سرعت ثابت

ســـرانجام، وقتی راننده ترمز می‌گیـــرد و حرکت اتومبیل شتابدار کندشونده اســـت، جهت نیروی اصطکاک در خلاف جهت حرکت اتومبیل اســـت (شـــکل ۳). ممکن است ترمز گرفتن با غلتش کامل باشـــد (بدون ســـر خوردن، اصطکاک ایستایی) یا اینکه لغزش داشته باشد (سر خوردن، اصطکاک جنبشی) که در تعیین جهت نیروی اصطکاک بی‌تأثیر است.

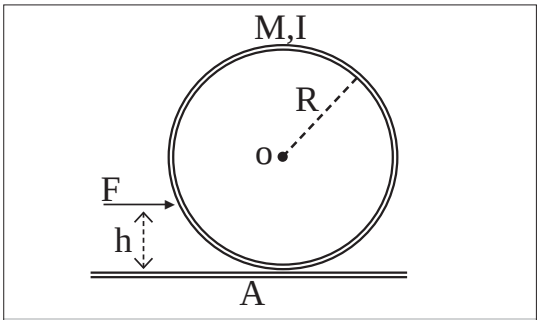


▲ شکل(۳) چرخ اتومبیل در حرکت کندشونده

این مثال نشـــان می‌دهد که در یک مســـئلهٔ خاص شرایط حرکت می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در جهت نیروی اصطکاک داشته باشد.

٤. چرخ قائم و نیروی خارجی افقی

فرض کنید چرخی به جرم M و شعاع R و لختی دورانی I حول مرکز جرم خود، روی یک سطح افقی دارای اصطکاک در حال سکون است. در لحظهٔ t=۰ نیروی افقی F در ارتفاع h به چرخ وارد می‌شود (شکل ۴)، در این حالت جهت نیروی اصطکاک وارد بر چرخ از طرف زمین چگونه است؟ شاید در نگاه اول چنین به‌نظر برسد که این نیرو همواره خلاف جهت نیروی خارجی F و به سمت چپ است. اما همان‌طور که بعداً خواهیم دید، این گفته همواره صحیح نیست و مسئله نیاز به بررسی و تحلیل فیزیکی دارد.

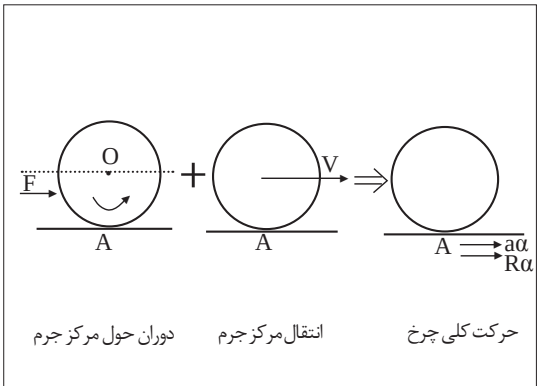


شکل (۴) اعمال نیروی خارجی F بر چرخ ساکن و تعیین جهت نیروی اصطکاک

برای تعیین جهت نیروی اصطکاک باید به این نکته توجه داشته باشیم که نیروی F می‌خواهد نقطهٔ تماس A را به چه سمتی جابه‌جا کند؟ در این صورت با قطعیت می‌توان گفت که نیروی اصطکاک در خلاف آن جهت خواهد بود.

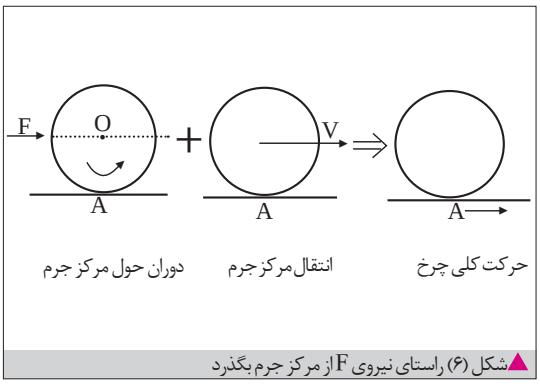
نیروی افقی F می‌تواند به دو نوع حرکت متمایز در چرخ بینجامد[۳]: (۱) حرکت انتقالی مرکز جرم مطابق با رابطه $\vec{F} = m\vec{a}$ و (۲) حرکت دورانی حول مرکز جرم مطابق با روابط گشتاور $\vec{\tau} = I\vec{\alpha}, \vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$

واضح است که اگر امتداد نیروی F از زیر مرکز جرم چرخ (O) بگذرد، گشتاور نیروی τ می‌خواهد چرخ را در جهت پادساعتگرد حول مرکز جرم بچرخاند (شکل ۵).



