

مهندسی شیمی سبز

ابراهیم واشقانی فراهانی^۱ و سعید رفیعیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۳

DOI: 10.22047/ijee.2024.447623.2063

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.2.1

چکیده: در این مقاله، مفهوم مهندسی شیمی سبز، به عنوان نقطه تلاقی «شیمی سبز» و «مهندسی سبز» معرفی شده است و بر اهمیت آن در برنامه درسی مهندسی شیمی تأکید می‌شود. این مقاله ابتدا اهداف و اصول دوازده‌گانه «شیمی سبز» و «مهندسی سبز» را تشریح می‌کند و نقش آنها را در ارتقای پایداری زیست محیطی و کاهش ردپای بوم‌شناختی^۳ فرایندهای شیمیایی برجسته می‌کند. پس از این مقدمه، مهندسی شیمی سبز با تمرکز بر معیارهای پایداری آن و نحوه اعمال این اصول برای ایجاد فرایندهای شیمیایی سازگارتر با محیط زیست و پایدار، با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس بحث به این سو می‌رود که چگونه مفهوم مهندسی شیمی سبز می‌تواند به طور یکپارچه در برنامه درسی مهندسی شیمی ادغام شود و تغییرات و اضافاتی را به دوره‌های موجود پیشنهاد می‌کند تا موضوعات مهندسی پایدار را دربرگیرد. سرانجام، مقاله با خلاصه‌ای کوتاه به پایان می‌رسد و خواستار گنجاندن اصول سبز در چارچوب آموزشی، برای آماده‌سازی مهندسان آینده به منظور چالش‌های توسعه پایدار است و بر اهمیت تجهیز آنها به دانش و مهارت‌های لازم برای نوآوری و مسئولیت‌پذیری در حفظ محیط زیست برای توسعه پایدار تأکید می‌کند.

واژگان کلیدی: مهندسی شیمی، مهندسی شیمی سبز، فرایندهای شیمیایی، محیط زیست، برنامه درسی

۱- دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). evf@modares.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. saeed_rafiyan@modares.ac.ir

3- Green Chemistry

4- Green Engineering

۵- بوم‌شناسی برابرنباده فرهنگستان برای واژه اکولوژی است.

۱. مقدمه

توسعه صنعتی باعث بالا رفتن معیارهای زندگی و افزایش چشمگیر جمعیت جهانی (با وجود روند کاهشی رشد جمعیت کشورهای صنعتی در دو دهه اخیر) شده است. اما به طور هم‌زمان منجر به آلودگی محیط زیست و مسئله گرم شدن زمین و تغییرات آب‌وهوایی، به علت مصرف روزافزون انرژی‌های فسیلی شده است.

تولید محصولات شیمیایی، اگر چه نیازهای زندگی روزمره را برآورده می‌سازد اما میزان قابل توجهی از منابع طبیعی را مصرف می‌کند و با محصولات جانبی ناخواسته همراه است. مهندسان شیمی برای حل مشکلاتی چون کمبود انرژی و مواد خام، تأمین آب پایدار و تصفیه پساب، جذب و استفاده کربن، منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک و تولید اقتصادی واکسنها و داروها تلاش میکنند. مهندسی شیمی مدرن به طور گسترده درگیر فرایندهای صنعتی است و به تلاشهای پژوهشی بسیاری برای بهینه‌سازی طراحی فرایندهای شیمیایی و توسعه کاتالیستهای کارآمد با رویکرد حفظ محیط زیست و پایداری^۱ نیاز دارد. با این ملاحظات "مهندسی شیمی سبز" در فصل مشترک "شیمی سبز" و "مهندسی سبز" با رویکرد پایداری، برای دستیابی به توسعه پایدار در فرایندهای شیمیایی / زیست‌شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، بازنگری برنامه‌های آموزش مهندسی شیمی متناسب با آن، در دهه قبل میلادی آغاز شده است و ادامه دارد.

۲. هدف و اصول دوازده‌گانه شیمی سبز

۲-۱. هدف شیمی سبز

هدف شیمی سبز طراحی و تولید محصولات و فرایندهای شیمیایی هزینه-رقابتی^۲ برای دستیابی به بالاترین تراز پیشگیری از آلودگی با سلسله‌مراتب زیر است (Anastas & Warner, 1998). هدف شیمی سبز طراحی و تولید محصولات و فرایندهای شیمیایی هزینه-رقابتی برای دستیابی به بالاترین تراز پیشگیری از آلودگی با سلسله‌مراتب زیر است.

