



چالش‌ها و فرصت‌های آموزش شیمی سبز و ارتباط آن با توسعه پایدار

نسیم اصغری لالمی^۱، وحید امانی^{۲*}

^۱ گروه شیمی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

^۲ استادیار گروه شیمی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

چکیده

به دلیل اهمیت زیاد "شیمی سبز" برای حفظ محیط زیست، جلوگیری از تخریب منابع طبیعی و ایجاد یک زندگی سالم و طبیعی، در طی چندین دهه‌ی گذشته شیمی سبز به‌عنوان جزئی مهم در آموزش شیمی ظهور یافته و به‌سرعت در حال گسترش است. انواع مواد آموزشی برای تدریس ۱۲ اصل شیمی سبز به دانش‌آموزان در مدارس و دانشجویان در دانشگاه‌های تمام کشورها ایجاد شده است. با این حال، یک فشار بین‌المللی به‌سمت توسعه پایدار وجود دارد که مربیان و معلمان شیمی سبز را برای سنجیدن عوامل پیچیده شیمی سبز و در نظر گرفتن عوامل اجتماعی پایداری، به چالش کشانده است. در این مقاله، پیشینه‌ای از شیمی سبز، آموزش آن و ارتباط آن با توسعه پایدار را بیان نموده، دوره‌ها و برنامه‌هایی که در سال‌های اخیر برای رسیدن به این اهداف تلاش می‌کنند و نیز برخی از روش‌هایی که برای ارزیابی نتایج فراگیران از دوره‌های شیمی سبز مورد استفاده قرار گرفته‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: شیمی سبز، آموزش شیمی، توسعه پایدار، شیمی پایدار

* نویسنده مسئول: (✉ v.amani@cfu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۲

مقدمه

ایده روی آوردن به شیمی سبزتر در دهه ۱۹۹۰ اولین بار در ایالات متحده آمریکا و با حمایت انجمن شیمی آمریکا^۱ ظهور یافت. در واقع، شیمی سبز حاصل تلاش‌های مشترک دانشگاهی، گروه‌های تحقیقاتی مستقل، گروه‌های تجاری، انجمن فنی حرفه‌ای و مؤسسات قانونی به‌منظور کاهش آلودگی بوده است. اولین تلنگر در این زمینه به‌وسیله کتاب "شیمی سبز": نظریه و عمل^۲ توسط آناستاز و وارنر در سال ۱۹۹۸ زده شد (آناستاز و وارنر، ۱۹۹۸). آن‌ها شیمی سبز را بدین‌گونه تعریف کردند: "شیمی سبز عبارت است از بهره‌گیری از مجموعه‌ای از اصول و قواعد که استفاده و یا تولید مواد خطرناک را در طراحی، ساخت و به‌کارگیری فرآورده‌های شیمیایی کاهش داده و یا حذف می‌نماید". شیمی سبز برای رسیدن به اهدافی مانند فرایندهای تمیزتر، فرآورده‌هایی ایمن‌تر و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر به‌جای منابع فسیلی پیشنهاد شد. در طی دو دهه بعدی، اصول شیمی سبز به بخش مهمی از فعالیت‌های صنعتی، آموزشی و اجتماعی تبدیل شدند (بادنر، ۲۰۱۷، ص. ۱).

توسعه پایدار، به‌عنوان بخشی از اهداف توسعه هزاره ملل متحد^۳ (MDGs) به‌صورت رفع نیازهای نسل حاضر بدون تضییع توانایی‌های نسل‌های آینده برای رفع نیازهایشان تعریف شد (برودلند، ۱۹۸۷). در سال ۲۰۱۶، MDGs با اهداف توسعه پایدار^۴ (SDGs) جایگزین شدند. این اهداف شامل توسعه اجتماعی، اقتصادی و فنی بوده و به‌صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده‌اند (والتن، ۲۰۱۸، ص. A7). این اهداف عبارت‌اند از:

- ۱- پایان دادن به فقر در تمامی اشکال آن و در همه جا
- ۲- پایان دادن به گرسنگی، دستیابی به امنیت غذایی و بهبود تغذیه و ترویج کشاورزی پایدار
- ۳- زندگی سالم و ارتقای رفاه برای همگان و در تمامی سنین
- ۴- آموزش فراگیر و باکیفیت و ترویج فرصت‌های یادگیری مادام‌العمر برای همگان
- ۵- دستیابی به برابری جنسیتی و توانمندسازی تمامی زنان و دختران
- ۶- دسترسی و مدیریت پایدار آب و بهداشت برای همگان
- ۷- دسترسی به انرژی پاک و مقرون به صرفه و پایدار
- ۸- رشد اقتصادی پایدار و اشتغال و کار مناسب برای همه
- ۹- ارتقای زیرساخت‌های مقاوم، ارتقای فرایند صنعتی‌سازی فراگیر و پایدار و تقویت نوآوری
- ۱۰- کاهش نابرابری در داخل و میان کشورها
- ۱۱- شهرها و جوامع پایدار، ایمن و تاب‌آور

¹ American Chemical Society

² Green Chemistry: Theory and Practice

³ UN Millennium Development Goals

⁴ Sustainable Development Goals

- ۱۲- الگوی تولید و مصرف پایدار
- ۱۳- اقدام‌هایی جهت مبارزه با تغییر اقلیم و اثرهای آن
- ۱۴- استفاده پایدار از اقیانوس‌ها، دریاها و منابع دریایی
- ۱۵- ارتقای اکوسیستم و جلوگیری از نابودی تنوع زیستی، مدیریت پایدار جنگل‌ها، مبارزه با بیابان‌زایی و تغییر و متوقف‌سازی فرایند تخریب زمین
- ۱۶- ترویج جوامع فراگیر و صلح‌آمیز با هدف توسعه پایدار
- ۱۷- احیای مشارکت جهانی برای توسعه پایدار



شکل ۱. اهداف ۱۷ گانه SDG

اصطلاح شیمی پایدار در حدود همان دهه ۱۹۹۰ و به‌طور عمده در اروپا پدید آمد. در برخی از مقالاتی که به‌تازگی منتشر شده است به‌جای این که شیمی سبز یک شرط عملی و فنی لازم برای شیمی پایدار باشد، به‌عنوان مسیری جهت ارائه ابزار علمی برای شیمی پایدار توصیف شده است. به‌عبارتی، شیمی پایدار دامنه شیمی سبز را توسعه می‌بخشد تا ملاحظات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را نیز در بر بگیرد. در حالی که شیمی سبز دستیابی به این اهداف را از نظر فنی تضمین می‌کند (آناستاز و زیمرمن، ۲۰۱۸، ص. ۱۵۰).

اصول ۱۲ گانه شیمی سبز به‌صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است (آناستاز و ورنر، ۱۹۹۸). این اصول عبارت‌اند از:

اصل اول: پیشگیری از تولید فرآورده‌های بیهوده؛ بهتر است که مواد زاید در فرایندها تولید نشوند تا این که به فکر راهی برای از بین بردن آن‌ها باشیم.

اصل دوم: اقتصاد اتمی؛ با کاهش میزان تولید فراورده‌های بیهوده و مازاد، بازده واکنش‌ها را افزایش دهیم.

