

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

فصل ششم: نیرو و حرکت ۲

نیروی اصطکاک



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

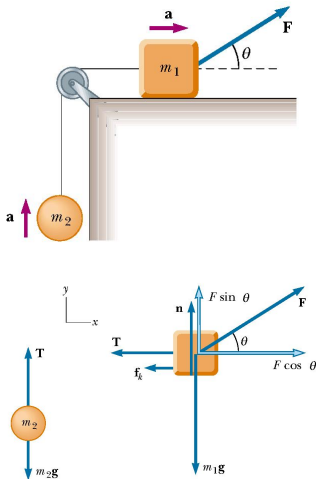
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

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.

استراتژی کلی برای به کار بردن قوانین نیوتن



شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش
دهم.

مساله را به درستی و با دقت مطالعه کنید. با مطالعه دقیق مساله، تعیین کنید که چه اطلاعاتی داده شده اند و چه کمیت هایی از شما خواسته شده اند. اگر هیچ ایده ای برای حل مساله ندارید، کتاب (مخصوصا مثال های متن درس) را مجدداً مطالعه کنید.

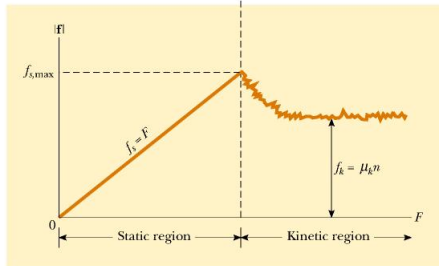
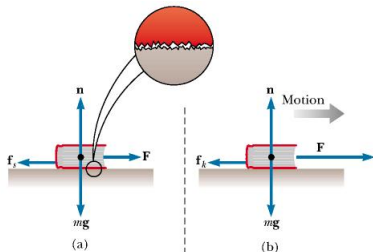
سیستم (جسم) کلیدی مساله کدام است؟ معمولاً سیستم کلیدی مساله جسمی است که پارامترهای خواسته شده به آن مربوط می شوند.

دو جور شکل بکشید. یکی نمودار کلی مساله و دیگری نمودار جسم آزاد. نمودار جسم آزاد نموداری است که جسم مورد نظر مساله را بدون هیچ گونه اتصالی به دنیای اطراف نشان می دهد. اثر محیط اطراف توسط بردارهای نیرو در نمودار جسم آزاد مشخص می شود.

محورها را عاقلانه رسم کنید. معمولاً بهتر است که یکی از محورها در جهت (ترجیحی) حرکت انتخاب شود.

در فصل ششم با تعداد دیگری از نیروها آشنا شده و در انتها نوشتن قانون دوم نیوتن در حرکت دایره ای یکنواخت را فرا خواهیم گرفت.

اصطکاک از نظر میکروسکوپی



(c)

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

در هنگام حرکت (و یا وقتی که جسم تحریک به حرکت شود)، برآمدگی ها و فرورفتگی های دو سطح با هم درگیر شده و باعث می شوند که نیروی مقاومتی در برابر حرکت به وجود آید. این نیروی مقاومت را نیروی اصطکاک می نامند.

دو نوع نیروی اصطکاک وجود دارد: اصطکاک ایستایی و اصطکاک جنبشی.

اصطکاک ایستایی به اجسام در حال سکون وارد می شود.

اصطکاک جنبشی به اجسام در حال حرکت وارد می شود.

آزمایش مقابل را تحلیل کنید.

فیلم های مربوط به نیروی اصطکاک را ببینید.

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

اصطکاک ایستایی



نیروی اصطکاک ایستایی شکلی از نیروی اصطکاک است که به اجسام در حال سکون وارد می شود. این نیرو را معمولاً با f_s یا F_s نشان می دهند.

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:

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

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

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



جهت نیروی اصطکاک ایستایی همیشه به سمتی است که با آغاز حرکت مخالفت می کند.

