طراحی محتوای آموزش سنجش‌های شیمی سبز برای دانشجویان کارشناسی شیمی: سنجش‌های جرمی و زیست‌محیطی

مریم قنبری، مریم صباغان*+، معصومه قلخانی، فاطمه خالوندی
گروه آموزشی شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده: هدف از پژوهش حاضر طراحی محتوای آموزش سنجش‌های شیمی سبز برای دانشجویان کارشناسی شیمی است. این پژوهش برحسب هدف از نوع کاربردی ـ توسعه‌ای و از نظر جمع آوری و تحلیل داده‌ها از نوع توصیفی ـ تحلیلی با استفاده از فن تحلیل محتوا می‌باشد. نمونه آماری استفاده شده مجموعه‌ی کتاب‌ها، مقاله‌ها، مجله‌ها و پایان نامه‌های مرتبط با شیمی سبز بوده که تا اشباع نظری داده ها انتخاب و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با بررسی ادبیات و پیشینه موضوع درمورد چگونگی طراحی محتوای آموزشی شیمی سبز، با راهنمایی متخصصان این حوزه، طی چندین مرحله رفت و برگشتی کد گذاری محوری، سرفصل‌هایی تعیین شد و سپس براساس سرفصل‌های تعیین شده هدف‌هایی برای هر مبحث در جدول هدف ـ محتوا نوشته شد. نتیجه‌های پژوهش نشان داد که برای طراحی محتوای آموزش سنجش‌های شیمی سبز، دو مقوله‌ی سنجش‌های جرمی و سنجش‌های زیست محیطی، اصول شیمی سبز می‌تواند به صورت کمی مورد ارزیابی قرار گیرد. در این دو مقوله روش‌های متنوعی برای ارزیابی سبز بودن یک واکنش (سنتز واکنش‌های آلی) شناسایی شدند، از جمله؛ اقتصاد اتمی، کارایی جرم واکنش، پارامتر بازیافت مواد، فاکتور زیست محیطی، شدت جرم فرایند و بازده جرم مؤثر که در یک چارچوب مفهومی ارایه شده اند.

واژه‌های کلیدی: آموزش شیمی سبز؛ سنجش‌های جرمی؛ اقتصاد اتمی؛ فاکتور زیست محیطی.

KEYWORDS: *Green Chemistry Education; Mass metrics; Atomic economy; Environmental metrics.*

مقدمه

مشکل‌های زیست محیطی به وجود آمده توسط انسان موجب گرم شدن کره‌ی زمین، آلودگی‌های محیط زیستی، ایجاد گازهای گلخانه‌ای و از طرفی استفاده از اسپری‌ها و آفت‌کش‌ها منجر به نازک شدن لایه‌ی اوزون و سرانجام موجب بروز سرطان پوست، آب مروارید و اختلال‌های هورمونی شده است. بنابراین چالش بزرگی پیش روی دولت، صنعت و دانشگاه در ارتباط با تأثیر جامعه و فناوری بر محیط زیست است، که پرداختن به این چالش نیاز به تغییر نگرش و حمایت همگانی دارد. بی‌گمان هر اندازه که بتوان از به کارگیری مواد شیمیایی در زندگی خود پرهیز کرد یا از رها شدن این‌گونه مواد در طبیعت جلوگیری نمود، به سلامت جامعه و محیط زیست کمک شده است. ولی به نظر می‌رسدکه راهکارهای پیش‌گیرانه تاکنون کار آمد نبوده و باید به راه‌های موثرتری اندیشید [۱].

بارها از آسیب‌های مواد شیمیایی به بدن آدمی و محیط زیست شنیده و خوانده‌ایم. آیا دوری و پرهیز از بهره‌گیری از مواد شیمیایی می‌تواند به ما کمک کند؟ تا چه اندازه می‌توانیم از آن‌ها دوری کنیم؟ داروهایی مفید نیز با عارضه‌های جانبی همراه‌اند. آیا می‌توانیم آن ها را

* عهده دار مکاتبات
+E-mail: sabbaghan@sru.ac.ir

مصرف نکنیم؟ آیا می‌توان آب تصفیه شده توسط مواد شیمیایی را ننوشیم؟ پیرامون ما را انبوهی از مواد شیمیایی گوناگون فراگرفته‌اند که در زهرآگین و آسیب رسان بودن بیش‌ترشان شکی نیست ولیکن از بسیاری از آن ها نمی توان دوری جست. حال باید به این موضوع توجه کرد که آیا راهکاری برای استفاده بهتر از علم شیمی وجود دارد؟

شیمی سبز می‌تواند یکی از مؤثرترین راهکارها باشد. هدف اصلی شیمی سبز به حداقل رساندن تولید زباله‌های شیمیایی، مصرف بهینه و صحیح مواد شیمیایی، کاهش استفاده از حلال‌ها، سمیت، خطرهای احتمالی، هزینه و مصرف انرژی است. شیمی سبز مجموعه‌ای از اصول اساسی است که مرتبط با بسیاری از رشته‌های شیمی می‌باشد. در سال ۲۰۱۰ میلادی، *ماری کریشف*[1] مقاله‌ای در مجله‌ی آموزش شیمی منتشر کرد و در آن اظهار کرد که شیمی سبز تنها مختص حوزه‌ی شیمیدانان سبز نیست؛ بلکه رویکردی قابل اجرا در همه حوزه های شیمی و مسئولیت همه شیمیدان‌های باتجربه است. سرانجام باید کار بهتری برای آموزش دانشجویان با توجه به شیمی سبز و مسائل زیست محیطی انجام داد [۲].

