دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

نقش آموزش‌های نوین شیمی سبز در تحقق توسعه پایدار

تهمینه بدر فتح الهی (نویسنده مسئول)[۱]، عباس بایگان[۲]

[۱] مدیر مرکز آموزش، پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران، کرج tfatollahi@yahoo.com

[۲] عضو هیات علمی و استادیار گروه پژوهشی بیوتکنولوژی صنعتی، پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران، کرج iranianresearch@gmail.com

چکیده

پس از انقلاب صنعتی به واسطه پیامدهای منفی زیست محیطی و اجتماعی ناشی از رویکردهای توسعه یک جانبه اقتصادی و تغییر نگرش بشر به مفهوم رشد و پیشرفت، واژه ی توسعه پایدار پدید آمده است. توسعه پایدار تلاش دارد که با نگاهی نو به توسعه، اشتباهات گذشته بشری را تکرار نکند و توسعه ای همه جانبه و متوازن را رقم بزند. از دهه ۱۹۹۰ جنبه‌هایی از توسعه انسانی و در ارتباط با محیط زیست و نسل‌های آینده مورد تاکید قرار گرفته و هدف توسعه انسانی پرورش قابلیت‌های انسانی محسوب می‌شود. توسعه پایدار به عنوان یک فرایند در حالی که لازمه بهبود و پیشرفت است، اساس بهبود وضعیت و رفع کاستی‌های اجتماعی و فرهنگی جوامع پیشرفته را فراهم می‌آورد و باید موتور محرکه پیشرفت متعادل، متناسب و هماهنگ اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی تمامی جوامع و به ویژه کشورهای در حال توسعه باشد. توسعه پایدار سعی دارد به پنج نیاز اساسی جوامع بشری یعنی تلفیق حفاظت و توسعه، تأمین نیازهای اولیه زیستی انسان، دست‌یابی به عدالت اجتماعی، خودمختاری و تنوع فرهنگی، حفاظت از یگانگی اکولوژیکی پاسخ مناسب ارایه دهد. جوامع مدرن امروزی، نقش محوری را برای آموزش شیمی در آموزش توسعه پایدار قائل هستند زیرا برجسته‌ترین زمینه برای یادگیری در مورد چگونگی گنجاندن شیمی در زندگی و جامعه ما و تأثیرات اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی آن است. در سال ۲۰۱۵ میلادی، سازمان ملل متحد یک فراخوان جهانی برای اقدام برای پایان دادن به فقر، حفاظت از کره زمین و اطمینان از برخورداری همه مردم از صلح و رفاه ایجاد کرد. این چارچوب، شامل ۱۷ هدف آرمانی، معروف به اهداف توسعه پایدار است که برخی از این اهداف، ارتباطی دو سویه با شیمی و صنایع شیمیایی دارند و به طور مستقیم و غیر مستقیم جایگاه علوم مرتبط با شیمی و مهندسی شیمی دیده می شود. همچنین نقش آموزش به عنوان برجسته‌ترین زمینه برای یادگیری در مورد چگونگی ورود علم شیمی در زندگی و جامعه، بسیار مهم می باشد. در میان رویکردهای مختلف آموزشی، رویکرد "جامعه محور" و چند بعدی به آموزش شیمی، دستیابی به این هدف را تسهیل می‌کند. برای اجرای آموزش شیمی در مسیر توسعه پایدار چهار مدل پیشنهاد شده که از میان آنها مدل "شیمی سبز" به عنوان موثرترین روش آموزش مفاهیم شیمی برای رسیدن به توسعه پایدار در جوامع پیشنهاد می شود. دوازده اصل شیمی سبز "قوانین طراحی" هستند تا به شیمیدانان کمک کنند تا به هدف پایداری دست یابند. برای تحقق پایداری نیازمند علوم میان رشته ای است و در این میان علوم شیمی و مهندسی شیمی نقش اساسی دارند که تفکر سیستمی، کل نگری و تعادل اکولوژیکی در توسعه پایدار باید مورد توجه قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی

آموزش های نوین، شیمی سبز، توسعه پایدار، تفکر سیستمی، جامعه محور.

۱. مقدمه

تعاریف متعددی از "توسعه پایدار"[1] وجود دارد و برای درک بهتر آن لازم است به جای یک مفهوم یا مدل دقیق آن را به صورت یک چشم‌انداز نوظهور و در حال تکامل نگریست. توسعه پایدار یک نماد ثابت نیست؛ بلکه فرایندی از تحول در رابطه با فرایندها و نظام‌های اجتماعی، اقتصادی و طبیعی است. در گفتمان پایداری، نه تنها تفوق یکی از این زمینه‌ها بر دیگری مردود شمرده می‌شود؛ بلکه یک نگرش مشترک مدنظر است که در آن کیفیت زندگی تمام ساکنین زمین (اعم از انسان و غیرانسان) نباید به پای منافع دیگران قربانی شود. در واقع مفهوم توسعه پایدار، یک نوع تلاش برای ترکیب مفاهیم در حال رشد حوزه‌هایی از موضوعات محیطی در کنار موضوعات اجتماعی - اقتصادی می‌باشد. توسعه پایدار در سال ۱۹۸۷میلادی در گزارش کمیسیون سازمان ملل متحد درباره محیط زیست و توسعه ظاهر شد. طبق تعریف این کمیسیون، توسعه پایدار عبارت است از "نوعی توسعه که نیازهای حال حاضر را بدون قربانی ساختن توانایی نسل‌های آینده در برآورده ساختن نیازهای خود، تامین می‌نماید". این مفهوم فرانسلی از توسعه پایدار در کنفرانس سازمان ملل متحد محیط زیست و توسعه در سال ۱۹۹۲ که در ریودوژانیرو تشکیل شد، مورد پذیرش قرار گرفت. در طول زمان این مفهوم تکامل بیشتری یافت تا شامل سه بعد اصلی توسعه پایدار گردد: توسعه اقتصادی، شمول اجتماعی و پایداری زیست محیطی [۱]. در طول قرن گذشته، کار مهندسان شیمی به تغییر جوامع و زندگی افراد کمک کرده است، از کودهای مصنوعی که به تغذیه جهان کمک کرده تا توسعه مواد جدید مورد استفاده در سوخت‌ها، الکترونیک، دستگاه‌های پزشکی و سایر محصولات. توانایی مهندسان شیمی برای اعمال تفکر در سطح سیستم از مقیاس‌های مولکولی تا مقیاس‌های تولیدی، آنها را به‌طور منحصربه‌فردی برای حل مشکلات امروزی، از جمله تغییرات آب و هوا و استفاده بیش از حد از منابع توسط جمعیت رو به رشد، انتخاب می‌کند. صنایع شیمیایی به طور مداوم برای بهبود سیستم، فرایندها و فناوری های فعلی نوآوری می‌کنند و به طور کلی، مهندسی شیمی طراحی سیستم هایی است که عوامل شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی را برای ایجاد مواد و محصولات به نفع جامعه در مقیاس‌های مختلف از مولکولی تا ماکروسکوپی یکپارچه می‌کند. کار مهندسان شیمی، جوامع و زندگی مردم در سراسر جهان را تحت تاثیر قرار داده است؛ زیرا تحولات شیمیایی، هسته اصلی فناوری‌هایی است که جامعه مدرن را پشتیبانی می‌کند.

۲. پیشینه تاریخی توسعه پایدار

توسعه مبتنی بر رشد اقتصادی تا دهه۱۹۷۰ میلادی گفتمان مسلط بود تا اینکه کاملا آشکار گردید که مصرف گرایی و رشد شتابان اقتصادی فشار عظیمی بر محیط زیست وارد ساخته و نتیجه آن فضای زندگی ناکافی و آلوده، گسترش فقر و بیماری بوده است. در عین حال بهره برداری بیش از حد از منابع طبیعی به ویژه ذخایر مواد خام و سوخت‌های فسیلی، همگان را متوجه وضع خطیر نیازهای نسل آینده و لزوم استفاده عاقلانه تر از منابع محدود طبیعی ساخت. عدم توازن میان توسعه انسانی و محدودیت‌های زیست بومی، مشکلات فزاینده زیست محیطی و پیامدهای وخیم آنها را خاطر نشان می سازد. اسباب اصلی آلودگی زیست محیطی عبارت اند از:

۱. **سبب‌های انسانی** (رشد اقتصادی، توسعه فناورانه، توسعه زیرساختارهای حمل و نقل، رشد جمعیت، توسعه شهرها، گردشگری انبوه)

۲. **سبب‌های طبیعی** (فرسایش خاک، سیلاب‌ها، زمین لرزه‌ها، آتشفشانی‌ها، آتش سوزی‌ها، خشک سالی و طوفان)

۳. **سبب های مختلف** (هوشیاری ناکافی نسبت به زیست بوم، عدم توازن میان توسعه و زیست بوم‌های طبیعی و فرصت‌های محدود علمی، مادی، سازمانی و فناورانه برای جامعه) [۲].

در ابتدای هزاره سوم میلادی، رهبران جهان در مقر سازمان ملل متحد گرد هم آمدند تا بینش گسترده‌ای را برای مبارزه با فقر در ابعاد متنوع آن شکل دهند. این بینش سازمانی به صورت هشت هدف توسعه هزاره (MDG)[2] ترجمه شد که تا به امروز به عنوان چارچوب کاری مرجع باقی مانده است. اهداف هشت‌گانه یاد شده عبارت اند از :

۱. از بین بردن فقر شدید

۲. دسترسی همگان به آموزش ابتدایی

---

1 . Sustainable Development
2 . Millennium Development Goals

۳. ارتقای برابری جنسیتی و توانمندسازی زنان
۴. کاهش میزان مرگ و میر کودکان
۵. ارتقای سلامت مادران
۶. مبارزه با بیماری های واگیردار
۷. تضمین پایداری زیست محیطی
۸. توسعه مشارکت جهانی [۳].

