

فیزیک مکانیک

فصل ششم: نیرو و حرکت ۲

حسین شناور

گروه فیزیک، دانشکده علوم



دانشگاه هرمزگان

- این مجموعه درس در ایام همه گیری کرونا در تابستان و پاییز سال ۱۳۹۹ و با سرعتی بیش از حد معمول تهیه شده است؛ بنابراین، امکان وجود اشتباهات در این ارائه وجود دارد.
- خواهشمندم هرگونه اشتباه نوشتاری، مفهومی و یا محاسباتی را به آدرس ایمیل من ارسال کنید تا در ویرایش های بعدی تصحیحات لازم اعمال شوند:

h.shenavar@gmail.com

۱ فصل ششم: نیرو و حرکت ۲

- قانون دوم نیوتن در حرکت دایره ای یکنواخت
- حرکت در حضور نیروهای مقاومتی

آنچه گذشت...

قوانین نیرو: این قوانین، مقدار و جهت نیروی وارد شده بر یک جسم را در شرایط مختلف و با استفاده از آزمایش های دقیق بیان می کنند.

قانون گرانش نیوتن برای دو جرم نقطه ای:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

قانون کولن برای دو بار نقطه ای:

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

قانون هوک برای جرم متصل به فنر

$$F = -kx$$

نیروی عمودی سطح، کشش نخ، نیروی ارشمیدس و ...

این دو دسته قانون، طیف بسیار گسترده ای از پدیده های فیزیکی را به درستی توضیح می دهند.

قوانین حرکت:

یکی از راه های نوشتن قوانین حرکت، استفاده از سه قانون حرکت نیوتن است. این شکل از علم مکانیک کلاسیک را مکانیک نیوتنی می نامند. نوشتن قوانین مکانیک به شکل های دیگر، مانند مکانیک لاگرانژی، هامیلتونی و ... هم ممکن است.

ما در این کتاب مکانیک نیوتنی را بررسی خواهیم کرد.

قانون اول: وقتی برآیند نیروهای وارد بر جسم صفر باشد، جسم حالت حرکت خود را حفظ خواهد کرد. یعنی اگر ساکن باشد، ساکن خواهد ماند و اگر با سرعت در حال حرکت باشد، با همان سرعت به حرکت خود ادامه خواهد داد.

قانون دوم: رابطه شتاب و نیرو

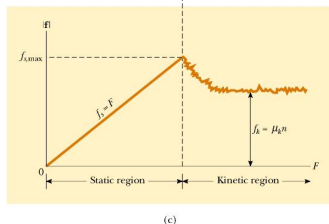
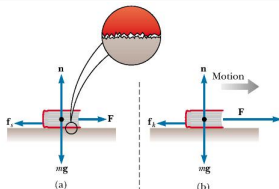
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

قانون سوم نیوتن: هر عملی را عکس العملی است، با مقدار مساوی و در جهت خلاف آن

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

قوانین نیوتن فقط در دستگاه های لخت برقرار هستند.

اصطکاک



شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی،
ویرایش هشتم.

نیروی اصطکاک یکی از نیروهای است که در اثر برهمکنش الکترومغناطیسی مواد به وجود می آید.

روش تعیین نیروی اصطکاک ایستایی: این نیرو با شرط تعادل ایستایی جسم به دست می آید؛ به این صورت که چون شتاب جسم در حال سکون برابر صفر است، مجموع نیروها نیز برابر صفر خواهد بود. بنابراین می توان نیروی اصطکاک ایستایی را از بقیه نیروها به دست آورد:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = 0 \Rightarrow \vec{F}_s + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0$$

$$\vec{F}_s = -(\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots)$$

بنابراین

نتیجه مهم: اندازه نیروی اصطکاک ایستایی در حالت کلی با استفاده از قانون دوم نیوتن به دست می آید.

بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی: آزمایش ها نشان داده اند که بیشینه اندازه نیروی اصطکاک ایستایی به اندازه نیروی عمودی سطح N و جنس سطح μ_s ربط دارد:

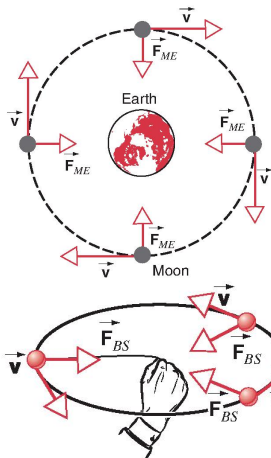
$$F_{s, max} = \mu_s N$$

بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی در آستانه حرکت رخ می دهد. شکل صفحه قبل را ببینید.

برای اجسام جامد که بر روی سطوح تخت در حال حرکت هستند، نیروی اصطکاک جنبشی به اندازه نیروی عمودی سطح و جنس دو سطح درگیر ربط دارد:

$$F_k = \mu_k n$$

یادآوری ویژگی های اصلی حرکت دایره ای با تندی ثابت



شکل ها از فیزیک هالیدی،
ویرایش پنجم.

بسیاری از حرکت های روزمره (مخصوصاً در آزمایشگاه و صنعت) با تقریب خوبی به صورت دایره ای با تندی ثابت انجام می شوند. این یکی دیگر از مثال های حرکت در صفحه است. در این حرکت:

جهت بردار سرعت تغییر می کند (شکل ها را ببینید) ولی اندازه بردار سرعت ثابت است؛ یعنی $|\vec{v}| = cte$

اگر حرکت مذکور بر روی دایره ای به شعاع r و دوره تناوب T انجام پذیرد، آنگاه اندازه سرعت لحظه ای در هر نقطه از مسیر حرکت برابر است با (چرا؟):

$$|\vec{v}| = v = \frac{2\pi r}{T}$$

همچنین، اندازه شتاب مرکزگرا در حرکت دایره ای با تندی ثابت برابر است با:

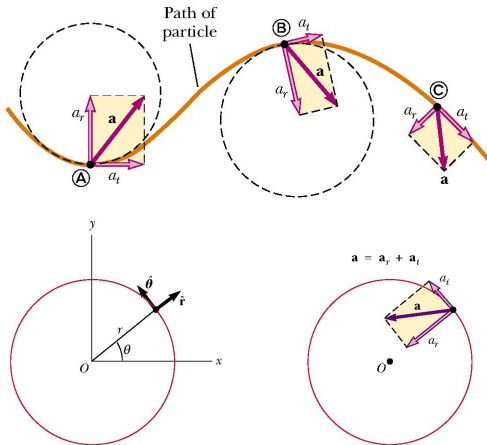
$$a_r = \frac{v^2}{r}$$

جهت شتاب مرکزگرا تغییر می کند و همیشه به سمت مرکز دایره است. شکل ها را ببینید. شتاب مماسی در این نوع حرکت برابر صفر است. درباره تفاوت شتاب شعاعی (مرکزگرا) و مماسی در ادامه صحبت خواهیم کرد.

حاصلضرب جرم جسم در شتاب مرکزگرای آن را نیروی مرکزگرا می نامند ($m a_r$). هر نیروی جانب مرکزی می تواند باعث شتاب مرکزگرا شود. مثلاً گرانش نیوتنی بین دو جرم، نیروی جاذبه بین الکترون و پروتون، نیروی کشش نخ و ...

از طرف دیگر، چیزی به نام نیروی مرکزگریز (و یا گریز از مرکز) وجود ندارد! این کمیت ها در اثر استفاده از دستگاه های نالخت ظاهر می شوند و بهتر است نیروی مجازی خوانده شوند. بحث حرکت نسبی را ببینید.

یادآوری شتاب مماسی a_t و شتاب شعاعی (مرکزگرا) a_r



شتاب هر حرکت دو بعدی را می توان به دو مولفه مرکزگرا a_r (شعاعی radial) و مماسی a_t تجزیه کرد:

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_t$$

شکل بالا را ببینید.

شتاب مرکزگرا، تغییر در جهت بردار سرعت را توصیف می کند:

$$a_r = \frac{v^2}{r}$$

شتاب مرکزگرا a_r بر جهت حرکت عمود است.

شتاب مماسی، تغییر در اندازه بردار سرعت را توصیف می کند:

$$a_t = \frac{d|v|}{dt}$$

شتاب مماسی a_t در جهت حرکت است.

نوشتن شتاب ها در دستگاه مختصات قطبی (با استفاده از بردارهای یکه قطبی):

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_t = -\frac{v^2}{r} \hat{r} + \frac{d|v|}{dt} \hat{\theta}$$

شکل پایین را ببینید.

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

هدف و مساله اصلی



در برخی مسائل، نیرو فقط در جهت شعاعی وارد می شود و بنابراین شتاب فقط در جهت شعاعی غیر صفر است:

$$a_r \neq 0$$

به صورت مشخص شتاب مماسی صفر است: $a_t = 0$. حل کردن این مسائل در دستگاه مختصات قطبی (رجوع شود به فصل چهارم) بسیار آسان است؛ زیرا فقط باید قانون دوم نیوتن را در جهت شعاعی بنویسیم:

$$\sum_{i=1}^N F_{r,i} = m a_r$$

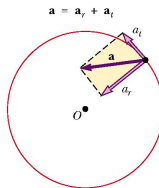
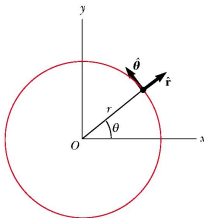
یعنی مجموع همه نیروهای شعاعی که به جسمی به جرم m وارد می شود برابر است با جرم جسم ضربدر شتاب در جهت شعاع a_r .

دقت کنید که اگر می خواستیم از دستگاه مختصات دکارتی استفاده کنیم، باید دو معادله نیوتن زیر را حل می کردیم:

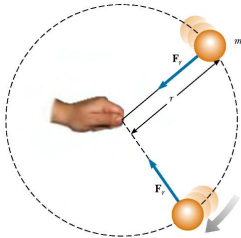
$$\sum_{i=1}^N F_{x,i} = m a_x \quad \sum_{i=1}^N F_{y,i} = m a_y$$

حل این دستگاه ممکن، ولی بسیار مشکل تر، است؛ بنابراین ترجیح می دهیم در این مورد از دستگاه قطبی استفاده کنیم.

شکل پایین از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.



دینامیک حرکت دایره ای یکنواخت

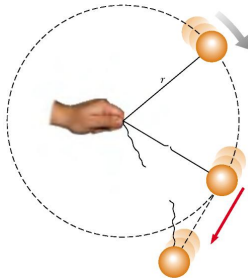


همانطور که در بالا یادآوری شد، شتاب شعاعی برابر است با $a_r = v^2/r$ ؛ بنابراین:

$$\sum_{i=1}^N F_{r,i} = ma_r = m \frac{v^2}{r}$$

این رابطه اساس حل مسائل دینامیک در حرکت دایره ای یکنواخت خواهد بود. یعنی:

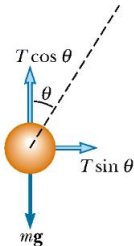
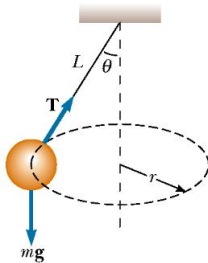
در حرکت دایره ای یکنواخت، می دانیم که مجموع نیروهای وارد شده به یک جسم در جهت شعاعی برابر است با جرم جسم ضربدر $a_r = v^2/r$. مثال های اسلاید های بعدی را ببینید.



دقت کنید که اگر، در هر لحظه از زمان، نیروی مرکزگرا تامین نشود، جسم دیگر حرکت دایره ای یکنواخت نخواهد داشت بلکه، بنا به قانون اول نیوتن، بر روی خط مستقیم با سرعت ثابت v به حرکت خود ادامه خواهد داد. شکل پایین را ببینید.

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

مثال اول: آونگ کانونی



جسم کوچکی به جرم m از نخ به طول L آویزان است. جسم با سرعت ثابت v حول یک مسیر دایروی افقی دوران می کند. مقدار سرعت را بیابید.

پاسخ: نمودار جسم آزاد را در شکل پایین می بینید. در راستای عمود هیچگونه حرکتی نداریم؛ بنابراین شتاب صفر است:

$$T \cos \theta - mg = 0$$

در راستای شعاعی هم، نیروی وارده شده (یعنی $T \sin \theta$) برابر است با حاصلضرب جرم جسم در شتاب جانبی مرکز

$$T \sin \theta = m a_r = m \frac{v^2}{r}$$

باید کشش نخ را از این دو معادله حذف کنیم، چون مقدار آن را نمیدانیم:

$$\tan \theta = \frac{T \sin \theta}{T \cos \theta} = \frac{v^2}{r g}$$

بنابراین:
از طرفی داریم:

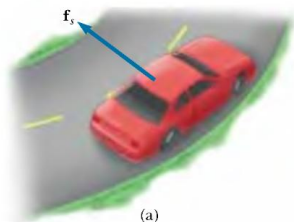
$$\sin \theta = \frac{r}{L} \Rightarrow r = L \sin \theta$$

بنابراین:

$$v = \sqrt{L g \sin \theta \tan \theta}$$

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

مثال دوم: بیشینه سرعت ماشین در پیچ



یک ماشین با جرم 1500 کیلوگرم بر روی یک جاده مسطح افقی، ولی پرپیچ و خم، حرکت می کند. شکل را ببینید. اگر شعاع این پیچ 35 متر باشد و ضریب اصطکاک ایستایی بین تایر و سطح جاده 0.5 باشد، بیشینه سرعتی را که ماشین می تواند بدون لغزیدن پیچ را بپیماید بیابید.

بین تایر و جاده اصطکاک ایستایی داریم. چرا؟ بحث جلسه قبل را ببینید.

نمودار جسم آزاد مساله را رسم می کنیم. در این صورت، با توجه به اینکه حرکتی در جهت عمود نداریم:

$$N - mg = ma = 0 \Rightarrow N = mg$$

در جهت افقی نیز قانون دوم نیوتن به صورت زیر است:

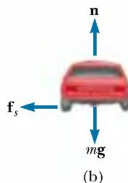
$$-f_s = ma_r$$

بیشینه سرعت وقتی اتفاق می افتد که بیشینه اصطکاک ایستایی را داشته باشیم:

$$-f_{s, max} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow \frac{v^2}{r} = -\frac{\mu_s N}{m} = \frac{\mu_s mg}{m}$$

بنابراین:

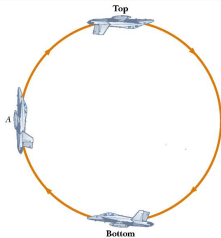
$$v = \sqrt{\mu_s g r} = \sqrt{(0.5)(9.8 \text{ m/s}^2)(35 \text{ m})} = 13.1 \text{ m/s}$$



شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

تمرین: در یک روز بارانی، ماشین وقتی پیچ را با سرعت 10 m/s طی می کند می لغزد. ضریب اصطکاک ایستایی را در این حالت بیابید.

مثال سوم: نیروی وارد شده به خلبان در گردش عمودی



خلبانی به جرم m در یک هواپیمای جت، مسیر دایره ای را به صورت عمودی می پیماید. در این مانور، هواپیما مسیری دایره شکل به شعاع ۲۷۰ km را با سرعت ۲۲۵ m/s می پیماید. نیروی وارد شده از طرف صندلی به خلبان در الف) پایین و ب) بالای مسیر را بیابید.

پاسخ: نمودار جسم آزاد را برای هر دو حالت رسم می کنیم. در پایین مسیر داریم:

$$n_{bot} - mg = ma_r = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow n_{bot} = mg + m \frac{v^2}{r}$$

بنابراین:

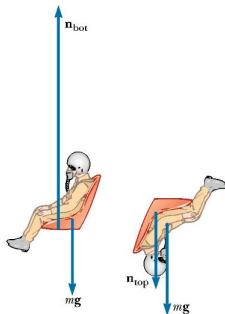
$$n_{bot} = mg \left(1 + \frac{v^2}{rg} \right) = mg \left(1 + \frac{۲۲۵^2}{۲۷۰۰ \times ۹.۸} \right) = ۲.۹۱\text{ mg}$$

به همین صورت در بالای مسیر داریم:

$$n_{top} + mg = ma_r = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow n_{top} = -mg + m \frac{v^2}{r}$$

بنابراین:

$$n_{top} = mg \left(\frac{v^2}{rg} - 1 \right) = mg \left(\frac{۲۲۵^2}{۲۷۰۰ \times ۹.۸} - 1 \right) = ۰.۹۱\text{ mg}$$



شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

نیروهای مقاومت در محیط های غیر خلاء حضور دارند.



وجود نیروهای اصطکاکی (مقاومتی) باعث می شود که حرکت جسم تغییر کند. بنابراین برای توصیف حرکت باید بتوانیم این نیروها را توصیف کنیم.

تاکنون دو نوع نیروی مقاومت، یعنی اصطکاک ایستایی و جنبشی که بین دو جسم جامد وجود دارند، را توصیف کرده ایم.

علاوه بر این دو، تاکنون تلاش های بسیاری برای مدل سازی نیروهای وارد بر یک جسم جامد در یک سیال انجام شده است. در نتیجه آزمایش های گوناگون معلوم شده است که نیروی مقاومت، و یا *resistive force*، وارد بر جسم از طرف محیط می تواند متناسب با توان های مختلفی از سرعت باشد و یا به چگالی محیط و ... بستگی داشته باشد. در ادامه دو نوع از این نیروها را در نظر می گیریم.

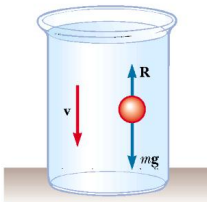
حرکت در اثر نیروهای متناسب با سرعت معمولا، پس از طی زمان طولانی، به یک حرکت با سرعت ثابت (به اصطلاح سرعت حدی) منجر می شود. چرا؟

ذات همه نیروهای مقاومتی الکترومغناطیسی است.

فیلم های مربوطه را ببینید.

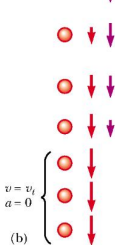
شکل از ویرایش هشتم مبانی فیزیک هالیدی.

نیروی مقاومت متناسب با سرعت



$$v = 0$$

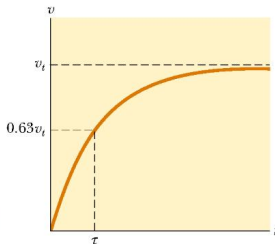
$$a = g$$



$$v = v_t$$

$$a = 0$$

(b)



وقتی سرعت حرکت جسم درون یک شاره کم باشد، نیروی مقاومت وارده بر جسم از طرف شاره با سرعت جسم رابطه مستقیم دارد:

$$R = -bv$$

مقدار ثابت b به ویژگی های محیط (شاره) و شکل جسم بستگی دارد. سرعت حرکت جسم در سیال را برحسب زمان بیابید.

بنا به قانون دوم نیوتن داریم: $m \frac{dv}{dt} = mg - bv$
این معادله را می توان به راحتی به روش جداسازی متغیرها انتگرال گیری کرد:

$$v(t) = \frac{mg}{b} \left(1 - e^{-\frac{bt}{m}} \right)$$

مقدار سرعت mg/b را سرعت حدی جسم می نامند. این سرعتی است که شتاب جسم در آن صفر است:

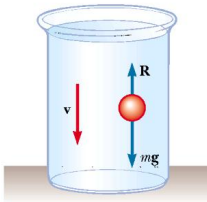
$$0 = m \frac{dv}{dt} = mg - bv \Rightarrow v_t = \frac{mg}{b}$$

نمودار تغییرات سرعت بر حسب زمان را ببینید.

تمرین: اثبات کنید که معادله $v(t)$ در واقع در قانون دوم نیوتن صدق می کند.

شکل از ویرایش هشتم مبانی فیزیک هالیدی.

نیروی مقاومت شاره در سرعت های زیاد



آزمایش ها نشان داده اند که وقتی جسم با سرعت بسیار زیاد در شاره حرکت کند، مانند حرکت هواپیما در هوا، نیروی مقاومت وارد بر آن با توان دوم سرعت متناسب است. همچنین، این نیرو با چگالی شاره ρ و سطح مقطع موثر جسم متناسب دارد:

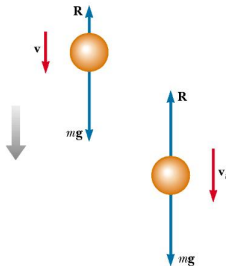
$$R = \frac{1}{2} D \rho A v^2$$

این نیرو را نیروی پسار، نیروی مقاومت شاره و یا به انگلیسی *drag force* می نامند. ثابت بدون بعد D را نیز ضریب پسار می نامند.

در این نوع حرکت نیز متحرک پس از مدتی به یک سرعت حدی می رسد که مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$ma = mg - \frac{1}{2} D \rho A v^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad v_t = \sqrt{\frac{2mg}{D\rho A}}$$

شکل از ویرایش هشتم مبانی فیزیک هالیدی.



اهمیت نیروهای مقاومتی در طراحی خودروها



• هزینه بسیار بالای سوخت باعث شده است که طراحان خودرو حتماً مقاومت پسا را در طراحی خود لحاظ کنند.

• مقاومت آیرودینامیکی را معمولاً با آزمایش های بسیار دقیق در تونل هوا می سنجند.

• شکل ها از ویرایش هشتم مبانی فیزیک هالیدی.



نکات مهم این درس

انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید نکات اساسی نوشتن قانون دوم نیوتن در حرکت دایره ای یکنواخت و نیروهای مقاومت درون شاره را بیان کنید. برای اینکار لازم است بتوانید به سوال های زیر پاسخ دهید:

۱ قانون دوم نیوتن در حرکت دایره ای یکنواخت را بیان کنید.

۲ چرا برای نوشتن دینامیک در حرکت دایره ای یکنواخت، ترجیح می دهیم از مختصات قطبی به جای مختصات دکارتی استفاده کنیم.

۳ نیروهای مقاومت سیال جزو کدامیک از نیروهای بنیادی طبیعت هستند؟

۴ در سرعت های کم نیروی مقاومت سیال چطور توصیف می شود؟

۵ در سرعت های زیاد نیروی مقاومت سیال چطور توصیف می شود؟

۶ سرعت حدی چیست؟

۷ چرا فهم نیروهای مقاومت در شاره اهمیت دارد؟

اگر درباره هر کدام از مفاهیم یاد شده بالا مشکلی احساس می کنید، لطفا درس را یک بار دیگر مرور کنید.

فراموش نکنیم که بهترین راه برای درک و ”درونی سازی“ مفاهیم ریاضی و فیزیک، حل مساله است. به همین دلیل سعی کنید دانسته های خود را با حل سوالات زیر محک زده و تقویت کنید.



تمرین

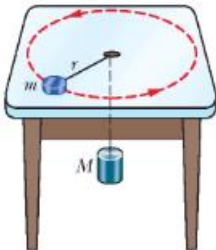
در شکل مقابل $m = 2\text{ kg}$ ، $M = 3\text{ kg}$ ، $r = 0.8\text{ m}$ و سطح میز بدون اصطکاک است. دو جرم از طریق طناب و حفره ای که در وسط میز قرار دارد به هم متصل اند. الف) اگر جرم m را با سرعت v ، وادار به حرکت دایره ای کنیم، مقدار کشش نخ چقدر خواهد بود؟

ب) حداقل این سرعت چقدر باشد تا جرم M شتاب نداشته باشد؟

پ) اگر مقدار سرعت از این مقدار کمتر باشد چه اتفاقی برای جرم M می افتد؟ (به سمت بالا و یا پایین حرکت میکند؟).

توجه: نمودار جسم آزاد را برای هرکدام از دو جرم بدقت رسم کنید.

شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.



تمرین

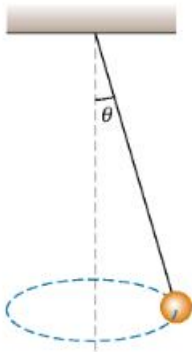
جسمی مطابق شکل مقابل، یک مسیر دایره وار را طی می کند. جرم جسم برابر $m = 2\text{ kg}$ ، طول طناب $L = 3\text{ m}$ و زاویه $\theta = 6^\circ$ است.

(الف) با نوشتن قانون دوم نیوتن در جهت افقی و عمودی، مولفه های افقی و عمودی کشش طناب را حساب کنید.

(ب) شتاب شعاعی این جرم را بیابید.

راهنمایی: $\sin 6^\circ \approx \tan 6^\circ \approx 0.1$.

شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.



تمرین



در شکل مقابل چرخ و فلکی را می بینید که با شعاع $r = 14 \text{ m}$ و سرعت ثابت $v = 6 \text{ m/s}$ در حال دوران است. فردی به جرم $m = 65 \text{ kg}$ سوار بر این چرخ و فلک را در نظر بگیرید.

الف) نمودار جسم آزاد نیروهای وارد شده را در پایین مسیر برای این فرد بنویسید و نیروی عمودی سطح را با استفاده از قانون دوم نیوتن بیابید.

ب) نمودار جسم آزاد را در بالای مسیر برای این فرد بنویسید و نیروی عمودی سطح را با استفاده از قانون دوم نیوتن بیابید.

شکل از کتاب سرز.

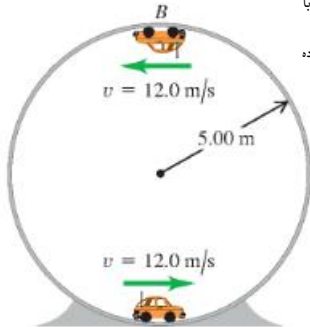
تمرین

در شکل مقابل یک ماشین اسباب بازی با جرم $m = 0.5\text{ kg}$ در مسیری دایره وار به شعاع ۵ متر با سرعت ثابت $v = 12\text{ m/s}$ در حال حرکت است.

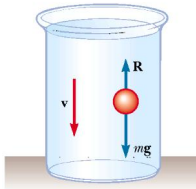
الف) نمودار جسم آزاد را در پایین مسیر برای این ماشین بنویسید و نیروی عمودی سطح را با استفاده از قانون دوم نیوتن بیابید.

ب) نمودار جسم آزاد را در بالای مسیر برای این ماشین بنویسید و نیروی عمودی سطح را با استفاده از قانون دوم نیوتن بیابید.

شکل از سرز.



تمرین



جسمی را که تحت تاثیر یک نیروی مقاومت سقوط می کند در نظر بگیرید. اگر سرعت حرکت جسم کم باشد، بنا به بحث امروز، معادله حرکت جسم به صورت

$$m \frac{dv}{dt} = mg - bv$$

خواهید بود. با انتگرال گیری از قانون دوم نیوتن (فصل دوم) نشان دهید که سرعت به صورت زیر تغییر می کند:

$$v(t) = \frac{mg}{b} \left(1 - e^{-\frac{bt}{m}} \right)$$

با انتگرال گیری از معادله بالا مکان را بر حسب زمان بیابید.

شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

مبحث بعدی: حل مساله حرکت با استفاده از کمیت های اسکالر



تاکنون مساله حرکت یک جسم ذره ای را با استفاده از کمیت های برداری مانند سرعت، شتاب و نیرو بررسی و حل کرده ایم. در دو فصل بعد نشان خواهیم داد که همین مساله را می توان با استفاده از کمیت های اسکالری مانند کار، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل نیز بررسی و حل کرد.

شکل از مبانی فیزیک، ویرایش هشتم.

مراجع

- ❶ Halliday, David, Robert Resnick, and Jearl Walker; Fundamentals of physics, 10th edn. John Wiley & Sons, 2014.
- ❷ Halliday, D., R. Resnick, and K. S. Krane. "Physics, 5th edn." (2002).
- ❸ Ohanian, Hans C., and John T. Markert. Physics for engineers and scientists, 3th edn. 2007.
- ❹ Young, Hugh D., Roger A. Freedman, and Albert Lewis Ford. Sears and Zeman-sky's university physics, 13th edn. Pearson education, 2006.

کلاس های دیگر فیزیک مکانیک

کلاس های درس فیزیک یک دانشگاه صنعتی شریف (مثلا کلاس درس دکتر محمد رضا اجتهادی و یا دکتر محمود بهمن آبادی) را می توانید از مرکز آموزش های الکترونیک دانشگاه صنعتی شریف (و یا حتی از سایت مکتب خونه) دریافت کنید.
<http://ocw.sharif.edu/>

کلاس درس دکتر والتر لوین از دانشگاه MIT در مرکز آموزش های الکترونیک این دانشگاه و یوتیوب:
<https://ocw.mit.edu/index.htm>
<https://www.youtube.com/watch?v=X9c0MRooBzQ>

با سپاس از توجه شما

