دربارۀ دوران و غلتش

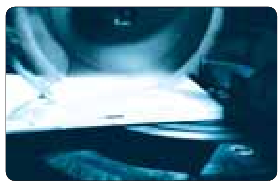
ریچارد ولفسون
ترجمۀ آرش ظهوریان پردل

مقدمه

در بررسی حرکت دورانی یا چرخشی، می‌توانیم دو رویکرد را در پیش بگیریم: ۱. برای هر ذرۀ تشکیل‌دهندۀ دستگاه چرخان از قوانین نیوتون استفاده کنیم، و ۲. هوشمندانه‌تر عمل کرده و دستگاه‌های چرخنده را با روش‌های دیگری بررسی کنیم.

ابتدا به چند مثال از حرکتِ دورانی توجه کنید:

* تیغ ارۀ دایره‌ای

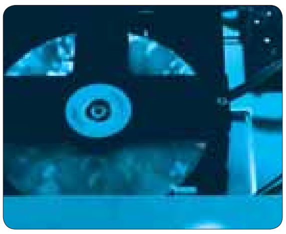


* سیارۀ ما، زمین، که حول محورش می‌چرخد،

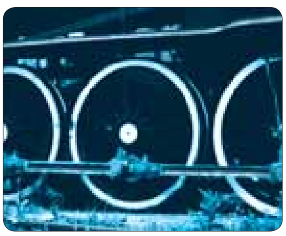
* توربین بادی،

عقربه‌های ثانیه‌شمار، دقیقه‌شمار و ساعت‌شمار ساعت،

* لوح فشرده‌ای که در دستگاهِ پخش قرار دارد،



* چرخ‌های یک ماشین بخارِ قدیمی.

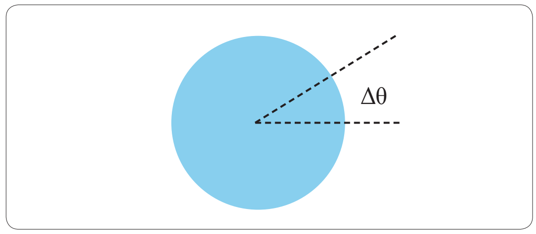


همۀ این دستگاه‌ها دارای حرکتِ دورانی هستند و حال می‌خواهیم روش ساده‌ای برای توضیح این حرکت بیابیم:

کلیدواژه‌ها: دوران، غلتش، لختی دورانی، گشتاور

روشی که در پیش خواهیم گرفت از تعمیم کمیت‌هایی است که قبلاً در حرکت در خط راست آموخته بودیم. در نتیجۀ این تعمیم، به کمیت‌های معادل و مشابهی برای حرکتِ چرخشی می‌رسیم. از جملۀ این کمیت‌ها، می‌توان به مکان، سرعت و شتاب اشاره کرد که قبلاً در حرکت در خط راست استفاده کرده بودیم و اینک، معادل آن‌ها در حرکتِ‌دورانی را به‌کار خواهیم گرفت.

در اینجا، تصویری از یک جسم چرخان را می‌بینیم که تحتِ زاویه‌ای می‌چرخد. نام این زاویه را $\Delta\theta$ می‌گذاریم. بنابراین، جسم ما که به یک دیسک یا چرخ شبیه است، حرکتِ خود را از خط‌چین افقی شروع می‌کند و این خط‌چین، به اندازۀ زاویه $\Delta\theta$ می‌چرخد:



θ یـا مکان زاویــه‌ای معادل مکان اســت. بنابرایــن، معادل جابه‌جایـی (Δx) کـه تغییر در مکان اسـت، به‌صورتِ $\Delta\theta$ (جابه‌جایی زاویه‌ای) تعریف خواهد شد.

می‌توانیم این جابه‌جایی زاویه‌ای را بر حســبِ دور، درجه و یا رادیان اندازه بگیریم.

اکنون به سرعت می‌پردازیم. سرعت چیست؟ سرعت عبارت است از تغییر مکان بر حســب زمان. بنابراین، سرعتِ زاویه‌ای عبارت خواهد بود از:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

که همان آهنگِ تغییرِ زاویه (مکان زاویه‌ای) است.

می‌توانیم ســرعت را بر حســبِ دور بر دقیقه (rmp) اندازه بگیریم که خیلی متداول اســت، و یا می‌توانیم آن را بر حسبِ درجه بر دقیقــه اندازه بگیریم و در نهایــت، می‌توانیم آن‌را بر حسبِ رادیان بر ثانیه اندازه بگیریم. (به شما خواهیم گفت چرا شاید بخواهیم کمیت‌ها را بر حسب رادیان اندازه بگیریم).