برای تشخیص دقیق سبز بودن واکنش‌ها می‌توان از علم اندازه‌گیری شیمی سبز استفاده کرد و با محاسبه کمّی می‌توان به طور دقیق‌تر سبز بودن یک واکنش را سنجید.

شیمی سبز اثرهای زیست محیطی فراورده‌های شیمیایی و فرایندهایی که توسط آن‌ها تولید شده را نشان می‌دهد. درواقع هدف، طراحی یک فرایند سبز برای تولید فراورده است. شیمی سبز زباله را در مبدأ حذف می‌کند یعنی پیشگیری اولیه‌ی آلودگی، جایگزین زدودن زباله می شود [۳].

شیمی سبز بر نگرانی‌های زیست محیطی در مورد مواد، انرژی و چرخه تولید تمرکز دارد و نشان می‌دهد که چگونه اصول اساسی شیمی سبز در عمل، می‌تواند از سلامت انسان و محیط زیست محافظت کند. شیمی سبز این پتانسیل را دارد که یادگیری شیمی و بهبود درک دانشجویان از شیمی را به طور چشمگیری افزایش دهد. ترکیب اصول شیمی سبز برای تکمیل برنامه درسی شیمی می‌تواند با استراتژی‌های خاص همراه باشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اجرای شیمی سبز در برنامه درسی، به اهداف کلی آموزش علوم، به عنوان یک عنصر مهم در پیشرفت سواد علمی در عموم مردم کمک می‌کند.

شیمی سبز فرصتی برای دانشجویان فراهم می‌کند که به ایجاد ارتباط میان رشته شیمی، دیگر موضوع‌ها و جنبه‌های زندگی بپردازند. آموزش شیمی سبز می‌تواند دانش و آگاهی لازم برای پیشرفت فناوری را فراهم کند [۴].

تفاوت یک فرایند سبز با غیر سبز این است که کمترین عارضه‌های منفی ممکن را بر محیط زیست باعث می‌شود. پارامترهای خاصی برای ارزیابی از عملکرد زیست محیطی در واکنش‌های شیمیایی با هدف ایجاد فرایند سبزتر و استفاده بهتر از مواد و انرژی پیشنهاد شده است. ارزیابی‌ها به طور خلاصه بر طبق هدف اصلی یعنی بهینه‌سازی جرم مصرفی، به حداقل رساندن خطرهای زیست محیطی و اقتصاد اتمی می باشد.

هدف این پژوهش انتخاب سبزترین فرایند با استفاده از اندازه گیری‌های شیمی سبز است و سرانجام به طراحی فرایندهای سبزتر می‌انجامد. نتیجه‌های این پژوهش باعث می‌شود تا واکنش‌های شیمیایی سبزتر به طور کمی اندازه‌گیری و مقدار مصرف مواد محاسبه شود که این موارد موجب استفاده بهینه از مواد، انرژی و کاهش زباله می‌شود.

هدف پژوهش

طراحی محتوا برای آموزش ارزیابی کمی اصول شیمی سبز در واکنش‌های شیمیایی.

سوال پژوهش

محتوای آموزشی برای ارزیابی کمی اصول شیمی سبز در واکنش‌های شیمیایی به چه صورت است؟

پیشینه موضوع پژوهش

شیمی سبز و مهندسی سبز

اصطلاح‌های شیمی سبز و مهندسی سبز بیش‌تر به جای یک‌دیگر در توصیف مفهوم‌های ساخت فرایندها و فرآورده‌هایی با کاهش اثرهای زیست محیطی استفاده می‌شود. با این حال اگر این مفهوم‌های عمیق‌تر بررسی شود، تفاوت‌های چشمگیری در فلسفه‌ی آن‌ها دیده می شود.

شیمی سبز توسط *آناستاس*[2] و *وارنر* به طور مناسب تعریف شده است. اصول شیمی سبز درباره‌ی مسائل مرتبط با واکنش‌های شیمیایی و فراورده‌های شیمیایی صحبت می‌کند و مفاهیم ناسازگار سنتز برای ساخت مواد شیمیایی را با یک راه سازگار با محیط زیست توصیف می‌کند. بنابراین ایده‌های خاص مانند استفاده از حلال‌های سازگار با محیط زیست، کاهش مشتق، مفهوم اقتصاد اتمی، نقطه‌ی عطف شیمی سبز هستند. از بسیاری جهت‌ها، شیمی سبز می‌تواند به عنوان تولید برتر، زیربنای علمی سازگار با محیط زیست مطرح شود. از سوی دیگر مهندسی سبز، به دنبال اعمال مفهوم‌های مهندسی اساسی

(۱) Kirchoff

(۲) Anastas

برای بهبود فرایندهای تولید می باشد. با توجه به تعریف ترویج شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA[1])، مهندسی سبز در حقیقت طراحی، تجاری سازی و استفاده از فرایندها و تولید فراورده‌هایی امکان‌پذیر و مقرون به صرفه، همراه با کاهش آلودگی از منبع، خطرهای سلامتی و زیست محیطی می باشد. مهندس سبز از ابزار بازیافت، شدت جرم فرایند و طراحی بهینه سازی برای به بیشینه کردن کارایی فرایند و کاهش اثرهای زیست محیطی استفاده می‌کند. مهندسی سبز فرایند ساخت را به عنوان یک سامانه، ارزیابی می‌کند و به دنبال بهینه کردن طراحی آن می‌باشد. به معنای واقعی، مهندسی سبز مفهوم‌های آنالیز چرخه زندگی و علم اقتصاد زیست محیطی را با ارزیابی مناسب همه اثرهای زیست‌محیطی ترکیب می‌کند. از آن‌جا که مهندسی سبز مبتنی بر بهینه‌سازی است، نیاز به پیشرفت مجموعه علم اندازه‌گیری دارد تا به‌طور مناسب بتواند پارامترهای زیست‌محیطی را ارزیابی کند. به عبارتی مهندسی سبز به دنبال کمی کردن اصول شیمی سبز است [۵].