اصل سوم: طراحی و سنتز فراورده‌های شیمیایی کم‌خطرتر؛ شیمییدان‌ها در جایی که امکان دارد باید شیوه‌ای را طراحی کنند تا مواد مورد استفاده اثرهای سوء کمتری برای سلامت آدمی یا محیط زیست داشته باشند یا این که هیچ‌گونه خطری نداشته باشند.

اصل چهارم: طراحی مواد و فراورده‌های شیمیایی ایمن‌تر؛ فراورده‌های شیمیایی باید به گونه‌ای طراحی شوند که با وجود کاهش خطر سمیت، بهترین عملکرد را نیز داشته باشند.

اصل پنجم: بهره‌گیری از حلال‌ها و مواد کمکی سالم‌تر؛ بهره‌گیری از مواد کمکی مانند حلال‌ها و غیره باید تا جایی که امکان دارد به کمترین اندازه برسد و زمانی که این مواد به‌کار می‌روند از گونه‌های کم‌خطرتر استفاده شود.

اصل ششم: افزایش بازده انرژی؛ تا جایی که امکان دارد، روش‌های ساخت و جداسازی در فرآیندهای شیمیایی باید به گونه‌ای طراحی شوند که نیاز به انرژی را کاهش دهند.

اصل هفتم: بهره‌گیری از مواد اولیه تجدیدپذیر و قابل بازگردانی؛ واکنش‌های شیمیایی باید به گونه‌ای طراحی شوند که از مواد اولیه‌ای که قابلیت بازگردانی دارند بهره بگیریم.

اصل هشتم: کاهش مشتق‌های شیمیایی؛ مشتق گرفتن (استفاده از گروه‌های بازدارنده، پروتون‌دار کردن، پروتون‌زدایی، تغییرهای فیزیکی و شیمیایی گذرا) باید کاهش یابد و در صورت امکان حذف شوند، زیرا چنین مراحل نیازی به واکنشگرهای اضافی داشته و مواد زاید بیشتری تولید می‌شود.

اصل نهم: بهره‌گیری از کاتالیزورها؛ کاتالیزورها باید تا حد امکان گزینشی باشند. استفاده از واکنشگرهای کاتالیزوری به جای واکنشگرهای استوکیومتری ارجحیت دارد.

اصل دهم: طراحی برای تخریب؛ واکنش‌های شیمیایی باید به گونه‌ای طراحی شوند که فراورده‌های پایانی در طبیعت تخریب‌پذیر بوده و در محیط زیست باقی نمانند و هر چه سریع‌تر تجزیه شوند.

اصل یازدهم: تخمین زمان واقعی یک واکنش برای پیشگیری از آلودگی؛ پیگیری مداوم پیشرفت یک واکنش برای پی بردن به زمان تکمیل واکنش بسیار مهم است؛ زیرا پس از کامل شدن یک واکنش شیمیایی، فراورده‌های ناخواسته جانبی تولید می‌شوند.

اصل دوازدهم: کاهش احتمالی رویدادهای ناگوار؛ بهره‌گیری از واکنشگرها و حلال‌هایی که احتمال انفجار، آتش‌سوزی و رها شدن ناخواسته مواد شیمیایی را کاهش می‌دهند روشی برای کاهش احتمال رویدادهای شیمیایی ناخواسته است.



شکل ۲. اصول ۱۲ گانه شیمی سبز

اگرچه مقالات زیادی در مورد شیمی سبز و توسعه پایدار در سطح بین‌المللی و در کشور ما منتشر شده و این روند همچنان رو به افزایش است، در زمینه آموزش شیمی سبز کار کمتری صورت گرفته است. با توجه به تعداد زیاد جمعیت دانش‌آموزان و دانشجویان در کشورمان و پتانسیل بالای موجود برای کار در زمینه‌های زیست‌محیطی، به نظر می‌رسد که با سرمایه‌گذاری بر روی بخش آموزش شیمی سبز در مدارس و دانشگاه‌ها و سپس در سطحی وسیع‌تر در جامعه، بتوان به توسعه شیمی سبز در جامعه و به تبع آن به توسعه پایدار کمک شایانی نمود. در مقاله حاضر پس از بررسی چالش‌ها و فرصت‌هایی که در این زمینه وجود دارد، مروری بر برخی از جدیدترین روش‌های آموزشی به کار رفته در سطح بین‌المللی برای آموزش شیمی سبز خواهیم داشت.

چالش‌ها و فرصت‌ها

پیشرفت سریع علم و فناوری در نیمه دوم قرن بیستم منجر به توسعه اقتصادی قابل توجه و افزایش استانداردهای سطح زندگی در بخش‌های مختلف جهان شده است. با این حال، چنین توسعه اقتصادی باعث تخریب قابل توجهی در محیط زیست از جمله تغییرات واضح آب و هوایی، ظهور حفره‌های اوزون و انباشته شدن آلاینده‌ها در تمام نقاط بیوسفر نیز شده است. جهان امروز با چالش‌های بزرگی روبروست. واقعیت‌های

امروز جهان، حاکی از آن است که کشورها نمی‌توانند بدون توجه به مسائل توسعه پایدار به حیات سالم و بهینه خود ادامه دهند. کشور ما نیز از این قاعده مستثنی نیست. به همین دلیل تلاش‌های زیادی در چند دهه اخیر و در سطح بین‌المللی برای حرکت به سمت توسعه پایدار و مقابله با چالش‌های موجود و پیش رو انجام شده و این اقدامات همچنان ادامه دارند.

همان‌طور که در اهداف ۱۷ گانه توسعه پایدار مشهود است، یکی از محورهای اصلی این اهداف جنبه زیست‌محیطی آن‌ها است. سهم شیمی سبز و یا شیمی پایدار به‌عنوان علمی که با مسائل زیست‌محیطی ارتباطی تنگاتنگ دارد برای برخی از اهداف SDG، مانند هدف ۶: آب تمیز و بهداشتی؛ هدف ۷: انرژی مقرون به‌صرفه و تمیز؛ و هدف ۱۲: الگوی تولید و مصرف پایدار مشهود است. شیمی سبز و یا شیمی پایدار می‌تواند در زمینه اهداف دیگر، مانند هدف ۲: پایان دادن به گرسنگی از طریق شیمی زراعی؛ هدف ۳: زندگی سالم و ارتقای رفاه برای مردم از طریق فراورده‌ها و مواد دارویی مصرفی؛ هدف ۸: رشد اقتصادی پایدار و اشتغال و کار مناسب؛ هدف ۹: صنعت، نوآوری و زیرساخت از طریق توسعه تجاری مسئولانه؛ هدف ۱۱: شهرها و جوامع پایدار؛ هدف ۱۴: استفاده پایدار از اقیانوس‌ها، دریاها و منابع دریایی؛ هدف ۱۵: ارتقای اکوسیستم از طریق فناوری‌های کاهش آلودگی؛ و هدف ۱۳: اقداماتی جهت مبارزه با تغییر اقلیم و اثرهای آن از طریق فناوری‌های کربن‌زدایی نیز می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد. در سایر اهداف مانند هدف ۴: آموزش باکیفیت؛ و هدف ۵: برابری جنسیتی نیز شیمیدانان می‌توانند از طریق چگونگی آموزش دادن و سازماندهی کسب و کارها سهمیم باشند. بدون تردید موضوع و یا رشته‌های تحصیلی زیادی وجود ندارند که بتوانند چنین مشارکت گسترده‌ای همانند شیمی و شیمیدانان در SDGs داشته باشند (الیکس و زین، ۲۰۱۸، ص. A4).