۱.۲. پیشینه ورود توسعه پایدار در آموزش شیمی

در طول سال های متمادی چندین راه حل نوآورانه برای ورود موضوع توسعه پایدار به آموزش شیمی و مهندسی شیمی استفاده شده است. این روش ها گاهی رویکردهای دانشگاه محور، معلم محور و دانشجو محور داشته و گاهی نیز بر برنامه درسی متمرکز بوده اند. در رویکردهای "دانشگاه محور"، سیاست های پایداری مشخصی ایجاد شده و در تمام فعالیت های درسی دانشگاه ادغام شده است [۴]. به عنوان مثال، دانشگاه ژوهانسبورگ یک استراتژی مدیریت نوآورانه را به کار گرفت که شامل برنامه ریزی منظم، تدوین خط مشی، طوفان فکری و جلسات متعدد با تمرکز بر اجرای اهداف پایداری در سراسر دانشگاه بود [۵]. اگرچه این مدل ایده آل است، اما ورود چنین رویکردی به فعالیت های دانشجو در کلاس درس بدون آموزش معلم و منابع مناسب دشوار است، از این رو رویکرد "معلم محور" بیشتر از رویکردهای دیگر مورد توجه قرار گرفت. توسعه یک برنامه تحصیلی جدید، دوره آموزشی کوتاه مدت و یا آزمایش های آزمایشگاهی، ممکن است زمان بر و پرهزینه باشد به ویژه در کشورهای کم درآمد و متوسط، به همین دلیل رویکردهای "دانشجو محور" بر آنچه دانشجو انجام می‌دهد تمرکز می‌کند، راهی آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر برای ورود پایداری در آموزش های مهندسی است و توانسته جایگزین رویکرد معلم محور گردد. روش‌های یادگیری مبتنی بر تحقیق، پرکاربردترین تکنیک برای ورود پایداری به هر موضوعی هستند. آنها یادگیری فعال را تشویق می کنند، زیرا فر اگیر مالکیت یادگیری خود را در اختیار می‌گیرد و از این طریق، توسعه مهارت های تفکر سطح بالاتر را که در آموزش پایدار ضروری هستند؛ ترویج می‌کنند [۶]. نمونه رایج یادگیری مبتنی بر تحقیق که در آموزش مهندسی شیمی به کار می‌رود، ارایه پروژه‌های تحقیقاتی است. پروژه‌های تحقیقاتی فردی یا تیمی به فراگیران کمک می‌کنند تا شایستگی‌های مهندسی کلیدی را توسعه دهند. بنابراین، پروژه‌های تحقیقاتی پل مهمی را بین دانشگاه و بازار کار مهندسین شیمی بنا می کنند. اگرچه ادغام پایداری در آموزش مهندسی مهم است، اما نیاز است که مربی درگیر بازتاب آموزشی باشد. اهداف بازتاب آموزشی باید شامل تعیین سطح درک یادگیرنده و مفاهیم پایداری و عملکردهایی باشد که یادگیرنده به خاطر بسپارد. پاسخ‌های دانشجویان در فعالیت‌های آنلاین می‌تواند منبع ارزشمندی برای تأمل آموزشی باشد. به عنوان مثال، پایداری جنبه های زیست محیطی، اجتماعی یا فرهنگی، ذی نفعان، سیاسی، اقتصادی و علمی و چند رشته ای را در بر می گیرد. از طریق تجزیه و تحلیل بر روی پاسخ‌های دانشجویان و گروه‌بندی کلماتی که آنها استفاده می‌کنند به شش دسته کمک می‌کند تا مشخص شود که آیا دانشجویان ماهیت بین‌رشته‌ای پایداری را درک کرده اند [۷].

۳. اهداف توسعه پایدار

در سپتامبر ۲۰۱۵ میلادی، سران کشورهای عضو سازمان ملل متحد موافقت کردند که با پذیرش قطعنامه ۲۰۳۰، دنیا را بر مسیر توسعه پایدار قرار دهند. این برنامه شامل ۱۷ هدف توسعه پایدار[۳] (SDGs) است که اهداف کمی را برای تمامی ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی توسعه پایدار تعیین کرده و تحقق آن را تا سال ۲۰۳۰ میلادی در نظر دارند. این اهداف ۱۷ گانه عبارت اند از:

۱. پایان دادن به فقر در تمامی اشکال آن و در سراسر نقاط دنیا
۲. پایان بخشیدن به گرسنگی، تحقق امنیت غذایی، بهبود تغذیه و توسعه کشاورزی پایدار
۳. تضمین زندگی سالم و ارتقای رفاه برای تمامی سنین
۴. تضمین آموزش و تحصیلات همه شمول و برابر و ارتقای فرصت‌های آموزشی مادام العمر برای همه
۵. تحقق برابری جنسیتی و توان بخشی به تمامی زنان و دختران

3. Sustainable Development Goals

۶. تضمین دسترسی پایدار به آب و بهداشت برای همه
۷. تضمین دسترسی به انرژی ارزان، قابل اعتماد، پایدار و نوین برای همه
۸. ارتقای رشد اقتصادی پایدار و همه شمول، اشتغال کامل و مولد و کار شرافتمندانه برای همه
۹. ساخت زیرساخت‌های انعطاف پذیر، صنعتی سازی پایدار و تقویت نوآوری
۱۰. کاهش نابرابری میان و درون کشورها
۱۱. پایدارسازی و ایمن سازی شهرها و سکونتگاه‌های انسانی
۱۲. تضمین الگوهای مصرف و تولید پایدار
۱۳. اتخاذ اقدامات فوری برای مبارزه با تغییرات آب و هوایی و اثرات آن
۱۴. محافظت و استفاده پایدار از اقیانوس‌ها، دریاها و منابع دریایی جهت توسعه پایدار
۱۵. حفاظت، ابقا و ارتقای استفاده پایدار از زیست بوم‌های زمینی، مدیریت پایدار جنگل‌ها و متوقف سازی فرسایش زمین
۱۶. ارتقای جوامع صلح آمیز و غیرانحصاری برای توسعه پایدار، دسترسی به عدالت برای همه، نهادهای پاسخگو و غیرانحصاری
۱۷. تقویت وسایل پیاده سازی و احیای مشارکت جهانی در راستای توسعه پایدار [۸].

۴. نقش شیمی در توسعه پایدار

جوامع مدرن امروزی، نقش محوری را برای آموزش شیمی در آموزش توسعه پایدار[۴] (ESD) قائل هستند. با این حال، درک لازم از شیمی و فناوری‌های منتسب به تحولات شیمیایی و صنعتی برای توجیه نقش آموزش شیمی در ESD کافی نیست. وقتی مفاهیم آموزشی مدرن شیمی مدارس را در نظر بگیریم، به سرعت متوجه می‌شویم که یادگیری تئوری‌ها و حقایق شیمیایی به تنهایی نمی‌تواند توانایی دانش‌آموزان و دانشجویان را برای رویارویی با مسائل توسعه پایدار به سطح لازم برساند. با این حال، افزودن رویکرد جامعه محور و چند بعدی به آموزش شیمی، دستیابی به این هدف را تسهیل می‌کند [۹]. در این صورت، آموزش به برجسته‌ترین زمینه برای یادگیری در مورد چگونگی گنجاندن شیمی در زندگی و جامعه ما، از جمله تأثیرات اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی آن تبدیل می‌شود [۱۰]. در سال ۲۰۱۵ میلادی، سازمان ملل متحد یک فراخوان جهانی برای اقدام برای پایان دادن به فقر، حفاظت از کره زمین و اطمینان از برخورداری همه مردم از صلح و رفاه ایجاد کرد. این چارچوب، شامل ۱۷ هدف آرمانی، معروف به اهداف توسعه پایدار است و توسط دولت ها، صنایع مختلف و بسیاری از سازمان های دیگر در سراسر جهان پذیرفته شده است. برخی از این اهداف، ارتباطی دو سویه با شیمی و صنایع شیمیایی دارند. در ادامه ارتباط این اهداف و صنایع شیمیایی را بررسی می‌کنیم [۱۱].