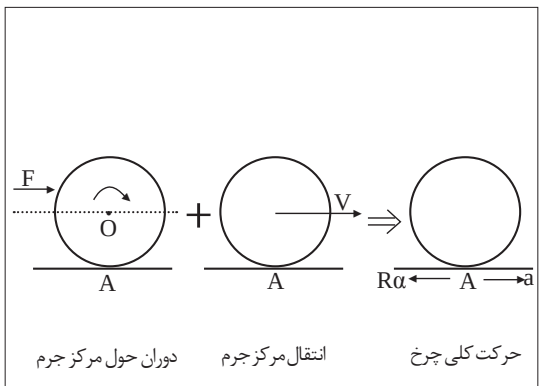
شکل (۵) راستای نیروی F پایین‌تر از مرکز جرم باشد

در صورتی که امتداد F از مرکز چرخ بگذرد، گشتاور τ حول مرکز جرم صفر است و نیروی F فقط باعث حرکت انتقالی چرخ می‌شود (شکل ۶).



شکل (۶) راستای نیروی F از مرکز جرم بگذرد

سرانجام، اگر امتداد F از بالای مرکز جرم چرخ (O) بگذرد، گشتاور نیروی **τ** می‌خواهد چرخ را به‌صورت ساعتگرد حول مرکز جرم بچرخاند. (شکل ۷).



شکل(۷) راستای نیروی F بالاتر از مرکز جرم باشد

واضح است که در شکل‌های (۵) و (۶) نقطه تماس A می‌خواهد به سمت راست جابه‌جا شود، بنابراین در این دو حالت که $h \le R$ با قطعیت کامل می‌توان گفت که نیروی اصطکاک وارد بر A در خلاف جهت F است.

اما، وضعیت برای شکل (۷) که h>R متفاوت است. در این شرایط، جهت حرکت A ناشی از نیروی F و گشتاور نیروی آن τ در خلاف جهت یکدیگرند. بنابراین بسته به اینکه (a-Rα) مثبت یا منفی باشد، نقطهٔ A می‌خواهد به سمت راست یا چپ حرکت کند، و در نتیجه نیروی اصطکاک به‌ترتیب به سمت چپ یا راست خواهد بود. واضح است که در این وضعیت، با افزایش (h-R) گشتاور نیرو و در نتیجه شتاب زاویه‌ایی حول مرکز جرم (α) افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار داریم در یک h_0 خاص رابطهٔ زیر برقرار باشد.

$$a=R\alpha \qquad (۱)$$

یعنی اگر نیروی F در این ارتفاع خاص h_0 به چرخ وارد شود،

چرخ غلتش کامل خواهد داشت (شـــتاب نقطه پایین چرخ صفر است) و نیروی اصطکاک وارد بر آن (ایستایی و جنبشی) صفر خواهد بـــود. علاوه بر این، در ارتفاع‌هـــای $h>h_{\circ}$ داریم $R\alpha>a$ و نیـــروی اصطکاک در جهـــت F و رو به جلو خواهد بود؛ این نتیجه جالب و برخلاف پیش‌بینی ســـطحی اســـت کـــه نیروی اصطکاک حتماً در خـــلاف جهت نیروی خارجی F است. این مسئله همچنین نشان می‌دهد که تعیین جهت نیروی اصطکاک می‌تواند پیچیده باشد.

