

ترمودینامیک مهندسی شیمی: بازنگری در محتوا و آموزش

لیلا زرگرزاده^۱ و غلامرضا پازوکی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۲۶

DOI: 10.22047/ijee.2023.402217.1986

چکیده: دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، با بازنگری در برنامه درسی، سرفصل جدیدی از دروس مهندسی شیمی از جمله مجموعه دروس ترمودینامیک را تدوین کرده است. این کار با هدف هماهنگی با روند فعلی آموزش مهندسی شیمی در سراسر جهان و پاسخگویی به انتظارات صنعت از فارغ‌التحصیلان مهندسی شیمی انجام گرفته است. بر اساس برنامه پیشنهادی پیشین وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تمرکز بخشی از درس ترمودینامیک ۲ بر چرخه‌های ترمودینامیکی بود. ناگزیر محتوای دروس پوشش کافی از برخی موارد مختص رشته مهندسی شیمی از جمله انواع تعادلات فازی (تعادلات دیگر علاوه بر تعادل بخار-مایع) نداشت. در این مقاله به بیان گزیده‌ای از مطالب در خصوص محتوا و سرفصل مطالب دروس ترمودینامیک مهندسی شیمی، کتاب‌های مرجع رایج و روش‌های تدریس این درس در دانشگاه‌های منتخب دنیا پرداخته می‌شود. در نهایت محتوا و سرفصل پیشنهادی، به انضمام نکاتی در خصوص روش‌های یاددهی، رویکرد یادگیری فعال و منابع مناسب موجود برای مجموعه دروس ترمودینامیک، با هدف بهبود طراحی درس و آموزش ترمودینامیک مهندسی شیمی ارائه می‌گردد. هدف تحقیق حاضر بهبود محتوا و طرح درس و روش‌های آموزش مجموعه دروس ترمودینامیک مهندسی شیمی است.

واژگان کلیدی: ترمودینامیک مهندسی شیمی، ترمودینامیک تعادلات فازی، سرفصل درس، طرح درس، یادگیری فعال

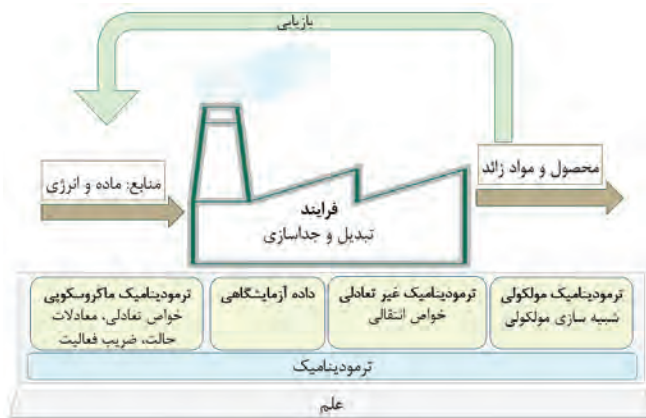
۱- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). zargarzadeh@aut.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). ghpazuki@aut.ac.ir

۱. مقدمه

ترمودینامیک اصول علمی حاکم بر اثر متقابل ماده و انرژی و تبدیل انواع انرژی (نظیر گرما، کار مکانیکی (انبساط و انقباض)، کار الکتروشیمیایی، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل) به یکدیگر است. مهندس شیمی با دانش ترمودینامیک مبنای علمی لازم در طراحی، بهینه‌سازی و بهره‌برداری فرایندهای صنعتی ایمن و پایدار را در اختیار دارد. نمونه‌هایی از این فرایندهای صنعتی، شامل تولید برق، سوخت، پلاستیک، باتری، رنگ، کود، مواد شوینده، دارو و مواد غذایی هستند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در شبیه‌سازی عددی و روش‌های آزمایشگاهی، دامنه کاربرد ترمودینامیک به حوزه‌هایی نظیر یاخته‌ها و علوم زیستی، نانومواد، مواد پیشرفته، جذب و جداسازی کربن، استخراج با سیال فوق‌بحرانی و حلال‌های نسل جدید نظیر مایعات یونی و حلال‌های نقطه یوتکتیک عمیق گسترش یافته است (Economou et al., 2014). ترمودینامیک کاربردی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار سازمان ملل نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. در بحث بهره‌وری انرژی، ترمودینامیک با کمک تحلیل اکسرژی، بیشینه ممکن تولید کار در فرایندهای مختلف را مشخص می‌کند. تحلیل ترمودینامیکی همچنین در تعیین گزینه مناسب برای ذخیره انرژی (تبدیل انرژی به صورت حرارتی، مکانیکی، الکتروشیمیایی یا محصول شیمیایی با قابلیت بازیابی با کمترین اتلاف) نقش کلیدی دارد. با تکیه بر دانش ترمودینامیک می‌توان قدم‌های مؤثری را در مدیریت و بهینه‌سازی مصرف آب در واکنش‌های صنعتی، مبدل‌های حرارتی و فرایندهایی که آب در نقش حلال کاربرد دارد، برداشت. همچنین ترمودینامیک نقش به‌سزایی در انتخاب و مصرف بهینه حلال مناسب در فرایندهای استخراج مایع-مایع، بهینه کردن فرایندهای تولید غذا و دارو، و مواد پیشرفته و جدید دارد و به دنبال آن، در تأمین سلامت انسان و محیط زیست تأثیرگذار است (De Hemptinne et al., 2022). شکل ۱ بخش‌های کاربردی علم ترمودینامیک در طراحی فرایند ایمن و پایدار جهت تولید محصول مورد نظر از منابع ماده و انرژی، و بازیافت حداکثری منابع را نشان می‌دهد.

با توجه به اهمیت دانش ترمودینامیک، در این مقاله به بررسی محتوا و نحوه ارائه دروس ترمودینامیک برای رشته مهندسی شیمی در دنیا و اطلاعات گردآوری شده در مقالات مرتبط پرداخته می‌شود. سپس بر اساس این اطلاعات، برنامه پیشنهادی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر برای مجموعه دروس ترمودینامیک، به‌عنوان بخشی از بازنگری برنامه درسی مهندسی شیمی، به علاوه روش آموزش پیشنهادی ارائه می‌گردد. به‌روزرسانی محتوای درسی و روش‌های یاددهی، به‌عنوان بخشی از الزامات آموزش عالی جهت تطبیق با انقلاب صنعتی چهارم (صنعت ۴/۰) است (Bameri et al., 2023).



شکل ۱. ترمودینامیک کاربردی زیربنای طراحی فرایندهای صنعتی ایمن و پایدار (ایده شکل از محتوا و اشکال همپتین و همکاران (De Hemptinne et al., 2022)

۲. تعداد دروس ترمودینامیک کارشناسی مهندسی شیمی

رایج‌ترین الگو در ارائه دروس ترمودینامیک رشته مهندسی شیمی بر اساس اطلاعات گردآوری شده از ۸۳ دانشکده مهندسی شیمی آمریکا و ۳ دانشگاه غیرآمریکایی در سال ۲۰۱۸، یکی از دو روش زیر است: یک درس شیمی- فیزیک به همراه یک درس ترمودینامیک مهندسی شیمی، یا دو درس ترمودینامیک مهندسی شیمی و حذف درس شیمی فیزیک به عنوان یک درس اجباری (Vigeant et al., 2019). همچنین طبق مطالعه دیگری در مورد برنامه آموزش ترمودینامیک و خواص انتقالی در برنامه درسی مهندسی شیمی در سال ۲۰۱۰ و با مشارکت ۵۵ دانشگاه از آمریکا و ۸۱ دانشگاه از ۲۰ کشور اروپایی (که یک سوم پاسخ‌ها از دانشگاه‌های آلمان دریافت شده)، بیشتر دانشگاه‌های آمریکا ۲ درس ترمودینامیک و بیشتر دانشگاه‌های اروپا بیش از ۲ درس ترمودینامیک دارند (Ahlström et al., 2010). در آمریکا برنامه‌های درسی از الگوی قدیمی به صورت ارائه یک درس ترمودینامیک عمومی (مشترک با دیگر رشته‌های مهندسی از جمله مهندسی مکانیک) و یک درس ترمودینامیک مهندسی شیمی فاصله گرفته‌اند. در بیشتر دانشکده‌ها، ارائه دو درس ترمودینامیک مهندسی شیمی، منحصراً مختص رشته مهندسی شیمی انجام می‌گیرد و تعداد معمول دانشجویان در کلاس ترمودینامیک، ۵۰ نفر است (Vigeant et al., 2019).

۳. محتوای ترمودینامیک مهندسی شیمی

مطالبی که به طور گسترده در بیشتر دانشکده‌ها تدریس می‌گردد، شامل موارد زیر است:

- قانون اول و دوم ترمودینامیک، آنتروپی، برگشت پذیری، گاز ایده‌آل، گازهای حقیقی و معادلات حالت، خصوصیات بخار آب، چرخه یا چرخه توان و تبرید (کارنو و رنکین)، کاربرد قانون اول و

دوم ترمودینامیک در عملیات واحد و چرخه‌ها، در اولین درس (تنها درس) ترمودینامیک ارائه می‌گردد. همچنین در بیش از نیمی از دانشگاه‌های آمریکا، معادلات حالت و روابط ماکسول جزء سرفصل‌های اولین درس ترمودینامیک است (Ahlström et al., 2010; Vigeant et al., 2019).

- خصوصیات جزئی مولی، پتانسیل شیمیایی، فوگاسیته، مدل‌های ضریب فعالیت، تعادل بخار-مایع در سامانه‌های چندجزئی، و واکنش‌های شیمیایی در بیشتر دانشکده‌ها در دومین درس و در بعضی دانشکده‌ها در اولین (یا تنها) درس ارائه می‌گردد (Vigeant et al., 2019). همچنین تعادلات مایع-مایع در بیش از ۵۰ درصد مؤسسات آموزشی آمریکا و در حدود ۴۵ درصد مؤسسات آموزشی اروپا در دومین درس ترمودینامیک وجود دارد (Ahlström et al., 2010; Vigeant et al., 2019).

- سرفصل‌های دیگر، نظیر تفسیر مولکولی آنتروپی، تعادل در سامانه‌های حاوی فاز جامد، مایعات یونی، بسپارها، ترمودینامیک آماری، و شبیه‌سازی مولکولی، در کمتر از ۵۰ درصد دانشکده‌های مورد بررسی ارائه می‌شود (Ahlström et al., 2010; Vigeant et al., 2019). در دانشکده‌های مهندسی شیمی آمریکا که ۳ درس ترمودینامیک تدریس می‌شود، ترمودینامیک آماری قسمت اصلی درس سوم (حدوداً نیمی از درس) را شامل می‌شود (Ahlström et al., 2010).

با توجه به تنوع مطالب قابل ارائه در دروس ترمودینامیک مهندسی شیمی، در دانشگاه‌های آمریکا بیشتر اساتید انواع کمتری از چرخه‌های توان و تبرید را نسبت به گذشته (آنچه در زمان دانشجویی یاد گرفتند) تدریس می‌کنند (Vigeant et al., 2019). ۲۶ درصد از دانشگاه‌های مورد بررسی در آمریکا در درس ترمودینامیک، به مواردی از ایمنی فرایند نظیر نقطه اشتعال^۱، محدوده اشتعال پذیری، انفجار بخار در حال انبساط از مایع در حال جوش^۲ و محاسبات فشار برای مخازن بسته^۳ اشاره می‌کنند (Vigeant et al., 2019). در حدود نیمی از دانشکده‌های مهندسی شیمی آمریکا، به ترمودینامیک سامانه‌های زیستی، حداقل در حد اشاره، پرداخته می‌شود (Ahlström et al., 2010). تقریباً تمامی دانشگاه‌ها از نرم‌افزارهای محاسباتی مثل اکسل، متلب و یا نرم‌افزار مدل‌سازی فرایند و شبیه‌سازی، مثل اسپن درکلاس ترمودینامیک و همچنین به عنوان ابزاری برای حل تکالیف استفاده می‌کنند (Vigeant et al., 2019). مبحث اکسرژی در مطالعات مذکور (Ahlström et al., 2010; Vigeant et al., 2019)، جزء موارد پرسش‌نامه نبوده و حاکی از آن است که به ندرت در سرفصل‌های ترمودینامیک مهندسی شیمی قرار می‌گیرد.

رایج‌ترین کتاب مرجع درس ترمودینامیک مهندسی شیمی در آمریکا، کتاب مقدمه‌ای بر ترمودینامیک مهندسی شیمی و همکاران (Smith et al., 2021) است که اولین چاپ آن در

1- Flash point
3- Sealed vessels

2- Boiling liquid expanding vapor explosion, BLEVE

سال ۱۹۷۳ در دسترس قرار گرفت و کماکان در حدود ۵۰ درصد از دانشگاه‌های مورد بررسی در آمریکا به عنوان مرجع اصلی استفاده می‌شود. روند کلی به سمت استفاده از مراجع متنوع دیگر از جمله کتاب ترمودینامیک شیمیایی، بیوشیمیایی و مهندسی سندلر (Sandler, 2017)، ترمودینامیک مقدماتی مهندسی شیمی الیوت و لیرا (Elliott & Lira, 2012)، مبانی ترمودینامیک مهندسی شیمی دهم و ویسکو (Dahm & Visco, 2014) و ترمودینامیک مهندسی و شیمیایی کورتسکی (Milo D. Koretsky, 2012) است (Vigeant et al., 2019). همچنین کتاب شیمی فیزیک اتکینز (Atkins & de Paula, 2017)، مرجع رایجی برای درس ترمودینامیک مهندسی شیمی در اروپا است (Ahlström et al., 2010).

تطابق محتوای درس با نیازهای صنعتی اهمیت بسیاری دارد (Memarian, 2013). بر اساس نظرسنجی و پاسخ دریافتی از شرکت‌های صنعتی، نیاز صنعت به مبانی علم ترمودینامیک، شامل مدل‌های ترمودینامیکی ماکروسکوپی (نظیر معادلات حالت) برای بیان خواص ترمودینامیکی تعادلی، خواص انتقالی (خواص غیرتعادلی مثل ویسکوزیته، هدایت حرارتی، ضریب نفوذ)، داده‌های آزمایشگاهی باکیفیت و شبیه‌سازی مولکولی برای رسیدن به معادلات پیش‌بینی‌کننده (به جای برازش بر داده‌های آزمایشگاهی) است (De Hemptinne et al., 2022; Hendriks et al., 2010; Kontogeorgis et al., 2021). نظرسنجی از شرکت‌های صنعتی با مشارکت ۳۷ شرکت متنوع (عمدتاً اروپایی فعال در سطح بین‌المللی و چند شرکت آمریکایی و ژاپنی) فعال در حوزه پالایش، محصولات شیمیایی، گاز طبیعی، بسیار، مواد غذایی، زیست‌فناوری، دارویی، تولید برق، بازیافت، مشاوره مهندسی و نرم‌افزاری در سال ۲۰۲۰ انجام گرفت (Kontogeorgis et al., 2021). بر مبنای پاسخ‌های دریافتی از صنعت، یک مهندس شیمی باید دانش کلی از تعادلات فازی و مدل‌های اصلی داشته باشد. برخی نظرات اشاره بر کاربرد دانش ترمودینامیک غیرتعادلی برای بهبود درک پدیده‌های انتقال داشت. دسته‌ای دیگر به ضرورت یادگیری تحلیل اکسرژی اشاره کردند که در بررسی فرایندها در شرایط حقیقی صنعت با زمان ماند کوتاه و قبل از رسیدن به تعادل کاربرد دارد (Kontogeorgis et al., 2021). بنابراین علاوه بر مهندس شیمی با دانش کلی، همچنین نیاز به تعلیم متخصصان، از جمله از بین دانشجویان دکترای علاقه‌مند، وجود دارد. البته استمرار چنین آموزش‌های تخصصی‌ای، به وجود افراد علاقه‌مند و فرصت شغلی مناسب بستگی دارد (Kontogeorgis et al., 2021).

چالش‌های جدید جهانی در مدیریت انرژی، مدیریت پسماند، آب و سلامتی، مسائل کاربردی جدیدی را به همراه دارد. در حوزه ترمودینامیک و با توجه به مسائل جدید، تعیین خصوصیات تعادلی در فضای محصور با ابعاد کوچک (زیر میکرومتر) (Elliott, 2021; Zargarzadeh & Elliott, 2019)، در فصل مشترک دو فاز، یا در حضور یک میدان خارجی، به علاوه پدیده‌های غیرتعادلی نیازمند تحقیقات و آموزش است. با توجه به گستردگی کاربردهای ترمودینامیک در صنعت، ایجاد فرایندها و مواد پیشرفته جدید و انواع شبیه‌سازها، نیاز است آموزش‌های مستمر ضمن اشتغال صورت گیرد (Kontogeorgis et al., 2021).

کتاب مرجع پیشنهادی برای دو درس تخصصی - اجباری ترمودینامیک در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، کتاب ترمودینامیک مهندسی و شیمیایی کورتسکی (Koretsky, 2012) است. از جمله مزایای این کتاب، کیفیت علمی مناسب در عین سادگی بیان، محتوای مناسب برای هر دو درس ترمودینامیک کارشناسی و در نتیجه هم‌خوانی علائم مورد استفاده، انتخاب مناسب علائم، اشاره به پیش‌زمینه‌های مولکولی در مباحثی نظیر آنتروپی، و معادلات حالت است. به علاوه نویسنده این کتاب، در حوزه تحقیقات آموزش مهندسی فعال است و اثر این موضوع در نحوه تألیف کتاب مشهود است.

در برنامه درسی پیشنهادی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دو درس تخصصی - اجباری شامل ترمودینامیک مهندسی شیمی در نیمسال سوم و ترمودینامیک تعادلات (فازی و شیمیایی) در نیمسال چهارم گنجانده شده است. نام این دو درس برای همخوانی با محتوای به‌روزشده، تأکید بر اختصاصی بودن برای رشته مهندسی شیمی و همگام با نام دروس مشابه در دانشگاه‌های دنیا، از ترمودینامیک ۱ و ۲ تغییر یافت. دلیل اختصاص عنوان ترمودینامیک مهندسی شیمی به درس اول، تمایز این درس از ترمودینامیک دیگر رشته‌ها نظیر مکانیک با توجه به مطالب اختصاصی برای رشته مهندسی شیمی است. درس شیمی - فیزیک مهندسی شیمی با تمرکز بر مباحث مولکولی به‌عنوان یک درس تخصصی - انتخابی در برنامه لحاظ گردیده است. گذراندن اولین درس ترمودینامیک (ترمودینامیک مهندسی شیمی) پیش‌نیاز درس شیمی فیزیک است. هدف درس شیمی فیزیک در برنامه جدید پیشنهادی، آموزش دیدگاه مولکولی، مقدمات مکانیک کوانتومی، ترمودینامیک آماری و ارتباط خواص ماکروسکوپی و میکروسکوپی است. جداول ۱ تا ۳ سرفصل‌های پیشنهادی هر یک از این دروس را بیان می‌کند که بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده تنظیم گردیده است. محتوای درس ترمودینامیک تعادلات آماده‌شده به صورت اسلاید، شامل برخی از فعالیت‌های کلاسی برای این درس ترمودینامیک تعادلات فازی از لینک <https://chemeng.aut.ac.ir/content/10477/Online-Courseware---Dr-Zargarzadeh> قابل دسترسی است.

جدول ۱. سرفصل‌های اولین درس ترمودینامیک دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ترمودینامیک مهندسی شیمی، نیمسال سوم

| |
|--|
| عنوان درس: ترمودینامیک مهندسی شیمی |
| تعداد واحد: ۳ |
| پیش‌نیاز (هم‌نیاز): اصول محاسبات مهندسی شیمی - ریاضی عمومی ۲ |
| هدف: هدف اصلی این درس آشنایی دانشجویان با اصول و مبانی ترمودینامیک و قوانین حاکم بر آن برای بررسی فرمولاسیون انرژی و تأثیر آن بر فرایندها است. |

| |
|---|
| <p>رئوس مطالب: (فصل های ۱ تا ۵ کتاب کورتسکی)</p> <ol style="list-style-type: none"> تعاریف پایه‌ای شامل حالت یک سامانه، متغیرهای حالت، خواص شدتی و مقداری، فشار بخار کار و گرما و آثار آن بر روی سامانه و محیط، برگشت پذیری فرایند، انرژی درونی قانون اول ترمودینامیک برای سامانه‌های پایا و ناپایا در حالت‌های بسته و باز کاربرد قانون اول برای سامانه‌های بسته و باز و تجهیزات فرایندی نظیر نازل و دیفیوزر، توربین و پمپ/کمپرسور، مبدل حرارتی، شیر فشارشکن قوانین دوم و سوم ترمودینامیک، کاربرد آنها برای فرایندها، استفاده از موازنه‌های ترکیبی انرژی و آنتروپی برای فرایندهای جریان دار پیوسته (نظیر توربین و کمپرسور) چرخه‌های توان و تبرید (کارنو رنکین) معادلات حالت (مکعبی، ویریال) برای گازهای غیر ایده‌آل (خالص و مخلوط) معادلات حالت برای مایعات و جامدات (ضریب انبساط حرارتی و تراکم پذیری هم‌دم) اصل حالات متناظر، ضریب تراکم پذیری خواص کاهیده ارتباط خواص ترمودینامیکی، روابط ماکسول محاسبه و کاربرد خواص باقی مانده برای آنالیز ترمودینامیکی سامانه‌های غیرایده‌آل تک جزئی انبساط و مایع سازی ژول - تامسون <p>توضیحات: این درس با تغییراتی در طرح درس جایگزین درس ترمودینامیک مهندسی شیمی-۱ شده است.</p> |
|---|

جدول ۲. سرفصل های دومین درس ترمودینامیک دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ترمودینامیک تعادلات فازي (و شیمیایی)، نیمسال چهارم

| |
|---|
| <p>عنوان درس: ترمودینامیک تعادلات (فازی و شیمیایی)</p> |
| <p>تعداد واحد: ۳</p> |
| <p>پیش نیاز (هم نیاز): ترمودینامیک مهندسی شیمی</p> |
| <p>هدف: هدف اصلی این درس آشنایی دانشجویان با ترمودینامیک مخلوط‌ها و تعادلات فازي و شیمیایی به منظور استفاده در فرایندهای جداسازی است.</p> |
| <p>رئوس مطالب: (فصل های ۶ تا ۹ کتاب کورتسکی)</p> <ol style="list-style-type: none"> تعادلات فازي سامانه‌های خالص تعریف پتانسیل شیمیایی تعادلات فازي سامانه‌های چند جزئی خواص مولی جزئی و محاسبه آن فوگاسیته ماده خالص و یک جزء در مخلوط گازی فوگاسیته مایع و جامد ضرایب فعالیت و مدل‌های غیرایده‌آل (مدل‌های بر مبنای انرژی آزاد گیبس) محاسبات تعادلات فازي: سامانه‌های بخار-مایع محاسبات تعادلات فازي و سامانه‌های جداسازی: مایع - مایع و جامد-مایع خواص کولیگاتیو و محاسبه آنها تعادل در واکنش‌های شیمیایی منفرد و چندگانه <p>توضیحات: این درس با تغییراتی در طرح درس جایگزین درس ترمودینامیک مهندسی شیمی-۲ شده است.</p> |

جدول ۳. سرفصل‌های سومین درس ترمودینامیک (تخصصی - اختیاری) دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شیمی - فیزیک مهندسی شیمی

| |
|---|
| عنوان درس: شیمی - فیزیک مهندسی شیمی |
| تعداد واحد: ۳ |
| پیش‌نیاز (هم‌نیاز): ریاضی مهندسی، ترمودینامیک مهندسی شیمی - فیزیک الکتریسیته و الکترومغناطیس |
| هدف: هدف اصلی این درس آشنایی دانشجویان با اصول و قوانین حاکم بر سامانه‌های مولکولی و ارتباط بین خواص میکروسکوپی و ماکروسکوپی است. |
| رئوس مطالب: در این درس دانشجویان با مباحث پیشرفته‌ای نظیر مکانیک کوانتوم - ساختار مولکولی و مقدمه‌ای بر ترمودینامیک آماری آشنا می‌شوند و به کمک آنها می‌توانند پدیده‌ها را در مقیاس مولکولی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند. رئوس کلی مطالب این درس به صورت زیر است: |
| <ol style="list-style-type: none"> ۱. تئوری جنبشی گازها ۲. احتمال و تئوری بولتزمان ۳. خواص انتقال ۴. مقدمه‌ای بر مکانیک موجی و ذره‌ای ۵. مقدمه‌ای بر تئوری مکانیک کوانتوم ۶. کاربردهای مقدماتی مکانیک کوانتوم ۷. ساختار اتمی و طیف‌سنجی (اسپکتروسکوپی) ۸. ساختار مولکولی مواد ۹. مقدمه‌ای بر ترمودینامیک آماری ۱۰. تئوری مولکولی سینتیک شیمیایی |
| توضیحات: این درس با تغییرات اساسی در محتوای از گروه اصلی در برنامه مصوب وزارت علوم به گروه جدید تخصصی - اختیاری منتقل شده است. |

مجموعه دروس ترمودینامیک در قالب دو درس تخصصی - اجباری و یک درس تخصصی - اختیاری به عنوان بخشی از برنامه بازنگری شده مهندسی شیمی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر مورد تأیید وزارت علوم قرار گرفته‌اند («فهرست کامل رشته‌ها»). از جمله تفاوت‌های عمده در محتوای بازنگری شده مجموعه دروس ترمودینامیک نسبت به محتوای قدیم، به موارد زیر می‌توان اشاره کرد: تعریف سرفصل در اولین درس ترمودینامیک به صورت اختصاصی برای دانشجوی مهندسی شیمی (متفاوت با سرفصل دیگر رشته‌های مهندسی نظیر مکانیک)، پرداختن به مطالب اختصاصی مهندسی شیمی در اولین درس ترمودینامیک، کاهش تمرکز بر آموزش انواع چرخه‌ها، ایجاد فرصت برای پرداختن به انواع تعادلات نظیر مایع - مایع و جامد - جامد (علاوه بر مایع - بخار) در دومین درس ترمودینامیک جهت ایجاد تصویر کلان قابلیت ترمودینامیک در بیان انواع تعادلات در ذهن دانشجو. در خصوص سرفصل درس شیمی فیزیک، لازم به ذکر است مباحث الکتروشیمی در یک درس مجزا با نام الکتروشیمی و خوردگی ارائه شده است و مباحث مربوط به کروماتوگرافی در درس فرایندهای جداسازی ۲ ارائه می‌شود.

۴. شیوه آموزش

تدریس دو درس ترمودینامیک در دانشگاه‌های مورد بررسی در آمریکا و اروپا عمدتاً به روش سنتی و با برگزاری جلسات درسی، حل تمرین و دادن تکلیف به دانشجویان بوده است. در بیشتر دانشگاه‌های آمریکا، بخشی از جلسات کلاس (بین ۱ تا ۲۰ ساعت کل آموزش‌ها) به یادگیری با روش مسئله‌محور اختصاص می‌یابد (Ahlström et al., 2010). در یادگیری مسئله‌محور، فرایند یادگیری با حل یک سناریوی واقعی توسط دانشجویان به صورت گروهی و با هدایت استاد در نقش تسهیلگر انجام می‌شود (Problem-Based Learning (PBL) – Department of Chemical Engineering, Woods, 1994). از جمله مزایای این روش تفکر و مشارکت فعال دانشجویان، انگیزه بخشی با طرح مسئله واقعی، کسب مهارت در شناسایی منابع اطلاعاتی مناسب، ارتباطات و کار گروهی است.

آموزش سنتی را می‌توان با انواع روش‌های یادگیری فعال^۱ همراه کرد. در یادگیری فعال، یادگیرنده فراتر از یادداشت‌برداری و شنونده صرف بودن، در فرایند یادگیری درگیر می‌شود. فعالیت‌هایی نظیر حل مسئله یا مباحثه گروهی^۲، یادگیری گروهی نظام‌مند و آموزش به یکدیگر^۳ (Mazur, 1996)، یادگیری مسئله‌محور، مطالعات موردی^۴، سؤالات کوتاه چندگزینه‌ای در حین کلاس از جمله نمونه‌های یادگیری فعال هستند. تحقیقات گسترده نشان داده است که یادگیری فعال، سبب ارتقای دستیابی به اهداف آموزشی و افزایش نمره میانگین، چه در کلاس حضوری (Freeman et al., 2014) و چه در کلاس غیرحضوری (Prince et al., 2020) می‌گردد. این تحقیقات (Prince et al., 2020; Freeman et al., 2014) با پشتوانه تجربی و تمرکز بر دروس رشته‌های علوم، فناوری، مهندسی و ریاضیات^۵ انجام گرفته است. یادگیری فعال ممکن است فردی یا به شکل گروهی و تعاملی باشد. در فعالیت‌های یادگیری گروهی، مهارت‌های ارتباط و تعامل نیز ارتقا می‌یابد. آموزش به روش یادگیری فعال، دانشجویان را در مسیر کسب توانایی تجزیه و تحلیل، ارزیابی و ایجاد دانش جدید که سطوح بالای هرم یادگیری بلوم هستند، قرار می‌دهد. یادگیری فعال در نهایت منجر به تربیت مهندس با قابلیت‌های مورد نیاز در صنعت نظیر توانایی شناسایی و حل مسئله، طراحی فرایند تولید محصول مشخص و تعامل مؤثر می‌گردد که منطبق با معیارهای هیئت اعتباربخشی مهندسی و فناوری^۶ (مؤسسه‌ای که به صورت دوره‌ای تمام دانشکده‌های مهندسی آمریکا را بررسی می‌کند) است (Felder & Brent, 2004).

نمونه‌هایی از یادگیری فعال به کاررفته و پیشنهادی در دروس ترمودینامیک در ادامه آورده شده است: از دانشجویان خواسته می‌شود در قالب گروهی، به یادگیری بخشی از درس که عموماً روند مشابه موارد قبلی دارد و آموزش آن به یکدیگر بپردازند. به عنوان نمونه، پس از توضیح روش محاسبه فشار

1- Problem-based learning

2- Active learning

3- Think-pair-share

4- Peer instruction

5- Case study

6- Science, technology, engineering, and math STEM

7- Accreditation Board for Engineering and Technology ABET

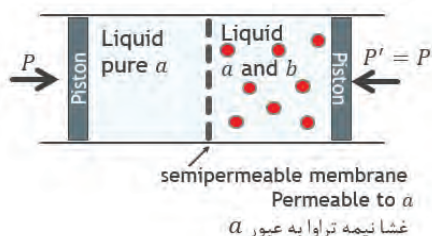
و کسر مولی فاز بخار با داشتن دما و کسر مولی فاز مایع، یادگیری انواع دیگر محاسبات تعادل بخار-مایع در قالب مباحثات گروهی اتفاق می‌افتد. در طی این نوع فعالیت کلاسی، استاد در کلاس و بین گروه‌ها حرکت می‌کند و به تسهیل فرایند یادگیری و رفع اشکال می‌پردازد. شکل ۲ نمونه‌ای از فضای کلاس ضمن انجام این نوع از فعالیت را نمایش می‌دهد. معمولاً پایان فعالیت با جمع‌بندی توسط یکی از دانشجویان و ذکر نکات احتمالی و اصلاحات لازم توسط استاد همراه است. نمونه دیگر فکرکردن و تحلیل مسیر حل یک مسئله به صورت فردی یا گروهی بر اساس درس همان جلسه است. در برخی از جلسات، در ابتدای کلاس و پیش از مرور درس جلسه قبل، از هر دانشجو خواسته می‌شود در یک یا دو جمله، موردی که از درس جلسه گذشته یا مطالعه معین شده قبل از کلاس متوجه نشده است را بنویسد. در ادامه فرصت چنددقیقه‌ای داده شود که دانشجویان در قالب گروه‌های دونفره یا بزرگتر، در رابطه با این موارد مباحثه کنند. برای جلوگیری از استرس در دانشجویان، تأکید بر فضای امن کلاس و ایجاد فضایی به دور از توهین، سرزنش یا قضاوت در صورت پاسخ اشتباه، تأکید بر فرصت یادگیری و تشویق دانشجویان، کمک‌کننده است.



شکل ۲. نمونه‌ای از فضای کلاس ضمن یادگیری فعال، نوع فعالیت: یادگیری بخشی از درس که مشابه بخش‌های آموزش داده شده توسط استاد است. کلاس ترمودینامیک مهندسی شیمی پیشرفته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سؤالات چندگزینه‌ای با حل کوتاه و "سؤالات مفهومی" (Mazur, 1996) روش دیگری هستند که می‌توانند در یادگیری فعال استفاده شوند. سؤالات مفهومی معمولاً سؤالات چندگزینه‌ای چالش برانگیز از نظر مفهومی و بدون حل عددی یا با حل کوتاه هستند (Koretzky et al., 2014; Mazur, 1996). می‌توان با یک سامانه پاسخگویی مخاطب مثل کلیکر^۲ یا موبایل یا لپ‌تاپ بر روی یک سامانه برخط^۳ یا ابزارهای بازخورد یا آزمون بر روی سامانه‌های دانشگاه، پاسخ دانشجویان را دریافت نمود و به بازخورد

درجا از میزان یادگیری رسید. همچنین در صورت نیاز پس از پاسخ اولیه دانشجویان، در صورت ابهام موضوع می توان به مباحثه یا توضیح بیشتر آن پرداخت.



سامانه روبرو را در دمای مشخص در نظر بگیرید. در هر دو سمت فشار یکسان P وارد می شود. در قسمت چپ ماده خالص a قرار داده شده و در قسمت سمت راست مخلوط a, b (کسر مولی b مخالف صفر است). غشای میان این دو قسمت نیمه تراوا با قابلیت عبور a است. کدامیک صحیح است؟

- $\mu_a(T, P, x_a = 1) = \mu_a(T, P' = P, x_a < 1)$
- $\mu_a(T, P, \text{pure}) < \mu_a(T, P' = P, x_a < 1)$
- $\hat{f}_a(T, P, \text{pure}) > \hat{f}_a(T, P' = P, x_a < 1)$
- $\gamma_a(T, P, \text{pure}) = \gamma_a(T, P' = P, x_a < 1)$

شکل ۳ نمونه ای از یک سؤال کوتاه چندگزینه ای در درس ترمودینامیک تعادلات فازی را نشان می دهد. همچنین نمونه هایی از سؤالات مفهومی دروس مهندسی شیمی در وبگاه آموزش مهندسی شیمی دانشگاه کلرادو بولدر learncheme.com و وبگاه بانک سؤالات مفهومی انجمن مهندسی شیمی آمریکا conceptwarehouse.tufts.edu/cw قابل مشاهده است. در حاشیه جا دارد به نقشی که در اختیار داشتن بانک سؤالات با مشارکت اساتید مختلف در سهولت استفاده از این روش یادگیری فعال دارد، اشاره کرد.

باتوجه به پیوستگی و ارتباط زنجیروار مطالب درس ترمودینامیک، همراه بودن دانشجو با درس از اهمیت ویژه ای برخوردار است. استفاده از یادگیری فعال و گنجانیدن فعالیت های کلاسی به دلیل ماهیت دانشجو محور، موجب می شود دانشجو به شرط حضور در جلسات درس، در مقایسه با روش ارائه صرف توسط استاد، در مسیر یادگیری پیوسته و همگام با روند درس قرار بگیرد. روش مؤثر دیگر در ارتقای یادگیری، ارائه نمایش های متناسب با محتواست (Cengel & Zarei, 2004) که با درگیر کردن حواس مختلف (دیداری، شنیداری، تصویرسازی) به تثبیت در حافظه کمک می کند. انواع نمایش های تعاملی در حوزه مهندسی، از جمله در demonstrations.wolfram.com/topic در html?topic=Chemical+Engineering&limit=20 در دسترس است. به عنوان نمونه، معرفی و نمایش انواع نمودارهای فازی ارائه شده به صورت تعاملی (با قابلیت تغییر میزان خوراک، نسبت فازها و ... و دیدن اثرات حاصل بر تعادل) یا کمپرسور و توربین با شرایط فشار و دمای قابل تنظیم، منجر به ارتقا در یادگیری این مباحث می شود. همچنین نمایش ویدئوهای تجربی (موجود در اینترنت) نظیر آزمایش های مربوط به نقطه سه گانه و حضور هم زمان سه فاز، یا نقطه بحرانی و از بین رفتن مرز بین دو فاز در یادگیری بسیار مؤثر است.

جهت بهره گیری از نرم افزارهای محاسباتی و آشنایی دانشجویان به استفاده از آنها در حل مسائل ترمودینامیکی، حل چند سؤال در طول درس با نرم افزار اکسل، متلب یا موارد مشابه پیشنهاد می گردد.

به عنوان نمونه، در درس ترمودینامیک تعادلات فازی، مثال‌های برآزش مدل انرژی گیبس اضافی بر داده‌های آزمایشگاهی و محاسبه فوگاسیتته یک جز در مخلوط گازی با استفاده از معادله حالت با استفاده از اکسل، به عنوان بخشی از محتوای درس در نظر گرفته شده است. مثال‌های حل‌شده متنوع با نرم‌افزار در وبگاه کتاب الیوت و لیرا موجود است: chetherno.net/software. در پیوست نمونه‌هایی از بازخوردهای دانشجویان در به‌کارگیری روش‌های یادشده در کلاس‌های درس ترمودینامیک آورده شده است.

۵. ارزیابی و نمره‌دهی دانشجویان

در تمامی دانشگاه‌های مورد بررسی در آمریکا، از آزمون به عنوان کسری از نمره در سنجش یادگیری ترمودینامیک دانشجویان استفاده می‌گردد. علاوه بر آزمون، برای سنجش یادگیری از تکلیف درسی در ۹۷ درصد، کوئیز (آزمون کوچک) در ۶۷ درصد و پروژه درسی در ۵۱ درصد مؤسسات استفاده می‌گردد. همچنین ۶۵ درصد مؤسسات از سؤالات مفهومی به عنوان بخشی از ارزیابی استفاده می‌کنند (Vigeant et al., 2019). با توجه به ماهیت درس ترمودینامیک و پیوستگی مطالب در این درس، به‌کارگرفتن ارزیابی تکوینی یا سازنده^۱ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ارزیابی تکوینی با مشخص کردن قسمت‌هایی که دانشجوی مشکل دارد یا دریافت نادرستی از آن داشته، به دانشجو و استاد بازخورد می‌دهد. نمونه‌هایی از ارزیابی تکوینی شامل سؤالات کوتاه کلاسی، کوئیز، تکلیف یا تمرین (از جمله با مشارکت خود دانشجویان در فرایند تصحیح) هستند. این ارزیابی به دانشجو فرصت می‌دهد تا با شناسایی نقاط قوت و ضعف خود و دریافت پیشنهادها راهبردی از استاد درس، در مسیر بهبود یادگیری و عملکرد حرکت کند. همچنین استاد درس با کمک ارزیابی تکوینی می‌تواند به نظارت مؤثر بر پیشرفت دانشجو، ارائه بازخوردهای سازنده و تنظیم روش تدریس بپردازد. مطالعات نشان می‌دهند که ارزیابی تکوینی، باعث کسب نمره بهتر در ارزیابی تراکمی (مثل امتحان پایان نیمسال)، افزایش علاقه و انگیزه در دانشجو، و بهبود نتایج یادگیری می‌شود (Iqbal, 2022). بنابراین پیشنهاد می‌شود بخشی از نمره ارزیابی، علاوه بر ارزیابی تراکمی^۲، شامل امتحانات میان و پایان نیمسال، به ارزیابی تکوینی از جمله فعالیت‌های کلاسی، کوئیز، و تکالیف اختصاص یابد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله تغییرات پیشنهادی در محتوای دروس ترمودینامیک مهندسی شیمی و نحوه آموزش آن، با نگاه به نوسازی و ارتقای محتوای دروس ترمودینامیک در دنیا، با در نظر گرفتن نیاز و توقعات صنعت از مهندس شیمی در دنیای امروز و نیز همگام با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل ارائه شده

است. در برنامه تحصیلی مهندسی شیمی در اکثر دانشگاه‌ها دو درس ترمودینامیک ارائه می‌گردد و اولین درس ترمودینامیک به صورت اختصاصی برای رشته مهندسی شیمی برگزار می‌شود. در مبحث چرخه‌های ترمودینامیکی، عموماً تنها چرخه‌های توان و تبرید کارنو و رنکین بیان می‌شوند. با این تمهیدات در دومین درس ترمودینامیک علاوه بر تعادل بخار-مایع، امکان پرداختن به تعادلات فازی دیگر، نظیر مایع-مایع، بخار-مایع، مایع-مایع و جامد-مایع و نیز ارائه تصویر کاملی از انواع تعادلات فازی فراهم می‌آیند. در نحوه تدریس، استفاده از یادگیری فعال از جمله قرار دادن فعالیت‌های کلاسی، سؤالات مفهومی چندگزینه‌ای، مباحثات گروهی برای حل یک نمونه سؤال و آموزش دانشجویان به یکدیگر در قالب فعالیت گروهی، می‌تواند در ارتقای یادگیری، ایجاد انگیزه و علاقه در دانشجویان و کسب مهارت‌های نرم مثل مهارت ارتباط و کار گروهی مؤثر باشد. وبگاه‌های مرتبط به آموزش مهندسی شیمی، نظیر دانشگاه کلرادو بولدر، فایل‌های نمایش و لفرم، و فایل‌های اکسل و متلب از کتاب الیوت-لیرا، به عنوان منابع مفید در یادگیری فعال و همچنین آموزش نرم‌افزارهای مرتبط معرفی شده‌اند. جهت ارزیابی مناسب، پیشنهاد می‌گردد در کنار ارزیابی تراکمی، بخشی از نمره به ارزیابی تکوینی نظیر کوئیز، سؤالات کوتاه و فعالیت کلاسی و نیز تکالیف اختصاصی یابد. ارزیابی تکوینی ابزار مناسبی جهت بازخورد مستمر به دانشجو و استاد و در نتیجه ارتقای یادگیری است.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود از نظرات ارزشمند جناب آقای دکتر بابک بنگدارپور سرپرست شورای برنامه‌ریزی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، جناب آقای دکتر روئین حلاج، جناب آقای دکتر احمدرضا رئیسی و سرکار خانم دکتر لیلا نصرآزادانی در بازنگری سرفصل دروس ترمودینامیک اعلام می‌نماییم.

References

- Ahlström, P., Aim, K., Dohrn, R., Elliott, J. R., Jackson, G., Jaubert, J. N., ... Economou, I. G. (2010). A Survey of the role of thermodynamics and transport properties in ChE university education in Europe and the USA. *Chemical Engineering Education*, 44, 35-43.
- Atkins, P. W., de Paula J., K. J. (2017). *Physical Chemistry*, 11th ed. In Oxford University Press, Oxford.
- Bameri, M., Salimi, G., Marzooqi, R., Safavi, S. A., & Mohammadi, M. (2023). Competencies of engineering students and requirements of universities and higher education centers to adapt to Industry 4.0: A study based on the meta-synthesis. *Iranian Journal of Engineering Education*, 24(96), 1-30. <https://doi.org/10.22047/ijee.2022.352365.1930> [In Persian].
- Cengel, Y. A., Translated by Zarei, G. (2004). Innovative approaches in teaching thermodynamics. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(22), 75-98. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2203> [In Persian].
- Dahm, K., & Visco, D. (2014). *Fundamentals of chemical Engineering thermodynamics SI edition*. Cengage.
- De Hemptinne, J. C., Kontogeorgis, G. M., Dohrn, R., Economou, I. G., Ten Kate, A., Kuitunen, S., ... Vesovic,

- V. (2022). A view on the future of applied thermodynamics. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 61(39), 14664–14680. <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.2C01906/ASSET/IMAGES/LARGE/IE2C01906.0006.JPEG>.
- Economou, I. G., Kontogeorgis, G. M., Dohrn, R., & de Hemptinne, J. C. (2014, December 1). Advances in thermodynamics for chemical process and product design. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 92, pp. 2793–2794. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.10.021>.
 - Elliott, J. A. W. (2021). Surface thermodynamics at the nanoscale. *Journal of Chemical Physics*, Vol. 154. <https://doi.org/10.1063/5.0049031>.
 - Elliott, J. R., & Lira, C. T. (2012). *Introductory chemical engineering thermodynamics*. Prentice Hall.
 - Felder, R. M., & Brent, R. (2004). The ABC's of engineering education: ABET, bloom's taxonomy, cooperative learning, and so on. *ASEE Annual Conference Proceedings*.
 - Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(23). <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>.
 - Hendriks, E., Kontogeorgis, G. M., Dohrn, R., De Hemptinne, J. C., Economou, I. G., Žilnik, L. F., & Vesovic, V. (2010). Industrial requirements for thermodynamics and transport properties. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(22). <https://doi.org/10.1021/ie101231b>.
 - Iqbal, A. (2022). Formative assessment in engineering education: Exploring ways to enhance students' learning achievement. <https://doi.org/https://doi.org/10.26076/AE3C-9BA3>.
 - Kontogeorgis, G. M., Dohrn, R., Economou, I. G., De Hemptinne, J. C., Kate, A., Kuitunen, S., ... Vesovic, V. (2021). Industrial requirements for thermodynamic and transport properties: 2020. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 60 (13), 4987 – 5013. https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.0C05356/SUPPL_FILE/IE0C05356_SI.001.PDF.
 - Koretsky, M. D., Falconer, J. L., Brooks, B. J., Gilbuena, D. M., Silverstein, D. L., Smith, C., & Miletic, M. (2014). The AIChE concept warehouse: A web-based tool to promote concept-based instruction. *Advances in Engineering Education*, 4(1).
 - Mazur, E. (1996). Peer Instruction: A user's manual. In Peer Instruction. Pearson.
 - Memarian, H. (2013). Reevaluation of engineering education. *Iranian Journal of Engineering Education*, 15(57), 1–18. <https://doi.org/10.22047/ijee.2013.2959>.
 - Milo D. Koretsky. (2012). *Engineering and Chemical Thermodynamics*. In Wiley. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
 - Prince, M., Felder, R., & Brent, R. (2020). Active student engagement in online STEM classes: Approaches and recommendations. *Advances in Engineering Education*, 8(4).
 - Problem-based learning (PBL) – Department of chemical engineering. (n.d.). Retrieved June 5, 2023, from <https://www.eng.mcmaster.ca/chemeng/problem-based-learning-pbl/#tab-content-ov>.
 - Sandler, S. I. (2017). *Chemical, biochemical, and engineering thermodynamics*. Wiley.
 - Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., & Swihart, M. T. (2021). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. McGraw Hill.
 - Vigeant, M. A., Cole, J., Dahm, K. D., Ford, L. P., Landherr, L. J., Silverstein, D. L., & West, C. W. (2019). How we teach: Thermodynamics. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference proceedings*. <https://doi.org/10.18260/1-2--32903>.
 - Woods, D. R. (1994). *Problem-based learning: how to gain the most from PBL*.
 - Zargarzadeh, L., & Elliott, J. A. W. (2019). Bubble formation in a finite cone: More pieces to the puzzle. *Langmuir*, 35(40). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01602>.

بیوست ۱

نمونه‌هایی از بازخوردهای دانشجویان به به‌کارگیری روش‌های یادگیری فعال در کلاس‌های درس ترمودینامیک:

- "وقتی که استاد برای حل مثال‌ها به خود ما می‌دهند، در یادگیری آن‌ها کمک زیادی به من کرده است."
- "تشکیل گروه و ایجاد بستر برای مشورت با دیگر دانشجویان در یادگیری مؤثر بوده است"
- "حل کردن فعالیت‌های کلاسی و تکرار و توضیح مسائل حل شده بسیار مؤثر بوده‌اند. همچنین کمک گرفتن از دیگر دانشجویان برای توضیح و حل سؤالات به زبان خودمانی تر به فهم بیشتر کمک کرده است."
- "فعالیت کلاسی به نظرم در یادگیری مؤثره ولی به مقدار استرس زا هست"
- "از مزیت‌های کلاس، مشارکت دادن بالای دانشجویان در طول کلاس، مرور قبل از شروع درس و ایجاد روحیه پرسش‌گری در دانشجو و شهامت جواب‌گویی است."
- "فعالیت‌های کلاسی و کویزها باعث میشن که آدم با دقت و توجه بیشتری به مطالب کلاس توجه کنه و سعی کنه که اونها رو همون سر کلاس یاد بگیره و اگر سؤالی داره از شما بپرسه"
- "مؤثرترین از نظر بنده زمانی هست که برای فکر کردن راجع به یک مطلب اختصاص می‌دهید"
- "این که تو کلاس فرصت میدین، فکر کنیم خیلی خوبه"
- "خلاصه جلسات اول هر جلسه و فعالیت کلاسی‌ها کمک کرده به من برای یادگیری درس"
- "بخش فیلم‌های مربوط به درس بسیار خوب و مفید است."



◀ **لیلا زرگرزاده:** استادیار دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دارای مدرک تکمیل دوره برنامه آموزش یاددهی و یادگیری دانشگاه آلبرتا کانادا سال ۲۰۱۵، منتخب فلوشیپ تدریس در دانشکده مهندسی شیمی و مواد دانشگاه آلبرتا کانادا سال ۲۰۱۶، عضو انجمن آموزش مهندسی ایران علایق پژوهشی: ترمودینامیک سامانه‌ها با اثرات سطح مشترک میان فازی، ترمودینامیک تعادلی سامانه‌های چندجزئی و چندفازی، سامانه‌های کلونیدی، ترمودینامیک مخلوط‌های غیرایده‌آل



◀ **غلامرضا پازوکی:** دانشیار دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، سرپرست گروه بازنگری دروس موازنه جرم و انرژی، ترمودینامیک، و شیمی فیزیک در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، عضو انجمن آموزش مهندسی ایران علایق پژوهشی: ترمودینامیک مخلوط‌های غیرایده‌آل، ترمودینامیک بسپارها، بیو ترمودینامیک، ترمودینامیک آماری