اما شتاب چیست؟ شتاب عبارت است از آهنگِ تغییر سرعت. بنابراین، شــتابِ زاویه‌ای عبارت خواهد بــود از آهنگِ تغییر، سرعتِ زاویه‌ای:

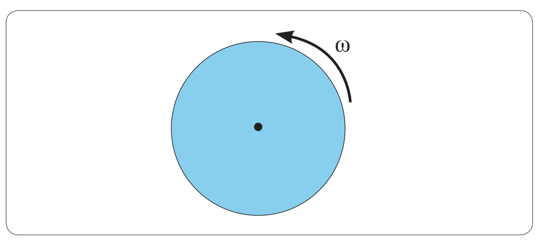
$$\alpha = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

که می‌تواند بر حسب rpm بر ثانیه، یا درجه بر ثانیه بر ثانیه، و یا رادیان بر مجذور ثانیه اندازه گرفته شود.

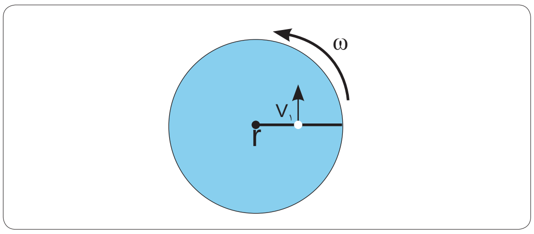
***

حــال، به رابطهٔ میان ســرعتِ چرخشــی و ســرعتِ خطی می‌پردازیم:

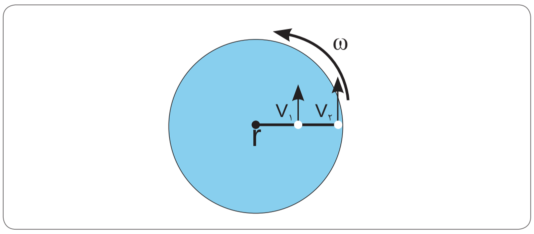
در تصویر زیر، جســمی را می‌بینیم که با سرعتِ زاویه‌ای ω دوران می‌کند:



چنانچه از مرکز این دیسک فاصله داشته باشیم، نقطهٔ مزبور با سرعتِ V_1 دوران خواهد کرد. این سرعت، در راستای، عمود بر شعاع قرار دارد:



چنانچه فاصلهٔ ما از مرکز دو برابر شود سرعت زاویه‌ای هم دو برابر خواهد شد:

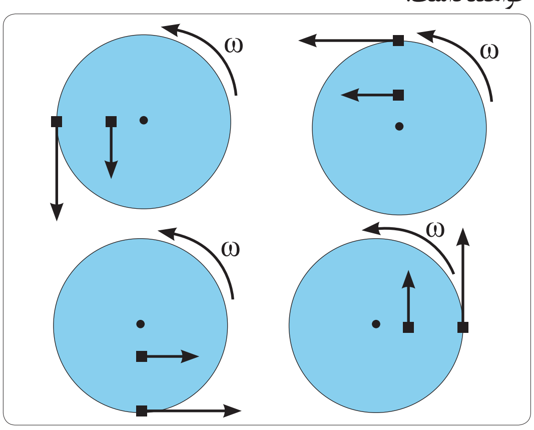


نقطهٔ دوم ســریع‌تر از نقطهٔ اول می‌گردد، چراکه مسیری که باید طی کند دوبرابر نقطهٔ اول است. اگر تمام دیسک با سرعتِ زاویه‌ای مشخصی بچرخد در این‌صورت نقطهٔ خارجی، یک دور کامل را همزمان با نقطهٔ داخلی طی می‌کند، با این تفاوت که سرعتِ (خطی) آن، دو برابر است.

از اینجــا می‌توانیم نتیجه بگیریم که ســرعتِ یک نقطه (که در فاصلهٔ r از مرکزِ جســم چرخنده‌ای قرار دارد که با ســرعتِ زاویه‌ای ω می‌گردد) عبارت خواهد بود از:

$$V = \omega r$$

وقتی دیسک می‌گردد، همهٔ قسمت‌های آن چنین وضعیتی خواهند داشت:

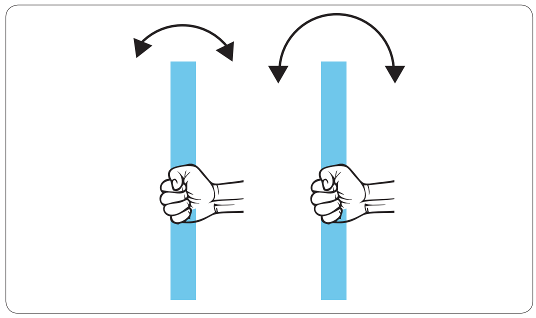


ایــن دو بردارِ ســرعت، می‌چرخند و همواره بر شــعاع عمود خواهند بود.