۱. کاهش منبع و پیشگیری از خطرهای شیمیایی با رویکردهای:

- طراحی محصولات شیمیایی که برای سلامتی انسان و محیط زیست کم‌خطرتر باشند؛ تهیه محصولات شیمیایی از مواد اولیه، معرف‌ها و حلال‌هایی که برای سلامتی انسان و محیط زیست کم‌خطرتر هستند؛ طراحی سنتز و دیگر فرایندها با پسماند شیمیایی کاهش یافته یا بدون پسماند؛ طراحی محصولات شیمیایی برای استفاده دوباره یا بازیابی
۲. تیمار مواد شیمیایی برای کم‌خطر کردن آنها پیش از عرضه

۳. عرضه مواد شیمیایی تیمار نشده به صورت امن، تنها اگر گزینه‌های دیگر امکان پذیر نباشد

۲-۲. اصول دوازده‌گانه شیمی سبز

اصول دوازده‌گانه شیمی سبز عبارتند از (Anastas & Warner, 1998):

۱. پسماند را پیشگیری کن: سنتر شیمیایی را برای پیشگیری پسماند طراحی کن، پسماندی برای تصفیه و پاک کردن به جا نگذار.

۲. اقتصاد اتمی را ببین: سنترهایی را طراحی کن که محصول نهایی دارای حداکثر نسبت از مواد اولیه باشد، تعداد کمی یا هیچ اتمی هدر نرود.

۳. کم‌خطرترین سنتر شیمیایی را طراحی کن: سنترهایی را طراحی کن که موادی با حداقل سمیت یا غیرسمی برای انسان یا محیط زیست استفاده یا تولید کند.

۴. محصولات و مواد شیمیایی امن تر طراحی کن: محصولاتی شیمیایی را طراحی کن که کاملاً مؤثر اما دارای سمیت کم یا غیرسمی باشند.

۵. از حلال‌ها و شرایط واکنش امن تر استفاده کن: از حلال‌ها، عوامل جداسازی یا دیگر مواد شیمیایی کمکی پرهیز کن، اگر باید از این مواد استفاده کنی، امن تر را استفاده کن.

۶. بهره‌وری انرژی را افزایش بده: واکنش‌های شیمیایی را در دما و فشار اتاق هرگاه که ممکن است انجام بده.

۷. مواد اولیه تجدیدپذیر استفاده کن: از مواد اولیه تجدیدپذیر به جای پایان یافتنی استفاده کن. منبع مواد اولیه تجدیدپذیر، اغلب محصولات کشاورزی یا پسماندهای فرایندهای دیگر است و منبع مواد اولیه پایان یافتنی، اغلب سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز طبیعی یا زغال سنگ) یا فرآورده‌های معدنی است.

۸. از مشتقات شیمیایی پرهیز کن: از پوشاندن یا حفاظت گروه‌های عاملی یا هرگونه اصلاحات موقتی، در صورت امکان پرهیز کن. مشتقات، عوامل اضافی را استفاده و تولید پسماند می‌کنند.

۹. از کاتالیست‌ها استفاده کن نه واکنشگرها (معرف‌های استوکیومتری): پسماند را با استفاده از کاتالیست‌ها کمینه کن. کاتالیست‌ها در مقدار کم برای انجام یک واکنش، چندین بار به کار می‌روند و بر معرف‌های استوکیومتری که در مقادیر اضافی برای انجام واکنش برای تنها یک بار به کار می‌روند، برتری دارند.

۱۰. محصولات و مواد شیمیایی ای را طراحی کن که پس از مصرف تخریب می‌شوند: محصولات شیمیایی ای را طراحی کن که به مواد بی‌ضرر تجزیه می‌شوند و پس از مصرف در محیط انباشته نمی‌شوند.

۱۱. به‌هنگام آنالیز کن تا آلودگی پرهیز کنی: کنترل و پایش به‌هنگام بر فرایند را در طی سنتر برقرار کن تا تشکیل محصولات جانبی کمینه یا حذف شود.

۱۲. پتانسیل حوادث را کمینه کن: مواد شیمیایی و حالت‌های فیزیکی (جامد، مایع، گاز) را به‌گونه‌ای طراحی کن که پتانسیل حوادث شیمیایی، شامل انفجار، آتش‌سوزی و رها شدن در محیط زیست کمینه باشد (نویسنده: البته طراحی آرمانی باید به‌گونه‌ای باشد تا انفجاری رخ ندهد).

۳. اصول دوازده‌گانه مهندسی سبز

اصول دوازده‌گانه مهندسی سبز عبارتند از (Anastas & Zimmerman, 2003):