آموزش شیمی سبز

آموزش افراد یک جامعه، به ویژه جوامع در حال توسعه، در تحکیم ارزش‌های آن جامعه، انتقال دانش و فناوری و افزایش توان تولیدی آن، نقش اساسی دارد. بنابراین برای طراحی یک جهان امن و سالم آموزش نسل آینده بسیار دارای اهمیت است. با توجه به تأثیرهای سوء که بشر بر زمین وارد ساخته، نیاز به کادر حرفه‌ای در شیمی برای توسعه و اجرای شیوه‌های شیمی سبز می‌باشد. پیشرفت شیمی سبز بدون توجه به جایگاه آموزش و پرورش و آموزش عالی، که یکی از جایگاه‌های اصلی و کلیدی آموزش شیمی سبز می‌باشند، امکان‌پذیر نیست [۶].

تفاوت شیمی سبز با شیمی محیط زیست

بین شیمی سبز و شیمی محیط زیست تفاوت هایی وجود دارد. چرا که شیمی سبز کاهش و جلوگیری از آلودگی را از سرمنشاء پیگیری می‌کند در حالی‌که شیمی محیط زیست، شیمی محیط طبیعی و مواد شیمیایی آلاینده موجود در طبیعت را پیگیری می‌نماید. در شیمی سبز تمرکز روی کاهش خطر و افزایش کارآیی مواد انتخاب شده است درحالی‌که در شیمی محیط زیست تمرکز روی پدیده‌های شیمیایی در محیط است. علم محیط زیست و شیمی‌سبز هر دو به مطالعه این‌که چگونه جهان مکانی برای زندگی بهتر شود، می‌پردازند. محیط‌زیست به شناسایی منابع و راه‌های ایجاد آلودگی در محیط‌زیست می‌پردازد و شیمی سبز به دنبال جلوگیری از این مشکل‌ها با ایجاد فناوری‌های امن می‌باشد [۷]. هدف شیمی‌سبز پیش‌گیری از منبع آلودگی درمرحله طراحی فراورده یا فرایند شیمیایی و جلوگیری از آلودگی پیش از آغاز آن است. شیمی‌سبز طرف‌دار رویکردهای فعال برای آموزش و جلوگیری از آلودگی است [۷].

شیمی سبز در برنامه درسی

ادغام شیمی سبز در برنامه درسی می‌تواند از کتاب‌های درسی آغاز شود. اولین کتاب درسی با نام "شیمی سبز در تئوری و عمل[2]" توسط *آناستاس* و *وارنر*[3] برای دانشجویان منتشر شد. این کتاب شامل دوازده اصل شیمی‌سبز، مطالبی در مورد فناوری‌های سبز و نکته‌های برجسته پژوهش‌های انجام یافته در زمینه شیمی سبز است. همچنین در آخر هر فصل تمرین‌هایی برای دانشجویان در نظرگرفته شده است[۸]. پیاده‌سازی شیمی‌سبز در آموزش و پرورش باید در همه سطح‌ها انجام گیرد و با تأکید بیش‌تری در دانشگاه‌ها اجرا شود. شایان ذکر است که خوشبختانه در دفتر برنامه‌ریزی وزارت علوم درس شیمی سبز و محیط زیست وجود دارد که می‌تواند کمک مؤثری در گسترش مفاهیم توسعه پایدار باشد. ولی با بررسی‌های صورت گرفته از سر فصل‌های این درس مشخص شد که برای ارایه بهتر به اصلاحاتی نیاز دارد که در ادامه آورده شده است.

در سرفصل درس شیمی سبز و محیط زیست تنها به کارایی اتمی اشاره شده است. این موضوع بخش بسیار کوچکی از سنجش های جرمی شیمی سبز می باشد و باید در کنار آن عنوان‌های بازده واکنش، کارایی جرم واکنش و پارامتر بازیافت مواد گنجانده شود تا بتوان یک فرایند شیمیایی را از لحاظ سنجش جرمی مورد بررسی کامل قرار داد. در بخش اندازه‌گیری، کنترل و عملکرد زیست‌محیطی از سرفصل‌های درس مورد نظر، به طور کلی به ارزیابی فرایندهای سبز اشاره شده است. در پژوهش حاضر، سنجش‌های زیست محیطی به طور جزیی تر با عناوین فاکتور زیست محیطی، شدت جرم فرآیند و بازده جرم موثر پرداخته شده است.

موضوع مهم دیگر که در نظر گرفته نشده است، توجه به پیش‌نیازهای مبحث مورد نظر است. روشن است که آموزش سنجش‌های سبز، پس از ارایه مبحث‌های کاتالیست و حلال‌ها گنجانده شود.