***

تا کنون، کمیت‌های معادل مکان، جابه‌جایی، سرعت و شتاب را تعریف کرده‌ایم. کار بعدی که باید انجام دهیم، تعریفِ کمیتِ معادلی برای جرم است.

دو میله ظاهراً مشابه و هم‌جرم به رنگ‌های آبی و قرمز داریم. چنانچه هر کدام را از وسط، با مچ دستمان به طرفین بچرخانیم، ملاحظه خواهیم کرد که با وجودِ شباهتِ ظاهری میله‌ها و اینکه هر دو جرم یکسانی دارند، چرخاندن و حرکت دادن یکی از آن‌ها (میلهٔ آبی) دشوارتر است:



چه اختلافی میان این دو میله وجود دارد؟ تفاوتِ میان این دو میله، در چگونگی توزیع جرم در آن‌هاست: در میلهٔ قرمز، جرم عمدتاً در وسط میله متمرکز شده است. بنابراین، جرم چندانی در دو انتهای میلهٔ قرمز وجود ندارد. اما در میلهٔ آبی، بیشتر جرم در دو انتهای آن متمرکز شده و به همین دلیل، شتاب دادن به میلهٔ آبی برای من دشوارتر است. بنابراین، نوعی از لختی در میلهٔ آبی بیشتر است؛ نه آن لختی مرتبط به حرکت بر خط راست (چندان به‌واسطهٔ هم جرم بودن میله‌ها، برای شتاب دادن به آن ها در خط راست به نیروی یکسانی نیاز است).

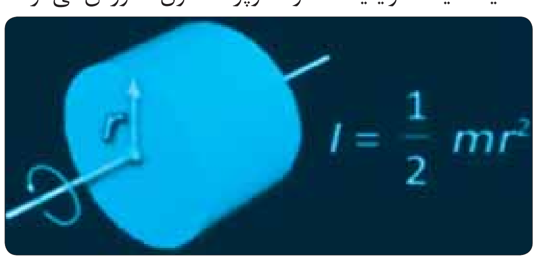
این نوع لختی که باعث می‌شود چرخاندن یکی از میله‌ها دشوارتر باشد، مقاومت در برابر حرکت دورانی است:

لختی دورانی، عبارت است از مقاومت در برابر تغییر در حرکتِ دورانی (چرخشی)

بیایید نگاهی به لختی دورانی چند جسم بیندازیم:

۱. یک حلقه یا استوانهٔ توخالی که حول محورش می‌چرخد:

۲. یک دیسک و یا یک استوانه توپُر که حول محورش می‌گردد:



دلیل تفاوتِ لختی دورانی در دو موردِ بالا، این است که جرم در استوانه توپُر به مرکز دوران نزدیک‌تر است. بنابراین، همانندِ میلهٔ قرمز، تغییرِ حرکتِ‌دورانی آن چندان دشوار نیست و در نتیجه، لختی دورانی آن کمتر است.

۳. پوستهٔ کروی توخالی که حول یکی از قطرهایش می‌گردد:

٤. کرهٔ توپُری که حول قطرش می‌گردد:

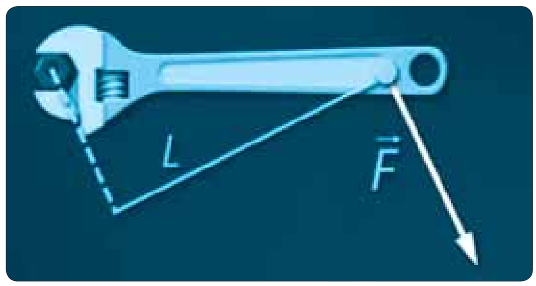
حال، به معادلی برای نیرو نیاز داریم. بیایید آزمایشی انجام دهیم: پیچ بلند و پهنی داریم، به همراه یک آچار، که از آن برای سفت کردن پیچ، استفاده خواهیم کرد. اگر به‌طور نه‌چندان هوشمندانه آچار را از نزدیکی پیچ (مرکز دوران) بکشیم، نمی‌توانیم آن را بچرخانیم:

حال، دستان خود را به انتهای دستهٔ آچار نزدیک می‌کنیم و نیرو وارد می‌کنیم: نتیجه به مراتب مؤثرتر خواهد بود.