در دهه‌های گذشته، آگاهی در مورد نیاز به حفاظت از محیط زیست افزایش یافته است، بنابراین توجه زیادی به فناوری‌های به اصطلاح "سبز" می‌شود. در واقع وظیفه اصلی شیمی سبز طراحی فراورده‌های شیمیایی و فرایندهایی است که باعث کاهش یا حذف کامل استفاده از مواد شیمیایی مضر و خطرناک می‌شود. اما این هدف بزرگ‌ترین نقص شیمی سبز نیز محسوب می‌شود. این نقص در زمان، هزینه‌ها و فقدان اطلاعات منعکس می‌گردد. به‌طور ویژه، تغییر از یک فراورده یا فرایند قدیمی به یک فراورده یا فرایند تازه "سبز" نیاز به زمان زیادی دارد. طراحی یا طراحی مجدد یک فراورده و فرایند جدید اغلب دشوار و گران است و همچنین در آن‌چه که ایمن در نظر گرفته می‌شود دیدگاه واحدی وجود ندارد (جیسول و دیگران، ۲۰۱۷، ص. ۱۲۷).

آموزش شیمی سبز و پایدار

امروزه یک تعهد قوی بین‌المللی نسبت به آموزش شیمی سبز وجود دارد (گارنر و دیگران، ۲۰۱۵، ص. ۷۶؛ راوچ، ۲۰۱۶، ص. ۱۶؛ کلوپاجلو، ۲۰۱۷، ص. ۱؛ کارپودیون رات و اسماعیل، ۲۰۱۵، ص. ۳۵). در واقع، به‌منظور مقابله با روند رو به رشد تخریب زمین و ارائه راه حل مناسب جهت رسیدن به توسعه پایدار، طی "اجلاس زمین" در سال ۱۹۹۲ سران کشورها گرد هم آمدند که حاصل این هم‌اندیشی و تدبیر، تدوین

برنامه قرن بیست و یکم توسعه و محیط زیست تحت عنوان سند "دستور کار ۲۱ سازمان ملل متحد"^۵ بود. این دستور کار منجر به این تصمیم شد که یونسکو یک دهه آموزش برای توسعه پایدار از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ برقرار کند. در این دستور کار آمده است که بدون اصلاحات و ابتکارهای مربوط در زمینه آموزش، توسعه پایداری رخ نخواهد داد. این موضوع در حالت کلی و در حالت ویژه برای شیمی با تمامی شاخه‌های فناوریانه و صنعتی آن صادق است. یونسکو مفهوم آموزش برای توسعه پایدار^۶ (ESD) را پیشنهاد کرد. ESD، تبدیل به یک الگوی پیشگام در سیاست‌های آموزشی بین‌المللی در دهه‌های گذشته شده است (یونسکو، ۲۰۰۵). هنوز هم در زمینه آموزش و به‌طور خاص در زمینه آموزش شیمی، بحث‌های زیادی وجود دارد که با بسیاری از نظریه‌های مختلف آموزش مرتبط گردیده است. شیمی به‌عنوان شاخه مهمی از علوم و به‌ویژه شیمی سبز با بسیاری از فرایندها، مسائل و مشکلات روزمره زندگی انسان‌ها در ارتباط است، از این رو سرمایه‌گذاری در آموزش و اجرای اصول شیمی سبز می‌تواند به ارتقای دانش عمومی جامعه، حفاظت از محیط زیست و منابع طبیعی و در نتیجه توسعه پایدار کمک کند.

به دلیل اهمیت ESD و نقش مهم شیمی برای هرگونه توسعه پایدار، آموزش شیمی سبز و پایدار^۷ (GSCE) به زمینه‌ای نوظهور در تحقیق و توسعه در آموزش شیمی و در تمام زمینه‌ها از آموزش در مدرسه و آموزش عالی، تا مراحل بالاتر توسعه حرفه‌ای و یادگیری مادام‌العمر تبدیل شده است. در مقالات مختلف تأکید شده است که GSCE برای ارائه دیدگاهی جدید و یک فلسفه متفاوت فعالیت و استفاده از شیمی در آموزش برای دانش‌آموزانی که شیمی را در مدارس مطالعه می‌کنند، دانشجویان دانشگاه‌ها یا برای آماده‌سازی نسل بعدی متخصصان شیمی مورد نیاز است تا همه با هم شهروندانی مسئول در زمینه صنعت و یا سیاست‌مدارانی مطلع را آموزش داده و یا اطلاع‌رسانی برای عموم مردم رخ دهد (الیکس و زین، ۲۰۱۸، ص. A4).

این انگیزه برای آموزش شیمی سبز منجر به توسعه بسیاری از مواد آموزشی (به‌ویژه در شیمی آلی (مورا و دیکس، ۲۰۱۶، ص. ۷)، کارگاه‌های آموزشی و شبکه‌های آموزشی (هاک و هاجینس، ۲۰۱۶، ص. ۵۸۸۹) گردید. این امر همچنین منجر به انتشار مجموعه‌ای رو به رشد از مقالاتی شد که به ارزیابی یادگیری دانشجویان و نتایج نگرشی از این برنامه درسی می‌پرداختند (بریچس، ۲۰۱۶، ص. ۱۰۵؛ کالینز، ۲۰۱۷، ص. ۹۳). هدف از آموزش شیمی سبز، آموختن مطالبی در مورد تصمیم‌گیری‌های شیمیایی و اجتماعی با استفاده از معیارهای چندبعدی شیمی سبز و با توجه به عوامل اجتماعی گسترده‌تری است که شیمی سبز و توسعه پایدار را به پیش می‌برند. روش‌های آموزشی شیمی سبز، اولین گام در ایجاد یک جامعه دانا و مطلع شیمی سبز متشکل از متخصصان، معلمان، دانش‌آموزان، دانشجویان و عموم مردم است (آرمسترانگ و دیگران، ۲۰۱۸، ص. ۶۱).