(۱) Environmental Protection Agency
(۲) Green chemistry: theory and practice
(۳) Warner

پژوهش‌های خارجی و داخلی مرتبط با موضوع

آموزش شیمی‌سبز درکشورهای پیشرفته از ۱۹۹۰ میلادی آغاز شده است و برای نخستین‌بار در برنامه درسی آمریکا دیده شده است. تا به امروز آمریکا در زمینه پژوهش‌های برنامه‌های آموزشی از سایر کشورها جلوتر است. شیمیدانان دانشگاه اورگان با همکاری آژانس حفاظت از محیط زیست و انجمن ملی آمریکا به تألیف محتوی شیمی سبز در کتاب‌های درسی پرداختند.

جان وارنر و *همکاران* در۱۹۹۸ میلادی نخستین افرادی بودند که بر ادغام شیمی سبز در برنامه درسی مقاطع گوناگون پژوهش نمودند [۸]. *پولی‌ایکف*[۱] در مقاله‌ای با عنوان "شیمی سبز: تغییر علم و سیاست" نتیجه گرفت که شیمی سبز افزون بر این‌که رشته علمی نوین و مفیدی است، در سیاست‌گذاری‌ها و اقتصاد کشور نقش مهمی دارد [۹]. *توبیسزوسکی*[۲] در مقاله‌ای با عنوان "سنجش‌های شیمی سبز با اشاره ویژه به سنجش‌های شیمی تجزیه‌ای سبز" به روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی سبزترین سنتز سبز مانند فاکتور زیست محیطی پرداخته است [۱۰].

در سال۱۳۸۳، *مستشاری* در مقاله‌ای با عنوان "دیدگاه‌های آموزشی و پژوهشی شیمی سبز" با بیان چشم اندازهای آموزشی شیمی‌سبز در مقاطع تحصیلی گوناگون به ویژه درشاخه‌های تخصصی آن تلاش کرده است تا دیدگاه‌های واقعی این تحول و شاخه‌های وابسته به آن در آموزش عالی شناسانده شوند [۱۱]. *جهان شاهی بیگباغی* و *همکاران* در مقاله‌ای با عنوان "آموزش شیمی سبز، با طراحی و اجرای آزمایش‌های سبز در مبحث استوکیومتری شیمی متوسطه" به مقایسه آموزش سنتی و آموزش مطابق با اهداف شیمی سبز پرداخته و راهکارهای لازم را برای ورود آزمایش‌های سبز به برنامه درسی بیان نمودند [۱۲]. *لیلا حبیبی* و *همکاران* به موضوع مطالعه تطبیقی آموزش شیمی سبز در برنامه درسی متوسطه پرداخته اند [۱۳].

در سال ۱۳۹۴، *مژگان عابدینی* در پایان نامه خود با عنوان "طراحی برنامه درسی آزمایشگاه شیمی آلی بر مبنای شیمی سبز" به راهکارهایی برای ورود شیمی سبز در آزمایشگاه شیمی آلی پرداخته است [۱۴]. *ژیلا حسن زاده مقیمی* پایان نامه‌ای را با عنوان "بررسی تجارب جهانی در زمینه آموزش شیمی سبز به معلمان به منظور ارایه راهکارهای مناسب در ایران" انجام داد [۱۵]. *شبنم نبی‌زاده کوکیا* در پایان نامه‌ای با عنوان "طراحی محتوای آموزشی تولید سوخت‌های زیستی از زیست توده‌ها برای دانشجویان رشته شیمی: تاکید بر نانو فناوری" که در آن به ارایه محتوای آموزشی درباره استفاده از فناوری نانو برای تولید سوخت‌های زیستی از زیست توده‌ها پرداخته که گامی مهم برای کمک به آینده پیش روی جامعه در برای جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی خواهد داشت [۱۶].

روش پژوهش

پژوهش حاضر برحسب هدف از نوع کاربردی–توسعه‌ای می‌باشد. هدف پژوهش‌های کاربردی توسعه‌ی دانش کاربردی در یک زمینه‌ی خاص است، به عبارت دیگر پژوهش‌های کاربردی به سمت کاربرد عملی دانش هدایت می‌شود. در نوع توسعه‌ای هدف اساسی تدوین یا تهیه برنامه‌ها، طرح‌ها، تولید فراورده (محتوا، کتاب و...) و مانند آن است، به طوری که ابتدا موقعیت خاصی مشخص شده و براساس یافته‌های پژوهشی، طرح یا برنامه‌ی ویژه‌ی آن تدوین و تولید می‌شود [۱۷].

روش پژوهش حاضر توصیفی ـ تحلیلی بوده که با استفاده از فن تحلیل محتوا انجام شده است که این روش برای بررسی محتوای آشکار پیام‌های موجود در یک متن استفاده می‌شود. مهم‌ترین کاربرد تحلیل محتوا توصیف ویژگی‌های یک پیام است [۱۷].