البته می‌دانید که اگر بخواهید در بزرگی را باز کنید، قاعدتاً تلاش می‌کنید نیروی وارد، تا حدِ امکان از لولا دور باشد. به عبارتِ دیگر، هیچگاه نیرویتان را در فاصلهٔ نزدیک به لولای در، اعمال نمی‌کنید چون در این‌صورت ناچارید نیروی بیشتری وارد کنید.

ما دربارهٔ میــزان اثربخش بودن نیرویــی که موجبِ حرکت دورانی می‌شود صحبت می‌کنیم که به دو عامل بستگی دارد:
اول: اینکه چقدر نیرو وارد کنیم،
دوم: اینکه این نیروی اعمال شده، چقدر تا مرکز دوران فاصله داشته باشد.
این نیروی پیچشــی که با اعمال نیرو در یک فاصلهٔ معین از مرکز دوران به‌دست می‌آید، گشتاور نامیده می‌شود.

گشــتاور، براساس نیرو، و فاصلهٔ عمودی مرکز دوران تا نقطه اعمال نیرو، اندازه‌گیری می‌شود. لذا اگر خطی عمود بر راستای نیرو رسم کنیم و محل تلاقی این خط، با خطِ گذرنده از مرکزِ دوران (و موازی با راستای نیرو) را L بنامیم- که «بازوی اهرم» نام دارد- این فاصله برای محاسبه گشتاور به‌کار می‌رود.



گشتاور عبارت است از حاصل ضرب بازوی اهرم (L) و نیروی (پیچشی) اعمال شده. بنابراین برای یک نیروی مشخص، هرچه بازوی اهرم بزرگ‌تر باشــد، اثربخشــی تــلاش من برای تغییر حرکت دورانی، بیشتر خواهد بود:

گشتاور: معادل دورانی نیرو $\tau=LF$
****

برخی دیگر از معادل‌های دورانی را بررسی می‌کنیم:
قانــون دوم نیوتــون می‌گویــد $F=ma$. در حــال حاضــر، معادل‌هایی برای نیرو، جرم و شتاب داریم. بنابراین، معادل قانون دوم نیوتون، به این‌صورت خواهد بود:

$$F = ma \quad و \quad \tau=I\alpha$$

شتاب معمولی (خطی) — لختی معمولی (خطی)

برای انرژی جنبشی هم داریم:

$$K=\frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow K_{rot}=\frac{1}{2}I\omega^2$$

و تکانه:

$$P=mV \rightarrow L=I\omega$$

↓
تکانهٔ زاویه‌ای

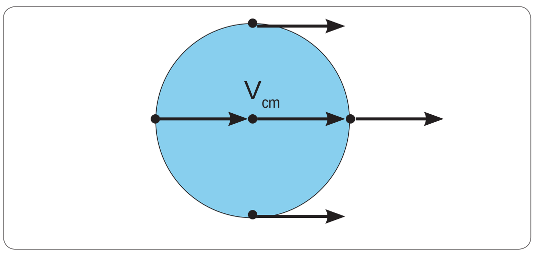
(البته رابطهٔ اخیر، تنها برای اجسام کاملاً متقارن در چرخش نظیر چرخ‌ها، کره‌ها و... صدق می‌کند).
بنابراین، می‌توانیم تعداد زیادی معادل برای کمیت‌هایی که قبلاً با آن‌ها آشــنا بودیم به‌دست آوریم؛ کمیت‌هایی که پیش از ایــن، در مــورد حرکت‌های خطی (در خط راســت) و حتی حرکت‌های در مسیر خمیده (در چند بُعد) استفاده می‌کردیم، ولی نه حرکتِ دورانی.

***

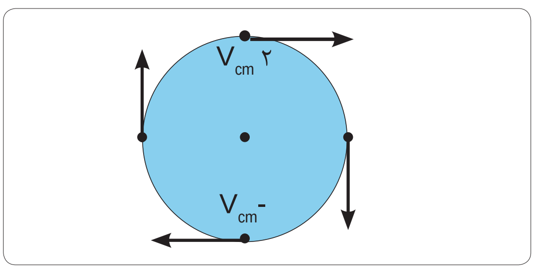
قضیه زمانی جالب می‌شــود که ترکیبی از هر دو نوع حرکت (دورانی و خطی) را داشته باشیم. در این صورت، با حالتِ خاصی از حرکت مواجهیم که آن را حرکتِ غلتشی می‌نامیم.