⁵ United Nations Agenda 21

⁶ Education for Sustainable Development

⁷ Green and Sustainable Chemistry education

۱- دوره‌های آموزشی و برنامه‌های درسی شیمی سبز

یاددهی این امر به فراگیرانی که در عین حال که عوامل اجتماعی گسترده‌تر را مد نظر دارند، اصول ۱۲ گانه شیمی سبز را به کار بندند موضوعی چالش‌انگیز است. برنامه‌های درسی که به‌تازگی در زمینه شیمی سبز مورد استفاده قرار گرفته‌اند به‌طور معمول به این ترتیب طراحی می‌شوند: (۱) از فراگیران (اعم از دانش آموزان، دانشجویان و سایر افراد) خواسته می‌شود که تنها یک جنبه از یک فرآیند شیمیایی را برای سبتر شدن بهبود بخشند، (۲) به فراگیران استفاده از معیارهای چندگانه برای ارزیابی همه‌جانبه سبز بودن یک فرآیند شیمیایی را آموزش می‌دهند، (۳) فراگیران را به چالش می‌کشاند تا عوامل اجتماعی بزرگ‌تر را در تجزیه و تحلیل خود وارد نموده و یافته‌های خود را به غیرمتخصصین منتقل کنند (هاک و هاچینس، ۲۰۱۶، ص. ۵۸۸۹)

۲- آشنا کردن فراگیران با پیچیدگی معیارهای شیمی سبز

کار در زمینه شیمی سبز شامل بهینه‌سازی بسیاری از اهداف متفاوت و نتایج مطلوب است. برخی از دوره‌های آموزشی مفاهیم و معیارهای شیمی سبز را معرفی می‌کنند تا فراگیران تجربه‌ای را در این تصمیم‌گیری‌ها به‌دست آورند. سپس از فراگیر خواسته می‌شود که تنها یک جنبه از سنتز و یا فرایند موجود را به‌منظور سبتر شدن بررسی کند. به‌عنوان مثال، برخی از دوره‌ها از فراگیران خواستند که سنتز سبتری از کمپلکس ورنر (گورون، پل و رودر، ۲۰۱۶، ص. ۶۳۹)، یک نانوذره (پالوری، ۲۰۱۵، ص. ۳۵۰) یا فرآورده‌های آلی (لی، گوری و سلتنبرگ، ۲۰۱۴، ص. ۱۰۰۱) را توسعه بخشند. پورسل^۸ و همکارانش از فراگیران خواستند تا فرضیه‌های مربوط به کارایی و خواص شیمی سبز فرآورده‌های تجاری را طراحی نموده و بیازمایند (پورسل و دیگران، ۲۰۱۶، ص. ۱۴۲۲). این دوره‌ها به‌طور کلی دانش‌آموزان یا دانشجویان تازه‌کار را به یک جنبه از تصمیم‌گیری سبز محدود می‌کنند.

دوره‌های دیگری نیز طراحی شده‌اند که فراگیران را با ارزیابی‌های چندبعدی شیمی سبز آشنا می‌کنند. به‌عنوان مثال، آیزن^۹ مواد دوره آموزشی را توسعه داد که فراگیران مقدماتی را از طریق ارزیابی فرآیندهای سنتزی که شامل اثرهای زیست‌محیطی، ایمنی و هزینه‌ها باشد، هدایت می‌کند (ایسن، ۲۰۱۲، ص. ۱۰۳). مارتیل-پرش^{۱۰} دوره‌ای را طراحی نمود که در آن دانشجویان از معیارهای چندگانه شیمی سبز برای مقایسه فرآیندهای سنتزی استفاده نموده و از مطالعه‌های موردی برای درک مفاهیم گسترده‌تر اجتماعی بهره می‌گیرند (مارتل پرش، ۲۰۱۴، ص. ۱۰۸۴). کندی^{۱۱} دوره‌ای در سطح بالاتر گزارش داد که دانشجویان را در معرض پیچیدگی ارزیابی سبز بودن یک واکنش از طریق مطالعه‌های موردی و مقالات موجود در مجله‌ها قرار می‌داد (کندی، ۲۰۱۶، ص. ۶۴۵). تمامی این دوره‌ها از مجموعه‌ای از تکالیف درسی برای پشتیبانی و ارزیابی استنتاج فراگیران از مفاهیم پیچیده شیمی سبز بهره برده‌اند.

⁸ Purcell

⁹ Eissen

¹⁰ Marteel-Parrish

¹¹ Kennedy

ماچادو^{۱۲} و همکارانش سه سیستم را ایجاد کردند (دایره سبز، ستاره سبز، ماتریس سبز) که به صورت جامع سبز بودن فرآیندهای شیمیایی را برای ارائه یک نقطه ورود قابل دسترس تر به پیچیدگی معیارهای شیمی سبز ارزیابی می‌کند. این سه سیستم، هر یک از اصول ۱۲ گانه را به منظور ارزیابی جامع بررسی می‌کنند. ارزیابی هر اصل، در دایره سبز به صورت دوگانه و در ستاره سبز به صورت ۳ سطحی است. این ارزیابی با یک SWOT (نقاط قوت، نقاط ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها) در ماتریس سبز تکمیل شده است. بررسی شش الگوریتم سیستم‌های متریک سبز نشان داد که ستاره سبز برای ارزیابی اولیه شیمی سبز مناسب است (ریبریو و ماچادو، ۲۰۱۳، ص. ۴۳۲).

۳- گنجاندن اهداف اجتماعی بزرگ‌تر در برنامه درسی شیمی سبز

به منظور پیاده‌سازی شیمی سبز در خارج از کلاس، فراگیران باید عوامل اجتماعی که فراتر از اصول شیمی سبز هستند را در نظر بگیرند. این امر به درگیر شدن بیشتر فراگیران با مطالب مربوطه کمک می‌کند. بسیاری از دوره‌ها عوامل اجتماعی محدودی مانند تجزیه و تحلیل هزینه را معرفی می‌کنند. اما برخی از دوره‌ها به منظور ارائه درک صحیح‌تری از تأثیرهای اجتماعی، بر روی یک منطقه جغرافیایی خاص تمرکز نموده یا فراگیران را به سوی مطالعه موردی سوق می‌دهند (هاک و هاجینس، ۲۰۱۶، ص. ۵۸۸۹). به عنوان مثال، دافی^{۱۳} و همکارانش دوره آموزشی را طراحی کردند که بر روی شیمی سبز، مدیریت منابع و پیچیدگی سیستم‌های زیست‌محیطی و انسانی در قطب شمال متمرکز است (دافی و دیگران، ۲۰۱۱، ص. ۹۷). در یک برنامه درسی دانشجویان معلمی در مالزی، کارپودوان^{۱۴} و همکارانش، مفاهیم شیمی سبز و توسعه پایدار را با تمرکز بر مسائل منطقه‌ای ادغام نموده‌اند (کارپودوان، اسماعیل و رات، ۲۰۱۲، ص. ۳۵) سایر مریدان تأثیرهای تاریخی، اجتماعی و زیست‌محیطی را بر روی فرآیندهای شیمیایی از طریق مطالعه‌های موردی یا مثال‌های زیست‌محیطی تاریخی، تعلیم می‌دهند (ویانا و پورتو، ۲۰۱۳، ص. ۱۶۳۲). در واقع ادغام شیمی سبز و توسعه پایدار به رشته‌های دیگر کمک خواهد کرد تا شیمی را برای مشکلات عدالت اجتماعی و توسعه رویکردهای انسانی در شیمی به کار برند (ساوتروم و تالانکور، ۲۰۱۴، ص. ۱۱۲۵؛ لاسکر، ۲۰۱۷، ص. ۹۸۳).