در این پژوهش نخست به مطالعه‌های کتابخانه‌ای در مورد موضوع پرداخته شد. با بررسی منابع گوناگون درمورد چگونگی طراحی محتوای آموزشی شیمی سبز سرفصل‌هایی تعیین شد، سپس براساس سرفصل‌های تعیین شده اهدافی برای هر مبحث در جدول هدف ـ محتوا نوشته شد. اهداف تعیین شده بعد از تایید استاد راهنما آماده شدند. سپس طرح اولیه‌ی محتوای اصلی براساس مطالب جمع آوری شده از مطالعه‌های کتابخانه‌ای و بررسی مقاله‌ها و پایان نامه‌ها ارایه شد. محتوای آماده شده پس از چند بار بازنگری و اصلاح، بازنویسی شد. در این محتوا سعی براین است تا با ایجاد انگیزه و با پررنگ نشان دادن مسائل زیست‌محیطی و حفظ منابع مالی و طبیعی، مطالب به روش کاوشگری، با استفاده از تصاویر، جدول، نمودار، فعالیت و تمرین به دانشجویان ارایه شود.

بخش نظری

تجزیه و تحلیل داده‌ها(یافته‌های پژوهش)

گردآوری داده‌ها و روش تجزیه و تحلیل داده‌ها منطبق بر کتاب *سرمد* و *همکاران*؛ از روش توصیفی ـ تحلیلی با استفاده از تحلیل محتوا صورت گرفته است. با توجه به کتاب برای تحلیل محتوا مرحله‌هایی طی می‌شود، از جمله این مرحله‌ها می‌توان سه مرحله عمده‌ی زیر را ذکر کرد:

(۱) Poliakoff

(۲) Tobiszewski

۱. مرحله‌ی پیش از تحلیل (آماده‌سازی و سازماندهی)؛
۲. بررسی مواد (پیام)؛
۳. پردازش نتیجه‌ها [۱۷].

مرحله‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها در پژوهش

۱- مرحله‌ی پیش از تحلیل (آماده سازی و سازماندهی): با توجه به عنوان پژوهش محتوا تهیه شد. برای این منظور ابتدا مطالعه‌هایی پیرامون موضوع اصلی انجام شد، سپس هدف‌های مورد مطالعه و سوال‌های پژوهش مشخص شد. با استفاده از کتاب‌های مرتبط با شیمی سبز و چگونگی کمی کردن اصول آن و مقاله‌ها و پایان نامه‌های مرتبط با موضوع به جمع آوری پاسخ سوال‌ها پرداخته شد.

۲- بررسی مواد (پیام): پس از گردآوری اسناد باید به بررسی آن‌ها پرداخت. بررسی مواد همان رمزگذاری است. رمزگذاری فرایندی است که در واحدهایی که امکان توصیف دقیق محتوا را فراهم می‌آورد، داده‌های خام به صورت منظم قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا واحدهای مورد نظر (جدول۱) و مرتبط با موضوع انتخاب شد و موردهای همانند دسته بندی شد. سپس به انتخاب مقوله‌ها (جدول۲) پرداخته شد. با بررسی واحدهای به‌دست آمده و بررسی موضوع مورد مطالعه برخی از واحدها برای ارایه‌ی محتوا حذف شد.

۳- پردازش نتیجه‌ها: آخرین مرحله در تحلیل محتوا، پردازش داده‌های رمزگذاری است. نتیجه‌های داده‌های به‌دست آمده در جدول هدف محتوا تهیه و محتوا باعنوان سنجش‌های شیمی سبز طراحی شد. سپس براساس عناوین هر فصل و اهمیت آن‌ها جدول هدف ـ محتوا آماده گردید (جدول ۳).

پیش نیازها

باتوجه به اطلاعات جمع آوری شده، دانشجویان بایستی با ساختار ترکیب‌های آلی، واکنش‌ها و مکانیسم‌های آلی، مفهوم شیمی سبز و دوازده اصل آن آشنایی داشته باشند.

سنجش‌های جرمی:

بازده واکنش (RY): [1]

بازده واکنش، مقدار یک فراورده می‌باشد که توسط یک واکنش شیمیایی از یک واکنش دهنده‌ی معین تولید شده است (به طورمعمول به عنوان یک کسر و یا درصد بیان شده است) معادله(۱) [۱۸] [۲۳].

$$\text{بازده} = \frac{\text{مقدار عملی}}{\text{مقدار نظری}} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

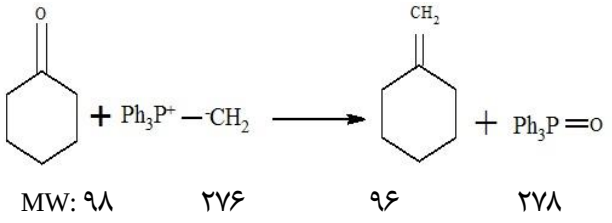
جدول۱ : واحدهای به‌دست آمده

ردیف	واحدهای استخراج شده از منابع کتابخانه‌ای مرتبط با موضوع
۱	مفهوم شیمی سبز
۲	دوازده اصل شیمی سبز
۳	کاتالیست‌ها و انواع آن
۴	بازده
۵	اقتصاد اتمی
۶	کارایی جرم واکنش
۷	پارامتر بازیافت مواد
۸	شدت جرم فرآیند
۹	بازده جرم موثر
۱۰	اندازه گیری انرژی
۱۱	کارایی انرژی
۱۲	چرخه عمر
۱۳	حلال‌ها و مواد کمکی

جدول۲ : دسته بندی مقوله‌ها

مقوله‌ها	واحدهای مشابه
شیمی سبز	- مفهوم شیمی سبز - دوازده اصل شیمی سبز
سنجش‌های جرمی	- بازده واکنش - اقتصاد اتمی - کارایی جرم واکنش - پارامتر بازیافت مواد
سنجش‌های زیست محیطی	- فاکتور زیست محیطی - شدت جرم فرآیند - بازده جرم موثر

بازده واکنش، فراورده‌های جانبی را محاسبه نمی‌کند، برای نمونه بازده واکنش ویتیگ ۸۷٪ به‌دست آمده است. اما همان‌گونه که می‌بینید فراورده‌ی جانبی با جرم بالا(۲۷۸ g/mol) به‌دست می‌آید بنابراین بازده بالای واکنش را نمی‌توان به تنهایی معیاری برای سبز بودن واکنش دانست.