در ادامه برای تکمیل بحث، ارتفاع $h_{\circ}$ را محاسبه می‌کنیم. بدین‌منظـــور، در غیاب نیروی اصطکاک (در ارتفاع $h_{\circ}$ نیروی اصطکاک صفر است)، شتاب انتقالی a و شتاب زاویه‌ای α را محاسبه می‌کنیم. برای حرکت انتقالی مرکز جرم داریم:

$$F = M\vec{a} \Rightarrow N = Mg, a = \frac{F}{M} \qquad (۲)$$

و برای حرکت دورانی حول مرکز جرم داریم:

$$\vec{\tau} = I\vec{\alpha} \Rightarrow \vec{\tau}_F + \vec{\tau}_N + \vec{\tau}_{Mg} = I\vec{\alpha} \Rightarrow$$
$$F(h-R) = I\alpha \Rightarrow$$
$$\alpha = \frac{F}{I}(h-R) \qquad (۳)$$

بنابراین

$$a - R\alpha = \frac{F}{M} = \frac{F}{M}$$

و با اعمال شـــرط صفر بودن شـــتاب کل نقطه تماس[۳]، داریم:

$$a - R\alpha = ۰ \Rightarrow h_{\circ} = R(۱ + \frac{I}{MR^۲}) \qquad (۴)$$

به‌عنوان مثـــال برای چـــرخ اســـتوانه‌ای یکنواخت داریم $I = \frac{۱}{۲}MR^۲$ و بنابراین $h_{\circ} = \frac{۳}{۲}R$ خواهد بود.

هدف این مســـئله تعیین جهت نیـــروی اصطکاک بود که حاصل شد، اما اجازه دهید در این مثال خاص، حرکت چرخ را در وضعیت $h<h_{\circ}$ (که نیروی اصطکاک به سمت جلو است) مورد بررسی قرار دهیم. ابتدا فرض کنید حرکت چرخ بدون لغزش باشد. در این حالت نیروی اصطکاک بین چرخ و زمین از نوع اصطکاک ایســـتایی اســـت و چرخ دارای غلتش کامل خواهد بود و داریم:

$$\left\{\begin{array}{l} F + f_s = Ma, N = Mg \\ F(h-R) - f_s R = I\alpha \end{array}\right\} \qquad (۵)$$

با اعمال شـــرط غلتش کامل $a=R\alpha$ جـــواب به‌صورت زیر به‌دست می‌آید،

$$a = R\alpha = \frac{Fh}{I + MR^۲} \qquad (۶)$$

$$f_s = F(\frac{hMR}{I + MR^۲} - ۱) \qquad (۷)$$

اصطکاک ایستایی هیچ کاری بر روی چرخ انجام نمی‌دهد و باعث اتلاف انرژی نمی‌شود، زیرا در این شرایط سرعت نقطه پایین چرخ به‌صورت رابطه $\upsilon = (a-R\alpha)t$ و همواره صفر است و چرخ روی ســـطح لغزش نخواهد داشـــت. شرط لازم برای غلتش کامل آن اســـت که f_s محاسبه شده در رابطه (۷) قابل تأمین باشد. بنابراین، شرط غلتش کامل را می‌توان به‌صورت زیر نوشت[۳]:

$$f_s \le \mu_s N \qquad (۸)$$
$$\Rightarrow F(\frac{hMR}{I + MR^۲} - ۱) \le \mu_s Mg$$
$$\mu_s \ge \frac{F}{Mg}(\frac{hMR}{I + MR^۲} - ۱).$$

اما، اگر این شـــرط برقرار نباشد (ضریب اصطکاک ایستایی سطح و چرخ کوچک باشد، مانند حرکت چرخ روی یک سطح لیز)، چرخ می‌لغزد و نیروی بین چرخ و زمین از نوع اصطکاک جنبشی خواهد بود. در این شرایط، معادله‌های حرکت چرخ و جواب آن‌ها بدین‌صورت خواهد شد:

$$\left\{\begin{array}{l} F + f_k = Ma \\ N = Mg, f_k = \mu_k N \\ F(h-R) - f_k R = I\alpha \end{array}\right\} \qquad (۹)$$

$$a = \frac{F}{M} + \mu_k g \qquad (۱۰)$$

$$= \frac{F(h-R) - \mu_k MgR}{I} \qquad (۱۱)$$

در این حالت شـــتاب نقطه تماس چـــرخ با زمین $(a-R\alpha)$ مقـــداری غیرصفر و منفی خواهد شـــد و چـــرخ روی زمین می‌لغزد و بر اثر لغزش بخشـــی از انرژی آن توسط اصطکاک جنبشی تلف می‌شود.