غلتــش، ترکیبی از حرکتِ انتقالــی (حرکت از یک مکان به مکان دیگر) و حرکتِ دورانی حول یک محور است.

جســمی شبیه به یک چرخ یا دیســک را در نظر بگیرید که حول محوری می‌گردد. این جسم، دارای مرکز جرمی است که درســت در مرکز آن قرار دارد. حال فرض کنیم که این جسم، به سمتِ راست حرکت می‌کند (حرکتِ انتقالی). در این‌صورت، می‌توانِ گفت که تمام جســم، با سرعتِ مرکز جرم، به سمتِ راست حرکت می‌کند (که در این مورد خاص، جرم درست در مرکز جسم قرار گرفته است):

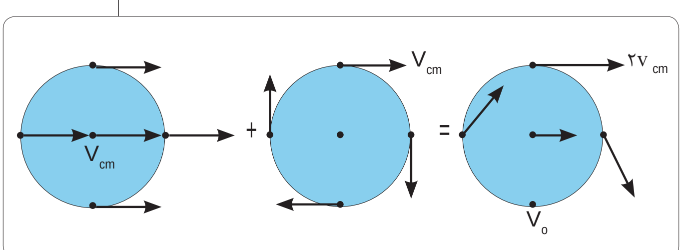


حــال، حرکتِ دورانی دیســک را در نظر می‌گیریم. هر نقطه روی چرخ، در راستای مماس بر چرخ حرکت می‌کند:



نقطهٔ بالایی با سرعت مرکز جرم به سمت راست حرکت می‌کند و نقطهٔ پایینی، با همان سرعت، در جهتِ عکس حرکت می‌کند.

* حرکت غلتشی، ترکیب این دو حرکت است:



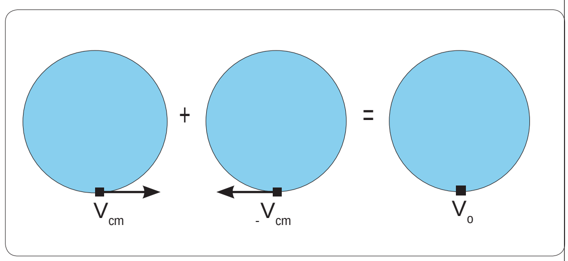
هنگامی که این دو حرکت را با هم تلفیق می‌کنیم، به نتایج مهمی می‌رسیم:

مرکز جرم، با سرعت V_{cm} حرکت می‌کند. نقطهٔ بالایی چرخ، با سرعت دو برابر مرکز جرم حرکت می‌کند. نقطهٔ سمت راست با سـرعتی متشکل از حرکتِ رو به پایینش (دورانی) و حرکت افقی‌اش (انتقالی) حرکت می‌کند. نقطهٔ سمت چپ، به‌صورت قطری و رو به بالا حرکت می‌کند. (بدیهی ست که با چرخیدن چرخ، این بردارها تغییر می‌کنند.)

اما جالب‌ترین حرکت، مربوط به نقطهٔ پایینی چرخ است:

پایین‌ترین قسمت چرخ غلتنده (که با سطح در تماس است)، به‌صورت لحظه‌ای، ساکن است.

دلیل چنین واقعیتی این است که دوران پیرامون مرکز جرم، می‌خواهد این نقطه را با سـرعت $-\vec{V}_{cm}$ به سمت چپ ببرد. در حالی‌که مرکز جرم، آن‌را با سرعت $\vec{V}_{cm}$ به راست می‌برد. در نتیجه، نقطهٔ مزبور دفعتاً ساکن خواهد بود:



این موضوع (ساکن بودن لحظه‌ای نقطهٔ پایین چرخ) موجب می‌شـود بتوانیم یک حرکت غلتشـی واقعی را از «سُـریدن» تفکیک کنیم. چنین ایده‌ای را می‌توان در موردِ ترمزها ABS به‌کار برد و تحلیل کرد. کار ترمزهای ضدقفل، همین است: این ترمزها همواره چرخ‌ها را در حال غلتش نگه می‌دارند و به همین دلیل، سطح تماس چرخ و سطح جاده، در یک لحظه، نسبت به یکدیگر ساکن خواهند بود. بنابراین اصطلاکِ بین چرخ و جاده، از نوع ایستایی است.