(۱) Reaction Yield

جدول ۳: جدول هدف ـ محتوا

هدف کلی: آشنایی با سنجش‌های سبز						
محتوا / هدف	سطوح شناختی					
	سنجش‌های جرمی			سنجش‌های زیست محیطی		
	دانش	درک وفهم	کاربرد	دانش	درک وفهم	کاربرد
بازده واکنش شیمیایی را محاسبه کند.			■			
اقتصاد اتمی را تعریف کند.	■					
اقتصاد اتمی واکنش شیمیایی را محاسبه کند.			■			
با استفاده از اقتصاد اتمی سبز بودن واکنش‌های شیمیایی را مقایسه کند.			■			
کارایی جرم واکنش را توضیح دهد.	■					
تشخیص دهد کارایی جرم واکنش از چه فرمولی محاسبه می‌شود.		■				
با توجه به پنج پارامتر (RME و ε و AE و $\frac{1}{SF}$ و MRP) تشخیص دهد کدام واکنش سبزتر است.			■			
فاکتور زیست محیطی و علت محاسبه‌ی آن را بیان کند.				■		
فاکتور زیست محیطی واکنش شیمیایی را محاسبه کند.						■
شدت جرم فرآیند واکنش شیمیایی را محاسبه کند.						■
علت ظهور بازده جرم موثر را بیان کند.				■		
بازده جرم موثر واکنش شیمیایی را محاسبه کند.						■

اقتصاد اتمی (AE)[1]:

در سال ۱۹۹۱میلادی، برای موازنه‌ی جرم، پارامتر اقتصاد اتمی توسط *تراست*[2] معرفی شده است. توانایی فرآیند شیمیایی برای ترکیب کردن بیش‌ترین اتم‌های ممکن از ماده‌ی اولیه به فراورده‌ی پایانی و در نتیجه نسبت وزن مولکولی فراورده به مواد اولیه به عنوان اقتصاد اتمی معرفی شده است معادله (۲) [۱۸] [۲۳].

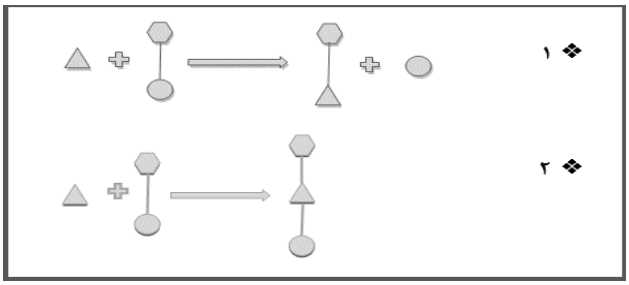
$$AE = \frac{\text{وزن مولکولی محصول}}{\text{مجموع وزن مولکولی مواداولیه}} \times ۱۰۰ \qquad (۲)$$

با توجه به این مفهوم، می‌توان واکنش ویتیگ را از نظر اقتصاد اتمی نیز مورد ارزیابی قرار داد.

$$AE = \frac{96}{98+276} = 25.7\%$$

بازده واکنش ویتیگ ۸۷٪ است که این بازده خوبی است ولی اقتصاد اتمی٪۲۵/۷ می‌باشد. علت این امر تولید مقدار زیادی فراورده‌ی جانبی تری فنیل فسفین اکسید است.

شکل(۱) اقتصاد اتمی بالا و پایین را به صورت نمادی نشان می‌دهد؛ که شماره‌ی ۲ نشان دهنده اقتصاد اتمی بالا است، زیرا همه مواد اولیه

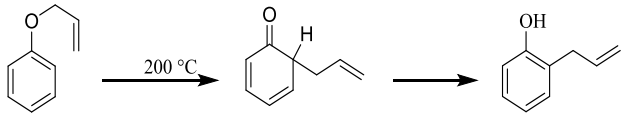


شکل۱: اقتصاد اتمی بالا (۲) و پایین (۱)

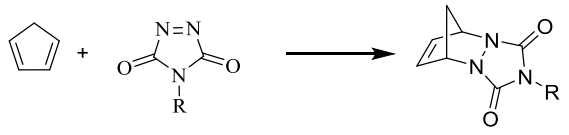
به فراورده تبدیل شده اند. ولی شماره‌ی ۱ افزون‌بر فراورده‌ی اصلی، فراورده‌ی جانبی هم تولید شده است.