۴- ارزیابی دوره‌ها و برنامه درسی شیمی سبز

آموزش شیمی سبز، یک بخش افزوده شده کمابیش جدید به چشم‌انداز آموزش شیمی است. توسعه دوره‌های آموزشی و برنامه‌های درسی جدید باید ارتباط نزدیکی با ارزیابی آن‌ها داشته باشد تا در زمینه سنجش نحوه اجرا و موفقیت‌های به دست آمده کمک‌کننده باشد. داده‌های ارزیابی همواره کمک می‌کنند تا دوره‌های موجود را بهبود بخشیم و به برنامه‌های درسی جدید اعتبار می‌هند. محققان از طیفی گسترده و ترکیبی از ابزار کمی و کیفی برای ارزیابی دانش فراگیران (و برخی مواقع مریدان)، نگرش‌ها، انگیزه‌ها و ارزش‌ها، مهارت‌های آزمایشگاهی و ارتباط بین شیمی و شیمی سبز بهره می‌برند. این ابزار ارزیابی به دلیل توانایی‌شان برای سنجش مؤثر و کارآمد نتایج یادگیری مورد نظر انتخاب می‌گردند. برخی از انواع ارزیابی‌ها

¹² Machado

¹³ Duffy

¹⁴ Karpudewan

عبارت‌اند از: بررسی و آمارگیری، تکالیف دوره آموزشی، آزمون یا بررسی پیشرفت تحصیلی، مصاحبه‌ها، مشاهده‌ها و یا ارزیابی دانشکده‌ها و مدارس و سایر موارد (هاک و هاچینس، ۲۰۱۶، ص. ۵۸۸۹).

ارزیابی می‌تواند اشکال بسیار مختلفی - از ارزیابی‌های ساده دوره آموزشی تا مطالعه‌های پژوهشی و روش‌های ترکیبی پیچیده - داشته باشد. ابزار یا ابزارهای ارزیابی که انتخاب می‌شود بستگی به عوامل زیادی از جمله زمان، منابع و نوع پرسش‌هایی که می‌خواهد پاسخ دهد، دارد (گرن و دیگران، ۲۰۱۳، ص. ۶۹۴).

یکی از رایج‌ترین ابزارهای مورد استفاده برای ارزیابی نتایج شیمی سبز، ارزیابی با آیتم‌های لیکرت است که اغلب با یک بخش پاسخ اضافی آزاد همراه است. این آیتم‌ها به پژوهشگران اجازه می‌دهند تا درک فراگیران را در دانش محتوای شیمی و شیمی سبز، نگرش نسبت به علم و محیط زیست و اعتماد به نفس با استفاده از تکنیک‌های آزمایشگاهی و مهارت‌های ارتباطی بسنجند (هاک و هاچینس، ۲۰۱۶، ص. ۵۸۸۹). به‌عنوان مثال، اوبرت^{۱۵} و همکارانش قبل و پس از تکمیل یک آزمایشگاه علمی پایدار، به فراگیران پرسشنامه‌های کوتاه به سبک لیکرت دادند. نتایج به‌دست آمده دستاوردهای خودادراکی قابل توجه در علاقه فراگیران به یاداری و علم، اعتماد به نفس آن‌ها در توانایی‌شان برای انجام آزمایش‌ها در سطح بالاتر و دانش انرژی و شیمی سبز را نشان داد (اوبرت و دیگران، ۲۰۱۵، ص. ۶۳۱). یک مزیت آیتم‌های سبک لیکرت، سهولت نسبی تجزیه و تحلیل آن‌ها نسبت به سایر روش‌های ارزیابی است. با این حال این نوع پرسش نیازمند این است که پاسخ‌دهندگان خودشان دانش و یا مهارت‌های خود را ارزیابی کنند و محقق تنها می‌تواند آن‌چه را فراگیران باور دارند که در مورد یک موضوع خاص می‌دانند، به‌دست آورد. همان‌گونه که برخی محققان پی برده‌اند، خود ارزیابی‌های فراگیران همیشه مطابق با مجموعه مهارت واقعی آن‌ها نیست. بنابراین بسیاری از محققان نتایج نظرسنجی را با کارهای کلاسی فراگیران - به‌عنوان شاهدهی از تسلط آن‌ها بر مطالب تکمیل می‌کنند (هاک و هاچینس، ۲۰۱۶، ص. ۵۸۸۹). گرون^{۱۶} و همکارانش از ترکیبی از داده‌های آزمایشگاهی دانشجویان، نتایج عملی آزمایشگاهی و بررسی و آمارگیری برای ارزیابی نتایج آن‌ها از آزمایشگاه مقدماتی‌شان که در زمینه اصول شیمی سبز طراحی شده بود استفاده نمودند. این مجموعه داده‌های غنی این امکان را برای پژوهشگران فراهم نمود که نه تنها بر اساس گزارش خود دانشجویان، به مهارت‌های آزمایشگاهی آنان پی ببرند، بلکه دریابند که آن‌ها در حقیقت دقت و صحت بالایی در آزمایشگاه داشته‌اند (ساوتروم و تالانکور، ۲۰۱۴، ص. ۱۱۲۵).

برخی از محققان برای به‌دست آوردن ارزیابی عمیق‌تر و دقیق‌تر دانش و رفتار فراگیران، از ترکیبی از تکنیک‌های کمی و کیفی استفاده کرده‌اند. همان‌طور که کارهای کلاسی برای تکمیل داده‌های بررسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، برخی از محققان نیز از مصاحبه‌ها یا گروه‌های کانونی برای ارائه تصویری جامع‌تر از یادگیری و نگرش فراگیران استفاده نموده‌اند. کارپودوان و همکارانش از هر دو ابزار آزمون دستاورد شیمی^{۱۷} (CAT) و مصاحبه‌ها برای اندازه‌گیری یادگیری و نتایج انگیزشی دانشجویان پس از تکمیل یک برنامه درسی

¹⁵ Aubrecht

¹⁶ Gron

¹⁷ Chemistry Achievement test

شیمی سبز استفاده نمودند. CAT دستاوردهای آماری قابل توجهی در محتوای دانش شیمی دانشجویان پس از اتمام دوره نشان داد. مصاحبه‌های فردی نیز نشان دادند که دانشجویان از باور خودکارآمدی و باور ارزش کم به سمت باورهای بالا سوق داده شده‌اند. اهداف آن‌ها از یادگیری، به سمت جهت‌گیری تبحری تغییر یافته و علاقه آن‌ها به یادگیری شیمی بیشتر شده است (کارپودیون رات و اسماعیل، ۲۰۱۵، ص. ۳۵).

به‌طور مشابه، مندلر^{۱۸} و همکارانش از ترکیبی از ابزار کمی و کیفی برای ارزیابی تغییرهای ایجاد شده در زمینه نگرش و ادراک دانشجویان پس از تکمیل یک مدل و طرح تحلیلی شیمی با زمینه محیط زیستی استفاده نمودند. این نویسندگان رویکرد منحصر به فردی را اتخاذ نمودند و از فراگیران خواستند که چهار پرسش جالب راجع به شیمی را در یک زمینه زیست‌محیطی، قبل و بعد از تکمیل طرح مطرح کنند. نویسندگان پرسش‌های فراگیران را کدگذاری کردند و دریافتند که پس از اتمام طرح، آن‌ها راحت‌تر می‌توانند مسائل محیط زیست را به زندگی روزمره خود مرتبط ساخته، شیمی را به محیط زیست پیوند داده و دارای علاقه و انگیزه بیشتری برای اقدام به نفع محیط زیست خود باشند. همچنین این نویسندگان مصاحبه‌هایی را با زیرمجموعه‌ای از دانشجویان انجام دادند. پاسخ‌های مصاحبه از یافته‌های کمی قبلی آنان پشتیبانی نموده و همچنین نشان داد که پس از تکمیل طرح، احتمال زیادتری برای صحبت دانشجویان در مورد شیمی با خانواده‌ها و دوستان وجود داشت و تصمیم‌های مبتنی بر ملاحظه‌های زیست‌محیطی و آگاهی از محیط زیست بیشتر شده است (ماندلر و دیگران، ۲۰۱۲، ص. ۸۰).