۱. ذاتی به جای موقعیتی: طراحان لازم است تلاش کنند تا اطمینان دهند که همه مواد و انرژی ورودی و خروجی، تا حد امکان به طور ذاتی غیرخطرناک باشند.
۲. پیشگیری به جای تیمار (درمان): پیشگیری از پسماند بهتر از تصفیه و پاک‌کردن پسماند پس از تشکیل آن است.
۳. طراحی برای جداسازی: عملیات جداسازی و خالص‌سازی باید برای کمینه‌سازی مصرف انرژی و مواد طراحی شوند.
۴. بیشینه‌سازی بهره‌وری: محصولات، فرایندها و سامانه‌ها باید برای بیشینه‌سازی بهره‌وری جرم، انرژی، فضا و زمان طراحی شوند.
۵. برون‌داد یا محصول محور در برابر درون‌داد یا خوراک‌محور: محصولات و مواد باید به جای درون‌داد محور، برون‌داد محور از طریق استفاده انرژی و مواد باشند. به عبارت دیگر، برون‌داد پایه به جای درون‌داد پایه باشند.
۶. پیچیدگی یا هم‌تافتگی^۲ را نگهدار: آنتروپی و پیچیدگی‌های جای‌گرفته باید هنگام گزینه‌های تصمیم‌گیری درباره بازگرداندن، استفاده دوباره یا آرایش مفید، به عنوان سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شود.
۷. دیرپایی به جای جاودانگی: دیرپایی هدفمند و نه جاودانگی باید یک هدف طراحی باشد.
۸. برآوردن نیاز، کمینه‌سازی موارد اضافی^۴: طراحی برای ایجاد ظرفیت یا توانمندی غیرضروری (به طور مثال، "یک اندازه برانزده همه است") باید یک کاستی طراحی در نظر گرفته شود.
۹. تنوع مواد را کمینه کن: تنوع مواد در محصولات چندجزئی، برای ارتقای پیاده کردن (باز کردن) و نگهداری ارزش باید کمینه شود.
۱۰. جریان‌های مواد و انرژی را یکپارچه کن: طراحی محصولات، فرایندها و سامانه‌ها باید شامل یکپارچه‌سازی و درهم پیوستگی با جریان‌های انرژی و مواد در دسترس باشند.
۱۱. برای "زندگی پس از مرگ"^۵ طراحی کن: محصولات فرایندها و سامانه‌ها باید برای کارایی در یک زندگی پس از مرگ طراحی شوند (پرهیز از تأثیرات غیرضرور پس از پایان یافتن عمر مفید یک محصول یا

1- Pulled-Out
4- Excess

2- Input-Pushed
5- After-Life

3- Complexity

فرایند، و قابل بازگشت به حالت اولیه یا قابل استفاده بودن).

۱۲. **تجدیدپذیر به جای پایانی یافتنی**: مواد انرژی ورودی باید به جای پایانی یافتنی، تجدیدپذیر باشند. اصول ۲۴گانه شیمی سبز و مهندسی سبز برای استفاده آسان تر، به صورت فشرده به شرح زیر، در جدول ۱ معرفی شده اند (Tang et al., 2008). با توجه به ارتباط الفبائی این اصول، این جدول به زبان انگلیسی درج می شود.

جدول ۱. اصول مهندسی شیمی سبز

Principles of Green Chemistry	Principles of Green Engineering
P - Prevent wastes	I - Inherently non-hazardous and safe
R - Renewable materials	M - Minimize material diversity
O - Omit derivatization steps	P - Prevention instead of treatment
D - Degradable chemical products	R - Renewable material and energy inputs
U - Use safe synthetic methods	O - Output-led design
C - Catalytic reagents	V - Very simple
T - Temperature, Pressure ambient	E - Efficient use of mass, energy, space & time
I - In-process monitoring	M - Meet the need
V - Very few auxiliary substances	E - Easy to separate by design
E - E-factor, maximize feed in product	N - Networks for exchange of local mass & energy
L - Low toxicity of chemical products	T - Test the life cycle of the design
Y - Yes it's safe	S - Sustainability throughout product life cycle

۴. مهندسی شیمی سبز

مهندسی شیمی سبز به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها برای دست یابی به توسعه پایدار در فرایندهای صنایع شیمیایی/زیست شیمیایی شناخته شده است.

مهندسی شیمی سبز به دو بخش عمده دسته بندی شده است (Riadi, 2019):

- مهندسی محصول سبز^۱: توسعه کاتالیست های نو و توسعه و استفاده از منابع تجدیدپذیر (مانند: انرژی خورشیدی و زیست توده)
- مهندسی فرایند سبز^۲: فشرده سازی (تشدید) فرایند^۳، محیط واکنش جدید، نگه داری^۴ انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، رآکتورهای نوین، روش های جداسازی جدید و...

۵. معیارهای پایداری^۵

سه ستون اصلی پایداری عبارتند از: شکوفایی اقتصادی، حفاظت از محیط زیست، و توسعه اجتماعی - معیارهای ارزیابی پایداری متشکل از عامل های اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی است. جنبه های فناورانه و سیاسی می توانند بر اقتصاد، محیط زیست و کارایی های اجتماعی تأثیر بگذارند

1- Green product engineering
4- Conservation

2- Green process engineering
5- Sustainability

3- Process intensification

و از این رو، در این معیارها قرار می‌گیرند.
 - چهارده معیار، با در نظر گرفتن چهار جنبه موضوعات اقتصادی، محیط زیستی، فناورانه و سیاسی اجتماعی برای ارزیابی پایداری سامانه‌های صنعتی مختلف، به شرح زیر تعیین شده است (Ren et al., 2016).