این واقعیت، پیامدهای جالبی را دربر خواهد داشـت. یکی از این پیامدها، این اسـت که رابطـهٔ $V_{cm}=\omega r$ که قبلاً در مورد حرکت دورانی به آن رسـیدیم، برای حرکت غلتشی نیز صدق می‌کند: چنانچه رابطهٔ میان حرکت دورانی با سرعت زاویه‌ای ω و سرعت مرکز جرم به‌صورت $V_{cm}=\omega r$ بنویسیم (شعاع چرخ است) در این صورت سرعت نقطهٔ بالایی چرخ را که بیشترین سـرعت را هم دارد، می‌توان از آن اسـتنتاج کرد. البته چنین رابطـه‌ای فقط و فقـط زمانی صحیح خواهد بـود که حرکتِ غلتشی، خالص و بدون لغزش و سُریدن باشد.

* * *

حال، با اسـتفاده از مفهوم لختی دورانی، آزمایشـی را انجام می‌دهیم:

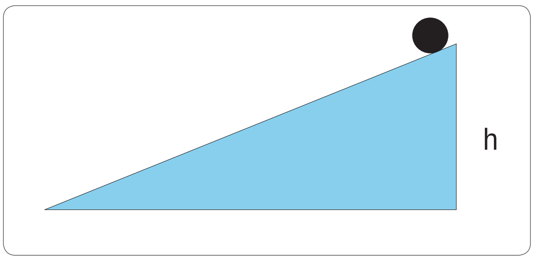
سطح شیب‌داری به همراه دو جسم در اختیار داریم. یکی از این اجسام، دیسکی صُلب است و دیگری، حلقه‌ای هم‌جرم و هم‌شعاع دیسک. این دو جسم را از بالای سطح شیب‌دار رها می‌کنیم. فکر می‌کنید کدام یک سریع‌تر به پایین سطح می‌رسد؟

دیسک پیروز می‌شود! اما چرا؟

دیسک صُلب، لختی دورانی کمتری دارد، چون بخش زیادی از جرم آن، حول مرکز متمرکز شده است. همین عامل موجب می‌شـود تا تغییر حرکت دورانی جسم، سـاده‌تر باشد. این در حالی است که در موردِ حلقه، تمام جرم در لبهٔ خارجی متمرکز شـده اسـت (همانند میلهٔ قرمز مثال اول) و در نتیجه، تغییر، حرکت دورانی آن دشوارتر است و شتاب کمتری می‌گیرد.

روش دیگری که می‌توانیم با کمک آن، این مسئله را تحلیل کنیم، استفاده از انرژی است:

دو جسم (حلقه ودیسک)، هر دو از ارتفاع شروع به حرکت بر روی سطح شیب‌دار می‌کنند و پایین می‌غلتند.



در نقطهٔ شروع، انرژی پتانسیل آن‌ها، عبارت است از $U=mgh$. در حالی‌که در ابتدای مسیر (بالای سطح شیب‌دار)، ساکن و در نتیجه دارای انرژی جنبشی صفر خواهد بود:

$K=0$

از طرفی، در انتهای مسـیر (پایین سطح شـیب‌دار)، انرژی پتانسیل آن‌ها صفر خواهد بود $U=0$ در حالی‌که انرژی جنبشی خواهند داشت.

اما مسئلهٔ مهم در اینجا، که البته باعث پیچیده‌تر شدن موضوع می‌شـود، این است که این اجسـام، ترکیبی از انرژی جنبشی انتقالی و انرژی جنبشی دورانی دارند:

$$K = K_{\text{انتقالی}} + K_{\text{دورانی}} = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

پایستگی انرژی می‌گوید: انرژی اولیه (mgh) با انرژی نهایی برابر است:

$$mgh = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

از اینجا به بعد جلوتر نمی‌توانیم برویم، مگر اینکه رابطهٔ میان

ω و v را بدانیم. این رابطه در حرکت غلتشی، به‌صورت $\omega=\frac{v}{r}$ است. پس:

لختی دورانی برای دیسک صلب عبارت است از:

$$I_{\text{دیسک}}=\frac{1}{2}mr^2$$

(ضریب $\frac{1}{2}$ از آنجا می‌آید که بخشی از جرم آن، حول مرکز متمرکز شده است).

لختی دورانی حلقه هم عبارت خواهد بود از:

$$I_{\text{حلقه}}=mr^2$$

حال، برای آنکه محاسبات را ساده‌تر کنیم، لختی را به‌صورت حاصل ضرب «چیزی» در mr^2 در نظر می‌گیریم:

$$I=amr^2 \begin{cases} a=\frac{1}{2} & \text{:دیسک} \\ a=1 & \text{:حلقه} \end{cases}$$

$$\Rightarrow mgh=\frac{1}{2}mu^2\underbrace{(1+a)}_{\text{تنها تفاوت دو جسم}}$$

این رابطه را برای سرعت حل می‌کنیم: جرم‌ها را از دو طرف حذف می‌کنیم (در تمام مسائل مربوط به گرانش، چنین اتفاقی می‌افتد) و در نتیجه، مهم نیست که دو جسم حتماً جرم‌های یکسانی داشته باشند. همچنین، مهم نیست که حتماً شعاع‌های یکسانی هم داشته باشند، چراکه شعاع‌ها نیز از دو طرف رابطه حذف می‌شوند.

سرانجام:

$$v=\sqrt{\frac{2gh}{1+a}}$$

و با عددگذاری، می‌رسیم به:

$$v_{\text{دیسک}}=0/82\sqrt{2gh}$$

$$v_{\text{حلقه}}=0/71\sqrt{2gh}$$

(اگر انرژی دورانی وجود نمی‌داشت، سرعت برابر $\sqrt{2gh}$ می‌شد).

***

در انتها، بهتر است یک معادله دیگر را هم بررسی کنیم؛ معادلی برای پایستگی تکانه. بیایید ابتدا نگاهی به پایستگی تکانهٔ زاویه‌ای بیندازیم:

تکانهٔ زاویه‌ای، معادل و همتای دورانی تکانهٔ خطی است. قانون دوم نیوتون را داریم که معادل دورانی آن، $\tau=I\alpha$ است. چنانچه قانون دوم نیوتون را بر حسب تکانه بنویسیم، خواهیم داشت: $F=\frac{\Delta P}{\Delta t}$ که همان آهنگ تغییر تکانهٔ یک دستگاه است. معادل دورانی این رابطه، به‌صورت $\tau=\frac{\Delta L}{\Delta t}$ خواهد بود که آهنگِ تغییر تکانهٔ زاویه‌ای است.

در مبحث حرکت خطی، به این نتیجهٔ بسیار مهم رسیدیم که اگر دستگاهی، در معرض هیچ‌گونه نیروی خارجی قرار نداشته باشد، تکانه‌اش پایسته خواهد ماند:

تکانه پایسته خواهند بود اگر $F_{\text{خارجی}}=0$

حال، می‌خواهیم به نتیجهٔ مشابهی برای تکانهٔ زاویه‌ای برسیم:

اگر گشتاوردهای خارجی، بر دستگاهی اثر نکنند، تکانهٔ زاویه‌ای آن نمی‌تواند تغییر کند و پایسته خواهد ماند.

تکانهٔ زاویه‌ای پایسته است. اگر $F_{\text{خارجی}}=0$

یک پاتیناژ باز را در نظر بگیرید که تحت هیچ گشتاور خارجی قرار ندارد و بر روی سطح یخی بدون اصطکاکی می‌چرخد. اگر او دستانش را به داخل جمع می‌کند. با این‌کار، تمرکز جرم را حول محور چرخش، افزایش خواهد داد که موجب می‌گردد لختی دورانی‌اش کاهش یابد. اما از آنجایی که باید تکانهٔ زاویه‌ای پایسته بماند، آنچه تغییر می‌کند و افزایش می‌یابد، سرعتِ زاویه‌ای اوست.

***

همان‌گونه که ملاحظه کردید، یک امتیاز حرکت دورانی نسبت به حرکت در خط راست، امکان تغییر توزیع جرم است: در حرکت در خط راست، تغییر توزیع جرم جسم، چندان ساده نیست. اما در حرکت دورانی، این امکان وجود دارد و تغییر توزیع جرم، منجر به تغییر لختی دورانی می‌شود و از آنجایی که تکانهٔ دورانی پایسته است، سرعت دورانی افزایش می‌یابد.

مثال پاتیناژ باز، مثالی متداول و کلاسیک دربارهٔ پایستگی تکانه زاویه‌ای است. بیایید به چند مثال پیچیده‌تر بپردازیم:

من روی یک صندلی چرخان بدون اصطکاک نشسته‌ام و هیچ گشتاور خارجی هم بر آن اثر نمی‌کند. همچنین، یک چرخ دوچرخه در دست دارم که جرم بسیار زیادی در لبهٔ آن متراکم شده است (در نتیجه، لختی دورانی آن زیاد است). حال، این چرخ را می‌چرخانم و روی صندلی می‌نشینم. دستگاه متشکل از من و چرخ، دارای تکانهٔ زاویه‌ای است:

اگر این چرخ را برگردانم و محور آن‌را برعکس کنم، جهت تکانهٔ زاویه‌ای آن عوض خواهد شد که در نتیجهٔ آن، من هم شروع به چرخش خواهم کرد!