۱.۴. هدف دوم توسعه پایدار (ریشه کن شدن فقر و گرسنگی)

نمونه‌های زیادی وجود دارند و نشان می‌دهند که شیمی می‌تواند به تحقق هدف دوم توسعه پایدار، یعنی ریشه کن شدن فقر و گرسنگی کمک کند. پیشرفت‌های شیمی به محافظت بهتر از گیاهان در برابر هجوم آفات، بهبود روش‌های تولید و توزیع غذا، افزایش ماندگاری مواد غذایی از طریق پیشرفت در بسته‌بندی و حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی کمک می‌کند. بذرهای پرمحصول در ترکیب با رویکردهای جدید کوددهی، تولید غذا را افزایش داده و کاهش فرسایش خاک را در پی دارد. غنی سازی مواد غذایی نیز سوء تغذیه در مناطقی را که دسترسی محدود به غذاهای سالم دارند؛ کاهش می‌دهد. فن‌آوری‌های تولید آمونیاک پایدار، بازیافت فسفات و استفاده مجدد و عوامل محافظت از محصولات هدفمند، نمونه‌های دیگری از فرصت‌های مهم برای شیمی و صنایع شیمیایی برای مشارکت مثبت هستند. نمونه هایی دیگری از شیمی و فن آوری های شیمیایی برای رسیدن به این هدف عبارت اند از:

- حفاظت از خشکسالی برای محصولات
- بازیابی فسفات و استفاده مجدد
- عوامل حفاظت از محصولات هدفمند
- بسته بندی فعال برای جلوگیری از فساد مواد غذایی

4. Education for Sustainable Development

۲.۴. هدف سوم توسعه پایدار (سلامت و رفاه)

شیمی کلید دستیابی به هدف سلامت و تندرستی است. پیشرفت‌ها و فناوری‌های پزشکی که از طریق پیشرفت‌های شیمی امکان‌پذیر شده‌اند؛ درک عمیق‌تری از چگونگی تأثیر بیماری و مواد شیمیایی خطرناک در غذا، آب و محیط بر سلامت انسان ارائه می‌دهند. شیمی نقش مهمی در تشخیص پزشکی و توسعه دارو ایفا می‌کند و افراد را قادر می‌سازد تا زندگی طولانی‌تر و سالم‌تری داشته باشند. همچنین راه حل‌های جدیدی را برای کاهش آلودگی و اثرات آن بر سلامت انسان ارائه می دهد. استفاده از شیمی سبز و پایدار، می‌تواند به حذف یا کاهش آلودگی های شیمیایی خطرناک کمک کند.

۳.۴. هدف ششم توسعه پایدار (تامین آب پاک و بهداشت فردی)

شیمیدانان از طرق مختلف به جامعه کمک خواهند کرد تا به هدف آب پاک و بهداشت فردی دست یابد. روش‌های جدید تصفیه آب و فرآیندهای نمک زدایی کم هزینه، برای دستیابی به دسترسی جهانی به آب آشامیدنی سالم و مقرون به صرفه کمک خواهد کرد. کیفیت آب از طریق به کارگیری فناوری‌های سبزتر و استراتژی‌های پیشگیری از آلودگی بهبود خواهد یافت. همچنین برای یافتن روش‌های جدید جداسازی کم انرژی و با راندمان بالا برای حذف فلزات و ریزآلاینده‌ها، تحقیقات شیمیایی توسط شیمیدان‌ها لازم است. صنایع شیمیایی می‌تواند شیوه‌های تولیدی را انتخاب کند که مصرف آب و شیوه‌های مدیریت زباله را به حداقل برساند و از آلودگی جلوگیری کند. مسلما مشارکت‌های بین‌المللی برای اطمینان از اینکه فناوری‌های جدید و استراتژی‌های مدیریت آب به نفع کل سیاره زمین خواهد بود؛ بسیار مهم است. از جمله نمونه‌های دیگر از شیمی و فن‌آوری‌های شیمیایی برای رسیدن به این هدف، فرآیندهای نمک زدایی با کمک انرژی خورشیدی و حذف فلزات سنگین هستند.

۴.۴. هدف هفتم توسعه پایدار (انرژی مقرون به صرفه و پاک)

شیمی از طریق توسعه مواد جدید برای انرژی‌های تجدیدپذیر، با بهره وری بیشتر انرژی در صنایع فرآوری شیمیایی و با پیشرفت فناوری های سوخت پاک تر، به تحقق هدف انرژی مقرون به صرفه و پاک کمک می‌کند. یک مسئله اصلی در تولید انرژی تجدیدپذیر، استفاده از مواد کمیاب و یا خطرناک برای تبدیل انرژی خورشیدی و باد و ذخیره آنها است. محققان شیمی در حال کار بر روی توسعه مواد پیشرفته برای تولید انرژی های تجدیدپذیر، از جمله فتوولتائیک، توربین‌های بادی، جمع آوری انرژی حرارتی، باتری‌ها، ابرخازن‌ها و راه حل‌های ذخیره انرژی هستند. صنایع فرآوری شیمیایی می‌توانند کارایی تولید را از طریق کاتالیزورهای جدید، طراحی فرآیند بهینه و فرآیندهای جداسازی جدید بهبود بخشند.

۵.۴. هدف نهم توسعه پایدار (صنایع، نوآوری و زیرساخت)

دستیابی به اهداف توسعه پایدار به مقدار بی سابقه ای از تحقیقات و نوآوری شیمی نیاز دارد. حداقل سه جنبه از هدف صنایع، نوآوری و زیرساخت وجود دارد که در آن متخصصان شیمی می‌توانند سهم قابل توجهی داشته باشند. در واقع صنایع فرآوری شیمیایی می‌توانند زیرساخت‌ها و تأسیسات تولید را برای پایدارتر شدن ارتقا دهند و مواد و پوشش‌های پیشرفته نوآورانه‌ای را طراحی، سنتز و تولید کند که زیرساخت ها را پایدارتر و انعطاف پذیرتر کند. نمونه‌هایی از شیمی و فن‌آوری‌های شیمیایی برای رسیدن به این هدف عبارت اند از:

- تحقیق و توسعه شیمی پایدار
- پوشش های سبز
- انجام تحقیقات برای تغییر علم جداسازی
- پیش بینی جوایز برای پیشرفت در علم جداسازی

۶.۴. هدف دوازدهم توسعه پایدار (مصرف و تولید مسئولانه)

مصرف و تولید مسئولانه، یک هدف کلیدی برای جامعه شیمی است. محصولات شیمیایی به بهبود کیفیت و کارایی فرآیندهای تولید در طیف گسترده‌ای از صنایع کمک می‌کنند و تلاش‌های مدیریت آب و بهره‌وری انرژی را بهبود می‌بخشند. از بسته بندی مواد غذایی و

افزودنی‌ها، جلوگیری از هدر رفتن و ضایعات مواد غذایی، تا نوآوری در سیستم‌های مدیریت زباله، صنعت فرآوری شیمیایی به کاهش اثرات چرخه عمر مصرف کمک می‌کند. صنعت فرآوری شیمیایی می‌تواند با کمک به گذار به اقتصاد دایره‌ای و فعال کردن آن در صنایع پایین دستی و همچنین با بازیافت و استفاده مجدد از مولکول‌ها برای بستن حلقه تولید مواد شیمیایی فراتر رود. دستیابی به یک اقتصاد رشد باثبات که تفکر چرخه زندگی را ترویج می‌کند؛ مستلزم توسعه مدل‌ها، محصولات و راه‌حل‌های کسب‌وکار جدید است که فراتر از مفهوم استفاده از یک محصول خواهد رفت. برای تحقق این امر، ما باید چالش‌های کاهش انرژی و افزایش استفاده از مواد اولیه زیستی و جایگزین را برطرف کنیم. نمونه هایی از شیمی و فن آوری های شیمیایی برای رسیدن به این هدف عبارت اند از:

- بازیافت مواد
- مواد اولیه زیستی
- سوخت های زیستی نسل دوم

۷.۴. هدف سیزدهم توسعه پایدار (اقدام اقلیمی)

پیشرفت در شیمی اتمسفر برای درک ما از علل تغییرات آب و هوای جهانی و توانایی ما برای پیش‌بینی میزان و تأثیرات تغییرات آب و هوا بسیار مهم است. تحقیقات شیمیایی برای کاهش و سازگاری با تغییرات آب و هوایی ضروری خواهد بود. مواد پیشرفته برای انرژی‌های تجدیدپذیر، درمان‌های بهبود یافته برای بیماری‌ها، دانه‌ها و کودهای پرمحصول برای افزایش تولید مواد غذایی به مبارزه با تغییرات آب و هوایی کمک می‌کند. صنعت شیمیایی با تلاش برای تغییر، به تولید مواد شیمیایی با انتشار کربن کم و با توسعه محصولاتی که نقش مهمی در توانمندسازی سایر بخش‌ها برای کاهش ردپای کربن خود دارند، به سمت اقتصاد کم کربن حرکت می‌کند. تحقیق و نوآوری برای کمک به صنعت برای حرکت به سمت مواد اولیه دایره‌ای و کم انتشار کربن، ارائه راه‌حل‌های مواد و انرژی به مشتریان پایین دستی خود با استفاده از کربن حاصل از زباله، زیست توده و CO_2 و CO از گازهای دودکش ضروری است. شرکت‌های شیمیایی می‌توانند برای ایجاد انعطاف‌پذیری و ظرفیت تطبیقی برای این بخش و زنجیره تامین آن در پاسخ به تأثیرات تغییرات آب و هوایی، همکاری کنند. آنها همچنین می‌توانند نقش کلیدی در توسعه راه حل‌هایی ایفا کنند که سایر بخش‌ها را قادر می‌سازد تا انعطاف پذیری خود را در برابر خطرات مرتبط با آب و هوا تقویت کنند [۱۲].

۵. آموزش مهندسان شیمی در مسیر توسعه پایدار

تمرکز اصلی آموزش توسعه پایدار بر این است که نسل جوان را برای تبدیل شدن به شهروندانی مسئول در آینده آماده کند. دانش آموزان و دانشجویان باید بتوانند به شکل‌گیری آینده به شیوه‌ای پایدار کمک کنند. آنها باید بیاموزند که بر اساس مفهوم توسعه پایدار، هم در قبال خود و هم برای نسل‌های آینده مسئولند. اهداف اصلی هر تلاش آموزشی رسمی، توسعه توانایی‌ها برای شناخت و بیان علایق خود در بین جامعه و مشارکت در جامعه به عنوان شهروندان مسئول است. آموزش شیمی بر اساس اصول ESD در همه سطوح باید با تأثیرات بر اکولوژی، اقتصاد و جامعه هماهنگ باشد و بر تغییرات واقعی در جامعه در سطوح محلی، منطقه ای و جهانی تمرکز کند [۱۳].