۱-۵. معیارهای اقتصادی

معیارهای اقتصادی عبارتند از:

۱. هزینه سرمایه‌گذاری: هزینه دستگاه‌ها، انتقال و ساخت هر واحد
۲. هزینه بهره‌برداری و نگهداری: هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری و نگهداری از هر واحد
۳. هزینه خوراک: هزینه‌های مواد خام
۴. هزینه تولید: هزینه کلی تولید محصولات هدف‌گذاری شده
۵. دسترس پذیری منابع: ظرفیت ذخیره خوراک کلیدی مورد استفاده در سامانه صنعتی شاخصی برای ظرفیت توسعه فناوری سامانه است. به طور مثال، ذخایر مختلف گیاه جاتروفا^۱، لوبیای سویا، روغن نخل و تخم شلغم روغنی بر مسیرهای تولید سوخت زیستی با استفاده از ذخایر متفاوت تأثیر می‌گذارد.

۲-۵. معیارهای زیست محیطی

معیارهای زیست محیطی عبارتند از:

۱. پتانسیل گرم شدن کره زمین: انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و متان، توسط سامانه‌های صنعتی جایگزین با واحد معادل گرم دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری می‌کند.
۲. پتانسیل اسیدی کردن: انتشار اسیدهای وارد شده در خاک و آب توسط سامانه صنعتی مختلف با واحد معادل گرم دی‌اکسید گوگرد

۳-۵. معیارهای فناورانه

معیارهای فناورانه عبارتند از:

۱. بلوغ: میزان بلوغ فناوری با چگونگی گسترش آن در تراز بین‌المللی و ملی
۲. بهره‌وری انرژی^۲: نسبت انرژی که می‌تواند توسط محصول تولید شود به انرژی لازم برای تولید محصول
۳. بهره‌وری کار مفید: نسبت حداکثر کار مفید خروجی توسط محصول به کل حداکثر کار مفید ورودی برای تولید محصول

۴. نوآوری فناوری: میزان نوآوری یکپارچه فناوری های جایگزین از نظر تجدیدپذیری چشم انداز آینده و دسترسی

۴-۵. معیارهای سیاسی - اجتماعی

معیارهای سیاسی - اجتماعی عبارتند از:

۱. پذیرش اجتماعی: اندازه گیری دیدگاه کلی مردم محلی درباره صنایع یا فناوری های مختلف
۲. تأثیر بر امنیت انرژی: اندازه گیری اثر سامانه صنعتی یا فناوری بر امنیت انرژی و کاهش وابستگی به وارد کردن انرژی با معرفی این فناوری (به ویژه انرژی های تجدیدناپذیر)
۳. کاربست پذیری سیاست: میزان سازگاری سامانه صنعتی با فناوری و سیاست های دولتی، مقررات و قوانین، این معیارها به دو نوع سخت^۱ و نرم^۲ با تعریف زیر تقسیم بندی می شوند: معیارهای سخت می توانند به طور مستقیم با استفاده از داده های موجود در کتاب ها، مقاله ها، گزارش های فنی و پیمایش واحدهای تولیدی و نیمه صنعتی امتیازبندی شوند، اما کمی کردن معیارهای نرم، توسط ذی نفعان و تصمیم گیران مشکل است.

۶. آموزش مهندسی شیمی سبز

شایستگی های اصلی دانشجویان برای برآوردن نیازهای بلندمدت مهندسی شیمی سبز عبارتند از (Haack & Hutchison, 2016):

۱. طراحی یا انتخاب مواد شیمیایی با عملکرد بهتر محصول و حفظ محیط زیست
۲. توسعه فرایندهای سنتز و واکنش جدید با بازدهی افزایش یافته؛
۳. ادغام مواد شیمیایی در محصولات یا فرمولاسیون برای افزایش عملکرد و کاهش اثرات در سراسر چرخه زندگی^۳.

تصمیم گیری در روبه رویی با عدم قطعیت یا مبادلات^۴ چندانکه

از این رو، گنجاندن ابزارها و اصول مهندسی سبز در آموزش مهندسی شیمی، از مفهوم اولیه زیست محیطی به مفهوم گسترده تر "پایداری" انتقال یافته است. مفهوم پایداری در این دیدگاه عبارت است از "مسیری روبه جلو که به بشریت اجازه می دهد تا نیازهای کنونی محیطی و سلامت انسان، اقتصادی و اجتماعی را بدون به خطر انداختن پیشرفت و موفقیت نسل های آینده برآورده کند". ابزار طراحی شامل هر دو اصل کلی، مانند ۱۲ اصل مهندسی سبز و همچنین تجزیه و تحلیل کمی بیشتر مواد، عملیات واحد و نقشه های جریان^۵ است که شامل استفاده از گروه های ابزار طراحی به