نمونه‌ای از واکنش‌هایی که بیشینه اقتصاد اتمی را دارا هستند:

واکنش‌های پریسیکلیک:



واکنش‌های دیلز–آلدر[3]:



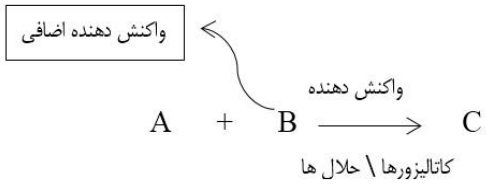
R = Me, Et, *n*-Pr, Ph

(۱) Atomic Economy
(۲) Trost
(۳) Diels-Alder

در اقتصاد اتمی تنها به فرآورده‌ها و واکنش دهنده‌ها پرداخته می شود. اگر واکنش شیمیایی شامل کاتالیزگرها و حلال‌های کمکی باشد، چگونه می‌توان واکنش را به طور کامل با همه جزئیاتش بررسی کرد؟ برای پاسخ به این سوال به پارامتر دیگری نیاز است تا تمام این موارد را پاسخگو باشد. برای این منظور باید کارایی جرم واکنش را بررسی کرد.

کارایی جرم واکنش[1] (RME):

در سال ۲۰۰۱ میلادی پژوهشگرانی از گلاکسو[2] (GSK) فهرستی از اندازه‌گیری‌های سبز مورد استفاده شرکت خودشان را ارایه دادند. در میان آن‌ها، کارایی جرم واکنش برای توصیف سبز بودن یک فرآیند تاکید شد. جرم فراورده محاسبه شده تقسیم بر مجموع جرم واکنش دهنده‌ها در معادله‌ی شیمیایی تعادلی ظاهر می‌شود، به طور کلی می‌توان گفت که کارایی جرم واکنش، بازده، استوکیومتری و اقتصاد اتمی را در نظر می‌گیرد معادله (۳). این ارتباط مهم را می‌توان با یک واکنش عمومی که در آن واکنش دهنده‌ی محدودکننده A با مقدار اضافی از واکنش دهنده‌ی B منجر به تولید فراورده‌ی C شده را نشان داد. با استفاده از این نمونه، کارایی جرم واکنش کرزونس[3] به‌دست آمده است. در این روابط ریاضی Z مفهوم مقدار مول عملی برای فراورده است [۲۳].



جرم:	m_1	m_2	m_3
مول :	x	y	z
وزن مولکولی:	M_{W1}	M_{w2}	M_{W3}

$$RME = \frac{m_3}{m_1 + m_2} = \frac{z(M_{W3})}{x(M_{W1}) + y(M_{W2})}$$

$$= \frac{z(M_{W3})}{x(M_{W1}) + (y - x + x)(M_{W2})}$$

$$= \frac{z(M_{W3})}{x(M_{W1}) + x(M_{W2}) + (y - x)(M_{W2})}$$

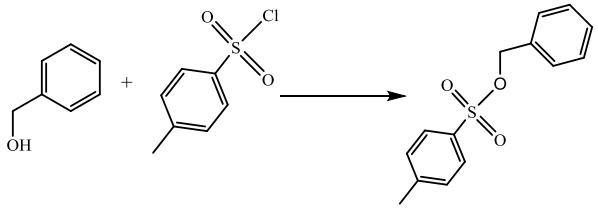
$$= \frac{z}{x} \cdot \frac{M_{W3}}{M_{W1} + M_{W2} + X^{-1}(y - x)M_{W2}} \cdot \frac{(M_{W1} + M_{W2})^{-1}}{(M_{W1} + M_{W2}{}^{-1})}$$

$$= \frac{z}{x} \cdot \frac{M_{W3}}{M_{W1} + M_{W2}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{(y - x)M_{W2}}{x(M_{W1} + M_{W2})}}$$

$$RME = \text{Yield} \cdot \text{Atom Economy} \cdot \frac{1}{\text{Stoichiometric Factor}}$$

$$RME = RY \cdot AE \cdot \frac{1}{SF}$$

به عنوان نمونه RME کرزونس برای ۱۰/۸۱ گرم بنزیل الکل با ۲۱/۹ گرم از پارا تولوئن سولفونیل کلراید برای تشکیل ۲۳/۶ گرم از سولفونات استر محاسبه شده است.



جرم :	10.81g	21.9g	23.6g
مول :	0.10	0.115	0.09
وزن مولکولی :	108.14	190.64	262.32

راه حل اول : $RME = \frac{23.6}{10.81+21.9} = 0.72$

راه حل دوم : $RY = \frac{0.09}{0.10} = 0.90$

$$AE = \frac{262.32}{108.14 + 190.64} = 0.88$$

$$SF = 1 + \frac{(0.115 - 0.10) \times 190.64}{0.10 \times (108.14 + 190.64)} = 1.10$$

$$RME = RY \cdot AE \cdot \frac{1}{SF} = 0.90 \times 0.88 \times (1.10)^{-1} = 0.72$$

با استفاده از معادله‌ی RME بالا مقدار آن ۰/۷۲ محاسبه شده است. هردو حالت ذکر شده برای محاسبه کارایی جرم واکنش سرانجام یک پاسخ را می‌دهد، باتوجه به داده‌ها می‌توان یک روش محاسبه را انتخاب کرد. هر اندازه عدد مذکور به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان دهنده کارایی جرم بالاتر است.

کرزونس و *همکاران* سنجش‌ها را با استفاده از مدل‌های مقایسه‌ی قیمت برای تولید دارو در GSK توجیه کردند. توسعه‌ی روش ساده‌ی محاسبه‌ی هر سه متغیر این گونه برای GSK به اثبات رسید. در سال‌های

(۱) Reaction Mass Efficiency
(۲) GlaxoSmithKline
(۳) Curzons

پس از آن، RME کرزونس به واسطه‌ی شیمیدان‌ها در پژوهش، تجارت و مجموعه‌ی آموزشی درک بیش‌تری به‌دست آورد.