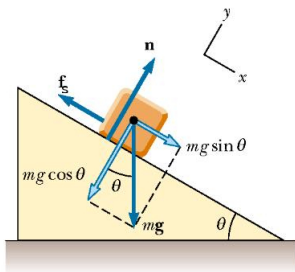
بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی: آزمایش ها نشان داده اند که بیشینه اندازه نیروی اصطکاک ایستایی به اندازه نیروی عمودی سطح N و جنس سطح μ_s ربط دارد:

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

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

شکل ها از سایت های نمناک و کارناوال.

اندازه گیری نیروی اصطکاک ایستایی



سوال اول: در شکل مقابل، زاویه θ سطح شیب دار به حدی است که جسم در آستانه حرکت نیست. مقدار نیروی اصطکاک ایستایی را بیابید.

پاسخ: جسم در حال سکون است:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = 0 \Rightarrow F_{tot, x} = 0 \text{ and } F_{tot, y} = 0$$

با رسم نمودار جسم آزاد مساله درمی یابیم که

$$f_s - mg \sin \theta = 0 \Rightarrow f_s = mg \sin \theta$$

$$n - mg \cos \theta = 0 \Rightarrow n = mg \cos \theta$$

دقت کنید که در این حالت داریم

که البته انتظارش را نیز داشتیم، چون جسم در آستانه حرکت نیست.

سوال دوم: در شکل مقابل، زاویه θ سطح شیب دار به حدی است که جسم در آستانه حرکت است. الف: مقدار نیروی اصطکاک ایستایی را بیابید. ب: مقدار μ_s را برحسب θ بیابید.

پاسخ الف: بنا به اسلاید، قبل مقدار بیشینه اصطکاک ایستایی برابر است با

$$f_{s, max} = \mu_s n = \mu_s mg \cos \theta$$

از طرفی جسم همچنان ساکن است، بنابراین مجموع نیروها در جهت x باید برابر صفر باشد:

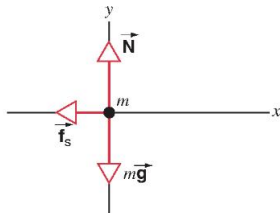
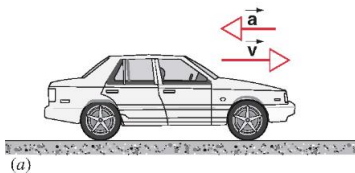
$$f_{s, max} - mg \sin \theta = 0 \Rightarrow mg \sin \theta = \mu_s mg \cos \theta$$

$$\mu_s = \tan \theta$$

بنابراین

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

ترمز ماشین



شکل از فیزیک هالیدی، ویرایش پنجم.

راننده ای که در ابتدا با سرعت v_0 در راستای مستقیم در حال حرکت است، ترمز گرفته و ماشین را متوقف می کند. ماشین مجهز به سیستم ترمز ABS و یا

Anti-lock braking system

است و پس از طی مسافت d متوقف می شود. این مسافت را بیابید.

در اینجا بین تأثیر و جاده اصطکاک ایستایی داریم. چرا؟
اسلاید صفحه بعد را ببینید.

نمودار جسم آزاد مساله را رسم کرده و فرض می کنیم که ترمز به بهترین نحو عمل می کند. بنابراین، بیشینه اصطکاک ایستایی را داریم. در جهت عمود قانون دوم نیوتن به صورت زیر است:

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

در جهت افق قانون دوم نیوتن به صورت زیر است:

$$-f_{s, max} = ma_x \Rightarrow a_x = -\frac{f_{s, max}}{m}$$

$$a_x = -\frac{\mu_s N}{m} = -\frac{\mu_s mg}{m} = -\mu_s g$$

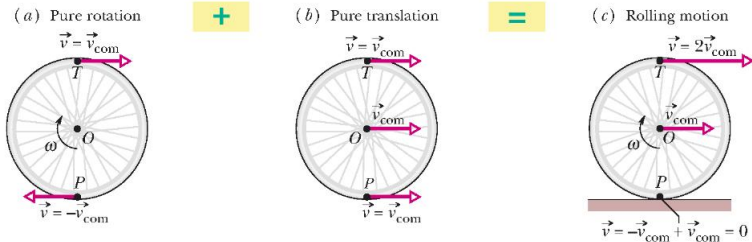
یعنی یک حرکت با شتاب ثابت داریم. حال، از معادله داریم:

$$v^2 - v_0^2 = 2a_x d \Rightarrow d = \frac{-v_0^2}{2a_x} = \frac{-v_0^2}{-2\mu_s g} = \frac{v_0^2}{2\mu_s g}$$

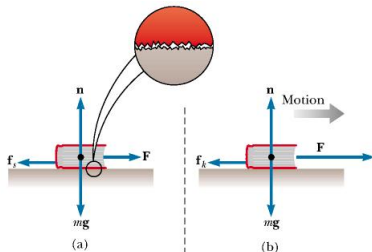
چرا سرعت تایر در پایین ترین نقطه نسبت به زمین صفر است؟

اگر تایر بر روی سطح نلغزد، مجموع سرعت دورانی و خطی آن در پایین ترین نقطه همیشه صفر خواهد بود. این نکته را با تفصیل بیشتر در فصل دهم نشان خواهیم داد.

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش دهم.



اصطکاک جنبشی



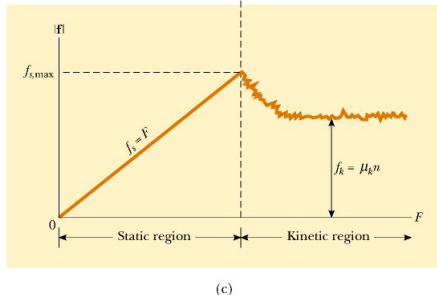
آزمایش ها نشان داده اند که به جسم در حال حرکت (جز در محیط خلا) نیروی اصطکاک وارد می شود.

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

$$F_k = \mu_k n$$

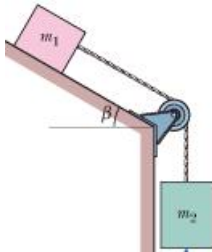
مقدار ضریب اصطکاک جنبشی و ایستایی را برای سطوح مختلف در جدول زیر ملاحظه می کنید.

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.



	μ_s	μ_k
Steel on steel	0.74	0.57
Aluminum on steel	0.61	0.47
Copper on steel	0.53	0.36
Rubber on concrete	1.0	0.8
Wood on wood	0.25–0.5	0.2
Glass on glass	0.94	0.4
Waxed wood on wet snow	0.14	0.1
Waxed wood on dry snow	—	0.04
Metal on metal (lubricated)	0.15	0.06
Ice on ice	0.1	0.03
Teflon on Teflon	0.04	0.04
Synovial joints in humans	0.01	0.003

مثال اول



در شکل مقابل $m_2 = 17 \text{ kg}$ ، $m_1 = 7 \text{ kg}$ و $\beta = 53^\circ$.
همچنین ضریب اصطکاک جنبشی بین قطعه m_1 و سطح شیب دار برابر $\mu_k = 0.3$ می باشد.

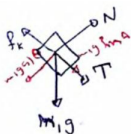
اگر جرم m_1 به سمت پایین در حرکت باشد شتاب مجموعه و نیروی کشش نخ را بیابید.

راهنمایی: $\sin 53^\circ = 0.8$ و $\cos 53^\circ = 0.6$.

توجه: نمودار جسم آزاد فراموش نشود.

شکل از ویرایش هشتم مبانی فیزیک هالیدی.

پاسخ مثال اول



$$\begin{cases} T + m_1 g \sin \theta - f_k = m_1 a \\ N - m_1 g \cos \theta = 0 \end{cases} \quad \begin{aligned} & \text{برای } m_1 \text{ داریم:} \\ & N = m_1 g \cos \theta \\ & f_k = \mu_k N = \mu_k m_1 g \cos \theta \end{aligned}$$

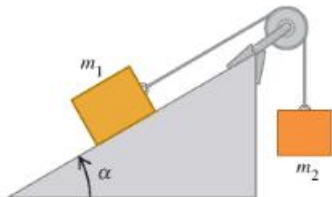
$$m_2 g - T = m_2 a \quad **$$

از معادلات ** و * داریم

$$\begin{aligned} m_2 g + m_1 g \sin \theta - f_k &= (m_1 + m_2) a \\ \rightarrow a &= g \frac{m_2 + m_1 \sin \theta - \mu_k m_1 \cos \theta}{m_1 + m_2} = 9.8 \times \left(\frac{17 + 7 \sin 53^\circ - 0.3 \times 7 \cos 53^\circ}{7 + 17} \right) \\ &= 8.7 \frac{m}{s^2} \end{aligned}$$

$$T = m_2 (g - a) = 17 \times (9.8 - 8.7) = 18.6 \text{ N}$$

مثال دوم



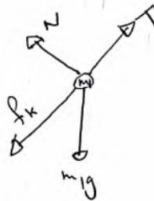
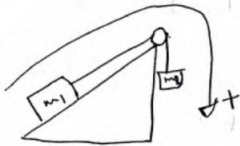
در شکل مقابل $m_2 = 25 \text{ kg}$ ، $m_1 = 8 \text{ kg}$ و $\alpha = 53^\circ$.
همچنین ضریب اصطکاک جنبشی بین قطعه m_1 و سطح شیب دار برابر $\mu_k = 0.35$ می باشد. اگر جرم m_1 به سمت بالا در حرکت باشد شتاب مجموعه را بیابید.

راهنمایی: $\sin 53^\circ = 0.8$ و $\cos 53^\circ = 0.6$.

توجه: نمودار جسم آزاد فراموش نشود.

شکل از ویرایش هشتم مبانی فیزیک هالیدی.

پاسخ مثال دوم



$$\begin{cases} m_2 g - T = m_2 a & * \\ N - m_1 g \cos \theta = 0 & \longrightarrow N = m_1 g \cos \theta \longrightarrow f_k = \mu_k m_1 g \cos \theta \\ T - f_k - m_1 g \sin \theta = m_1 a & ** \end{cases}$$

معادلات *، **، و * را جمع می‌کنیم :

$$m_2 g - \mu_k m_1 g \cos \theta - m_1 g \sin \theta = (m_1 + m_2) a$$

$$\longrightarrow a = g \frac{m_2 - m_1 \sin \theta - \mu_k m_1 \cos \theta}{m_1 + m_2} = 5 \text{ m/s}^2$$

نکات مهم این درس

انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید نکات اساسی نیروهای اصطکاک را بیان کنید. برای اینکار لازم است بتوانید به سوال های زیر پاسخ دهید:

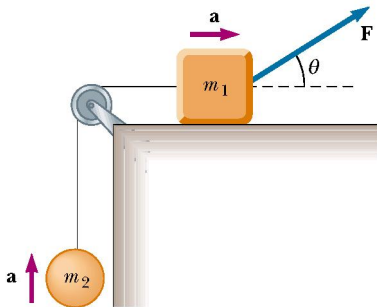
- ۱ نیروی اصطکاک در اثر کدام یک از نیروهای چهارگانه بنیادی در طبیعت به وجود می آید؟
- ۲ اصطکاک ایستایی چیست و چگونه اندازه گیری می شود؟
- ۳ بیشینه اصطکاک ایستایی در چه زمانی رخ می دهد و مقدار آن چگونه است؟
- ۴ جهت نیروی اصطکاک ایستایی چطور تعیین می شود؟
- ۵ مقدار اصطکاک جنبشی چگونه به دست می آید؟
- ۶ جهت نیروی اصطکاک جنبشی چطور تعیین می شود؟
- ۷ دستگاه دومعادله و دو مجهول را چگونه حل می کنیم؟

اگر درباره هرکدام 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



فردی با نیروی F دو جرم را به سمت خود می کشد. ضریب اصطکاک جنبشی سطح با جرم m_1 برابر μ_k می باشد. از جرم نخ و قرقره صرف نظر کنید.

الف: شتاب مجموعه را بیابید.

ب: نیروی کشش نخ در مجموعه چقدر است؟

نمودار جسم آزاد هر دو جرم را به دقت رسم کنید.

شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

تمرین

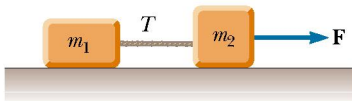
نیروی $F = 100 \text{ N}$ به دو جرم $m_1 = 1 \text{ kg}$ و $m_2 = 2 \text{ kg}$ وارد می شود و باعث حرکت شتابدار به سمت راست این دو می شود. ضریب اصطکاک جنبشی بین این دو جسم و سطح برابر $\mu_k = 0.3$ می باشد. از جرم نخ صرف نظر کنید.

الف: شتاب مجموعه را بیابید.

ب: کشش نخ چقدر است؟

نمودار جسم آزاد فراموش نشود.

شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.



تمرین

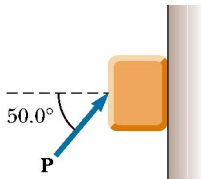
نیروی $P = 100\text{ N}$ با جهت نشان داده شده به جرم $m = 1\text{ kg}$ وارد می شود. جسم ساکن می ماند.

الف: نیروی عمود بر سطح را به دست آورید.

ب: نیروی اصطکاک ایستایی چقدر است؟

پ: اگر جسم در این حالت در آستانه حرکت باشد، ضریب μ_s چقدر است؟
نمودار جسم آزاد فراموش نشود.

شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.



تمرین

نیروی $F = 200 \text{ N}$ به سه جرم $m_1 = 1 \text{ kg}$ ، $m_2 = 2 \text{ kg}$ و $m_3 = 3 \text{ kg}$ وارد می شود و باعث حرکت شتابدار به سمت راست این دو می شود. ضریب اصطکاک جنبشی بین این سه جسم و سطح برابر $\mu_k = 0.2$ می باشد.

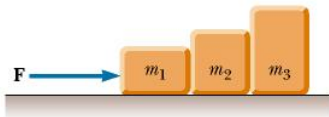
الف: شتاب مجموعه را بیابید.

ب: نیروی وارده از طرف جسم ۲ به جسم ۳ چقدر است؟

پ: نیروی وارده از طرف جسم ۱ به جسم ۲ چقدر است؟

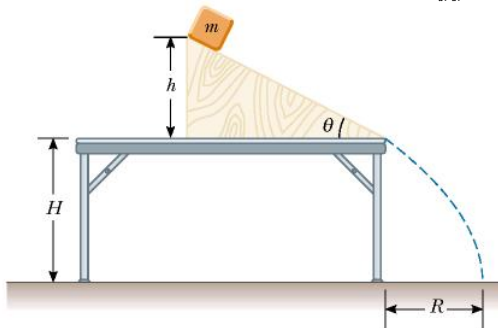
نمودار جسم آزاد فراموش نشود.

شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.



تمرین مروری

- جسمی به جرم m را از بالای سطح شیب‌داری رها کرده و جسم به پایین می‌لغزد. ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح شیب‌دار و جسم μ_k می‌باشد. فاصله برخورد جسم با سطح زمین، یعنی R را بر حسب بقیه پارامترهای مساله بیابید.
- شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.



مبحث بعدی: نیروی پسار و دینامیک در حرکت دایره ای یکنواخت



- در جلسه بعد، نیروی پسار (نیروی اصطکاک وارده به جسم جامد در حال حرکت در سیال) را به اختصار در نظر خواهیم گرفت. در انتها نیز دینامیک حرکت دایره ای یکنواخت را مطالعه خواهیم کرد.
- شکل از مبانی فیزیک، ویرایش دهم.

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

