

## معرفی رهیافتی جامع در آموزش مهندسی مکانیک

مجتبی محزون

دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

**چکیده:** در این مقاله رهیافتی جامع در مهندسی مکانیک معرفی و طبق آن دروس کلیدی این رشته در دوره کارشناسی در یک مجموعه منسجم با نگرشی سیستماتیک تجمیع شده است، به گونه‌ای که دانشجو در برخورد با یک مسئله به جای جستجوی فرمول‌های خاص برای حل آن، بتواند از قوانین و معادلات علمی که آموخته است، مدل مناسب مسئله خود را استنتاج کند و مسائل متنوعی را که از اصول و مدل‌های مشابه تبعیت می‌کنند به صورت مجموعه‌های پراکنده و نا مرتبط با یکدیگر نبیند. این شیوه در سال‌های اخیر در بعضی از دانشگاه‌های آمریکا به انحای مختلف مورد توجه قرار گرفته و عموماً نتایج رضایتبخش به دنبال داشته است. برای اعمال چنین رهیافتی در آموزش مهندسی مکانیک در دوره کارشناسی در دانشگاه‌های ایران با توجه به برنامه آموزشی متمرکز کشوری و تبعیت کلیه دانشگاه‌ها، اگر نه به طور مطلق، حداقل به صورت نسبی، از یک الگوی واحد در برنامه ریزی درسی به بررسی جدی متخصصان امر نیاز است.

واژه‌های کلیدی: تجمیع، قوانین پایستگی و محاسباتی، سیستم و مدل.

## ۱. مقدمه

یکی از معضلاتی که دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک [یا هر رشته مهندسی دیگر] با آن برخورد می‌کند این است که وی پس از یک سال تحصیل و گذراندن دروسی نظیر ریاضی عمومی، معادلات دیفرانسیل، فیزیک، شیمی و... در کلاس یک درس مهندسی نظیر استاتیک یا ترمودینامیک می‌نشیند یا به تدریج با دروس دیگر رشته مهندسی مواجه می‌شود که در نظر وی مجموعه‌های پراکنده و نامرتب به هم و همچنین، نامرتب با آنچه تاکنون آموخته است، نمایان می‌شوند. هر کدام از این درس‌ها اصطلاحاً قلق خاص خودش را دارد و ارتباط چندانی هم با سایر دروس ندارد. مثلاً وی در دروس فیزیک، استاتیک، دینامیک و مکانیک سیالات مطلبی به نام "نمودار جسم آزاد" آموخته است، بدون آنکه بتواند نسبت به این مفهوم دیدی جامع داشته باشد. موارد مشابه زیاد است، مثلاً بحث توازن انرژی که دانشجو در دروس متعددی با آن مواجه می‌شود.

البته، شاید استادان در مواجهه با این معضل تلاش کنند تا ارتباط لازم را بین مفاهیمی که از دید دانشجو بی‌ارتباط به نظر می‌رسد برقرار کنند، اما این کار یعنی انتقال دانش از یک درس به درس دیگر، به خصوص در باره مطلبی که دانشجو قبلاً آن را آموخته است، کاری دشوار و چه بسا خود باعث سر درگمی مضاعف وی شود.

در سال ۱۹۸۸ گروهی از استادان دانشگاه تگزاس A&M آمریکا با هدف تجمیع دروس کلیدی رشته مهندسی مکانیک در چارچوب برنامه درسی این رشته مطالعاتی انجام دادند که کار آنها به معرفی دنباله‌ای از دروس منجر شد که بر مفاهیم "اصول پایداری و محاسباتی" شکل گرفته بود. در سال ۱۹۹۳ هفت دانشگاه آمریکا تحت نظارت بنیاد ملی علوم NSF مجدداً با همان هدف تجمیع دروس گرد هم آمدند و بر مبنای کارهای اولیه انجام شده توسط دانشگاه‌های تگزاس و رزهالمن برنامه‌ای برای دانشجویان سال دوم تنظیم کردند که مشتمل بر پنج مبحث و بر همان اساس "اصول پایداری و محاسباتی" استوار شده بود. این مجموعه مباحث مکانیک، ترمودینامیک، مکانیک مواد، مکانیک محیط‌های

پیوسته، مدارهای الکتریکی و الکترونیک را شامل می‌شد. در بعضی از دانشگاه‌های دیگر دانشجویان سال دوم ملزم شدند مجموعه‌ای هشت درسی متشکل از دینامیک، مکانیک سیالات، ترمودینامیک، مدارهای الکتریکی، دینامیک سیستم‌ها، معادلات دیفرانسیل، جبر ماتریسی و آمار را بگذرانند.

رهیافت جامعی که در این نوشتار معرفی شده است بر مبنای مقاله ای است که دونالدای ریچاردز از مؤسسه تکنولوژی رزهالمن در زمینه تجمیع دروس کلیدی دوره کارشناسی مهندسی مکانیک ارائه کرده است [۱]. اساس این رویافت شناخت مفاهیم اساسی است که بر مبنای آنها دانش مهندسی شکل گرفته است و چارچوبی در اختیار دانشجویان قرار می‌دهد که با تبعیت از آن بتوانند در برخورد با مسائل جدید مهندسی ارتباطات ضروری را کشف و از آن استفاده کنند. البته، چنین رویافتی برای اغلب رشته‌های مهندسی کارایی دارد، اما برای رشته مهندسی مکانیک که حوزه بسیار وسیعی را پوشش می‌دهد، بسیار مناسب است.