1- Hard

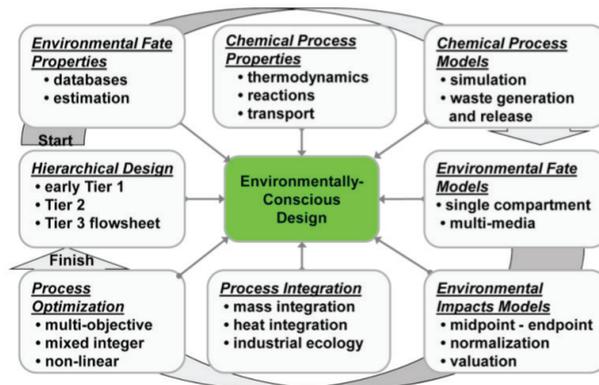
4- Trade-off

2- Soft

5- Fowsheets

3- life cycle

کمک رایانه است و به عنوان نمونه، در شکل ۱ نشان داده شده است (Allen et al., 2016).



شکل ۱. چارچوبی جامع برای طراحی محیطی آگاهانه. این چارچوب طراحی سلسله‌مراتبی، بهینه‌سازی فرایند، خواص فرایند شیمیایی، مدل‌های فرایند شیمیایی، مدل‌های سرنوشت زیست‌محیطی و مدل‌های اثرات زیست‌محیطی را برای ترویج شیوه‌های مهندسی پایدار یکپارچه می‌کند.

داشتن شایستگی‌های زیر برای دانش‌آموختگان مهندسی شیمی، توسط مؤسسه شیمی سبز انجمن شیمی آمریکا (ACS GCI) اعلام شده است (Reichmanis & Sabahi, 2017):

- طراحی و/ یا انتخاب مواد شیمیایی که عملکرد محصول و پایداری (اجتماعی/ انسانی، محیطی و اقتصادی) را از دیدگاه چرخه زندگی بهبود می‌بخشد
- طراحی و/ یا انتخاب فرایندهای شیمیایی‌ای که بسیار کارآمد هستند، از مواد اولیه جایگزین استفاده می‌کنند و این کار را در حالی انجام می‌دهند که کمترین مقدار پسماند را تولید می‌کنند
- درک چگونگی استفاده یا ادغام مواد شیمیایی در محصولات، برای دستیابی به بهترین مزیت برای مشتریان و در عین حال، به حداقل رساندن اثرات پایداری چرخه زندگی با در نظر گرفتن تفکر چرخه زندگی و تجزیه و واکاوای سامانه‌ها، فکر کنید و تصمیم بگیرید.

در حال حاضر، بسیاری از دانشگاه‌ها دانش، روش‌ها و مهارت‌های مهندسی سبز را در برنامه‌های آموزشی خود با تمرکز بر تدریس درس‌ها، گنجانده‌اند. از نظر روش تدریس، برخی از دانشگاه‌ها مفهوم مهندسی سبز را در درس‌های موجود گنجانده‌اند، مانند تولید شیمیایی سبز در درس مهندسی واکنش شیمیایی. برخی از دانشگاه‌ها، درس‌های جداگانه، مانند شیمی سبز و مهندسی سبز ارائه می‌دهند (Mason, 2020). برخی دیگر، تغییرات سبز را در فهرست مطالب درس موجود می‌کنند، مانند درس انتقال گرما (Flynn, 2005). شایان ذکر است که دانشکده^۲ شیمی و مهندسی شیمی سبز دانشگاه

تولید و ایالت اوهایو آمریکا، در سال ۲۰۱۱ میلادی تأسیس شد و برنامه آن برای دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد به شرح جدول‌های ۲ و ۳ است (Mason, 2020).

جدول ۲. درس‌های مهندسی شیمی و مهندسی شیمی سبز دانشگاه تولید و (Toledo) آمریکا

Course	Title	Credit hours
The following are required:		
CHEM 2410	Organic chemistry I	3
CHEM 2420	Organic chemistry II	3
CHEM 4200	Green chemistry	3
CHEE 4010*	Green engineering principles for chemical processes	3
Select at least one of the following courses:		
CHEM 4210	Environmental chemistry	3
CHEE 4110	Green engineering applications in chemical industries	3
Select at least one of the following courses:		
CHEM 3810	Chemistry of sustainable energy resources	3
CHEE 4120	Biofuels	3
EEES 4220	Environmental geochemistry	3
EEES 4450	Hazardous waste management	3
ECON 3240	Environmental economics	3
PSC 4340	Environmental policy	3
Total		21

جدول ۳. درس‌های مورد نیاز برای مدرک PSM در شیمی و مهندسی شیمی سبز دانشگاه تولید و (Toledo) آمریکا