انواع بسیار مختلفی از ابزارهای ارزیابی وجود دارد و کیفیت هر نوع آن می‌تواند متفاوت باشد. مهم این است که نتایج مورد نظر برنامه درسی، نوع ارزیابی مورد استفاده را هدایت نموده و بین تکمیل مجموعه داده‌ها و زمان و منابع مورد نیاز برای انجام ارزیابی و تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل شده تعادلی برقرار باشد. به‌طور اصولی، ارزیابی دوره‌ها و برنامه‌های درسی جدید شیمی سبز منجر به اعتباربخشی به داده‌ها شده و بهترین شیوه‌ها و تعلیم داده‌محور را به آموزش‌دهندگان ارائه می‌دهد (هاک و هاچینس، ۲۰۱۶، ص. ۵۸۸۹).

پرداختن به تمامی روش‌های برگزار شده و نحوه ارزیابی آن‌ها در مقاله حاضر امکان‌پذیر نیست. در این‌جا برای نمونه روشی که طی آن مارتیل-پریش دوره آموزشی شیمی سبز را اجرا نموده و نحوه ارزیابی توضیح داده می‌شود. او یک دوره آموزشی هفت جلسه‌ای برای دانشجویان رشته‌های شیمی و زیست‌شناسی که حداقل دو ترم شیمی عمومی و شیمی آلی را گذرانده باشند تدوین کرد. جلسه اول شامل بررسی تاریخی، بیان اصول و ابزار شیمی سبز و پایداری بود و از دانشجویان خواسته شد که به‌صورت روزانه تحقیقاتی بر روی موضوعات ارائه شده انجام دهند تا بیشتر با موضوع درگیر شوند و در کلاس به بحث در آن مورد بپردازند. در جلسه دوم، تمرکز اصلی بر روی برخی از کاربردهای شیمی سبز و پایدار در زندگی روزمره بود. فهرستی از موضوعات به دانشجویان داده شد و از آن‌ها خواسته شد موضوعی که برایشان جالب است را انتخاب نمایند، مقالات مربوطه را مرور و برای بحث آماده کنند. سپس باید در مورد آن موضوع در مدت زمان مشخصی بحث خود را ارائه می‌دادند. این بحث شامل ارائه رویکرد سنتی و سبزتر، اثرات سریع و بلندمدت و موانع اجرای

¹⁸ Mandler

روش جدید بود. ارائه این بحث ۱۵ درصد از نمره کل آن‌ها را تشکیل می‌داد. جلسه سوم به معرفی و کاربرد متریک‌های شیمی سبز اختصاص یافت. واکنش‌های آلی خاصی از دیدگاه شیمی سبز مطالعه شدند. دانشجویان یک واکنش آلی مانند جانشینی الکتروفیلی آروماتیک، جفت شدن سوزوکی و یا واکنش‌های دیگر را انتخاب نموده و جدولی ساختند که در آن به اقتصاد یا بهره‌وری اتم و اقتصاد اتمی تجربی و همچنین الزامات انرژی و ماده پرداخته شده بود. سپس با استفاده از مهارت‌های تحلیلی و کمی خود یک فرایند سنتی را با یک فرایند سبزتر مقایسه نموده و نتیجه را بیان کردند. این مرحله نیز ۱۵ درصد نمره کل ارزیابی را به خود اختصاص می‌داد. جلسه چهارم به ارزیابی مؤلفه‌های سیاسی، اجتماعی و شغلی مؤثر در موفقیت فرآورده‌ها و فرایندهای سبز اختصاص یافت. طراحی تکنولوژی‌های سنتز و شیمی سبز در چند شرکت معروف مانند DuPont ارائه شد. سپس از دانشجویان خواسته شد که به بررسی یک فرایند یا واکنش در بخش‌های پتروشیمی، دارویی و سایر صنایع مرتبط با شیمی بپردازند. از آن‌ها انتظار می‌رفت که به مشکل یا مشکلات مربوطه از نظر مواد مورد استفاده، هزینه‌ها، جنبه‌های زیست‌محیطی، سلامت و ایمنی و نقاط قوت و ضعف فرایند یا فرآورده سبزتر بپردازند. سپس اثرات نتایج به‌دست آمده بر اقتصاد، تولید و تصور عمومی را بررسی نموده و ارائه دهند. این ارائه ۲۰ درصد از نمره کل ارزیابی دانشجویان را شامل می‌شد. جلسه پنجم به بررسی شیمی سبز در کشورهای کمتر توسعه یافته می‌پرداخت. دانشجویان باید یک بروشور تبلیغاتی تهیه می‌کردند که تأکید آن بر روی ابتکارات شیمی سبز در کشورهای کمتر توسعه یافته باشد. موضوعات مورد بحث در بروشورها، باید میزان چالش‌های زیست‌محیطی (مانند تولید، آلودگی، سمیت) و تأثیر آن‌ها بر اقتصاد، سلامتی و جامعه را در حالت کلی نشان می‌داد. همچنین دانشجویان باید به چالش‌های اصلی مانند نقش سازمان‌های دولتی، فقدان آموزش و زیرساخت مناسب، فقدان آگاهی‌های لازم و مواردی از این قبیل می‌پرداختند. نتایج آن‌ها که در این بروشور آمده و ارائه می‌شد ۱۵ درصد از نمره کل دانشجویان را به خود اختصاص داد. جلسه ششم به بحث در مورد موضوعات نوظهور در شیمی سبز پرداخته شد و در جلسه آخر نیز دانشجویان باید یک طرح پیشنهادی کوچک و ابتکاری در مورد این که یک واکنش شیمیایی یا فرآورده‌ای که به‌طور معمول استفاده می‌شود را چگونه از نظر زیست‌محیطی سبزتر کنیم ارائه می‌داند که ۳۵ درصد نمره کل را به خود اختصاص می‌داد (مارتل پریش و نیوسیتی، ۲۰۱۷، ص. ۲۰۷).