## ۲. مفاهیم مشابه در دروس کلیدی

با توجه به برنامه فعلی که در اغلب و شاید کلیه دانشگاه‌های ایران در دوره کارشناسی مهندسی مکانیک اجرا می‌شود، فرض کنید هفت درس استاتیک، دینامیک، مقاومت مصالح، مکانیک سیالات، ترمودینامیک، انتقال حرارت و مبانی مهندسی برق (مدارهای الکتریکی) را به عنوان دروس کلیدی این رشته در نظر بگیریم. حال می‌خواهیم ایده‌ها و مفاهیم مشابهی را که در این مجموعه دروس جاری است، شناسایی کنیم. برای مثال، از نظر یک دانشجو ممکن است این سؤال خاص مطرح شود که "ارتباط بین قانون نیوتن در دینامیک و معادله انتگرالی تکانه در مکانیک سیالات چیست؟" یا "ارتباط بین اصول کار-انرژی در دینامیک و بقای انرژی مکانیکی در مکانیک سیالات یا اصل کلی توازن انرژی در ترمودینامیک چیست؟"

### دروس کلیدی

استاتیک، دینامیک، مقاومت مصالح، مکانیک سیالات، ترمودینامیک، انتقال حرارت و مبانی برق.

**ویژگی‌های جمع‌پذیر:** جرم، تکانه خطی، تکانه زاویه‌ای، انرژی، انرژی مکانیکی، آنتروپی، بار الکتریکی و ...

**اندرکنش با محیط:** نیرو، گشتاور، کار، انتقال حرارت، انتقال جرم، جریان الکتریکی و ...

**روابط ساختمندی (متشکله):** فنر ایده‌آل، اصطکاک کولمب، مدل گاز ایده‌آل، جداول بخار، ضریب اصطکاک، سیال نیوتونی، نیروی مقاوم لزج، قانون اهم و ...

**سیستم:** نمودار جسم آزاد، سیستم باز، سیستم بسته، حجم معیار، گره و ...

**فرضیات مدل:** حالت ماندگار، تعادل، مرز صلب، تکیه‌گاه مفصلی، جسم صلب، مرز عایق، عناصر گسسته و ...

### شکل ۱: دروس کلیدی و بعضی مفاهیم مشترک در آنها

شاید در این زمینه اتفاق نظر وجود داشته باشد که مشکل اصلی دانشجویان حل مسئله است. البته، برای حل هر مسئله ابتدا باید صورت آن به دقت مطالعه شود. اما قبل از انجام دادن هر گونه تحلیلی عموماً باید یک **مدل** ریاضی برای مسئله در نظر گرفته شود. برای این کار ابتدا جزئی از عالم فیزیکی را مجزا و سیستم را شناسایی می‌کنیم. قدم بعدی تشریح وضعیت (**حالت**) سیستم و شناسایی **ویژگی‌های** مهم آن است. آن گاه باید **فرایندهایی** که وضعیت سیستم را تغییر می‌دهند و **اندرکنش‌هایی** که سیستم در طول این فرایندها با محیط دارند، شناسایی شوند.

پس از انجام دادن مراحل یاد شده لازم است از اصول یا قوانین بنیادی نظیر قانون نیوتون، قوانین اول و دوم ترمودینامیک، بقای جرم، بقای بار الکتریکی و ... استفاده شود. اینها همان "اصول محاسباتی" هستند که طبق آنها "ویژگی‌های مهم جمع‌پذیر" سیستم نظیر جرم، انرژی، تکانه خطی، تکانه زاویه‌ای، بار الکتریکی و آنتروپی تعقیب می‌شوند. از این ویژگی‌ها پنج تا پایستار هستند و ششمی؛ یعنی آنتروپی می‌تواند تولید شود.

در مراحل مختلف حل مسئله باید **فرضیات مدل** که جنبه‌های اصلی مسئله را دربر می‌گیرد، به دقت مشخص شوند و **روابط متشکله (ساختمندی)** مناسب برای تکمیل اصول اساسی‌گزينش شود. با توجه به مطالب گفته شده حل مسئله مورد نظر امکان‌پذیر است.

در شکل ۱ مشخص شده است که هر درسی نام ویژه خود را برای یک مفهوم عام دارد. در ادامه بحث واژه‌هایی که با حروف تیره نوشته شده است، تعریف می‌شود.

**مدل:** یک تبیین هدفمند.

**سیستم:** ناحیه‌ای از فضا یا کمیتی از ماده که برای تحلیل در نظر گرفته شده است.

**ویژگی:** خصوصیتی از سیستم که بتوان به آن در زمان مشخص صرف نظر از تاریخچه سیستم یک مقدار عددی نسبت داد. یک ویژگی "جمع‌پذیر" (غیر متمرکز - گسترده - extensive) عبارت است از یک ویژگی که مقدار آن به "گسترده‌گی" سیستم یا بزرگی سیستم بستگی دارد، مثل جرم، حجم و انرژی. یک ویژگی متمرکز - intensive - عبارت از یک ویژگی است که مقدار آن به "گسترده‌گی" سیستم بستگی ندارد؛ به عبارت دیگر، این ویژگی دارای مقدار در یک نقطه است؛ فشار، دما و سرعت از این گونه ویژگی‌ها هستند.

**وضعیت (حالت) سیستم:** تشریح کاملی از سیستم بر حسب ویژگی‌های آن.

**فرایند:** شیوه‌ای که سیستم طبق آن وضعیت (حالت) خود را تغییر می‌دهد.

**سیستم ماندگار:** سیستمی که رفتار آن به شکلی است که کلیه ویژگی‌های متمرکز آن و نیز اندرکنش آن با محیط تابع زمان نیست.

**اندرکنش:** انتقال یک ویژگی غیر متمرکز (گسترده - جمع پذیر) از مرز سیستم. **ویژگی پایسته:** یک ویژگی گسترده (غیر متمرکز) که قابل تولید یا از بین رفتن نیست. **اصل محاسباتی:** یک رابطه ساده توازن برای یک ویژگی غیر متمرکز (e.p.): انباشتگی یک e.p در داخل سیستم برابر است با انتقال e.p به داخل سیستم، منهای انتقال e.p به خارج سیستم، به اضافه تولید e.p داخل سیستم و منهای مصرف (انهدام) e.p داخل سیستم. **روابط متشکله (ساختمندی):** ارتباطی ریاضی بین متغیرهایی که پدیده‌ای فیزیکی را تشریح می‌کنند. چنین روابطی ذاتاً تخصیصی‌اند و عام نیستند و فقط تحت شرایط مشخصی قابل استفاده هستند.