تفکر سیستمی مقیاس‌ها، مرزها و چارچوب‌های زمانی را در مورد شیمی گسترش می‌دهد. در آموزش شیمی سنتی، از رویکرد تقلیل‌گرایانه برای هدایت درک شیمی در مقیاس‌های مختلف از اتم تا لیوان، در یک هود و در بازه‌های زمانی کوتاه استفاده می‌شود. این رویکرد، زمانی معنادار است که به دنبال درک چگونگی عملکرد جهان در سطح اتمی باشیم. در واقع این رویکرد می‌تواند محدودکننده باشد؛ زیرا به مخاطب نمی‌گوید که چگونه شیمی بر جهان اطراف آنها تأثیر می‌گذارد؟ مواد از کجا می‌آیند و به کجا ختم می‌شوند؟ فراوانی نسبی آنها چقدر است؟ هنگام استفاده از این مواد چه تأثیرات اجتماعی در سراسر زنجیره تأمین وجود دارد؟ تأثیر شیمی بر جامعه محلی و جهان چیست؟ البته پاسخ به همه این سوالات در هنگام آموزش مفاهیم پایه شیمی در دوره‌های مختلف شیمی امکان‌پذیر نیست. هدف این است که فراگیر از این مسائل آگاه شده و به پاسخ آنها فکرکند. در واقع بهبود کلی در پایداری شیمیایی یا فرآیندی محدود است. با استفاده از یک لنز بازتر و با تفکر چرخه زندگی، بهبودها در یک مرحله از چرخه زندگی را می‌توان با افزایش یا کاهش تأثیرات در مرحله دیگر سنجید. تفکر سیستمی می‌تواند عدسی را برای در نظر گرفتن به هم پیوستگی عناصر در یک سیستم، ظهور ویژگی‌ها از یک سیستم، مرزهای مورد استفاده و نحوه تغییر سیستم ها در طول زمان را بیشتر باز کند [۱۴].

۶. مدل های آموزش شیمی در مسیر توسعه پایدار

افزودن موضوعات توسعه پایدار به برنامه درسی شیمی ایده جدیدی نیست. در دو تا سه دهه گذشته، بسیاری از دانش آموزان در سراسر جهان در آموزش شیمی با مسائلی مانند تمیز نگه داشتن منابع آب، مقابله با اثرات باران اسیدی، جلوگیری از سوراخ شدن لایه اوزون و انرژی تجدید پذیر مواجه شده اند. منابع انرژی و مواد خام این موضوعات و موضوعات دیگر به طور گسترده به عنوان محتوا در بسیاری از برنامه های درسی شیمی در سراسر جهان پیاده سازی شده اند. در هر صورت، نحوه برخورد با مسائل توسعه پایدار می تواند ظاهری کاملاً متفاوت داشته باشد و از الگوهای کاملاً متفاوتی پیروی کند. اگرچه آنها تا حدی هم پوشانی دارند و می‌توانند به روش‌های مختلف ادغام شوند، اما می توان چهار مدل را در آموزش رسمی شیمی پیشنهاد کرد:

۱.۶. مدل اول - شیمی سبز [۵]

اولین مدل، فلسفه شیمی سبز را برای رسیدگی به مواد شیمیایی و روش‌های کار آزمایشگاهی در کلاس‌های شیمی به کار می‌برد [۱۵]. آزمایش‌ها را می‌توان از مقیاس کلان به مقیاس خرد تغییر داد و مواد خطرناک را با مواد مشابه کم تر سمی جایگزین کرد و از کاتالیزورها نیز می‌توان برای تحریک واکنش‌ها استفاده کرد [۱۶]. اگر دانش آموزان قادر به تشخیص، مقایسه و تفکر در مورد استراتژی های تغییر یافته باشند؛ می‌توانند یاد بگیرند که چگونه تحقیقات شیمی و صنایع شیمیایی تلاش می‌کنند تا استفاده از منابع را به حداقل برسانند، اثرات را به حداکثر برسانند و از محیط زیست نیز محافظت کنند. نقطه قوت این رویکرد این است که آموزش شیمی واقعاً با کاهش مقدار مواد شیمیایی مورد استفاده و با تولید زباله کم تر به پایداری کمک می‌کند. ضعف رویکرد ESD این است که کم تر در در مورد چگونگی مدیریت جامعه بحث می‌کند. در این صورت، دانش‌آموزان مهارت‌هایی را برای مشارکت در تصمیم‌گیری جامعه و در مورد فناوری‌های جدید یا جایگزین توسعه کسب نخواهند کرد. علاوه بر این، دانش آموزان به سختی ماهیت بحث برانگیز تحولات جامعه و تعامل واقعی بین علم، فناوری و جامعه را لمس خواهند کرد.

۲.۶. مدل دوم - افزودن راهبردهای پایداری در محتوای آموزش شیمی

این مدل استراتژی‌ها و تلاش‌های مورد استفاده برای کمک به توسعه پایدار را هنگام تصمیم‌گیری اینکه کدام محتوا در آموزش شیمی گنجانده شود، در نظر می‌گیرد. در این رویکرد، اصول اولیه شیمیایی پشت شیمی پایدار و سبز و کاربردهای صنعتی آنها به عنوان موضوعاتی در برنامه های درسی شیمی ظاهر می شود [۱۷]. نمونه‌های عملی این امر عبارت اند از: توسعه فرآیندهای کارآمد در شیمی صنعتی در زمینه‌های حفاظت از انرژی و مواد خام، تحقیق در مورد ساختار، خواص و کاربرد کاتالیزورهای نوآورانه و ملاحظات شیمیایی پشت تولید سوخت‌های ناشی از مواد تجدیدپذیر [۱۸]. یادگیری در مورد سهم شیمی سبز و تحقیقات شیمیایی در توسعه پایدار همچنین می‌تواند مبنایی برای درک بهتر پیشرفت‌های مختلف در زمینه‌های گسترده باشد. نقطه قوت این رویکرد این است که یادگیری اصول شیمیایی پنهان شده در پشت فرایندهای روزمره و محصولات نهایی را برجسته کرده و آنها را معنادارتر می‌کند [۱۹].

۳.۶. مدل سوم - موضوعات بحث برانگیز پایداری در آموزش شیمی

این مدل یادگیری شیمی را با استفاده از مسائل اجتماعی- علمی و تنش بحث‌های اجتماعی کنونی ادغام می‌کند [۲۰]. این آموزش اساساً بر یادگیری شیمی به عنوان یک موضوع یا مسائل پایداری فی نفسه متمرکز نیست. درعوض، درس‌ها با توسعه مهارت‌های آموزشی عمومی در حوزه اقدامات یک فرد به‌عنوان عضو مسئول جامعه، آموزش توسعه پایدار را شکل می‌دهند. رویکرد این مدل با مدل دوم متفاوت است، زیرا هم مبانی شیمیایی دانش را در بر می‌گیرد و هم منعکس کننده بحث جامعه در مورد کاربرد عملی آن در فناوری به عنوان عواملی است که باید آموخته شوند. مدل سوم اساساً بر یادگیری دقیق چگونگی تحولات در شیمی متمرکز است و چگونگی استفاده از همه ابعاد پایداری در جامعه را به بحث و ارزیابی می‌گذارد. در این مدل، فراگیران یاد می‌گیرند که چگونه در تصمیم گیری‌های اجتماعی شرکت کنند تا در شکل دادن به آینده ای پایدار نقش داشته باشند. نقطه قوت این رویکرد این است که مهارت محور با تمرکز

---

5. Green Chemistry

دقیق بر ESD است. با این حال، برخی از موضوعات علمی- اجتماعی که ماهیت بحث برانگیز دارند، پتانسیل محدودی در حوزه کنش فردی و محلی دارند. در چنین عرصه ای، نفوذ فرد بسیار محدود است؛ اما در یک جامعه واقعاً دموکراتیک، هیچ فردی در صورت تمایل از ورود به صحنه سیاسی منع نمی‌شود. نوع تدریس در این مدل تلاش می‌کند فراگیران را برای این احتمال آماده کند [۲۱].