۵- ایجاد یک جامعه شیمی سبز بزرگتر

رسیدن به اهداف بلند آموزش برای توسعه پایدار نیازمند یک جامعه شیمی سبز بزرگتر است که شامل دانش‌آموزان و دانشجویان، مربیان، متخصصان و در مقیاس بزرگتر عموم مردم است. به‌منظور ایجاد این جامعه، برنامه‌های بسیاری بر آموزش معلمان تمرکز دارد، زیرا که معلمان دانش و عقاید نسل‌های آینده را تحت تأثیر قرار می‌دهند (ایوانز، ۲۰۱۶، ص. ۶۵). حمایت عمومی از شیمی سبز نیاز به آموزش گسترده‌تر اجتماعی دارد. برخی از مربیان تلاش کرده‌اند تا از طریق توسعه مهارت‌های ارتباطی دانشجویان که می‌تواند برای ایجاد حمایت عمومی از سیاست شیمی سبز مورد استفاده قرار گیرد به این اهداف برسند. لوئیس^{۱۹} و

¹⁹ Luis

همکارانش توسعه یک شبکه وسیع ابتکارات آموزشی شیمی سبز و پایدار را برای عموم مردم و متخصصین در اسپانیا توصیف کردند (لوئیس و دیگران، ۲۰۱۵، ص. ۲۷۸). این نویسندگان در مورد چالش توسعه مطالب آموزشی برای مخاطبان مختلف و گرایش‌شان به حرکت آرام با زمان توضیح دادند. تجزیه و تحلیلی در مورد سیاست شیمی سبز در کالیفرنیا نشان داد که مشارکت عمومی باعث رونق گفتگو می‌شود که به نوبه خود از توسعه دانش اجتماعی قوی که برای رسیدن به اهداف شیمی سبز اهمیت دارد، پشتیبانی می‌کند. بنابراین آموزش به شیمی‌دان سبز در مورد چگونگی تسهیل بحث در بین گروه‌ها و درون گروه‌ها می‌تواند به ترویج گفتمان عمومی کمک کند. این مطالعه همچنین ارزش ارزیابی نتایج برنامه‌ای برای نشان دادن این که کدام رویکردها بیشترین احتمال تأثیرگذاری بر رفتار اجتماعی دارند را نشان می‌دهد (ایلس، ۲۰۱۳، ص. ۴۶۰).

نتیجه‌گیری

ایجاد تعادل در استفاده از منابع طبیعی، رشد اقتصادی و حفاظت از محیط زیست از طریق معرفی یک فرایند شیمی سبز که وظیفه آن طراحی فرایندهای شیمیایی و فرآورده‌های بی‌ضرر برای سلامت انسان و محیط زیست امکان‌پذیر است. مفهوم شیمی سبز بر اساس دوازده اصل استوار است که در مورد کاهش یا حذف مواد خطرناک یا مضر از سنتز، تولید و کاربرد فرآورده‌های شیمیایی بحث می‌نماید و بنابراین استفاده از مواد خطرناک برای سلامت انسان و محیط زیست کاهش می‌یابد یا حذف می‌شود. کشور ما به‌عنوان یک کشور در حال توسعه با چالش‌های زیست‌محیطی بسیاری مواجه است. آلودگی هوای کلان‌شهرها و شهرهای مختلف کشور به‌ویژه در فصول سرد سال، ریزگردها، تغییرات آب و هوایی، خشکسالی، آلودگی رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی، انباشته شدن زباله‌های پلاستیکی و تجدیدنپذیر، استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی، مصرف زیاد انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای برخی از این موارد هستند. از سوی دیگر نمی‌توان از روند رو به رشد صنعتی شدن و رشد اقتصادی کشور جلوگیری نمود. منابع نفت و گاز کشورمان ایجاب می‌کند که صنایع مربوطه گسترش بیشتری یابند. در این راستا و همگام با اهداف توسعه پایدار، باید به فناوری‌های سبز و شیمی سبز توجه بیشتری نمود. ایران نیز همانند بسیاری از کشورهای دیگر، به‌عنوان کشوری که در مسیر توسعه قرار دارد، دستیابی به شاخص‌های بین‌المللی در خصوص توسعه پایدار را در دستور کار نهادهای مختلف قرار داده است و این امر در برنامه ششم توسعه کشور نیز تعریف و تبیین شده است.

قبل از ورود به عرصه عمل در راستای توسعه، باید اطلاعات و دانش متخصصین امر و عامه مردم را در این زمینه افزایش داد. به نظر می‌رسد که در این شرایط آموزش در زمینه شیمی سبز در مدارس و دانشگاه‌ها و برگزاری دوره‌های آموزشی کوتاه مدت، کارگاه‌های آموزشی و سمینارهایی در این زمینه بتواند تا حد زیادی راهگشا باشد. همچنین با توجه به عینیت داشتن شیمی سبز در تمامی ابعاد زندگی روزمره، آموزش و آگاهی رساندن به عموم مردم در رسانه‌های جمعی نیز می‌تواند بسیار مفید باشد. مواد آموزشی قابل توجه و سرمایه‌گذاری گسترده‌ای از طرف جامعه بین‌المللی، به‌ویژه در زمینه توسعه پایدار ایجاد شده است. معلمان و مربیان از انواع مختلف روش‌های ارزیابی برای اندازه‌گیری و سنجش نحوه اجرا و نتایج

برنامه‌های خود استفاده می‌کنند که می‌تواند برای شناسایی شیوه‌های تعلیم مؤثر شیمی سبز مورد استفاده قرار گیرد. نکته مهم این‌جاست که فراگیران مهارت‌هایی را برای آموزش و تعامل با غیرمتخصصین در این امر آموخته و به‌نحوی آن‌ها را توسعه بخشند که بتوانند حمایت گسترده‌ای از اولویت‌های شیمی سبز داشته باشند. در نهایت برای این‌که شیمی سبز جزئی از یک حرکت اجتماعی گردد، نیاز داریم که یک جامعه شیمی سبز آگاه و مطلع متشکل از متخصصان، معلمان و مربیان، دانش‌آموزان، دانشجویان و عموم مردم داشته باشیم. حمایت‌های حقوقی و قانونی و تأمین منابع مالی برای آموزش شیمی سبز و اجرای پروژه‌های سبز از پیش‌نیازهای گام نهادن در این راستا است تا مسیر رسیدن به توسعه پایدار هموارتر گردد.

منابع

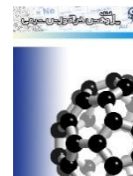
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: theory and practice*. New York: Oxford University.
- Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2018). The United Nations sustainability goals: how can sustainable chemistry contribute? *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 150–153.
- Armstrong, L. B., Rivas, M. C., Douskey, M. C., & Baranger, A. M. (2018). Teaching students the complexity of green chemistry and assessing growth in attitudes and understanding. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 61–67.
- Aubrecht, K. B., Padwa, L., Shen, X., & Bazargan, G. (2015). Development and implementation of a series of laboratory field trips for advanced high school students to connect chemistry to sustainability. *Journal of Chemical Education*, 92, 631–637.
- Bodner, G. M. (2017). The quadruple bottom line: the advantages of incorporating green chemistry into the undergraduate chemistry major. *Physical Science Reviews*, 1-13.
- Brundtland, C. G. (1987). *Our common future*. Oxford: World Commission on Environment and Development, OUP.
- Brydges, S. (2016). *Chemistry in context: integrating chemical information literacy, scientific writing, and contemporary issues in the first-year undergraduate curriculum*. ACS symposium series (pp 105-120). American Chemical Society.