### ۳. اصل محاسباتی

اصلی که اساساً رهیافت مورد نظر در این نوشتار را سازماندهی می‌کند، "اصل محاسباتی" است. ایده کلیدی در این مطلب نهفته است که می‌توان به هر سیستم ویژگی‌های غیرمتمرکز (جمع پذیر) بسیار زیادی را نسبت داد و رفتار سیستم را با تعقیب این ویژگی‌ها شناسایی کرد. هر میزان تغییر در یک ویژگی e.p داخل سیستم با احتساب مقدار انتقال یافته این ویژگی از مرزهای سیستم و میزان تولید شده یا مصرف شده آن در داخل سیستم قابل محاسبه است. برای مثال، برای یک ویژگی غیر متمرکز کلی مثل  $B$  می‌توان یک اصل محاسباتی عام برای هر سیستمی نوشت. در ساده‌ترین شکل این اصل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

*میزان انباشتگی یک ویژگی در داخل سیستم برابر است با میزان انتقال یافته آن ویژگی به داخل سیستم، منهای میزان انتقال یافته آن به خارج سیستم، به اضافه میزان تولید آن در داخل سیستم و منهای میزان مصرف (یا انهدام) آن ویژگی در داخل سیستم.*

با در نظر گرفتن ویژگی خاص  $B$  و تشریح این جملات به زبان ریاضی تر رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\left( \begin{array}{c} \text{مقدار ویژگی} \\ \text{در داخل} \\ \text{سیستم در} \\ \text{انتهای بازه} \\ \text{زمانی} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{مقدار ویژگی} \\ \text{در داخل} \\ \text{سیستم در} \\ \text{ابتدای بازه} \\ \text{زمانی} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{مقدار انتقال} \\ \text{یافته B داخل} \\ \text{سیستم در} \\ \text{طول بازه} \\ \text{زمانی} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{مقدار انتقال} \\ \text{یافته B به} \\ \text{خارج سیستم} \\ \text{در طول بازه} \\ \text{زمانی} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{مقدار تولید} \\ \text{شده B در} \\ \text{داخل سیستم} \\ \text{در طول بازه} \\ \text{زمانی} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{مقدار مصرف} \\ \text{شده B در} \\ \text{داخل سیستم} \\ \text{در طول بازه} \\ \text{زمانی} \end{array} \right)$$

یا

$$\left( \begin{array}{c} \text{میزان انباشتگی B} \\ \text{داخل سیستم در طول} \\ \text{یک بازه زمانی} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{خالص انتقال یافته} \\ \text{B به داخل سیستم} \\ \text{در طول بازه زمانی} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{خالص تولید شده} \\ \text{B داخل سیستم در} \\ \text{طول بازه زمانی} \end{array} \right)$$

نحوه فرمولبندی یاد شده معمولاً به نام نحوه "زمان - محدود" اصل محاسباتی خوانده می‌شود، زیرا در طول یک بازه زمانی مشخص اعمال پذیر است. فرم نرخی اصل محاسباتی را هم می‌توان در قالب کلمات تحریر کرد. مع هذا بیان ریاضی آن فشرده‌تر و به صورت زیر است:

$$B_{sys} = \int_{V_{sys}} b\rho dV \quad \frac{dB_{sys}}{dt} = [\dot{B}_{in} - \dot{B}_{out}] + [\dot{B}_{gen} - \dot{B}_{cons}] \quad (1)$$

$\uparrow$   
 نرخ خالص انتقالی  
 به داخل سیستم

$\uparrow$   
 نرخ خالص تولید  
 در داخل سیستم

عبارت سمت چپ مبین نرخ تغییرات یا مشتق زمانی ویژگی B در داخل سیستم،

$$\frac{dB_{sys}}{dt} \text{، است.}$$

عبارت سمت راست رابطه نرخ‌های انتقال، تولید و مصرف را مشخص می‌کند. مقدار ویژگی غیر متمرکز B در داخل سیستم را می‌توان با روی هم گذاری مقدار این ویژگی نظیر جرم سیستم محاسبه کرد. برای سیستم‌های گسسته این کار به صورت جمع متعارف انجام می‌پذیرد، در حالی که برای سیستم‌های پیوسته از حاصل ضرب  $b\rho$  بر روی حجم

سیستم انتگرال گرفته می‌شود که  $b$  شکل متمرکز و ویژگی غیر متمرکز  $B$  و  $\rho$  چگالی جرمی ماده داخل سیستم است. چنانچه  $b$  و  $\rho$  در کل سیستم یکنواخت باشند، میزان  $B$  را می‌توان با استفاده از حاصل ضرب  $B_{sys} = b\rho V_{sys}$  محاسبه کرد. باید توجه داشت که

$$\frac{dB}{dt} \neq \dot{B} \text{ یعنی کمیت مبین مشتق نیست؛ یعنی}$$

با توجه به اینکه اصل محاسباتی هم برای سیستم‌های بسته و هم برای سیستم‌های باز اعمال شدنی است [برای مثال سیستم‌هایی که جریان جرمی از مرزهای آنها وجود نداشته یا وجود داشته باشد]، می‌توان رابطه یاد شده را به شکل تفصیلی‌تری هم نوشت. مثلاً نرخ خالص انتقال ویژگی به داخل سیستم را می‌توان به دو جزء تفکیک کرد: یک جزء نرخ خالص انتقال ویژگی به داخل سیستم بدون در نظر گرفتن جریان جرمی و جزء دیگر نرخ خالص انتقال ویژگی به داخل سیستم با در نظر گرفتن جریان جرمی که جزء اخیر را می‌توان به شکل  $\sum_{in} \dot{m}_i b_i - \sum_{out} \dot{m}_e b_e$  نوشت که  $\dot{m}$  نرخ جریان جرمی و  $b$  شکل متمرکز  $B$  است.