۴.۶. مدل چهارم - آموزش شیمی به عنوان بخشی از توسعه مبتنی بر ESD

این مدل آموزش شیمی را به عنوان بخشی از توسعه مبتنی بر ESD در کل یک مؤسسه، به ویژه در مدارس ابتدایی و متوسطه، ادغام می کند [۲۲]. این مدل پیشنهاد می‌کند که زندگی مرکز آموزش و فرایند تدریس باید بخشی از ESD شود. آموزش فراگیران در هر سنی برای تبدیل شدن به شهروندانی فعال که توانایی دستیابی به سبک زندگی پایدار را دارند، مستلزم مدل های کامل فرآیند آموزش است. چنین مدل هایی شامل توسعه، خود ارزیابی و تأمل است. تدریس شیمی می‌تواند به طور فعال به صرفه جویی در منابع (انرژی، آب تمیز و غیره) کمک کند و در محیط های محلی، از جمله مدرسه، دانشگاه و مراکز آموزشی غیر رسمی می‌تواند پیشنهاداتی را برای کاهش زباله و بازیافلت آنها به روشی کارآمد و مناسب ارائه دهد. در این صورت درس‌های شیمی و زندگی آموزشی به یک الگوی زندگی و یادگیری مبتنی بر عمل تبدیل می‌شود. فراگیران، تجربه دست اولی از اینکه چگونه می‌توانند زندگی خود و افراد جامعه را تغییر دهند؛ به دست می‌آورند و خواهند دید که چگونه مشارکت شخصی آنها در فرآیندهای تصمیم‌گیری در مدرسه، دانشگاه و جامعه باعث تغییر رفتار و تغییرات در فرآیند یادگیری می‌شود. در عمل هر چهار مدل ذکر شده، ممکن است هم پوشانی داشته باشند یا حتی ترکیب شوند تا تمرکز قوی تری بر مسائل پایداری مرتبط با آموزش شیمی محقق گردد. در واقع یک تمایز مهم، تفاوت آموزش در مورد توسعه پایدار و آموزش برای توسعه پایدار است. اولی یک درس آگاهی یا بحث نظری است و دومی استفاده از آموزش به عنوان ابزاری برای دستیابی به پایداری است. البته هر چهار مدل می‌توانند به یادگیری در مورد توسعه پایدار کمک کنند.

۷. طراحی شیمی سبز

شیمی سبز به عنوان "طراحی محصولات و فرایندهای شیمیایی برای حذف یا کاهش تولید یا استفاده مواد خطرناک" تعریف می‌شود. تعریف و مفهوم شیمی سبز اولین بار در آغاز دهه ۱۹۹۰ تقریباً ۲۰ سال پیش تدوین شد. ریشه‌های شک و تردیدهای گاه و بی‌گاه عمومی نسبت به مواد شیمیایی و شیمی را می‌توان در اواسط قرن بیستم ریشه‌یابی کرد. بنابراین، شیمی سبز، تلاشی مداوم برای رسیدگی به مشکلاتی است که گاهی اوقات مواد شیمیایی و فرآیندهای شیمیایی می‌توانند ایجاد کنند. شیمی سبز در تمام زمینه‌های شیمی کاربرد دارد و منجر به کاهش منبع می شود؛ زیرا از تولید آلودگی جلوگیری داده و اثرات منفی محصولات و فرآیندهای شیمیایی بر سلامت انسان و محیط زیست را کاهش می دهد. شیمی سبز با به حداقل رساندن یا حذف خطرات مواد اولیه شیمیایی، معرف ها، حلال ها و محصولات، آلودگی را در منبع خود کاهش می دهد. این برخلاف پاکسازی آلودگی است که شامل تصفیه جریان‌های زباله (تصفیه انتهای لوله) یا پاکسازی نشت‌های محیطی و سایر انتشارات است. پاکسازی ممکن است شامل جداسازی مواد شیمیایی خطرناک از سایر مواد، سپس تصفیه آنها به طوری که دیگر خطرناک نباشند یا تمرکز آنها برای دفع ایمن باشد. بیشتر فعالیت های اصلاحی شامل شیمی سبز نمی شود و اصلاح مواد خطرناک را از محیط زیست حذف می کند. از سوی دیگر، شیمی سبز در وهله اول مواد خطرناک را از محیط دور نگه می دارد. اگر یک فناوری مواد شیمیایی خطرناکی که برای پاکسازی آلاینده‌های محیطی استفاده می‌شود را کاهش یا حذف کند، این فناوری به عنوان یک فناوری شیمی سبز واجد شرایط می‌شود. مثلا جایگزینی جاذب خطرناک (شیمیایی) مورد استفاده برای جذب جیوه از هوا برای دفع ایمن با یک جاذب موثر اما غیر خطرناک است. استفاده از جاذب غیرخطرناک به این معنی است که جاذب خطرناک هرگز تولید نمی شود و بنابراین فناوری اصلاح با تعریف شیمی سبز مطابقت دارد [۲۳].

۱.۷. اصول شیمی سبز

مهم ترین جنبه شیمی سبز مفهوم طراحی است. دوازده اصل شیمی سبز "قوانین طراحی" هستند تا به شیمیدانان کمک کنند تا به هدف عمدی پایداری دست یابند. شیمی سبز با برنامه ریزی دقیق سنتز شیمیایی و طراحی مولکولی برای کاهش پیامدهای نامطلوب مشخص می شود. رویکرد شیمی سبز برای دستیابی به پایداری در سطح مولکولی تلاش می کند. به دلیل این هدف، تعجب آور نیست که

در تمام بخش های صنعت اعمال شده است. از هوافضا، خودرو، لوازم آرایشی، الکترونیک، انرژی، محصولات خانگی، دارویی گرفته تا کشاورزی، صدها نمونه از کاربردهای موفق فناوری‌های برنده جایزه و رقابتی اقتصادی وجود دارد. سه نکته اصلی در مورد چارچوب شیمی سبز را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱. شیمی سبز در تمام مراحل چرخه حیات شیمیایی طراحی می کند.
۲. شیمی سبز به دنبال طراحی ماهیت ذاتی محصولات و فرآیندهای شیمیایی است تا خطر ذاتی آنها را کاهش دهد.
۳. شیمی سبز به عنوان یک سیستم منسجم از اصول یا معیارهای طراحی عمل می‌کند [۲۴].

در واقع شیمی سبز طراحی محصولات و فرایندهای شیمیایی است که باعث کاهش یا حذف استفاده یا تولید مواد خطرناک می شود. شیمی سبز در طول چرخه زندگی یک محصول شیمیایی از جمله طراحی، ساخت، استفاده و دفع نهایی آن اعمال می‌شود. شیمی سبز یک زمینه نسبتاً جدید در حال ظهور است که تلاش می کند در سطح مولکولی برای دستیابی به پایداری کار کند. این رشته در دهه گذشته به دلیل توانایی آن در مهار نوآوری های شیمیایی برای دستیابی به اهداف زیست محیطی و اقتصادی به طور هم زمان مورد توجه گسترده قرار گرفته است. شیمی سبز چارچوبی از مجموعه منسجمی از دوازده اصل دارد که به طور سیستماتیک در این تحقیق بررسی شده است. این مقاله مفاهیم طراحی و فلسفه علمی شیمی سبز را با مجموعه ای از مثال های گویا پوشش می دهد. روندهای آینده در شیمی سبز با چالش استفاده از اصول به عنوان یک سیستم طراحی منسجم مورد بحث قرار می گیرد. دوازده اصل شیمی سبز معیارها یا دستورالعمل هایی طراحی هستند که چارچوبی را برای طراحی پایدار ارائه می‌دهند .آنها ساختاری فراگیر برای طراحی مواد شیمیایی ایمن و دگرگونی های شیمیایی را تشکیل می دهند. هدف شیمی سبز، کاهش خطرات در تمام مراحل چرخه زندگی، از نظر اقتصادی سودآور است. خطر به عنوان توانایی ایجاد پیامدهای نامطلوب برای انسان یا محیط زیست تعریف می شود. دوازده اصل شیمی سبز در سال ۱۹۹۸ توسط *پل آناستاس* و *جان وارنر* معرفی شد که عبارت اند از:

۱. پیشگیری از زباله: این اصل به سادگی بیان می کند که فرآیندهای شیمیایی باید برای تولید حداقل مقدار زباله ممکن بهینه شوند. یک ضریب E برای اندازه‌گیری میزان ضایعات ایجاد شده در یک فرآیند تعریف شده است که با تقسیم جرم زباله‌ی تولید شده از یک فرآیند بر جرم محصول به‌دست‌آمده، محاسبه می‌شود. هر قدر این ضریب E کم تر باشد محیط سالم تری خواهیم داشت. فرآیندهای تولید دارو از نظر تاریخی دارای فاکتورهای E بسیار بالا بوده و هستند؛ اما استفاده از برخی دیگر از اصول شیمی سبز می‌تواند به کاهش آن کمک کند.

۲. اقتصاد اتمی: اقتصاد اتمی به معنای اندازه گیری مقدار اتم های ماده اولیه است که در محصولات مفید در پایان یک فرآیند شیمیایی وجود دارند. محصولات جانبی ناشی از واکنش‌هایی که مفید نیستند، می‌توانند منجر به کاهش اقتصاد اتمی و ضایعات بیشتر شوند. از بسیاری جهات، اقتصاد اتمی معیار بهتری برای سنجش بازده واکنش است و بنابراین، فرآیندهایی که اقتصاد اتمی را به حداکثر می‌رسانند؛ ترجیح داده می‌شوند.

۳. سنتز شیمیایی کم خطر: در حالت ایده‌آل، ما می‌خواهیم مواد شیمیایی که برای هر هدفی ایجاد می‌کنیم، خطری برای سلامتی انسان نداشته باشند و سنتز مواد شیمیایی تا حد امکان ایمن گردد، بنابراین هدف این است که در صورت وجود جایگزین‌های امن‌تر، استفاده از مواد شیمیایی خطرناک به عنوان نقطه شروع کاهش یابد. علاوه بر این، داشتن زباله های خطرناک از فرآیندهای شیمیایی چیزی است که باید از آن اجتناب کرد؛ زیرا می تواند باعث ایجاد مشکلاتی در دفع شود.

۴. طراحی مواد شیمیایی ایمن تر: این اصل ارتباط نزدیکی با اصل قبلی دارد. شیمیدانان باید هدفشان تولید محصولات شیمیایی باشد که نقش خود را اعم از پزشکی، صنعتی یا غیره ایفا کنند؛ اما حداقل سمیت را برای انسان نیز داشته باشند. طراحی اهداف شیمیایی ایمن‌تر نیازمند آگاهی از نحوه عملکرد مواد شیمیایی در بدن ما و محیط است. در برخی موارد، درجه ای از سمیت برای حیوانات یا انسان ممکن است اجتناب ناپذیر باشد، اما باید به دنبال جایگزینی بود.

۵. حلال ها و مواد کمکی ایمن تر: بسیاری از واکنش های شیمیایی نیاز به استفاده از حلال ها یا عوامل دیگر به منظور تسهیل واکنش دارند. آنها همچنین می‌توانند تعدادی از خطرات مرتبط با خود را مانند اشتعال پذیری و فرار مانند داشته باشند. حلال ها ممکن است در اکثر فرآیندها اجتناب ناپذیر باشند، اما باید برای کاهش انرژی مورد نیاز برای واکنش انتخاب شوند، حداقل سمیت داشته باشند و در صورت امکان باید بازیافت شوند.

۶. طراحی برای بهره وری انرژی: فرآیندهای انرژی بر در شیمی سبز مورد بی توجهی قرار می‌گیرند. در صورت امکان، بهتر است با انجام واکنش‌ها در دما و فشار اتاق، انرژی مصرفی برای ایجاد یک محصول شیمیایی به حداقل برسد و ملاحظات طراحی واکنش نیز باید در نظر گرفته شود. حذف حلال‌ها یا فرآیندهای حذف ناخالصی‌ها می‌تواند انرژی مورد نیاز را افزایش داده و با همراهی اثرات زیست‌محیطی فرایند را افزایش دهد.

۷. استفاده از مواد اولیه تجدید پذیر: جهت چشم انداز این اصل عمدتاً به سمت پتروشیمی ها مانند محصولات شیمیایی حاصل از نفت خام است. اینها به عنوان مواد اولیه در طیف وسیعی از فرآیندهای شیمیایی استفاده می‌شوند؛ اما غیر قابل تجدید هستند و می‌توانند تخلیه شوند. فرآیندها را می توان با استفاده از مواد اولیه تجدیدپذیر، مانند مواد شیمیایی مشتق شده از منابع بیولوژیکی، پایدارتر کرد.

۸. کاهش مشتقات: گروه‌های محافظ اغلب در سنتز شیمیایی استفاده می‌شوند، زیرا می‌توانند از تغییر بخش‌های خاصی از ساختار یک مولکول در طول یک واکنش شیمیایی جلوگیری کنند، در حالی که امکان انجام دگرگونی‌ها در سایر بخش‌های ساختار را فراهم می‌کنند. با این حال، این مراحل به معرف‌های اضافی نیاز دارند و همچنین میزان ضایعات تولیدی یک فرآیند را افزایش می‌دهند. جایگزینی که در برخی از فرآیندها مورد بررسی قرار گرفته است، استفاده از آنزیم ها است. از آنجایی که آنزیم ها بسیار اختصاصی هستند، می‌توان از آنها برای هدف قرار دادن بخش‌های خاصی از ساختار یک مولکول بدون نیاز به استفاده از گروه های محافظ یا سایر مشتقات استفاده کرد.

۹. کاتالیزور: استفاده از کاتالیزورها می‌تواند واکنش‌هایی را با اقتصاد اتمی بالاتر فعال کند. خود کاتالیزورها توسط فرآیندهای شیمیایی مصرف نمی‌شوند و به همین دلیل می‌توانند چندین بار بازیافت شوند و به ضایعات کمکی نمی‌کنند. آنها می توانند امکان استفاده از واکنش هایی را فراهم کنند که در شرایط عادی انجام نمی‌شوند، اما زباله کمتری نیز تولید می‌کنند.

۱۰. طراحی برای تخریب: در حالت ایده آل، محصولات شیمیایی باید به گونه ای طراحی شوند که پس از رسیدن به هدف خود، به محصولات بی ضرر تجزیه شده و اثرات منفی بر محیط زیست نداشته باشند. آلاینده های آلی پایدار محصولاتی هستند که تجزیه نمی‌شوند و می‌توانند در محیط انباشته و باقی بمانند. آنها معمولاً ترکیبات هالوژنه هستند که DDT مشهورترین نمونه آن است. در صورت امکان، این مواد شیمیایی باید در موارد استفاده با مواد شیمیایی جایگزین شوند که به راحتی توسط آب، اشعه ماوراء بنفش یا تجزیه زیستی تجزیه می‌شوند.

۱۱. پیشگیری از آلودگی در زمان واقعی: نظارت بر یک واکنش شیمیایی در زمان وقوع می‌تواند به جلوگیری از انتشار مواد خطرناک و آلاینده در اثر حوادث یا واکنش‌های غیرمنتظره کمک کند. با نظارت زمان واقعی، می‌توان علائم هشدار دهنده را مشاهده کرده و واکنش را قبل از وقوع چنین رویدادی متوقف یا مدیریت کرد.

۱۲. شیمی ایمن برای پیشگیری از حوادث: کار با مواد شیمیایی همیشه خطراتی را به همراه دارد؛ اما اگر خطرات به خوبی مدیریت شوند، می‌توان آنها را به حداقل رساند. این اصل به وضوح با تعدادی از اصول دیگر مرتبط است که در مورد محصولات یا معرف های خطرناک بحث می‌کنند. در صورت امکان، قرار گرفتن در معرض خطرات باید از فرآیندها حذف شده و طوری طراحی شوند که خطرات را در مواردی که حذف امکان پذیر نیست به حداقل برساند [۲۵].

۸. نقش آموزش شیمی سبز در توسعه پایدار

علم و فناوری به تنهایی نمی تواند مشکلات غذایی، انرژی، زیست محیطی و بهداشتی ما را حل کند. تحقق اهداف در این زمینه ها نیازمند علم میان رشته ای است. علم میان رشته‌ای فرایند مشارکتی یکپارچه‌سازی دانش و تخصص افراد آموزش‌دیده از دو یا چند رشته، با استفاده از دیدگاه‌ها، رویکردها، روش‌ها، روش‌های تحقیق مختلف، برای ایجاد پیشرفتی فراتر از محدوده توانایی یک رشته است [۲۶]. آینده پایدار در گرو ترویج همکاری بین دانشمندان علوم زیستی و دانشمندان علوم اجتماعی برای توسعه و اجرای راه حل های عملی است. اولین دوره شیمی سبز اجرا شده در سطح کالج توسط پروفسور *تری کالینز* در دانشگاه کارنگی ملون ایجاد شد. بعدها این دوره برای دانشجویان کارشناسی ارشد و فوق لیسانس نیز مورد استفاده قرار گرفت [۲۷]. موضوعات این دوره شامل موضوعات مرتبط با شیمی پاک،

شیمی غیر سمی و بیوتکنولوژی است. علاوه بر این، در کنار روابط مفاهیم اساسی شیمیایی با تأثیرات دنیای واقعی محصولات و فرآیندهای شیمیایی، اخلاق پایداری نیز بخش مهمی از برنامه دوره است.

برنامه درسی شیمی سبز میان رشته ای، ترجیحاً باید با سایر دروس مرتبط با علم، مانند زیست شناسی و هوش مصنوعی و دروس غیر مرتبط با علم، مانند روانشناسی، تجارت، اخلاق، حقوق و امور نظارتی ادغام شود. درک چگونگی آموزش مسائل در یک برنامه درسی بین رشته ای یکی از عوامل کلیدی یادگیری بین رشته ای است. با توجه به ماهیت مشکلات ناپایداری، یادگیری بین رشته ای در مورد این موضوع اغلب نیاز به همکاری دارند. یادگیری شیمی سبز میان رشته‌ای را می‌توان با بررسی چگونگی تعامل عوامل شناختی، اجتماعی و عاطفی با یکدیگر برای ارتقاء درک مسائل و مشکلات توسعه داد. یادگیری بین رشته ای اغلب به تجربیات گروهی نیز نیاز دارد که به موجب آن عناصر کلیدی توسعه مهارت‌های تفکر شامل تأمل در مورد مشکلات، مقایسه اطلاعات از رشته های مختلف، ارتقاء اثر اهرمی یکپارچگی و تمایل به ارزیابی انتقادی است [۲۸].

مطالعات قبلی نشان می‌دهد که ابعاد پایداری و اکولوژیکی (محیطی)، اقتصادی و اجتماعی توسعه پایدار باید در برنامه‌های درسی GCE[6] طراحی و در فرایندهای آموزش، مطالعه و یادگیری گنجانده شود. بنابراین، یک چارچوب بین رشته ای، برنامه درسی بین رشته ای و روش های بین رشته ای باید هنگام ادغام اهداف توسعه پایدار در GCE در نظر گرفته شوند [۲۹]. یک هدف مهم در GCE یادگیری مشارکت در بحث های اجتماعی و در فرایندهای اجتماعی تصمیم گیری دموکراتیک در مورد مسائل مربوط به کاربردهای شیمی و فناوری مهندسی شیمی است. در واقع توانایی کار گروهی، ایجاد و تفکر انتقادی، برقراری ارتباط و همکاری در هنگام تأمل در مسائل پیچیده و جستجوی راه‌حل برای این مشکلات است. اگر مهارت ها بر پایه دانشی است که باید فراگیر تسلط داشته باشد، به کمک شیمی سبز، شایستگی پایداری آمو خته می‌شود. در این صورت فراگیران قادر خواهند بود که به شیوه‌ای بین رشته‌ای با استفاده از کار مشترک و یادگیری مبتنی بر مشکل در مورد اصول شیمی سبز و پایداری کار کنند [۳۰].

۹. روش‌های آموزش شیمی سبز

یک روش تدریس یا یک روش آموزشی، تحقق عملی یا به کارگیری یک رویکرد آموزشی است. روش های تدریس را می‌توان به دو دسته قیاسی (مستقیم) یا استقرایی (غیر مستقیم) طبقه بندی کرد. آموزش سنتی قیاسی است که با تئوری ها شروع می شود و تا کاربرد آن نظریه‌ها پیش می‌رود. آموزش استقرایی با عینی، تجربه، جزئیات و مثال ها آغاز می شود و با قاعده و تعمیم، پایان می یابد. در حالی که روش‌های خاص اغلب با استراتژی‌های خاصی مرتبط هستند. برخی از روش‌ها ممکن است در انواع استراتژی‌ها یافت شوند. علاقه اخیر به ترویج یادگیری و توسعه مهارت های مهم بین فردی در اواخر دهه ۱۹۸۰ آغاز شد و از آن زمان تاکنون روش های مختلف تدریس ترویج، تحقیق و اجرا شده است. علیرغم آشنایی گسترده با اصطلاحات روش‌های تدریس، آنها به طور مداوم با هم ترکیب شده و به جای یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند و گاهی نیز به طور غیر دقیق برای توصیف آنچه فراگیران در طول فرآیندهای یادگیری انجام می‌دهند؛ استفاده می شوند. این استفاده نادرست از اصطلاحات، به عنوان مثال، درک معلمان از اشکال کار گروهی مانند یادگیری مشارکتی و یادگیری مبتنی بر مشکل، روابط بین آنها را مختل کرده است [۳۱].

۱.۹. سطوح دانش و مهارت های تفکر در آموزش شیمی سبز

طبق نظر *زولر* و *پوشکین*، سطوح دانش را می توان به صورت یک سلسله مراتب سه سطحی ارائه کرد: دانش اعلامی، دانش رویه ای و دانش مشروط. مقوله دانش اعلامی شامل اطلاعات واقعی و همچنین اطلاعاتی درباره مفاهیم و ارتباطات بین آنهاست .دانش رویه ای عبارت است از دانش چگونگی انجام کاری و دانش شرطی در بالای سلسله مراتب بیان می‌کند که چرا، چه زمانی و در چه موقعیت هایی استفاده از یک استراتژی خاص مناسب است. دانش شرطی، دانش اعلامی و رویه ای را به هم متصل کرده و نقش بسیار محوری را در فرآیند حل مسئله شیمی ایفا می‌کند [۳۲]. علاوه بر این، مهارت‌های تفکر سطح بالاتر و تفکر سیستمی برای ارتقای شایستگی‌های فراگیران جوان برای تبدیل شدن به سواد علمی و پایداری، شهروندان و متخصصان توانمند و مسئول در سطح جهانی مورد نیاز است. از

---

6. Green Chemistry Education

این رو، می‌توان استدلال کرد که برای توسعه مهارت‌های تفکر سطح بالاتر و تفکر سیستمی در بین فر اگیران، دوره‌های شیمی سبز و روش‌های تدریس باید به نمونه‌های مختلفی از موارد ضروری و پیشرفته در شیمی سبز توجه داشته باشد.

۱۰. ویژگی های روش آموزش شیمی سبز

باید توجه داشت که مسائل پیچیده را نمی‌توان با دانش تنها در یک رشته حل کرد. رشته های مختلف می‌توانند سهم مربوطه خود را به طراحی پایدار ارائه دهند، از جمله مواد شیمیایی سبز که پتانسیل به حداقل رساندن تأثیر همزمان بر مسائل مربوط به محیط زیست و سلامت را دارند [۳۳]. علاوه بر این، پایداری مستلزم کل نگری و تعادل اکولوژیکی در توسعه اجتماعی است و تفکر سیستمی باید شامل مسائل اجتماعی نیز باشد. برای دستیابی به پایداری متوازن، باید تفکر شیمیایی سیستماتیک با در نظر گرفتن شیمی در شرایط اجتماعی جهانی، گسترش و ارائه تفکر منطقی در شیمی و در نظر گرفتن نه تنها در بعد فن‌آوری، بلکه در ابعاد اجتماعی و اخلاقی برجسته شده و مورد حمایت قرار گیرد. مهارت های یادگیری مشکل محور با الهام از روانشناسی شناختی ضروری است؛ زیرا هدف شیمی سبز رسیدگی به آلودگی‌های محیطی و بحران‌های اکولوژیکی است. در طول تمام مراحل وقایع و بحران‌های مخاطره‌آمیز، مردم اغلب خود را با روش‌های مختلف برای یادگیری دانش جدید، بهبود فردی، کاهش عدم اطمینان و به دست آوردن کنترل شخصی بر رویداد درگیر می‌کنند. بنابراین، یادگیری در بحران و فعالیت‌های یادگیری همراه با بحث مبتنی بر مسئله، انتظار می رود که یک استراتژی آموزشی موثر برای فراگیران شیمی سبز برای پیشبرد یادگیری آن باشد.

۱.۱۰. گنجاندن پایداری در آموزش شیمی سبز

یکی از ویژگی های ESD این است که فراتر از انتشار دانش است و آموزش ها و محیط های یادگیری خاصی را در نظر می‌گیرد. به همین دلیل بیشتر مشارکتی است و شامل خوشه هایی بین بازیگران مختلف جامعه است و نیازمند روش‌های مشارکتی است که افراد توانمند را برای تغییر رفتارشان برانگیزد و مهارت‌هایی مانند تفکر انتقادی، تصمیم‌گیری جمعی و دگرگونی خود و جوامع را ارتقا دهد. اهداف ESD را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- درک وابستگی متقابل همه اشکال زندگی و تأثیر فعلی و آتی اقدامات انسانی بر منابع
۲- آگاه شدن از تأثیر اقتصاد، سیاست، فرهنگ، جامعه، فناوری و محیط بر توسعه
۳- توسعه ظرفیت‌ها، مهارت‌ها، نگرش‌ها و ارزش‌های مثبت برای دستیابی به SD در سطوح محلی، منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی [۳۴].

۲.۱۰. از آموزش شیمی تا آموزش شیمی سبز، تا آموزش شیمی پایدار

از لحاظ تاریخی، اولین بار سم شناسی و نگرانی‌ها برای حفاظت از سلامت انسان و محیط زیست در کلاس‌های درس شیمی مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، یک تغییر پارادایم به سمت ارزیابی آلودگی و پیش گیری بعدی در نیمه دوم قرن بیستم اتفاق افتاد که با آگاهی روزافزون از اثرات نامطلوب برخی مواد شیمیایی که در موضوعات جدیدی مانند شیمی محیطی و اکوتوکسیکولوژی منعکس شده است، همراه بود. آموزش شیمی این انتقال مفهومی را در ۲۰ سال گذشته منعکس کرد و برنامه های درسی در بسیاری از کشورها مورد بازنگری قرار گرفت. در سال ۱۹۹۷ نیز برای اولین بار برنامه دکتری GC در یک دانشگاه معرفی شد [۳۵].

اوایل دهه ۲۰۰۰ شاهد گسترش ایده های جدید عمدتاً تحت عنوان "شیمی سبز" در جامعه علمی بودیم. زمانی که موسسه شیمی سبز (GCI)[7] بخشی از انجمن شیمی آمریکا شد، مدارس تابستانی و دوره های دیگری را ارائه داد و متعاقباً، تعداد فزاینده‌ای از دانشگاه‌ها حداقل بخش‌هایی از GC را در برنامه‌های درسی خود گنجانیدند [۳۶]. به عنوان مثال دانشگاه یورک در بریتانیا عمدتاً برای سنتز ارگانیک، به تدریج ۱۲ اصل GC و برخی موضوعات دیگر را در برنامه‌های آموزشی خود گنجانیدند. در حال حاضر عناصر GCE در دوره‌ها و برنامه‌های بسیار بیشتری گنجانده شده و توسط شرکت‌ها، دولت‌ها و سازمان‌های غیردولتی در سراسر جهان ترویج می‌شوند [۳۷].

7 . Green Chemistry Institute

۱۱. نتیجه گیری

توسعه یک جانبه اقتصادی بشر با پیامدهای منفی در حوزه های زیست محیطی و اجتماعی ناشی از آن موجب شد تا پس از انقلاب صنعتی با تغییر نگرش بشر به مفهوم رشد و پیشرفت، واژه ی توسعه پایدار پدید آمد. توسعه پایدار تلاش دارد که با نگاهی نو به توسعه، اشتباهات گذشته بشری را تکرار نکند و توسعه ای همه جانبه و متوازن را برای همه کشورها و نسل آینده رقم بزند. توسعه پایدار سعی دارد به پنج نیاز اساسی جوامع بشری یعنی تلفیق حفاظت و توسعه، تأمین نیازهای اولیه زیستی انسان، دستیابی به عدالت اجتماعی، خودمختاری و تنوع فرهنگی، حفاظت از یگانگی اکولوژیکی، پاسخ مناسب بدهد. کشورهای عضو سازمان ملل متحد در سال ۲۰۱۵ میلادی موافقت کردند که در یک برنامه ۱۵ ساله و تا پایان سال ۲۰۳۰ تمامی ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی توسعه پایدار را در قالب اهداف ۱۷ گانه دنیا را بر مسیر توسعه پایدار قرار دهند. در این میان پرداختن به علوم مربوط به شیمی و مهندسی شیمی در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار بسیار مهم و اساسی است، به گونه ای که در اهداف ۱۷ گانه توسعه پایدار به طور مستقیم و غیر مستقیم جایگاه علوم مرتبط با شیمی و مهندسی شیمی دیده می شود. در مسیر تحقق توسعه پایدار، نقش آموزش به عنوان برجسته‌ترین زمینه برای یادگیری در مورد چگونگی ورود علم شیمی در زندگی و جامعه، بسیار مهم می باشد. در میان رویکردهای آموزشی معلم محور، دانشجو محور و جامعه محور، رویکرد جامعه محور و چند بعدی به آموزش شیمی، دستیابی به این هدف را تسهیل می‌کند. تمرکز اصلی آموزش توسعه پایدار بر این است که نسل جوان را برای تبدیل شدن به شهروندانی مسئول در آینده آماده کند. آموزش علوم مرتبط با شیمی بر اساس اصول ESD در همه سطوح باید با تأثیرات بر اکولوژی، اقتصاد و جامعه هماهنگ باشد و بر تغییرات واقعی در جامعه در سطوح محلی، منطقه ای و جهانی تمرکز کند. برای اجرای آموزش شیمی در مسیر توسعه پایدار چهار مدل پیشنهاد شده که از میان آنها مدل "شیمی سبز" به عنوان موثرترین روش آموزش مفاهیم شیمی برای رسیدن به توسعه پایدار در جوامع پیشنهاد می شود. در این مدل طراحی محصولات و فرایندهای شیمیایی با هدف حذف یا کاهش تولید یا استفاده مواد خطرناک می باشد. . دوازده اصل شیمی سبز "قوانین طراحی" هستند تا به شیمیدانان کمک کنند تا به هدف پایداری دست یابند. آینده پایدار در گرو ترویج همکاری بین دانشمندان علوم زیستی و دانشمندان علوم اجتماعی برای توسعه و اجرای راه حل های عملی است و تحقق اهداف در این زمینه ها نیازمند علوم میان رشته ای است و در این میان علوم شیمی و مهندسی شیمی نقش اساسی دارند. برنامه های درسی شیمی سبز میان رشته ای، ترجیحاً باید با سایر دروس مرتبط با علم شیمی و دروس غیر مرتبط با علم شیمی ادغام شود. یادگیری شیمی سبز میان رشته‌ای را می‌توان با بررسی چگونگی تعامل عوامل شناختی، اجتماعی و عاطفی با یکدیگر برای ارتقاء درک مسائل و مشکلات توسعه داد. و در کلام آخر برای تحقق پایداری نیاز به کل نگری و تعادل اکولوژیکی در توسعه اجتماعی است و در این میان تفکر سیستمی باید توسعه یابد.

۱۲. منابع

1. SDSN (2015), Getting Started with the Sustainable Development Goals: A Guide for Stakeholders. Sustainable Development Solutions Network, URL: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/2217Getting%20started.pdf
2. Harris, J.M. (2000), Basic Principles of Sustainable Development, Global Development and Environment Institute, Tufts University, URL: http://ase.tufts.edu/gdae.
3. United Nations (2007), Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, United Nations publication, ISBN 978-92-1-104577-2.
4. Louw, W. Green curriculum: Sustainable learning at a higher education institution. Int. Rev. Res. Open Distance Learn. 2013, 14.
5. Barnard, Z.; Van der Merwe, D. Innovative management for organizational sustainability in higher education. Int. J. Sustain. High. Educ. 2016, 17, 208–227.

6. Pretorius, R.; Lombard, A.; Khotoo, A. Adding value to education for sustainability in Africa with inquiry-based approaches in open and distance learning. Int. J. Sustain. High. Educ. 2016, 17, 167–187.
7. Lourdel, N.; Gondran, N.; Laforest, V.; Brodhag, C. Introduction of sustainable development in engineers' curricula. Int. J. Sustain. High. Educ. 2005, 6, 254–264.
8. United Nations (2018), The 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals, United Nations publication, ISBN: 978-92-1-122011-7.
9. are S. A., (2001), Teaching chemistry from a societal perspective, Pure Appl. Chem., 73(7), 1209–1214.
10. Hofstein A., Eilks I. and Bybee R., (2011), Societal issues and their importance for contemporary science education: a pedagogical justification and the state of the art in Israel, Germany and the USA, Int. J. Sci. Math. Educ. Published online first January 4, 2011.
11. UNESCO Education for Sustainable Development Goals: Learning Objectives. Education for sustainable development. Global Education Agenda 2030; UNESCO: Paris, France, 2017; ISBN 978-92-3-100209-0.
12. National academies of science, engineering and medicine. (2022). New directions for chemical engineering.
13. De Haan G., (2006), The BLK '21' programme in Germany: a 'Gestaltungskompetenz'-based model for education for sustainable development, Environ. Educ. Res., 12, 19–32.
14. Sanchez-Carasedo, F. Surda, B. Moreno-Pino, FM; Romero-Portillo, D. Education for sustainable development in Spanish engineering disciplines. Case Study. J. clear Production 2021, 294, 126322.
15. Anastas P. T. and Warner J. C., (1998), Green Chemistry Theory and Practice. New York: Oxford University.
16. Hutzinger O., (1999), The greening of chemistry—Is it sustainable? Environ. Sci. Poll. Res., 6.

123. Kant I., (1787, reprinted 1956). Kritik der reinen Vernunft. Hamburg: Felix Meiner.

17. Lühken A. and Bader H. J., (2003), Energy input from microwaves and ultra sound—examples of new approaches to Green Chemistry. In Royal Society of Chemistry (ed.), Green Chemistry.
18. Bader H. J. and Blume R., (1997), Environmental chemistry in classroom experiments. Delhi: IUPAC.
19. Pilot A. and Bulte A. M. W., (2006), Special issue: Context based chemistry education. Int. J. Sci. Educ., 28(9), 953–1112.
20. Marks R. and Eilks I., (2009), Promoting scientific literacy using a socio-critical and problem-oriented approach to chemistry teaching: concept, examples, experiences, Int. J. Sci. Environ. Educ., 4(3), 231–245.
21. Hiramatsu A., Takabay K., Utsumi R., Fujii H. and Ogawa H., (2009), A lesson model fostering fine ideas in chemistry concerning biodiesel on the basis of "Education for Sustainable Development": potentialities for collaboration with social studies, Chem. Educ. J., 13, Retrieved from the World Wide Web, July 01, 2011 .
22. Rauch F., (2002), The potential of Education for Sustainable Development for reform in schools, Environ. Educ. Res., 8(1), 43–52.
23. Singh M. M., Szafran Z. and Pike R. M., (1999), Microscale chemistry and green chemistry: Complementary pedagogies, J. Chem. Educ., 76, 1684–1687.
24. Anastas, P.T.; Zimmerman, J.B. The United Nations Sustainability Goals: How Can Sustainable Chemistry Contribute? Curr. Opin. Green Sustain. Chem. 2018, 13, 150–153.
25. Anastas, P.T.; Warner, J. Green Chemistry: Theory and Practice; Oxford Sciences Publications: New York, NY, USA, 1998.

26. Clark, J.; Jones, L.; Summerton, L. Green Chemistry and Sustainable Industrial Technology– Over 10 Years of an MSc Programme. In Worldwide Trends in Green Chemistry Education; The Royal Society of Chemistry: Cambridge, UK, 2015; pp. 157–178.
27. Collins, T.J. Introducing Green Chemistry in Teaching and Research. J. Chem. Educ. 1995, 72, 965.
28. Frodeman, R.; Klein, J.T.; Mitcham, C. The Oxford Handbook of Interdisciplinarity; Holbrook, J.B., Ed.; Oxford University Press Inc.: New York, NY, USA, 2010.
29. Eilks, I.; Rauch, F. Sustainable development and green chemistry in chemistry education. Chem. Educ. Res. Pract. 2012, 13, 57–58.
30. Pullen, S.; Brinkert, K. SolEn for a Sustainable Future: Developing and Teaching a Multidisciplinary Course on Solar Energy to Further Sustainable Education in Chemistry. J. Chem. Educ. 2014, 91, 1569–1573.
31. Prince MJFelder, R.M. Inductive Teaching and Learning Methods: Definitions, Comparisons, and Research Bases. J. Eng. Educ. 2006, 4, 123–138.
32. Zoller, U.; Pushkin, D. Matching Higher-Order Cognitive Skills (HOCS) promotion goals with problem-based laboratory practice in a freshman organic chemistry course. Chem. Educ. Res. Pract. 2007, 8.
33. Iles, A.; Mulvihill, M.J. Collaboration across disciplines for sustainability: Green chemistry as an emerging multistakeholder community. Environ. Sci. Technol. 2012, 46, 5643–5649.
34. Günter, T.; Akkuzu, N.; Alpat, Ş. Understanding ‘green chemistry’and ‘sustainability’: An example of problem-based learning (PBL). ReseaRch Sci. Technol. Educ. 2017, 35, 500–520.
35. M. Elschami and K. Kümmerer , Design of a Master of Science Sustainable Chemistry, Sustainable Chem. Pharm., 2020.
36. Green Chemistry History - American Chemical Society, https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/history-of-green-chemistry.html.
37. K. Kümmerer Sustainable Chemistry: A Future Guiding Principle, Angew. Chem., Int. Ed., 2017.