- Collins, T. J. (2017). Review of the twenty-three year evolution of the first university course in green chemistry: teaching future leaders how to create sustainable societies. *Journal of Cleaner Production*, *140*, 93–110.
- Duffy, L. K., Godduhn, A., Dunlap, K., van Muelken, M., & Middlecamp, C. H. (2011). *Sustainability and chemistry: key concepts in an arctic-focused interdisciplinary course*. In Sustainability in the chemistry curriculum (pp 97-112). American Chemical Society.
- Eilks, I., & Zuin, V. G. (2018). Green and Sustainable Chemistry Education (GSCE): Lessons to be learnt for a safer, healthier and fairer world today and tomorrow. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *13*, A4–A6.
- Eissen, M. (2012). Sustainable production of chemicals – an educational perspective. *Chemistry Education Research and Practice*, *13*, 103–111.
- Evans, N. (Snowy), Ferreira, J-A., Davis, J., & Stevenson, R. B. (2016). Embedding EfS in teacher education through a multi-level systems approach: lessons from Queensland. *Australian Journal of Environmental Education*, *32*, 65–79.
- Garner, N., Huwer, J., Siol, A., Hempelmann, R., & Eilks, I. (2015). On the development of non-formal learning environments for secondary school students focusing on sustainability and green chemistry. In V. Zuin & L. Mammino (Eds.), *Worldwide trends in green chemistry education* (pp. 76-92). Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Gron, L. U., Bradley, S. B., McKenzie, J. R., Shinn, S. E., & Teague, M. W. (2013). How to recognize success and failure: practical assessment of an evolving, first-semester laboratory program using simple, outcome-based tools. *Journal of Chemical Education*, *90*, 694–699
- Guron, M., Paul, J. J., & Roeder, M. H. (2016). Incorporating sustainability and life cycle assessment into first-year inorganic chemistry major laboratories. *Journal of Chemical Education*, *93*, 639–644.

- Haack, J. A., & Hutchison, J. E. (2016). Green chemistry education: 25 Years of progress and 25 years ahead; *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4, 5889–5896.
- Iles, A. (2013). Greening chemistry: emerging epistemic political tensions in California and the United States. *Public Understanding of Science*, 22, 460–478.
- Jaiswal, Sh., Kapoor, D., Kumar, A., & Sharma, K. (2017). Applications of green chemistry. *International Journal on Cybernetics & Informatics (IJCI)*, 6(1/2), 127-133.
- Karpudewan, M., Roth, W-M., & Ismail, Z. (2015). The effects of “Green Chemistry” on secondary school students’ understanding and motivation. *Asia-Pacific Education Researcher*, 24, 35–43.
- Karpudewan, M., Ismail, Z., & Roth, W-M. (2012). Ensuring sustainability of tomorrow through green chemistry integrated with sustainable development concepts (SDCs). *Chemical Education Research and Practice*, 13, 120–127.
- Kennedy, S. A. (2016). Design of a dynamic undergraduate green chemistry course. *Journal of Chemical Education*, 93, 645–649.
- Kolopajlo, L. (2017). Green chemistry education in the Middle East. *Physical Science Reviews*, 2(6), 1-14.
- Lasker, G. A., Mellor, K. E., Mullins, M. L., Nesmith, S. M., & Simcox, N. J. (2017). Social and environmental justice in the chemistry classroom. *Journal of Chemical Education*, 94, 983–987.
- Lee, N. E., Gurney, R., & Soltzberg, L. (2014). Using green chemistry principles as a framework to incorporate research in to the organic laboratory curriculum. *Journal of Chemical Education*, 91, 1001–1008.
- Luis, S. V., Altava, B., Burguete, M. I., & García-Verdugo, E. (2015). Educational efforts in green and sustainable chemistry from the Spanish network in sustainable chemistry. In V. Zuin & L.

- Mammino (Eds.), *Worldwide trends in green chemistry education* (pp.278-307). Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Mandler, D., Mamlok-Naaman, R., Blonder, R., Yayon, M., & Hofstein, A. (2012). High- school chemistry teaching through environmentally oriented curricula. *Chemistry Education Research and Practice*, 13, 80–92.
- Marteel-Parrish, A., & Newcity, K. M. (2017). Highlights of the impacts of Green and sustainable chemistry on industry, academia and society in the USA. *Johnson Matthey Technogyl Review*, 61(3), 207-221.
- Marteel-Parrish, A. E. (2014). Teaching green and sustainable chemistry: a revised one- semester course based on inspirations and challenges. *Journal of Chemical Education*, 91, 1084–1086.
- Morra, B., & Dicks, A. P. (2016). Recent progress in green undergraduate organic laboratory design. *Green chemistry experiments in undergraduate laboratories*, 7–32.
- Paluri, S. L. A., Edwards, M. L., Lam, N. H., Williams, E. M., Meyerhoefer, A., & Pavel Sizemore, I. E. (2015). Introducing “Green” and “Nongreen” aspects of noble metal nanoparticle synthesis: an inquiry based laboratory experiment for chemistry and engineering students. *Journal of Chemical Education*, 92, 350–354.
- Purcell, S. C., Pande, P., Lin, Y., Rivera, E. J, Latisha, P. U., Smallwood, L. M., Kerstiens, G. A., Armstrong, L. B., Robak, M. T., Baranger, A. M., et al. (2016). Extraction and antibacterial properties of thyme leaf extracts: authentic practice of Green chemistry. *Journal of Chemical Education*, 93, 1422–1427.
- Rauch, F. (2015). Education for sustainable development and chemistry education. In V. Zuin & L. Mammino (Eds.), *Worldwide trends in green chemistry education* (pp. 16-26). Cambridge: Royal Society of Chemistry.

- Ribeiro, M. G. T. C., & Machado, A. A. S. C. (2013). Holistic metrics for assessment of the greenness of chemical reactions in the context of chemical education. *Journal of Chemical Education*, *90*, 432–439.
- Sjostrom, J., & Talanquer, V. (2014). Humanizing chemistry education: from simple contextualization to multifaceted problematization. *Journal of Chemical Education*, *91*, 1125–1131.
- United Nations Educational and Cultural Organization (UNESCO). United Nations decade of education for sustainable development (2005–2014): International implementation scheme. 2005. Document code: ED/DESD/2005/PI/01.
- Viana, H. E. B., & Porto, P. A., (2013). Thomas Midgley, J.R., and the development of new substances: a case study for chemical educators. *Journal of Chemical Education*, *90* (12), 1632–1638.
- Welton, T. (2018). UN Sustainable Development Goals: How can sustainable/green chemistry contribute? There can be more than one approach. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *13*, A7–A9.



Challenges and Opportunities for Green Chemistry Education and its Relation with Sustainable Development

Nasim Asghari Lalmi¹, Vahid Amani^{2*}

^{1,2} *Department of Chemistry, Farhangian University, Tehran, Iran*

Abstract

Due to the importance of green chemistry in protecting the environment, preventing the destruction of natural resources and creating a healthy and natural life, over the past several decades, it has emerged as an important component of chemistry education and is rapidly expanding. Various educational materials have been developed to teach the 12 principles of green chemistry to students in schools and universities around the world. However, there is international pressure on sustainable development that challenges educators and teachers of green chemistry to gauge the complexities of green chemistry and to consider social sustainability factors. In this review paper we describe the history of green chemistry, its teaching and its relation to sustainable development, the courses and programs that have been working to achieve these goals in recent years. In addition, some of the methods used to evaluate the learning outcomes of green chemistry courses are discussed.

Keywords: Green Chemistry, Chemistry Education, Sustainable Development, Sustainable Chemistry.

*Corresponding Author: (✉ v.amani@cfu.ac.ir)