#### ۴. معادلات اساسی پایستگی و محاسباتی

آنچه با عنوان اصل محاسباتی مورد بحث قرار گرفت، چارچوبی عام برای تبیین قوانین اساسی فیزیکی که مورد استفاده مهندسان است، ارائه می‌کند و همان گونه که بیان خواهد شد، تمام این قوانین را می‌توان در چارچوب این اصل محاسباتی ارائه کرد. با چنین نحوه بیانی دانشجویان به تدریج به ارتباط بین مفاهیم مختلف در طول تحصیل خود پی می‌برند. تمام این قوانین را می‌توان با عنوان یک درس برای دانشجویان سال دوم تدریس کرد.



$$\frac{d}{dt} m_{sys} = \sum_{in} \dot{m}_i - \sum_{out} \dot{m}_e$$

$$\frac{d}{dt} q_{sys} = \sum_{in} \dot{q}_i - \sum_{out} \dot{q}_e$$

$$\frac{d}{dt} P_{sys} = \sum_{external} F_j + \sum_{in} \dot{m}_i v_i - \sum_{out} \dot{m}_e v_e$$

$$\frac{d}{dt} L_{o,sys} = \sum_{external} M_{o,j} + \sum_{in} \dot{m}_i (r_o \times v)_i - \sum_{out} \dot{m}_e (r_o \times v)_e$$

$$\frac{d}{dt} E_{sys} = \dot{Q}_{net,in} + \dot{W}_{net,in} + \sum_{in} \dot{m}_i (h + v^2/2 + gz) - \sum_{out} \dot{m}_e (h + v^2/2 + gz)$$

$$\frac{d}{dt} S_{sys} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_{in} \dot{m}_i s_i - \sum_{out} \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen} \quad \dot{S}_{gen} \geq 0$$

معادلات یاد شده به ترتیب بیان اصول پایستگی جرم، بار الکتریکی، تکانه خطی، تکانه زاویه‌ای، انرژی و یک اصل محاسباتی مناسب برای آنروپی است.

با معرفی هر اصل جدید چهار سؤال اساسی در چارچوب اصل محاسباتی یاد شده قابل

طرح است:

۱. ویژگی گسترده (غیر متمرکز) کدام است؟
  ۲. چگونه این ویژگی در سیستم ذخیره می شود و چگونه می توان آن را کمی کرد؟
  ۳. این ویژگی چگونه از مرز سیستم انتقال می یابد؟
  ۴. چگونه می توان این ویژگی را در سیستم تولید یا مصرف کرد؟
- برای مثال، ویژگی غیر متمرکز e.p تکانه خطی را در نظر می گیریم.

۱. تکانه خطی چیست؟  $P_{particle} = m_{particle} v_{particle}$  تکانه خطی یک ذره از

حاصل ضرب جرم ذره و سرعت ذره به دست می آید و دانشجویان این تعریف را در

فیزیک خوانده‌اند. در چارچوب اصل محاسباتی تکانه خطی  $P$  همان ویژگی غیر

متمرکز  $B$  است و سرعت  $v$  همان تکانه خطی ویژه؛ یعنی متناظر با ویژگی متمرکز  $b$

است. به رابطه شماره (۱) مراجعه شود.

۲. چگونه می‌توان این کمیت را در سیستم ذخیره و آن را کمی کرد؟

$$P_{sys} = \int_{V_{sys}} v p dV$$

یعنی برای محاسبه تکانه خطی سیستم تکانه خطی ویژه  $v$  و چگالی

جرمی  $\rho$  را در هم ضرب می‌کنیم و از حاصل ضرب بر روی حجم سیستم انتگرال می‌گیریم. چنانچه سیستم از ذرات منفصل تشکیل شده باشد، تکانه خطی مجموع تکانه

$$P_{sys} = \sum P_j = \sum m_j v_j$$

خطی تک تک جرم‌ها خواهد بود.

۳. چگونه می‌توان آن را از مرز سیستم انتقال داد؟ توسط  $F_{external}$  و  $\dot{m}v$ .

تجربه به ما نشان داده است که تکانه خطی با اعمال نیروی خارجی به سیستم و همچنین، با جریان جرم از مرز سیستم انتقال می‌یابد. نیروهای خارجی  $F_{external}$  از دو نوع تشکیل شده‌اند: یکی نیروهای جسمی که توسط میدان‌هایی نظیر گرانش تولید می‌شوند و دیگری نیروهای سطحی یا تماس که نقطه اثر آنها بر مرز سیستم است. انتقال تکانه خطی را می‌توان از حاصل ضرب نرخ جریان جرمی و سرعت جریان نیز به دست آورد،  $\dot{m}v$ . با این تعبیر، نیرو مکانیزمی برای انتقال تکانه خطی است و به طور خاص عبارت است از نرخ انتقال تکانه خطی و واحد آن نیز همان واحد تکانه خطی بر واحد زمان است.

$$\dot{P}_{gen} = \dot{P}_{con} = 0$$

تکانه خطی چگونه در سیستم تولید یا مصرف می‌شود؟

تجربه نشان داده است که تکانه خطی را نمی‌توان تولید یا منهدم کرد و لذا، می‌گوییم تکانه خطی "بقا می‌یابد"؛ به عبارت دیگر، اجزای مربوط به تولید یا مصرف تکانه خطی در رابطه کلی هر دو صفر هستند.

با جمع بندی نکات یاد شده و در چارچوب اصل محاسباتی که طبق رابطه (۱) بیان شد، شکل نرخی بقای تکانه خطی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d}{dt} P_{sys} = \sum_{external} F_j + \sum_{in} \dot{m}_i v_i - \sum_{out} \dot{m}_e v_e$$

به بیان کلامی، نرخ تغییرات تکانه خطی یک سیستم برابر است با نرخ خالص انتقال تکانه خطی به داخل سیستم از طریق نیروهای خارجی، به اضافه نرخ خالص انتقال تکانه

خطی به داخل سیستم از طریق جریان جرمی. چنین چارچوبی نقطه شروع هر مسئله‌ای است که در آن تکانه خطی مطرح باشد، چه این مسئله در استاتیک باشد یا دینامیک یا مکانیک سیالات.