روش مطرح شده برای تعیین جهت اصطکاک را می‌توان به مســـائل پیچیده‌تر نیز تعمیم داد. نکته مهم و کلیدی در این روش، تعیین جهت حرکت (یا حرکت احتمالی) نقطهٔ تماس

با اینکه نیروی اصطکاک به‌عنوان عامل بازدارندگی و اتلاف انرژی شهرت دارد، اما در پاسخ به این پرسش که چه عاملی باعث می‌شود انسان روی زمین راه برود، مشاهده می‌شود که نیروی اصطکاک می‌تواند عامل حرکت نیز باشد

جسم به سطح است که باید در غیاب نیروی اصطکاک محاسبه گردد (محاسبه شتاب نقطه تماس در غیاب اصطکاک). پس از آن، اگر این شتاب غیرصفر و نقطه تماس تمایل به حرکت داشته باشد، نیروی اصطکاک در جهتی خواهد بودکه در صورت امکان از این لغزش جلوگیری کند (شتاب نقطه تماس در حضور اصطکاک را صفر کند، اصطکاک ایستایی) و یا اینکه از مقدار آن بکاهد (شتاب نقطه تماس در حضور اصطکاک کمتر از شتاب آن در غیاب اصطکاک است، اصطکاک جنبشی). اما، اگر بدون در نظر گرفتن نیروی اصطکاک شتاب نقطه تماس صفر باشد (در این مثال نیرو در ارتفاع h_0 وارد شود)، در این صورت نقطه تماس تمایل به حرکت ندارد، و از این رو، نیروی اصطکاک (ایستایی یا جنبشی) به آن وارد نمی‌شود. زیرا، در صورت وارد شدن نیروی اصطکاک طبق قانون دوم نیوتون، شتاب نقطه تماس دیگر صفر نخواهد بود، و این نتیجه بدین معنی است، که اصطکاک باعث حرکت جسمی می‌شود که هیچ تمایلی به حرکت ندارد و از این رو غیرممکن است.

بررسی مثال‌های مختلف تعیین جهت نیروی اصطکاک نشان می‌دهد که تعیین جهت این نیرو همواره کار ساده‌ای نیست

۵. حرکت مهره روی تسمه نقاله

در اغلب مثال‌هایی که بررسی می‌شوند، سطح زیرین را ثابت فرض می‌کنیم اما سطح می‌تواند خود دارای حرکت باشد که یکی از ساده‌ترین مثال‌های با سطح متحرک، تسمه نقاله است.

تسمه نقاله شامل تسمه‌ای افقی است که حرکت می‌کند و اجسامی که روی آن قرار دارد را با خود جابه‌جا می‌کند. برای آغاز حرکت، دو حالت را در نظر می‌گیریم: حالت اول تسمه در حال حرکت با سرعت ثابت و به سمت راست باشد و در لحظه $t=0$ مهره روی آن قرار گیرد که در این‌صورت مهره روی آن می‌لغزد و تنها نیروی افقی وارد بر آن اصطکاک تسمه است. بنابراین تا زمانی که سرعت مهره با سرعت تسمه برابر شود، نیروی اصطکاک از نوع جنبشی خواهد بود.

حالت دوم اینکه مهره روی تسمه قرار داشته باشد و هر دو ساکن باشند و در لحظه $t=0$ تسمه به آرامی شروع به حرکت به سمت راست کند به طوری‌که لغزش نداشته باشیم و مهره همراه تسمه حرکت کند. در این حالت، نیروی اصطکاک میان مهره و تسمه از نوع ایستایی خواهد بود. در هر دو حالت، حرکت آغازین مهره تندشونده است و به تدریج بر سرعت آن افزوده می‌گردد. بنابراین طبق قانون دوم نیوتون، باید نیروی کل افقی وارد بر مهره که در اینجا فقط نیروی اصطکاک است هم‌جهت با حرکت مهره باشد. از این رو، نیروی اصطکاک (ایستایی یا جنبشی) الزاماً در جهت راست بر مهره وارد می‌شود و بر سرعت آن می‌افزاید.