اگر بخواهم از چرخش بازایســتم، تنها کافی اســت چرخ را مجدداً سر و ته کنم. از آنجایی که هیچ گشتاور خارجی بر این دستگاه اثر نمی‌کند، تکانهٔ زاویه‌ای آن ثابت خواهد ماند.

اتفاقی که افتاد، این بود: چرخ در ابتدا، در جهتی می‌چرخید و لذا تکانهٔ زاویه‌ای آن در یک جهت بود. من این تکانهٔ زاویه‌ای را برعکس کردم و در نتیجه، برای اینکه تکانهٔ زاویه‌ای پایسته بماند، در جهت مخالف شروع به چرخیدن کردم. در نتیجه تکانهٔ زاویه‌ای کل دستگاه ثابت می‌ماند، ولی اجزای مختلفِ دستگاه تکانه‌های زاویه‌ای‌شان را تغییر می‌دهند

***

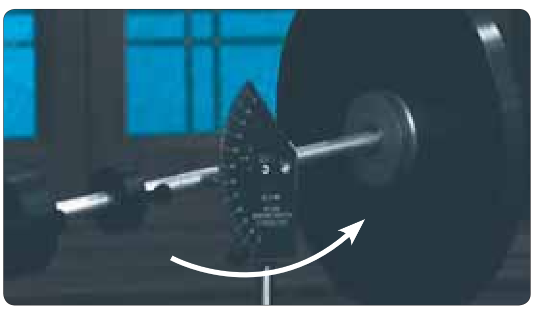
آزمایش دیگری نیز می‌توان با چرخ انجام داد که البته کمی دشوارتر است: چرخ دوچرخهٔ مثال قبل را می‌چرخانیم، سپس آن‌را به‌وسیلهٔ قطعه‌ای طناب که به محور دورانش متصل شده است، آویزان می‌کنیم. جالب است که به‌جای آنکه چرخ بیفتد و در حالت آویزان قرار بگیرد، شروع به گردش حول طناب (که به حالت عمودی قرار گرفته و به محور چرخ متصل شده) می‌کند:

آخر چرا و چگونه چرخ چنین حرکتی را انجام می‌دهد؟! چون تکانهٔ زاویه‌ای دارد! تکانهٔ زاویه‌ای چرخ، به سوی بیرون محور است. از طرفی، به واسطهٔ گرانش، به آن گشتاور وارد می‌شود. اگر چرخ در حال چرخش نمی‌بود، این گشتاور باعث می‌شد تا چرخ به‌صورت آویزان قرار بگیرد (محورش همراستای طناب باشد): اما چون این چرخ در حال چرخش اســت، گشتاور وارد بر آن، به‌صورتی عمل می‌کند که باعث چرخش چرخ حول محور طناب، می‌شود.

این پدیده را به نام «حرکت تقدیمی» می‌شناسیم.

حرکت تقدیمی را می‌توان با یک ژیروسکوپ به‌خوبی توضیح داد: ژیروســکوپی داریم که به‌طور دقیقی متعادل شده است. این ژیروسکوپ، شامل یک دیسک سنگین است که لختی دورانی زیادی دارد و به محوری متصل شده است:

دیسک را می‌گردانیم. ملاحظه می‌شود که تغییری در وضعیت ژیروسکوپ حاصل نمی‌شــود. حال، وزنهٔ کوچکی را به انتهای محور ژیروسکوپ آویزان می‌کنیم، به‌گونه‌ای که تعادل آن به‌هم بخورد. در این حالت، گشــتاور گرانشی به آن اعمال می‌گردد و تکانهٔ زاویه‌ای را تغییر خواهد داد که نتیجهٔ آن، چرخش محور ژیروسکوپ است:



می‌توانیم این رویداد را به کمک بردارها، این‌گونه توضیح دهیم که تکانهٔ زاویه‌ای، برداری است که در راستای محور دوران و این بردار، در اثر گشتاور اعمال شده، تغییر می‌کند.

درســت همان‌گونه که قانون دوم نیوتــون، مربوط به تغییر حرکت دســتگاه در راستای نیروســت، معادل این قانون برای دستگاه‌های چرخان، مربوط به تغییر تکانهٔ زاویه‌ای دستگاه در راستای گشتاوری است که به آن وارد می‌شود.

منبع

Richard Wolfson, Physics and our Universe (Rotational Motion), The Great Courses, 2011.