با توجه به انس دانشجویان به رابطه آشنای  $F = ma$ ، بینیم ارتباط این رابطه با رابطه کلی‌تر آن چگونه است. با استفاده از شکل نرخ بقای تکانه خطی کافی است که فرضیات مدل را اعمال کنیم. یکی آنکه چون با سیستم بسته سر و کار داریم جریان جرمی ندارد، لذا، دو جمله آخر رابطه یاد شده صفر است. دیگر آنکه  $P_{sys} = m_{sys} v_G$  که زیر نویس  $G$  مبین مرکز جرم سیستم و  $m_{sys}$  بیانگر جرم سیستم است، لذا:

$$\frac{d}{dt}(m_{sys} v_G) = \sum_{external} F_j \Rightarrow m_{sys} \frac{dv_G}{dt} = \sum_{external} F_j \Rightarrow m_{sys} a_G = \sum_{external} F_j$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در کاربرد اصل یاد شده برای استخراج رابطه  $F=ma$  نکته مهم این است که دانشجو توجه کند با سیستم بسته سر و کار دارد. معمولاً اگر این رابطه را دانشجو حفظ کرده باشد، کمتر توجه خواهد کرد که کاربرد آن برای یک سیستم بسته است. حسن استفاده از چارچوب کلی و آن‌گاه اعمال فرضیات خاص یک مدل در این است که دانشجو بهتر متوجه می‌شود چه کار می‌کند و بهتر به محدودیت‌های تحلیل خود توجه خواهد کرد.

معادلات مشابهی را می‌توان برای سایر قوانین اساسی که توسط روابط (۲) معرفی شده‌اند، عنوان کرد. توجه شود که تمام این قوانین به استثنای اصل محاسباتی آنتروپی قوانین بقا هستند. مع‌هذا گرچه برای آنتروپی نمی‌توان یک رابطه پایستگی به نحو متعارف نوشت، اما می‌توان برای آن یک اصل محاسباتی مناسب در نظر گرفت و از آنجایی که طبق قانون دوم ترمودینامیک محدودیت بر تولید آنتروپی وجود دارد؛ یعنی  $\dot{S}_{gen} \geq 0$  و تولید آنتروپی تحت شرایطی که بازگشت پذیری داخلی وجود دارد به سمت صفر میل می‌کند، این گزاره را هم می‌توان جوف اصل محاسباتی مد نظر قرار داد.

همان گونه که ملاحظه شد، تمام این معادلات ظاهر مشابهی دارند. هر کدام شامل یک جمله انباشتگی است و همگی دارای جملات انتقال هستند و انتظار بر این است که دانشجویان با دیدن شکل مشابه معادلات به راحتی ارتباطات ضروری را کشف کنند.

### ۵. شیوه حل مسئله و بررسی چند مثال

یکی از مزایای رهیافت یاد شده این است که صرف نظر از نوع مسئله شیوه مشابهی برای حل آن تعقیب می‌شود. وقتی دانشجو با مسئله‌ای مواجه می‌شود، مجموعه‌ای از سؤالات با ویژگی عام در خصوص آن مسئله به ذهنش خطور می‌کند، از قبیل سیستم مورد نظر چیست؟ چه ویژگی‌هایی را باید محاسبه کرد؟ بازه زمانی کدام است؟ اندرکنش‌های مهم کدام‌اند؟ چه روابط متشکله‌ای (ساختمندی) را باید مد نظر قرار داد؟ چگونه باید معادلات اساسی را ساده کرد؟ مجهولات مسئله کدام‌اند؟ به چه تعداد معادله نیاز است؟ و... . ملاحظه می‌شود که نحوه ساماندهی این سؤالات به قسمی است که مستقل از نوع مسئله هستند. همچنین، با ملاحظه صورت مسئله موارد زیر را می‌توان در خصوص مسئله خاص و نحوه حل آن مطرح کرد: معلومات، مجهولات و داده‌های مسئله کدام‌اند؟ در تحلیل مسئله چه راهبردی باید تعقیب شود؟ مدل مناسب کدام است؟ حل تحلیلی و حل عددی را چگونه باید فرمولبندی کرد؟ و توضیحات ضروری دیگر.

بدین ترتیب، انتظار می‌رود با توجه به اینکه از دانشجو خواسته می‌شود با توجه به اصول اساسی مسئله مورد نظر را فرمولبندی کند، توجه وی به فرضیات مدل، نحوه ساده کردن معادلات عام و استخراج شکل مناسب برای مسئله خاص معطوف شود، نه اینکه وی به دنبال معادلات ساده‌ای در کتاب درسی بگردد که به درد مسئله‌اش بخورد.

به منظور کسب دیدی تفصیلی‌تر از رهیافت یاد شده حل سه مسئله نمونه از کتاب‌های درسی بیان شده است. هر کدام از این سه مسئله در چارچوب اصول پایستگی و محاسباتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند و در عین حال، فرمولبندی نهایی برای حل آنها کاملاً متفاوت است. در هر یک از این مسائل اندرکنش سیستم با محیط بررسی شده است تا

جملات انتقال شناسایی شوند.

مثال ۱- اتومبیل کابلی

صورت مسئله: یک وسیله کوچک کابلی که به منظور بازرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، توسط کابلی که به نقطه  $A$  وصل شده است، بر روی کابل بالاسری بدون اصطکاک کشیده می‌شود (به شکل مراجعه شود).

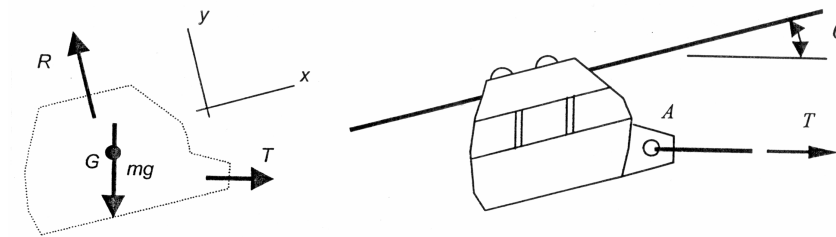
خواسته مسئله:

الف) مقدار و جهت نیروی  $R$  که توسط کابل بالاسری به وسیله وارد می‌شود چند نیوتون است؟

ب) شتاب وسیله چند متر بر مجذور ثانیه و جهت آن کدام است؟

داده‌ها:

$$\theta = 22.6^\circ, \quad m_{car} = 200Kg, \quad T = 2400N$$



تحلیل

راهبرد مناسب: چون مسئله راجع به نیروست، بقای تکانه خطی مناسب به نظر می‌رسد.

ویژگی: تکانه خطی

بازه زمانی: آنی

بدون گزینش یک دستگاه مختصات با توجه به بسته بودن سیستم پایستگی تکانه خطی

چنین است:

$$\frac{d}{dt} P_{sys} = \sum_{external} F_j \Rightarrow \frac{d}{dt} P_{sys} = mg + T + R$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، فقط سه نیروی خارجی به سیستم وارد می‌شود: نیروی  $R$  وارده بر چرخ‌ها، وزن وسیله  $mg$  و نیروی کابل  $T$ . همچنین، چون سیستم بسته است، تکانه خطی آن  $P_{sys} = m_{sys} v_G$  است که  $v_G$  سرعت مرکز جرم سیستم است. بنابراین، داریم:

$$m_{sys} \frac{dv_G}{dt} = m_{sys} g + T + R$$

حال مطابق شکل دستگاه مختصاتی را انتخاب می‌کنیم که محور  $x$  آن هم راستا با کابل بالایی باشد و دو مؤلفه بقای تکانه خطی را می‌نویسیم. چون حرکت در جهت  $y$  نداریم، لذا  $dv_{G,y}/dt = 0$  است و بنابراین:

$$-(T \sin \theta) + R - (m_{sys} g \cos \theta) = 0 \Rightarrow R = T \sin \theta + m_{sys} g \cos \theta$$

با جاگذاری مقادیر عددی:

$$R = (2400N) \sin(22.6^\circ) + (200kg)(9.81m/s^2) \cos(22.6^\circ) = 2733N$$

در جهت  $x$  معادله تکانه خطی چنین است:

$$m_{sys} \frac{dv_{G,x}}{dt} = T \cos \theta - m_{sys} g \sin \theta$$

یا

$$a_{G,x} = \frac{dv_{G,x}}{dt} = \left(\frac{T}{m_{sys}}\right) \cos \theta - g \sin \theta = \frac{2400N}{200kg} \cos(22.6^\circ) - (9.81m/s^2) \sin(22.6^\circ) = 7.31m/s^2$$

مثال ۲- توزین آب

صورت مسئله: جریان دایم آب از مخزنی که در حالت سکون بر وسیله توزین قرار گرفته، برقرار است ...

خواسته مسئله: عددی که وسیله توزین نشان می‌دهد.

داده‌ها: ورودی در نقطه (۱) دبی حجمی:  $\dot{V}_1 = 30 \text{ m}^3 / \text{h}$  قطر:  $D_1 = 6 \text{ cm}$

خروجی در نقطه (۲) قطر:  $D_2 = 6 \text{ cm}$

حجم آب در داخل مخزن در حالت دایم:  $V_{\text{water}} = 0.6 \text{ m}^3$  وزن مخزن:  $500 \text{ N}$

### تحلیل

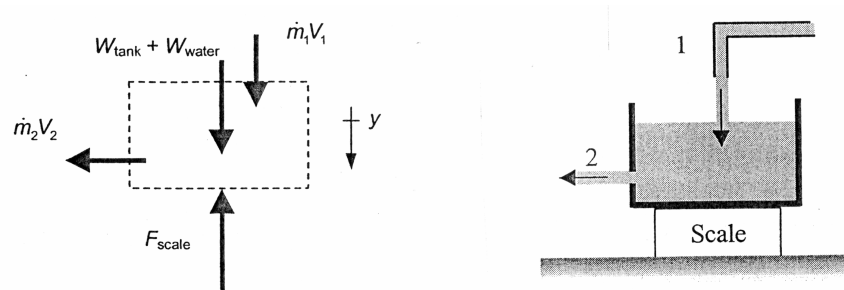
راهبرد: در اینجا هم چون با نیرو سر و کار داریم، بقای تکانه خطی را مد نظر قرار می‌دهیم.

سیستم: سیستم باز متشکل از مخزن و آب درون آن همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است.

ویژگی: تکانه خطی و جرم

بازه زمانی: آنی

شکل نرخ بقای تکانه خطی برای این مسئله به قرار زیر است:



$$\frac{d}{dt} P_{\text{sys}} = \sum_{\text{external}} F_j + \sum_{\text{in}} \dot{m}_i v_i - \sum_{\text{out}} \dot{m}_e v_e$$

و با توجه به حالت دایم و در نظر گرفتن نیروهای خارجی:

$$0 = \frac{d}{dt} P_{\text{sys}} = W_{\text{tank}} + W_{\text{water}} + F_{\text{scale}} + \dot{m}_1 v_1 - \dot{m}_2 v_2$$

مؤلفه معادله یاد شده در جهت  $y$  که در شکل تعریف شده است، معادله زیر را به دست می‌دهد:

$$0 = W_{\text{tank}} + W_{\text{water}} - F_{\text{scale}} + \dot{m}_1 v_{1,y} - (\dot{m}_2 v_{2,y} = 0)$$

حل معادله یاد شده برای  $F_{\text{scale}}$ :

$$F_{\text{scale}} = W_{\text{tank}} + W_{\text{water}} + \dot{m}_1 v_{1,y}$$

وزن آب درون مخزن عبارت است از:

$$W_{\text{water}} = m_{\text{water}} g = (\rho_{\text{water}} V_{\text{water}}) g = (1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(0.6 \text{m}^3)(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) = 5886 \text{N}$$

مؤلفه  $y$  سرعت در نقطه ۱ و دبی جرمی در نقطه ۱ عبارت اند از:

$$v_{1,y} = v_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1} = \frac{\dot{V}_1}{\frac{\pi}{4} D_1^2} = \frac{(30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1 \text{h}}{3600 \text{s}})}{\frac{\pi}{4} (0.06 \text{m})^2} = 2.96 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_1 = \rho_1 \dot{V}_1 = (1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1 \text{h}}{3600 \text{s}}) = 8.33 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

بالاخره، با استفاده از این یافته‌ها نیروی ترازو حساب می‌شود:

$$F_{\text{scale}} = (500 \text{N}) + (5886 \text{N}) + (8.33 \frac{\text{kg}}{\text{s}})(2.96 \frac{\text{m}}{\text{s}}) = 6411 \text{N}$$

اگر اثر جریان آب بر عددی که ترازو می‌خواند مورد غفلت قرار گیرد، وزن آب داخل مخزن با حدود 0.4% خطای اضافی گزارش می‌شود.

### مثال ۳- چرخنده کاهنده

صورت مسئله: یک موتور الکتریکی سیستم چرخنده کاهنده‌ای را در شرایط دایم به کار انداخته است.

خواسته مسئله: حد اقل توان الکتریکی لازم برای تولید توان 25hp در شافت خروجی



چرخنده.

$$\dot{W}_{shaft,out} = 25hp \text{ توان مورد نیاز شافت خروجی}$$

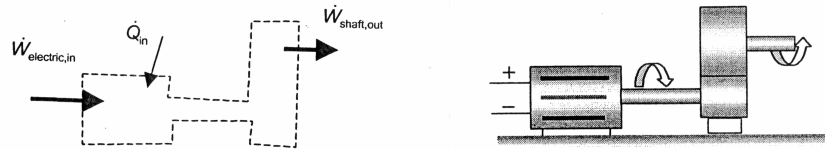
### تحلیل

راهبرد: چون مسئله با توان سر و کار دارد، باید از توازن انرژی بهره گرفت. علاوه بر این، چون حداقل مقدار خواسته شده است، احتمالاً اصل محاسباتی آنتروپی نیز باید لحاظ شود و قانون دوم ترمودینامیک مد نظر قرار گیرد.

سیستم: سیستم بسته متشکل از موتور و چرخنده

ویژگی: انرژی و آنتروپی

بازه زمانی: آنی



شکل نرخی بقای انرژی در حالت کلی معادله زیر است:

$$\frac{d}{dt} E_{sys} = \dot{Q}_{net,in} + \dot{W}_{net,in} + \sum_{in} \dot{m}_i (h + v^2/2 + gz) - \sum_{out} \dot{m}_e (h + v^2/2 + gz)$$

که با توجه به بسته بودن سیستم و حالت دایم به صورت زیر ساده می شود:

$$0 = \dot{Q}_{in} + (\dot{W}_{electric,in} - \dot{W}_{shaft,out}) \Rightarrow \dot{W}_{electric,in} = \dot{W}_{shaft,out} - \dot{Q}_{in}$$

شکل نرخی معادله محاسباتی آنتروپی نیز عبارت است از:

$$\frac{d}{dt} S_{sys} = \frac{\dot{Q}_{in}}{T_{surface}} + \sum_{in} \dot{m}_i s_i - \sum_{out} \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen} \quad , \quad \dot{S}_{gen} \geq 0$$

که با توجه به اینکه سیستم بسته است و حالت دایم داریم، به نحو زیر ساده می شود:

$$\dot{Q}_{in} = -T_{surface} \dot{S}_{gen}$$

حال با ترکیب معادله انرژی و آنتروپی و حذف نرخ انتقال حرارت داریم:

$$\dot{W}_{electric,in} = \dot{W}_{shaft,out} + T_{surface} \dot{S}_{gen}$$

اما نرخ تولید آنتروپی غیر منفی است، لذا  $\dot{W}_{electric,in} \geq \dot{W}_{shaft,out}$  است؛ به عبارت دیگر، حداقل توان الکتریکی ورودی عبارت است از:

$$\dot{W}_{electric,in|min} = (25hp) \left( \frac{0.746kW}{1hp} \right) = 18.6kW$$

ملاحظه می‌شود که تحلیل انجام شده مبین دو نتیجه مهم است:

اولاً هر اتلافی [یعنی تولید آنتروپی] در موتور یا چرخنده توان الکتریکی مورد نیاز را، برای یک میزان مشخص توان خروجی، افزایش می‌دهد. ثانیاً نمی‌توان با انتقال حرارت به داخل سیستم توان الکتریکی ضروری را کاهش داد، زیرا چنین کاری مستلزم تولید آنتروپی منفی است که ناممکن است.

## ۶. نتیجه گیری و جمع‌بندی

رهیافتی که در این نوشتار معرفی شد، حداقل از دو منظر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه، موجبات اصلاح برنامه آموزشی را فراهم آورد. نخست آنکه از آن می‌توان به‌عنوان شیوه‌ای برای تجمیع مجموعه‌ای از دروس سنتی که در دوره‌های مهندسی تدریس می‌شود، استفاده کرد. البته، انجام یافتن چنین کاری به طور ایده‌آل مستلزم تهیه و تدوین کتب درسی مناسبی است که تجمیع مورد نظر در آنها رعایت شده باشد. دوم آنکه از این رهیافت می‌توان به‌عنوان یک اصل سازماندهی یا چارچوبی به منظور تدوین برنامه آموزشی جدیدی برای مباحث کلیدی مورد نیاز دوره‌های مهندسی بهره گرفت. همانگونه که اشاره شد، این رهیافت در دانشگاه‌های Texas A&M و رزهالمن در آمریکا استفاده شده که علاوه بر افزایش بازده آموزشی، موجب کاهش واحدهای آموزشی دوره کارشناسی نیز شده است [۱].

مجدداً خاطر نشان می‌شود که تأکید این رهیافت بر توسعه شیوه حل مسائل خاص از

اصول کلی است و در نقطه مقابل شیوه مرسوم قرار دارد که طبق آن برای هر مسئله خاص شیوه خاص حل آن و معادلات خاصی که باید اعمال شود، جستجو می‌شود. به موجب این رهیافت قبل از آنکه دانشجو به حل یک مسئله بپردازد، ابتدا باید تصمیم بگیرد کدام یک از اصول اصلی را باید مورد استفاده قرار دهد و چه چیزی را قرار است محاسبه کند، نه اینکه چه معادله‌ای برای آن مسئله خاص به درد می‌خورد.