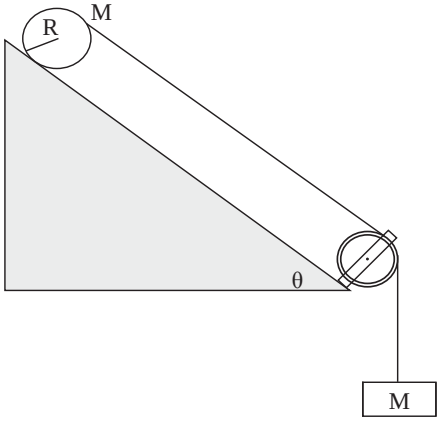
در هر دو حالت، پس از مدتی سرعت حرکت مهره ثابت می‌شود و همراه تسمه با سرعت ثابت حرکت می‌کند (در این حالت سرعت نسبی مهره و تسمه صفر است). از آنجا که تنها نامزد نیروی افقی وارد بر مهره، نیروی اصطکاک است، طبق قانون دوم نیوتون در این مرحله نیروی اصطکاک (ایستایی و جنبشی) صفر است.

حال فرض کنید تسمه به تدریج و به آرامی شروع به ایستادن کند. طبق قانون اول نیوتون، در غیاب اصطکاک، مهره می‌خواهد همچنان با سرعت ثابت به سمت راست حرکت کند، بنابراین نیروی اصطکاک الزاماً به سمت چپ بر آن وارد می‌شود، که البته از قانون دوم نیوتون نیز همین نتیجه حاصل می‌شود. این نیروی اصطکاک با توجه به اندازهٔ ضریب اصطکاک بین مهره و تسمه و شتاب کند شدن حرکت تسمه، می‌تواند از نوع ایستایی یا جنبشی باشد. اگر تسمه خیلی آرام شروع به ایستادن کند، مهره روی آن سُر نمی‌خورد و نیروی اصطکاک وارد بر آن از نوع ایستایی خواهد بود. اما اگر تسمه به‌صورت ناگهانی متوقف شود، مهره روی آن سُر خواهد خورد و نیروی اصطکاک وارد بر آن از نوع جنبشی است.

تحلیل مسائل مربوط به حرکت جسم روی جسم یا حرکت اجسام داخل وانت نیز به همین شیوه انجام می‌شود.

٦. حرکت استوانه روی سطح شیبدار

به‌عنوان مثال آخر به بررسی حرکت یک استوانه یکنواخت روی سطح شیب‌دار خواهیم پرداخت (شکل ۸).



در این مثال نیز مشابه با مثال قسمت ۴، برای تعیین جهت

▲شکل (۸) حرکت استوانه روی سطح شیب‌دار

اصطکاک، حرکت نقطه تماس استوانه با سطح شیب‌دار را در غیاب نیروی اصطکاک مورد بررسی قرار می‌دهیم. حرکت استوانه ترکیب دو حرکت انتقالی مرکز جرم و دوران حول مرکز جرم است. نیروی کشش طناب و مؤلفه نیروی وزن در راستای سطح شیب‌دار، باعث حرکت انتقالی استوانه به سمت پایین سطح شیب‌دار می‌شوند. اگر شتاب انتقالی مرکز جرم استوانه به سمت پایین سطح شیب‌دار برابر a باشد، طبق قانون دوم نیوتون داریم:

$$\left.\begin{matrix} Mg\sin(\theta)+T=Ma \\ N=Mg\cos(\theta) \end{matrix}\right\} \qquad (۱۲)$$

علاوه بر این، نیروی کشش طناب می‌خواهد استوانه را در جهت ساعتگرد حول مرکز جرم آن بچرخاند:

$$TR=I\alpha=\frac{۱}{۲}MR^{۲}\alpha \qquad (۱۳)$$

در این رابطه $I=\frac{۱}{۲}MR^{۲}$ و α به ترتیب لختی دورانی و شتاب زاویه‌ای دوران استوانه حول مرکز جرم آن است [۳]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جهت حرکت نقطه تماس A در اثر حرکت انتقالی و دورانی در خلاف جهت یکدیگرند. بنابراین بسته به اینکه $(a-R\alpha)$ مثبت یا منفی باشد، نقطهٔ A می‌خواهد به سمت پایین یا بالای سطح شیب‌دار حرکت کند، و در نتیجه نیروی اصطکاک به‌ترتیب به سمت بالا یا پایین خواهد بود. برای حل کامل مسئله باید معادله حرکت انتقالی جسم متصل به استوانه را نیز مورد بررسی قرار داد. از آنجایی که شتاب این جسم با شتاب نقطه بالای استوانه برابر است[۳]، طبق قانون دوم داریم:

$$Mg-T=M(a+R\alpha) \qquad (۱۴)$$

بنابراین از معادله‌های ۱۲ تا ۱۴نتیجه می‌شود که:

$$a-R\alpha=\frac{g}{۴}(۵\sin(\theta)-۱) \qquad (۱۵)$$

این رابطه نشان می‌دهد که در این مثال خاص نیز تعیین جهت نیروی اصطکاک (بدون انجام محاسبات) کار ساده‌ای نیست و جهت آن وابسته به زاویه سطح شیب‌دار است. در زاویه

$$\sin(\theta_{.})=\frac{۱}{۵} \qquad (۱۶)$$

تساوی $a=R\alpha$ برقرار و نیروی اصطکاک (ایستایی و جنبشی) صفر است. در زاویه های $\theta>\theta_{.}$، نقطه تماس استوانه با سطح شیبدار می‌خواهد به سمت پایین سطح شیبدار حرکت کند و نیروی اصطکاک در خلاف جهت و به سمت بالا خواهد بود. سرانجام در حالت $\theta<\theta_{.}$، عبارت $(a-R\alpha)$ منفی و نیروی اصطکاک به سمت جلو خواهد بود. نتیجهٔ اخیر برخلاف برداشت سطحی اولیه، مبنی بر آن است که نیروی اصطکاک همیشه در خلاف جهت حرکت مرکز جرم استوانه قرار دارد.

نکته مهم دیگری که باید در نظر داشت آن است که در این مثال نیز، بسته به اندازهٔ ضریب اصطکاک ایستایی μ_s بین استوانه و سطح شیب‌دار، و اندازه زاویه θ سطح شیب‌دار، نیروی اصطکاک می‌تواند از نوع ایستایی یا جنبشی باشد. در دو حالت $\theta>\theta_{.}$ و $\theta<\theta_{.}$، با افزودن جمله اصطکاک به رابطه (۱۲)، و ترکیب آن با معادله‌های (۱۳) و (۱۴)، با روش مشابه قسمت ۴، می‌توان نشان داد که اگر رابطه

$$\mu_s\geq\frac{|۱-۵\sin(\theta)|}{۵\cos(\theta)} \qquad (۱۷)$$

برقرار باشد، غلتش کامل $(a=R\alpha)$ رخ می‌دهد و نیروی اصطکاک بین استوانه و سطح شیب‌دار از نوع ایستایی است. در غیر این صورت استوانه روی سطح سُر می‌خورد $(a\neq R\alpha)$، و نیروی اصطکاک وارد بر آن از نوع جنبشی خواهد بود.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، در قالب مثال‌های مختلف، به بررسی تعیین جهت نیروی اصطکاک (ایستایی و جنبشی) پرداختیم. مثال‌های مطرح شده نشان می‌دهد که تعیین جهت نیروی اصطکاک همواره کار ساده‌ای نیست و به شرایط اولیه و مقدار پارامترهای مختلف موجود در مسئله بستگی دارد. روش کلی مطرح شده جهت تعیین جهت نیروی اصطکاک، حل کامل مسئله در غیاب اصطکاک، و تعیین جهت حرکت (یا حرکت احتمالی) نقطهٔ تماس جسم با سطح است. پس از این فرایند، نیروی اصطکاک در جهتی است که مانع انجام این لغزش شود. این روش نشان می‌دهد که در برخی شرایط جهت نیروی اصطکاک با پیش‌بینی سطحی همخوانی ندارد، و با تغییر یک پارامتر، مثل مکان اثر نیرو، زاویه سطح و ... ، جهت این نیرو می‌تواند تغییر کند.

منابع

۱. فیزیک، دوره پیش‌دانشگاهی،رشتهٔ علوم ریاضی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، چاپ چهاردهم، ۱۳۹۴.

۲. فیزیک (۲) و آزمایشگاه، سال دوم آموزش متوسطه، رشته‌های علوم تجربی- ریاضی فیزیک، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، چاپ سیزدهم، ۱۳۹۲.

۳. مبانی فیزیک، دیوید هالیدی - رابرت رزنیک - جرل واکر، ویرایش ۱۰.

Direction of the Friction-Force

Ezzatollah Rezaei[۱], KhaterehJafari[۲], Mojtaba Golshani[۳]

۱) Shahid Ahmadi Roshan High School for talent student, Ghorveh, Kurdistan, Iran

۲) Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

۳) Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran