تحلیلی بر درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی در رشتهٔ مهندسی شیمی

جعفرصادق سلطان‌محمدزاده، محمد حقیقی پراپری

دانشکدهٔ مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده: درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی یکی از مشخصه‌های رشتهٔ مهندسی شیمی در مقایسه با سایر رشته‌های مرتبط است. مقالهٔ حاضر بر اساس تجارب تدریس این درس توسط مؤلفان در طول سال‌های متمادی، اطلاعات جمع آوری شده از سایر افراد صاحبنظر در این زمینه در مجامع ملی و بین‌المللی، برداشت‌های نگارندگان از جلسات متعدد تبادل نظر با استادان محترم درس طراحی راکتور در جلسات ماهانه انجمن مهندسان شیمی ایران، کارگاه تخصصی دروس مهندسی شیمی و نشست‌های آن و جلسات تکمیلی بعد از کارگاه ارائه می‌شود. در این نوشته پس از مرور اهمیت و جایگاه سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی در آموزش مهندسی شیمی به جزئیات مربوط به ارائه درس در برنامه مهندسی شیمی، پیش‌نیازها، تجربهٔ عملی و آزمایشگاه، سرفصل‌های کلی، نحوهٔ ارزیابی و مراجع پیشنهادی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: سینتیک و طراحی راکتور، برنامه درسی مهندسی شیمی، آموزش طراحی راکتور.

۱. مقدمه

هرچند رشته مهندسی شیمی مشابهت‌ها و اشتراکات زیادی با بسیاری از رشته‌های مهندسی دارد، ولی به‌طور خاص در این رشته توجه ویژه‌ای به فرایندهای جداسازی و تبدیل مواد معطوف شده است و می‌توان گفت که فرایندهای تبدیل مواد و مهندسی واکنش‌های شیمیایی نقطه تمایز ویژه‌ای برای فارغ‌التحصیلان مهندسی شیمی محسوب می‌شود.

با مطالعه سیر تحول دانش طراحی راکتور و مهندسی واکنش‌ها مشاهده می‌شود که این زمینه ابتدا به‌عنوان شاخه‌ای از سینتیک کاربردی مطرح بود و در آن علاوه بر مباحث نظری، مسائل عملی و تجربی نیز مطرح می‌شد، چرا که به‌دلیل پیچیدگی‌های سیستم‌های واقعی و ضعف و کمبود مبانی نظری و ابزارهای محاسباتی تجزیه و تحلیل مطلوب سیستم‌های واقعی ممکن نبود.

علی‌رغم ضعف در ابزارهای محاسباتی، به‌تدریج با منسجم‌تر شدن مبانی نظری، کتب درسی و روش‌های تدریس به سمت یک درس مستقل متمایل شد. در این دوره در کتب درسی واکنش‌ها و راکتورهای ساده شده برای انتقال مفاهیم به کار می‌رفت و برای حل مسائل خاص و محدود از روش‌های جبری و ترسیمی استفاده می‌شد. سیاق کتاب لونسپیل [۱] و تا حد کمتری هیل [۲] به‌عنوان نماینده بارز این دوره قابل طرح است. در دهه اخیر، با رشد سریع تکنولوژی محاسباتی از قبیل رایانه‌ها، روش‌های عددی و نرم‌افزارهای محاسباتی و با دسترسی نسبتاً آسان و ارزان دانشجویان به این امکانات به‌تدریج امکان بررسی مسائل به شکل واقعی‌تر فراهم شد.

کتاب فاگلر [۳] به‌عنوان نمونه‌ای بارز از این دوره قابل ذکر است. امکان دسترسی فراگیر به ابزارها و امکانات محاسباتی، در محتوای کتب و نحوه آموزش درس طراحی راکتور تأثیر بسزایی گذاشت. تجربه نشان داده است که آموزش مفاهیم و اصولی که دانشجویان به وسیله آن امکان برقراری ارتباط و تجربه و حس فیزیکی داشته باشند، به مراتب موفق‌تر، آسانتر و

---

۱. Levenspiel, 1999

۲. Hill, 1971

۳. Fogler, 1999

جذابتر از مفاهیم مجرد است.

اکنون به‌نظر می‌رسد که با کاملتر و قابل دسترس‌تر شدن ابزارهای محاسباتی، آموزش درس طراحی راکتور تحول بسیار مثبتی یافته است، چراکه اکنون می‌توان به طراحی و تجزیه و تحلیل راکتورهایی پرداخت که دانشجو در بازدیدهای علمی و کارآموزی‌ها به نمونه‌های واقعی و صنعتی آن برخورد کرده است. این امر قابلیت انعطاف خوبی به دانشجو در مواجهه با مسائل جدیدتر می‌دهد.

با پیشرفت دانش و فنّاوری و رشد زمینه‌های بین رشته‌ای روز به‌روز بر دامنه کاربرد مهندسی واکنش و طراحی راکتور در زمینه‌های جدید و غیرسنتی مانند مهندسی پزشکی، اندام‌های مصنوعی، الکترونیک و... افزوده می‌شود که این، علاوه بر گسترش معمول فنّاوری در زمینه‌های متداول مانند بیوتکنولوژی، پلیمر، فرایندهای الکتروشیمیایی، غشاها، راکتورهای بستر سیال، فرایندهای متالورژی، صنایع دارویی، فرایندهای فتوشیمیایی، مواد شیمیایی خاص و غیره است [۱، ۲ و ۳].

با توجه به نکات یاد شده و با مرور تجارب سایر کشورها و دانشگاه‌ها و نیز با توجه به دیدگاه‌های دانشجویان، فارغ‌التحصیلان و مهندسان شاغل در صنایع مختلف و نیز مباحثات و نظرهای همکاران هیئت علمی در جلسات بررسی دروس و کارگاه برگزار شده از طرف انجمن مهندسان شیمی ایران، موارد زیر در مورد بازنگری سرفصل‌ها و ارائه درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی پیشنهاد می‌شود.

۲. تعداد واحد و زمان ارائه درس

این درس باید زمانی ارائه شود که دانشجو مبانی پایه و تخصصی لازم را فراگرفته و استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی را در دروس قبلی خود تجربه کرده باشد. از طرف دیگر، دستاوردهای این درس در دروس نهایی دوره مانند طرح و اقتصاد مهندسی مورد نیاز دانشجوست. بنابراین، تعداد ۴ واحد در ترم ۷ پیشنهاد می‌شود.

۳. پیش‌نیازها

از آنجاکه در این درس مدلسازی و حل مسائل مربوط به راکتورهای مختلف مورد توجه

می‌باشد، لازم است پیش‌نیازهای این درس مبانی لازم در خصوص سینتیک، ترمودینامیک، پدیده‌های انتقال و روش‌های محاسباتی را به دانشجو آموزش دهد. از این نظر دروس ترمودینامیک، شیمی فیزیک، مکانیک سیالات، انتقال حرارت، انتقال جرم و محاسبات عددی یا کاربرد ریاضی در مهندسی شیمی به‌عنوان دروس پیش‌نیاز پیشنهاد می‌شوند.

۴. نحوهٔ تدریس

این درس به‌صورت نظری به همراه حل تمرین در کلاس ارائه می‌شود. علاوه بر روش‌های معمول گچ و تخته سیاه، استفاده از وسایل کمک‌آموزشی از قبیل کامپیوتر، تجهیزات سمعی و بصری، فیلم آموزشی، آموزش‌های مجازی و غیره در حد متعادل توصیه می‌شود. به‌علاوه، آزمایش، بازدید و اجرای پروژه نقش زیادی در ارتقای آموزش این درس دارد.

۵. ارائه پروژه

پیشنهاد می‌شود یک پروژه گروهی (گروه‌های ۳ تا ۴ نفری) در خصوص آشنایی و طراحی اولیه یک راکتور صنعتی انجام شود. در ابتدای ترم جمع‌آوری اطلاعات واکنش و فرایند انجام می‌شود. با پیشرفت درس وجوه مختلف طراحی مانند ترمودینامیک، مشخصات، ایمنی و... نیز انجام می‌شود. در آخر ترم تصویر منطقی از راکتور صنعتی در ذهن دانشجو ایجاد می‌شود. توصیه می‌شود این پروژه‌ها از میان صنایعی که ارتباط با آنها یا بازدید از آنها برای دانشجو میسر است، انتخاب شود. تجربه نشان داده است که صنعت نیز استقبال خوبی از این پروژه‌ها به‌عمل آورده و زمینه برای ارتباط یا حتی اشتغال آتی دانشجو تا حد زیادی تسهیل شده است. این موضوع به‌صورت موردی توسط نویسندگان مقاله تجربه شده است.

۶. به‌کارگیری روش‌های عددی و نرم‌افزارهای مرسوم

استفاده از روش‌ها و ابزارهای نوین امری اجتناب‌ناپذیر در سیستم‌های آموزشی امروزی است. در این خصوص، به‌کارگیری کامپیوتر و استفاده از روش‌های عددی در حل، تجزیه و تحلیل مسائل مهم است. آشنایی و کار با نرم‌افزارهای محاسباتی شبیه Matlab یا حداقل نرم‌افزارهای کتب درسی مانندی PolyMath یا Ez–Solve برای حل مجموعه معادلات

حاکم لازم است. اکنون زمینه خوبی برای آموزش و استفاده از این نرم‌افزارها در دانشگاه‌ها به‌وجود آمده است. به‌علاوه، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند PRO II، Hysys و... و نیز آشنایی با مدل‌های طراحی راکتور و آنالیز واکنش‌های آنها توصیه می‌شود. فهرست برخی از نرم‌افزارهای قابل استفاده در درس سینتیک و طراحی راکتورها در جدول ۱ ارائه شده است.

۷. بازدید

تجربه نشان داده است که آموزش به همراه مشاهده از نزدیک در روند یادگیری تأثیر بسزایی دارد. برای آشنایی با انواع راکتورهای صنعتی متداول یا نوین توصیه می‌شود از یک مجتمع صنعتی مربوط بازدید به عمل آید. این بازدیدها به‌خصوص از اوایل ترم می‌تواند الگوی خوبی برای پروژه دانشجو باشد و دید او را به درس کاربردی نماید. در بسیاری موارد پروژه فارغ‌التحصیلی دانشجو نیز می‌تواند از این‌گونه بازدیدها تأثیر بپذیرد و یک موضوع کاربردی تعریف شود.

۸. مشخصات استاد درس

وقتی درسی به‌صورت مطلوب ارائه می‌شود، به دانشجویان کمک می‌کند تا خوب بیاموزند و تجربه کسب کنند. به بیانی دیگر، الگوی تدریس خوب به یادگیری بهینه کمک می‌کند.

مدرسان برای تحقق هر یک از اهداف آموزش و پژوهش در سیستم‌های آموزش عالی به روش‌ها، فنون و مهارت‌های تدریس خاصی نیاز دارند. بنابراین، تنوع روش‌ها، فنون و مهارت‌های تدریس ضروری و نیاز تلاش‌های آموزشی در محیط‌های درسی است. اگر رشد توان و قابلیت تدوین یک مبحث علمی، کسب و طبقه‌بندی مفاهیم، پیش‌بینی روال آینده و تفکر منطقی برای دانشجویان ضروری و لازم است، نمی‌توان آنها را با روش‌های آموزش متمرکز بر مدرس یا سخنرانی ایجاد کرد، بلکه به روش‌های جایگزین دیگری از قبیل

روش‌های فعال[1]، دانشجو محوری، تفکر استقرایی[2] (گردآوری، سازماندهی و کنترل مطالب)، آموزش کاوشگری[3]، پژوهشگری، حل مشکل در تجربه، عمل و کاربرد نیاز است.

طبیعی است که توانایی‌های استاد درس نقش بسزایی در جلب توجه دانشجویان و کیفیت آموزش آنان دارد. از این نظر استفاده از یک استاد مجرب، با سابقه و ترجیحاً دارای تجربه صنعتی توصیه می‌شود. به‌علاوه، باید زمینه‌های لازم برای ارتباط مناسب دانشجویان با صنایع مربوط توسط استاد درس ایجاد شود.

۹. تجربهٔ عملی و آزمایشگاه

هدف عمدهٔ این بخش درگیر ساختن دانشجویان با یک مسئله واقعی کاوشگری است که با مواجه ساختن آنان با زمینه‌ای برای جستجو، کمک کردن به آنها برای مشخص ساختن یک مسئله مفهومی و دعوت آنان به تدوین راه‌های حل آن مسئله صورت می‌گیرد. بنابراین، دانشجویان یک موضوع علمی را در حال ایجاد آن ملاحظه می‌کنند و به درون جامعهٔ اندیشمندان قدم می‌گذارند.

از آنجا که انجام‌یافتن آزمایش‌های عملی نقش مهمی در تقویت و تثبیت توانایی‌های دانشجویان فنی و مهندسی دارد، ارائه آزمایشگاه و تجربهٔ عملی در این درس پیشنهاد می‌شود. این آزمایشگاه می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مستقل یا مشترک با سایر آزمایشگاه‌های دوره مانند آزمایشگاه عملیات واحد ارائه شود (جدول ۲). یافته‌های ویلیامز[4] در خصوص آزمایش‌ها و تأثیر آنها بر کیفیت آموزش این درس قابل توجه است. در مواردی می‌توان سیستم‌های آزمایشی مورد نیاز را به‌عنوان پروژه‌های دانشجویی تعریف کرد و با هزینه کمی به ساخت و نیز تغییر آنها اقدام کرد [۵].

---

۱. Active Methods

۲. Thinking Inductively

۳. Inquiry Training

۴. Williams, 1973

جدول ۱. نرم‌افزارهای کاربردی درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی

ردیف	نام نرم‌افزار	توضیحات
۱	نرم‌افزارهای دارای صفحهٔ فعال (برای منحنی‌سازی) Excel Quattro Pro PolyMath Table Curve	دانشجو با استفاده از این نرم‌افزارها می‌تواند به‌دست آوردن معادلهٔ سرعت واکنش‌های شیمیایی را تجربه کند.
۲	نرم‌افزارهایی با قابلیت حل معادلات جبری: Matlab Math Cad Maple TK Solver Poly Math Point Five	دانشجو با استفاده از این نرم‌افزارها می‌تواند حل معادلات جبری خطی و غیرخطی را به‌عنوان مثال در طراحی راکتورهای مخلوط شونده تجربه کند.
۳	نرم‌افزارهایی با قابلیت حل معادلات دیفرانسیل: Matlab Math Cad Maple Mathematica Poly Math Ez - Solve	دانشجو با استفاده از این نرم‌افزارها می‌تواند حل معادلات دیفرانسیل را به‌عنوان مثال در طراحی راکتورهای لوله‌ای و بستر ثابت تجربه کند.
۴	نرم‌افزارهای حرفه‌ای: Aspen Plus Chem Cad Hysys Pro II Design II	دانشجو با استفاده از این نرم‌افزارها می‌تواند طراحی انواع راکتورها را تجربه و عملکرد آنها را بررسی کند.

جدول ۲. آزمایش‌های پیشنهادی برای استفاده در درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی

ردیف	نام آزمایش	توضیحات
آزمایش اول	تعیین معادله سرعت واکنش در یک راکتور ناپیوسته (همدما)	در این آزمایش دانشجو نحوهٔ به‌دست آوردن معادله سرعت واکنش در یک راکتور ناپیوسته در دمای اتاق را تجربه می‌کند.
آزمایش دوم	تعیین معادله سرعت واکنش در یک راکتور نیمه پیوسته (همدما)	در این آزمایش دانشجو با ترسیم منحنی غلظت بر حسب زمان، نحوهٔ به‌دست آوردن معادلهٔ سرعت واکنش در یک راکتور نیمه پیوسته در فاز مایع و تأثیر پارامترهای حاکم بر آن را تجربه می‌کند.
آزمایش سوم	تعیین معادله سرعت واکنش در یک راکتور پیوستهٔ همزده (همدما)	در این آزمایش دانشجو نحوهٔ به‌دست آوردن معادلهٔ سرعت واکنش در فاز مایع با راکتور CSTR و تأثیر پارامترهای حاکم بر آن را تجربه می‌کند.
آزمایش چهارم	تعیین معادله سرعت واکنش در یک راکتور پیوستهٔ لوله‌ای (همدما)	در این آزمایش دانشجو با تغییر دبی جریان ورودی به راکتور، نحوهٔ به‌دست آوردن معادلهٔ سرعت واکنش در یک راکتور لوله‌ای و تأثیر پارامترهای حاکم بر آن را تجربه می‌کند.
آزمایش پنجم	راکتورهای همزدهٔ سری	در این آزمایش دانشجو با کنار هم قراردادن راکتورهای همزده به شکل سری، میزان تبدیل واکنش و تأثیر پارامترهای حاکم بر آن را تجربه می‌کند.
آزمایش ششم	راکتورهای سری ترکیبی (یک سیستم سری متشکل از راکتورهای همزده و لوله‌ای)	در این آزمایش دانشجو با کنارهم قراردادن راکتورهای همزده و لوله‌ای به شکل سری، میزان تبدیل واکنش و تأثیر پارامترهای حاکم بر آن را تجربه می‌کند.
آزمایش هفتم	راکتورهای بستر ثابت	در این آزمایش دانشجو عملکرد راکتورهای کاتالیستی بستر ثابت را تجربه می‌کند.
آزمایش هشتم	بررسی اثر دما در سینتیک واکنش	در این آزمایش دانشجو قانون آرنیوس را برای بررسی اثر دما در سینتیک واکنش تجربه می‌کند.

جدول ۳. سرفصل کلی پیشنهادی درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی

ردیف	سرفصل	درصد از حجم کل درس	توضیحات
۱	مقدمه، یادآوری ترمودینامیک، شیمی فیزیک، موازنه جرم یا مول، سرعت واکنش	۱۰٪	دانشجو در این فصل با مباحث و مبانی مورد نیاز در درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی آشنا می‌شود.
۲	معرفی روش‌های عددی، نرم‌افزارهای مرتبط و کاربرد آنها	۵٪	دانشجو در این فصل با روش‌های عددی، نرم‌افزارهای ارائه شده در جدول ۱ و کاربرد آنها در درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی آشنا می‌شود.
۳	سینتیک واکنش‌های همگن و ناهمگن	۱۵٪	دانشجو در این فصل با سینتیک واکنش‌های همگن و ناهمگن و نحوهٔ به‌دست آوردن معادلهٔ سرعت واکنش و پارامترهای مؤثر بر آن آشنا می‌شود.
۴	راکتورهای ایده‌آل، متجانس همدما	۲۰٪	دانشجو در این فصل طراحی راکتورهای ایده‌آل، متجانس همدما را تجربه می‌کند و با پارامترهای مؤثر بر آن آشنا می‌شود.
۵	کاتالیست‌ها و راکتورهای کاتالیستی	۱۵٪	دانشجو در این فصل با انواع کاتالیست‌ها و راکتورهای کاتالیستی آشنا می‌شود و طراحی مقدماتی آنها را تجربه می‌کند.
٦	راکتورهای ناهمدما	۱۵٪	دانشجو در این فصل با طراحی راکتورهای دما متغیر آشنا می‌شود.

۱۰. سرفصل کلی مورد نیاز

عناوین کلی مورد نیاز در این درس لازم است پس از مرور مباحث مورد نیاز از دروس موازنه جرم و ترمودینامیک و شیمی فیزیک به مدل‌های راکتورهای ایده‌آل بپردازد، سپس به موارد خاص راکتورهای ناهمدما، غیرایده‌آل و مثال‌هایی از راکتورهای واقعی در سیستم‌های پلیمری و غیره اشاره شود. یک نمونه از سرفصل‌های پیشنهادی به شرح جدول ۳ می‌باشد. جزئیات سرفصل‌های پیشنهادی از کتاب فاگلر، لونسپیل و کتب مرجع بنابر نظر مدرس تعیین می‌شود.

جدول ۴. نوع سئوالات پیشنهادی درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی

ردیف	نوع سؤال	درصد از کل نمره	توضیحات
۱	سؤالات کلیشه‌ای	٪۳۰	در این بخش دانشجویان با سؤال یا سؤالاتی ارزیابی می‌شوند که روش حل آن روشن است. دانشجویانی که در طول یک نیمسال در کلاس حضور داشته باشند و فعالیت نسبی نشان دهند، به این سؤال پاسخ کامل می‌دهند.
۲	سؤالات نیمه کلیشه‌ای	٪۳۰	در این بخش دانشجو با سؤالاتی ارزیابی می‌شود که روش حل آن روشن نیست، ولی با کمی تفکر قابل تبدیل به سؤالات نوع اول است. دانشجویانی که در طول یک نیمسال حضور فعال داشته باشند، به این سؤال پاسخ کامل می‌دهند.
۳	سؤالات ابتکاری	٪۴۰	در این بخش دانشجو با سؤال یا سؤالاتی ارزیابی می‌شود که روش حل آن روشن نیست. دانشجویانی به این سؤال پاسخ کامل می‌دهند که فعالیت زیاد و مطالعهٔ جامع و خارج از کلاس دارند و دارای ابتکار هستند. این نوع سؤالات دانشجویان دستهٔ سوم را ارزیابی و شناسایی می‌کند.

۱۱. ارزیابی درس

در سیستم‌های آموزشی، ارزیابی پیوسته، نوع سؤال و نحوهٔ برگزاری آزمون دارای جایگاه ویژه‌ای است. ارزیابی از جنبه‌های مهم فعالیت‌های دانشجویان است و اهمیت خاصی در تداوم یادگیری آنان دارد. جدول ۴ تقسیم‌بندی پیشنهادی نوع سؤالات ارزیابی و جدول ۵ توزیع پیشنهادی نمرات هر کدام از بخش‌های ارزیابی درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی را نشان می‌دهد.

جدول ۵. توزیع پیشنهادی نمرهٔ درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی

ردیف	مورد ارزیابی	درصد از کل نمره	توضیحات
۱	تکلیف	٪۱۰	ارائه منظم و هدفدار تکالیف سبب می‌شود خلاقیت دانشجو در برخورد با مسائل افزایش یابد و تداوم یادگیری فراهم شود.
۲	کوئیز	٪۱۰	برگزاری امتحان‌های کوتاه کلاسی سبب تقویت تداوم آموزش و ارزیابی پیوسته می‌شود.
۳	پروژه	٪۱۰	ارائه پروژه سبب افزایش خلاقیت در طراحی، تجزیه و تحلیل نتایج و توسعهٔ فرهنگ کارهای گروهی می‌شود.
۴	فعالیت کلاسی	٪۵	این بخش بر اساس ارزیابی مدرس از فعالیت‌های کلاسی دانشجو در طول یک نیمسال برآورد و سبب می‌شود دانشجو در طول نیمسال به‌طور فعال حضور داشته باشد.
۵	میان‌ترم	٪۲۵	اخذ امتحان میان‌ترم برآوردی از نیمهٔ مباحث درس است و سبب می‌شود دانشجو مباحث خوانده شده تا نیمهٔ ترم را یکجا تجربه کند.
٦	پایان ترم	٪۴۰	از کل درس ارائه شده ارزیابی به عمل می‌آید.

۱۲. کتاب درسی و سایر کتاب‌های مرجع

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در علوم مهندسی و کاربردی بودن رشتهٔ مهندسی شیمی، به‌نظر می‌رسد کتابی می‌تواند به عنوان کتاب درسی مطلوب مورد استفاده قرار گیرد که دو جنبهٔ تئوری و کاربردی داشته باشد. کتاب‌های درسی متعددی که اهداف آموزشی مورد نیاز این درس را فراهم می‌کنند، وجود دارد. به‌نظر می‌رسد کتاب فاگلر[۱] انتخاب مناسبی به‌عنوان کتاب درسی پیشنهادی باشد.

[1] Fogler, Elements of Chemical Reaction Engineering, Prentice Hall, 1999.

در مباحث مختلف مطرح شده در این درس کتب زیادی مورد استفاده و رجوع دانشجویان قرار می‌گیرد. کتاب‌های زیر نمونه‌ای از کتب مرجع پیشنهادی است.

[2] Levenspiel, Chemical Reaction Engineering, John Wiley, 1999.

[3] Hill, An Introduction to Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design, John Wiley, 1971.

[4] Smith, Chemical Engineering Kinetics, Mc Graw Hill, 1991.

[5] Froment, Elements of Chemical Reaction Engineering, John Wiley, 1997.

[6] Rase, Chemical Reactor Design for Process Plants, Vol. 1, 2, John Wiley.

[7] Rase, H.F. Fixed-Bed Reactor Design and Diagnostics: Gas-Phase Reactions, Butterworths, 1990.

[8] Doraiswamy & Sharma, Heterogeneous Reaction: Analysis, Examples, and Reactor Design, Vol. 1, 2, John Wiley.

[9] Carberry, J. & Varma, A., Chemical Reaction and Reactor Engineering, Marcel Dekker.

[10] Whitaker, S. & Cassano, A.E., Concepts and Design of Chemical Reactors, Gordon and Breach Science.

[11] Rose, L.M., Chemical Reactor Design in Practice, Elsevier Scientific.

---

۱. Fogler, 1999

[12] Satterfield, C.N. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice, 2nd Edition, Mc Graw Hill.

[13] Twigg, M.V., Catalyst Handbook, Manson Pub., London.

[14] Walas, S.M. Reaction Kinetics for Chemical Engineers, Buterworths.

[15] Mezaki, R. & Inoue, H. (ed), Rate Equations of Solid-Catalysed Reactions, University of Tokyo.

۱۳. نتیجه‌گیری

با توجه به گسترش روزافزون کاربردهای مفاهیم و فرایندهای مهندسی شیمی در زمینه‌های جدید و نقش رو به گسترش واکنش‌های شیمیایی و راکتورها در زمینه‌های نوین و بین‌رشته‌ای، لازم است در سرفصل‌ها و نحوهٔ تدریس درس سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی تجدیدنظر شود. از طرف دیگر، رشد کاربرد ابزارهای محاسباتی در آموزش مهندسی شیمی این امکان را فراهم کرده است که اصول و مفاهیم پایه را با مثال‌ها و موارد واقعی‌تر و عملی‌تر ارائه کرد.

مراجع

1. Doraiswamy, I.K., Chemical Reaction Engineering, A Story of Continuing Fascination, Chemical Engineering Education, p. 184, Fall 1992.
2. Dudokovic, M.P., Chemical Reaction Engineering Current Status and Future Directions, Chemical Engineering Education, p. 210, Fall 1987.
3. Fogler, H.S., An Appetizing Structure of Chemical Reaction Engineering for Undergraduates, Chemical Engineering Education, p. 110, Summer 1993.
4. Williams, R.D., An Integrated Reactor Engineering Laboratory, Chemical Engineering Education, p. 148, Summer 1973.

۵. دلیرصفت، سیدرضا و سلطان‌محمدزاده، "طراحی و ساخت راکتور همزده در مقیاس

آزمایشگاهی جهت بررسی سینتیک واکنش اتیل استات با سود"، سومین همایش دانشجویی مهندسی شیمی ایران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مازندران، اردیبهشت ۱۳۸۱.

(تاریخ دریافت مقاله: ۸۱/۱۰/۷)