بعد از طی این مرحله لازم است سیستم شناسایی شود. شناسایی سیستم فوق‌العاده با اهمیت است، زیرا قوانین اصلی پایستگی و محاسباتی در چارچوب مفهوم سیستم، انباشتگی داخل سیستم و انتقال از مرز سیستم فرمولبندی شده‌اند. کاربست معادلات در این چارچوب مستلزم داشتن اطلاع دقیق از سیستم و مرز آن است. با شناسایی سیستم و اصول حاکم بر آن، کاری که باقی می‌ماند این است که معادلات حاکمه ساده شوند. این کار با در نظر گرفتن فرضیات خاص مدل مربوط و قیود موجود امکان‌پذیر است. بنابراین، این رهیافت از دانشجو می‌خواهد که حل مسئله را با استفاده از اطلاعات مسئله با شیوه‌ای استدلالی از اصول کلی بسازد و تأکید بر اصول فیزیکی مربوط و فرضیات مربوط به مدل است، در حالی که در روش مرسوم دانشجو دنبال معادلاتی می‌گردد که برای مسئله خاص او کاربرد دارد.

با توجه به اینکه فرضیات مربوط به مدل و قیود در بسیاری از موضوعات مشترک است - مثلاً حالت دایم یا سیستم بسته - این نکته نیز تأکیدی بر مشابهت بین موضوعات گوناگون است.

به‌طور کلی، در دانشگاه‌هایی که رهیافت مذکور مورد استفاده قرار گرفته، پاسخ اعضای هیئت علمی و دانشجویان به نتایج آن بسیار مثبت بوده است [۱]. تشخیص دانشجویان عموماً این بوده که چنین تجمیعی به آنان کمک کرده است تا از آنچه در دانش مهندسی می‌گذرد بهتر سر در بیاورند و ارتباط بین موضوعات به ظاهر متفاوت را بهتر کشف کنند. از نظر اعضای هیئت علمی با کاربست این شیوه دانشجویان از عمق دانش بیشتری بهره‌مند شده‌اند و با توجه به مراجعه دایم به موضوعات مشابه در سطوح بالاتر و بر

مبنای چارچوب مشترک، مطالب آموخته شده بهتر ملکه ذهن آنها شده است. همچنین، فرصتی برای اعضای هیئت علمی پیش آمده است که خارج از تخصص خود نیز به توضیح و حل مسائل بپردازند.

بحث ضرورت تجمیع دروس اگر نه به شکل مطرح شده در این نوشتار، لکن به انحای محدودتری مورد توجه اغلب دانشگاه‌های معتبر دنیا قرار گرفته است. برای مثال، در دانشگاه MIT آمریکا طی یک برنامه یکساله آموزشی در دوره کارشناسی مهندسی مکانیک دروس ترمودینامیک، انتقال حرارت و مکانیک سیالات در یک مجموعه درسی تدریس می‌شود، بدین ترتیب که در نیمسال اول اصول اساسی تدریس می‌شود و در نیمسال دوم کاربرد آنها در مسائل مختلف آموزش داده می‌شود. همچنین، مجموعه‌های دیگری هم نظیر طراحی و ساخت: دینامیک، کنترل و سیستم: مواد و مقاومت مصالح در برنامه درسی اصلاح شده این دانشگاه به صورت تجمیع یافته گنجانده شده است که توسط استادان به صورت مشترک تدریس می‌شود و کتب درسی جدیدی نیز توسط آنها تألیف شده و می‌شود [۲ و ۳].

در حال حاضر، مسئله اساسی، چه برای دانشجویان و چه استادان، کمبود کتب درسی است که در تألیف آنها رهیافت یاد شده مد نظر قرار گرفته باشد. در دانشگاه‌های مجری این برنامه در حال حاضر معمولاً ترکیبی از کتب استاندارد موجود و جزوه‌های درسی استادان مورد استفاده قرار می‌گیرد که البته، این روش مشکلات مربوط به خود را به دنبال دارد، از قبیل ناهماهنگی بین نمادهای به کار گرفته شده در کتب مختلف یا قراردادهایی که هر کدام جداگانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

چنانچه این رهیافت مورد توجه متخصصان امر و سیاستگذاران برنامه‌های آموزشی دانشگاه‌های کشور قرار گیرد، به منظور افزایش کارایی و جاذبه آن می‌توان ابتدا با اجرای یک برنامه مطالعاتی و تحقیقی جامع، مسائل و موضوعات علمی و کاربردی مورد توجه صنایع، که انتظار بر این است یک مهندس پس از فراغت از تحصیل بتواند آنها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد، شناسایی و سپس، به صورت پروژه‌های علمی تفکیک و تعریف

و جزو تکالیف درسی برنامه‌های تجمیعی گنجانده شود.

به نظر می‌رسد که چنانچه این شیوه برنامه‌ریزی به صورت صحیح و با دقت لازم ساماندهی شود، بتوان بدون کاهش ارزش نظری دوره‌های مهندسی آگاهی علمی و فنی دانش‌آموختگان این رشته را بالا برد و استقلال و اعتماد به نفس آنها را در برخورد با مسائل مهندسی افزایش داد، ضمن آنکه با اجتناب از موضوعات تکراری که در حال حاضر در بسیاری از دروس وجود دارد، می‌توان کل واحدهای ضروری و در نتیجه، طول دوره را نیز کاهش داد.

#### مراجع

1. E. Richards, Integrating the Mechanical Engineering Core; Donald. Proceedings of the 2001, American Society for Engineering Education, Annual Conference and Exposition.
2. P. Suh; Transformation of Mechanical Engineering Education at MIT. Nam. Journal of STEM Education, July-December 2003.
3. ASME's Vision of the Future of Mechanical Engineering Education, ASME International Council on Education, Nov. 2004.