Course	Title	Credit hours
CHEM 6200	Green chemistry	3
CHEM 6210	Environmental chemistry	3
CHEE 6010	Green engineering principles for chemical processes	3
CHEE 6110	Green engineering applications in chemical industries	3
BUAD 6600*	Supply chain management	3
EFSB 6690 OR	Technology commercialization	3

ادامه جدول ۳

Course	Title	Credit hours
EFSB 6590 OR	New venture creation	3
CHEM/CHEE 6970	Graduate industrial internship	6
	Elective courses in chemistry, chemical engineering, and materials science	12
Total		36

این رویکردها در گسترش مفهوم آموزش مهندسی شیمی سبز نقش مثبتی ایفا کرده‌اند. با این حال، هنوز نیاز به تقویت کاربرد عمیق اصول مهندسی سبز و بهبود کیفیت تربیت استعدادهایی با آگاهی از شیمی سبز وجود دارد (Yue et al., 2023).

جالب توجه است که به نظر پروفیسور چن و همکارش، مهندسی شیمی مقصر اصلی مشکلات زیست محیطی در "عصر سبز" تلقی می‌شود و برای مقابله با چالش‌های پیش روی صنعت، بخش‌های مرتبط در نظام آموزش عالی باید به فکر ارائه مجموعه‌ای از دوره‌هایی باشند که نیازهای عصر جدید را برآورده کند. جالب توجه است که در این ارتباط، ایشان توسعه آموزش مهندسی سامانه فرایندی (PSE) به ویژه کنترل فرایند را به امید ایفای نقش کلیدی در رهبری صنعت و بهبود رفاه انسان‌ها پیشنهاد کرده‌اند (Lee & Chen, 2016). ایشان پس از طرح نقدهایی به شیوه آموزش درس کنترل فرایند و کتاب درسی مربوط "دینامیک‌ها و کنترل فرایند"، چارچوب جدیدی را همراه با کتاب‌های درسی دیگر برای این درس پیشنهاد داده‌اند. پیشنهاد می‌شود همکاران محترمی که این درس را ارائه می‌دهند، به منبع مربوط مراجعه فرمایند.

پروفیسور ژانگ از دانشکده مهندسی شیمی کالج فنی و حرفه‌ای پویانگ^۱ چین نتیجه‌گیری کرده است که برای توسعه شیمی و مهندسی شیمی با استفاده از ایده "سبز"، باید روش‌های تولید سبز را به کار گرفت و توجه به تربیت استعدادها در این زمینه تخصصی، جهت و هدف اصلی تلاش‌های آینده این کشور در زمینه شیمی و مهندسی شیمی خواهد بود (Zhang, 2017).

در طراحی فرایند سبز برای پیشگیری از آلودگی، پایداری و بازطراحی^۲ می‌توان نرم‌افزارهایی، مانند گرین اسکوپ^۳، الگوریتم وار^۴، و ساستین پرو^۵ را به کار برد (Ruiz-Mercado et al., 2016). از این رو، پیشنهاد می‌شود از این‌گونه نرم‌افزارها، در آموزش درس "طراحی مفهومی فرایندهای شیمیایی" استفاده شود.

با توجه به ضرورت استفاده همه مهندسان از اصول مهندسی سبز، گنجاندن این مفهوم در برنامه

1- Puyang vocational and technical college

2- Retrofit

3- GREENSCOPE

4- WAR Algorithm

5- SustainPro

درسی مقطع کارشناسی اهمیت ویژه دارد. رویکرد اصلی در این ارتباط، ادغام مفاهیم مهندسی سبز در درس‌های مختلف مهندسی شیمی است. از این رو گنجاندن این مفهوم در درس‌هایی، مانند موازنه مواد و انرژی، پدیده‌های انتقال، ترمودینامیک به ویژه در سامانه‌های تک‌فاز و چند فاز، مهندسی واکنش‌های شیمیایی (طراحی رآکتور)، فرایند جداسازی، طراحی فرایند، کنترل فرایند و حتی درس‌های تخصصی زیست‌فناوری و فناوری نانو پیشنهاد شده است (García-Serna et al., 2007; Riadi, 2019). نخستین درسی که می‌توان مفهوم مهندسی سبز را در مهندسی شیمی گنجانده، موازنه مواد و انرژی است. جدول ۴ برخی از مباحث مفهومی مهندسی سبز ارائه شده در این درس را نشان می‌دهد (Slater & Hesketh, 2004).

جدول ۴. مباحث مهندسی سبز مفهومی در درس موازنه مواد و انرژی (Slater & Hesketh, 2004)

Green Engineering topic	M&E balances topic
Balances on recycle operation in green engineering process; green chemistry in stoichiometry; combustion process and environmental impact	Fundamentals of material balances
Various forms of energy in a green engineering process	Energy and energy balances
Use of heat capacity and phase change calculation; recovery of energy in process-energy integration; mixing and solution issues in green engineering	Nonreactive process balance
Energy use in green chemistry reaction, combustion process; overall mass and energy balances in green engineering on an overall plant design basis	Reactive process balance

نمونه‌ای دیگر از گنجاندن مهندسی سبز در برنامه درسی بخش مهندسی شیمی دانشگاه روئن آمریکا، در جدول ۵ نشان داده شده است (Mason, 2020).

جدول ۵. مباحث مهندسی شیمی سبز در دانشگاه Rowan آمریکا

Chemical Engineering Course	Green Engineering Topic
Freshman engineering clinic	Green engineering project drip coffee maker Introduction to environmental regulations Introduction to life cycle assessment
Sophomore engineering clinic	Life cycle assessment of a product Environmental regulations
Material & energy balances	Emissions terminology/calculations "Green" material and energy balances
Mass transfer/Equilibrium stage separations	Mass separating agent Risk assessment

ادامه جدول ۵

Chemical Engineering Course	Green Engineering Topic
Material science	Estimation of properties Life cycle assessment
Heat transfer	Introduction to heat integration
Chemical thermodynamics	Estimation of chemical properties
Separation processes	Pollution prevention strategies Novel "Green" separation process integration
Chemical reaction engineering	Pollution prevention strategies Green chemistry
Process/Plant design	Heat integration & mass integration Flowsheet analysis Life cycle assessment
Process dynamics & control	Pollution prevention modeling and control
Unit operations laboratory	Green engineering experiments
Design for pollution prevention	Heat and mass integration Process analysis
Senior engineering clinic/Senior project	Real industrial projects in green engineering

افزون بر مورد بالا، می‌توان به گنجاندن مفهوم مهندسی سبز در دو درس پشت سر هم "فرایندهای جداسازی"، در برنامه درسی مهندسی شیمی این دانشگاه اشاره کرد (Mariano et al., 2004). این مفهوم‌ها بر اساس مطالب کتاب درسی مربوط به نام "مهندسی سبز: طراحی آگاهانه فرایند شیمیایی از دیدگاه زیست‌محیطی" (Spargo, 2004) در این دو درس گنجانده شده‌اند. شایان ذکر است که این کتاب، شامل سه بخش اصلی (۱) راهنمای مهندس شیمی به مسائل و مقررات زیست‌محیطی، (۲) کاهش خطرات زیست‌محیطی برای فرایندهای شیمیایی، و (۳) حرکت فراتر از مرز واحد است. این دو درس به عنوان درس‌های مه‌اد دوره کارشناسی و دوره تحصیلات تکمیلی مهندسی شیمی طراحی شده‌اند. مفهوم «مهندسی سبز» در جدول‌های ۴گانه، متناسب با موضوع انواع فرایندهای جداسازی برای راهنمایی مدرسان با توجه به هر فصل کتاب درسی یادشده، پوشش داده شده است. به دلیل تعداد زیاد جدول‌ها و گستردگی مطالب مربوط، امکان ارائه آنها در این مقاله کوتاه وجود ندارد و همکاران محترم دانشگاهی و صنعتی علاقه‌مند می‌توانند به منبع مربوط (Mariano et al., 2004) مراجعه کنند. در برنامه آموزشی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه‌های کنترابریا^۱ و ایالتی باسک^۲ اسپانیا، که شامل ۹۰ واحد بر اساس نظام آموزشی اروپا (ETCS) است، یک درس انتخابی^۳ واحدی به نام «ارزیابی

1- Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes

2- Cantabria

3- Basque

چرخه عمر محصول و فرایند» با تأکید بر آموزش مسئله محور پیرامون مهندسی سبز وجود دارد. با توجه به محدودیت تعداد درس ها و برنامه آموزشی، گنجاندن موضوعات مربوط به مهندسی شیمی سبز در درس های موجود توصیه می شود.

۷. نتیجه گیری

ادغام اصول مهندسی شیمی سبز در برنامه درسی مهندسی شیمی، نشان دهنده پیشرفت قابل توجهی به سمت توسعه پایدار در فرایندهای شیمیایی و زیست شیمیایی است. این رویکرد با تمرکز بر توسعه محصولات و فرایندهای سبز، در کنار تأکید بر اهمیت معیارهای پایداری شامل رقابت اقتصادی، حفاظت از محیط زیست و توسعه اجتماعی، مهندسان آینده را برای رسیدگی به چالش های پیچیده کاهش اثرات زیست محیطی و در عین حال افزایش منافع اقتصادی و اجتماعی آماده می کند. این مقاله بر ضرورت ترکیب ابزارها و اصول مهندسی سبز در سراسر آموزش مهندسی شیمی، از مقطع کارشناسی تا کارشناسی ارشد، برای پرورش نسل جدیدی از مهندسان مجهز به دانش و مهارت ها برای نوآوری برای آینده ای پایدار تأکید می کند. این راهبرد آموزشی جامع، نه تنها به نیاز توجه فوری به موارد محیط زیستی پاسخ می دهد بلکه با تقاضاهای در حال تحول حرفه مهندسی شیمی در قرن بیست و یکم نیز همسواست.

References

- Allen, D. T., Shonnard, D. R., Huang, Y., & Schuster, D. (2016). Green engineering education in chemical engineering curricula: a quarter century of progress and prospects for future transformations. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(11), 5850–5854. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01443>.
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: theory and practice*. Oxford University Press. <https://books.google.nl/books?id=SrO8QgAACAAJ>.
- Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). Design through the 12 principles of green engineering. *Environ Sci Technol*, 37(5), 94a–101a. <https://doi.org/10.1021/es032373>.
- Flynn, A. M. (2005). Assessing the incorporation of green engineering into a design-oriented heat transfer course. *Chemical Engineering Education*, 39, 320–327.
- Garcia-Serna, J., Pérez-Barrigón, L., & Cocero, M. J. (2007). New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering. *Chemical Engineering Journal*, 133(1), 7–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.02.028>.
- Haack, J. A., & Hutchison, J. E. (2016). Green chemistry education: 25 years of progress and 25 years ahead. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(11), 5889–5896. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02069>.
- Lee, J.-Y., & Chen, C.-L. (2016). A proposal for charting the undergraduate process control course for the 21st century. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.10.044>.
- Mariano, S., Stephanie, F., Robert, H., & Slater, C. S. (2004/06/20). The novel use of green engineering concepts in teaching separations salt lake city, Utah. <https://peer.asee.org/13665>.
- Mason, M. R. (2020). Greening the curriculum at the University of Toledo School of green chemistry and engineering. *Physical Sciences Reviews*, 5(7). <https://doi.org/doi:10.1515/psr-2020-000>.

- Reichmanis, E., & Sabahi, M. (2017). Life cycle inventory assessment as a sustainable chemistry and engineering education tool. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 9603–9613. <https://doi.org/10.1021/acsschemeng.7b03144>.
- Riadi, L. (2019). Green chemical engineering: challenges in chemical industrial processes for a better life. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 703(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/703/1/012002>.
- Ruiz-Mercado, G. J., Carvalho, A., & Cabezas, H. (2016). Using green chemistry and engineering principles to design, assess, and retrofit chemical processes for sustainability. *ACS Sustain Chem Eng*, 4(11), 6208–6221. <https://doi.org/10.1021/acsschemeng.6b02200>.
- Slater, C. S., & Hesketh, R. (2004). Incorporating green engineering into a material and energy balance course. *Chemical Engineering Education*, 38, 48–53.
- Spargo, P. L. (2004). Green engineering: Environmentally conscious design of chemical processes by David T. Allen and David R. Shonnard. Prentice Hall PTR: New Jersey. 2002. 552 pp. £51.99. ISBN 0–13–061908–6. *Organic Process Research & Development*, 8(6), 1083–1083. <https://doi.org/10.1021/op049881a>.
- Tang, S. Y., Bourne, R. A., Smith, R. L., & Poliakoff, M. (2008). The 24 principles of green engineering and green chemistry: “Improvements productively” [10.1039/B719469M]. *Green Chemistry*, 10(3), 268–269. <https://doi.org/10.1039/B719469M>.
- Yue, C.-J., Gu, L.-P., Ma, S.-S., Sun, X., Dai, N., Zhang, Z.-W., & Liu, B.-L. (2023). Improving undergraduate graduation chemical design using green techniques based on green engineering principles. *Education for Chemical Engineers*, 44, 96–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ece.2023.05.003>.
- Zhang, Y. (2017). Discussion on the development of green chemistry and chemical engineering. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 94(1), 012136. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/94/1/012136>.



◀ **دکتر ابراهیم واشقانی فراهانی:** متولد ۱۳۳۳ و دارای مدرک دکتری

تخصصی مهندسی شیمی از دانشگاه مگ گیل کانادا هستند. ایشان دوبار به عنوان استاد نمونه و چندبار به عنوان پژوهشگر برتر دانشگاه تربیت مدرس انتخاب شده‌اند. همچنین به عنوان استاد برجسته مهندسی شیمی سال ۱۴۰۰ از سوی فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران انتخاب شده‌اند و هم‌اکنون عضو وابسته شاخه مهندسی شیمی این فرهنگستان هستند. زمینه فعالیت‌های پژوهشی ایشان، شامل تهیه هیدروژل‌ها و کاربرد آنها در سامانه‌های نوین دارورسانی، سلول درمانی و مهندسی بافت است.



◀ **سعید رفعیان:** دانش‌آموخته مهندسی شیمی - مهندسی

زیست‌پزشکی دانشگاه تربیت مدرس هستند. تمرکز تحقیقاتی ایشان بر استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پژوهش‌های مهندسی شیمی و مهندسی پزشکی است.