تا این جا به کارایی جرم، بازده، اقتصاد اتمی و فاکتور استوکیومتری واکنش پرداخته شده است. برای ادامه‌ی پاسخ به سوال نخستین و پیدا کردن راه حلی برای محاسبه‌ی کاتالیست‌ها و حلال‌های کمکی به مفهوم کامل‌تری از کارایی جرم واکنش نیاز است. مفهومی که به واسطه کار آندراوس[1] در سال ۲۰۰۵ میلادی ایجاد شد. وی در رساله‌ی ریاضی خود بیان کرده که کارایی جرم واکنش باید برای همه‌ی مواد درگیر در فرایند شیمیایی (نه صرفا جرم واکنش دهنده‌ها و فراورده) محاسبه شود [۱۹]. پارامتر دقیق‌تر RME توسط آندراوس در سال ۲۰۰۷ میلادی شرح داده شد معادله (۴). نسخه پایانی معادله کارایی جرم بستگی به شرایط واکنش و یا فرایند (بازیابی حلال واکنش و یا مواد پس از واکنش) دارد. این پارامتر در تلاش به منظور کاهش ضایعات در سطح ذاتی و جهانی مؤثر است [۲۰] [۲۳].

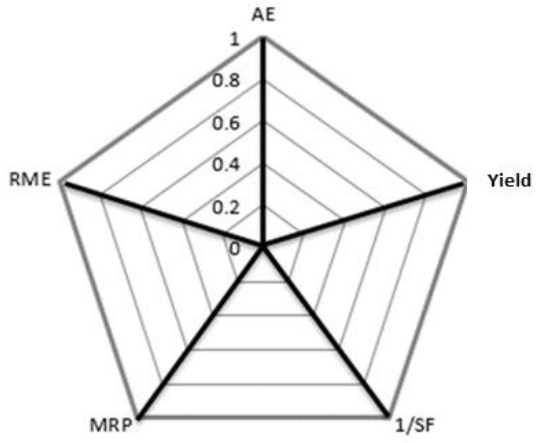
$$\mathrm{RME} = (\varepsilon)(AE)\left(\frac{1}{\mathrm{SF}}\right)(\mathrm{MRP}) \qquad \text{معادله (۴)}$$

در معادله (۴) ε همان بازده واکنش است و SF فاکتور استوکیومتری است که برای محاسبه‌ی واکنشگرهای اضافی استفاده می‌شود. پارامتر بازیافت مواد[2] MRP که برای محاسبه‌ی مواد دیگر استفاده شده در واکنش و همچنین مواد پس از واکنش مانند حلال‌های شستشو در مرحله‌ی استخراج یا کروماتوگرافی محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{MRP} = \frac{1}{1+\frac{(\varepsilon)(AE)[c+s+w]}{(SF)(m_p)}} \qquad \text{معادله (۵)}$$

بازه‌ی پارامتر بازیافت مواد بین صفر و یک می‌باشد $(0 < \mathrm{MRP} < 1)$. در معادله (۵) c، s، w به ترتیب جرم کاتالیست‌ها، حلال‌ها، مواد لازم که برای جداسازی و خالص سازی فراورده استفاده می‌شود و m_p جرم فراورده‌ی جمع آوری شده (ممکن است شامل فراورده‌ی جانبی قابل استفاده هم باشد) می‌باشد. حال RME در شرایط گوناگون ذکر شده در جدول ۴ بررسی می شود [۲۱]. همان‌گونه که می بینید با بازیافت کاتالیزگر، حلال واکنش، حلال های شستشو و حذف واکنشگر اضافی به معادله کروزونس تبدیل شد.

پنج پارامتری که در معادله‌ی کارایی جرم واکنش (RME، Yield، AE، 1/SF و MRP) می‌باشد را می‌توان در قالب یک پنج ضلعی نشان داده شود که در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲: پارامترهای معادله‌ی کارایی جرم واکنش(RME = کارایی جرم واکنش،RxnYield = بازده واکنش، AE= اقتصاد اتمی، 1/SF= معکوس استوکیومتری ، MRP= پارامتر بازیافت مواد)

هر محور مربوط به یکی از پنج پارامتر از مرکز نشأت می‌گیرد که بین صفر و یک محدود می‌شود. ارزش این پارامترها به عنوان نقطه‌هایی نشان داده شده و این‌ها به شکل یک پنج ضلعی متصل شده‌اند.

وضعیت "سبز" توسط پنج ضلعی منظم با شعاع یک (هر پارامتر برابر یک) نشان داده شده است. واکنشی که کم‌تر سبز است، پنج ضلعی بیش‌تر به سمت مرکز منحرف می‌شود (شکل۳–B) و در واکنش سبزتر شعاع پنج ضلعی به یک نزدیک‌تر است (شکل۳–A). بنابراین این نمودارها برای مقایسه‌ی دسته‌های گوناگون RME استفاده می‌شود به طوری که شیمیدان‌ها می‌توانند با یک نگاه واکنش سبز را معلوم کنند. میزان انحراف شعاع پنج ضلعی از شکل ایده‌آل منظم مرتبط به پارامترهای مسئول انحراف می‌باشد. این نمودارها به ما نشان می‌دهد که چه واکنشی سبز و یا سبزتر است [۲۱].

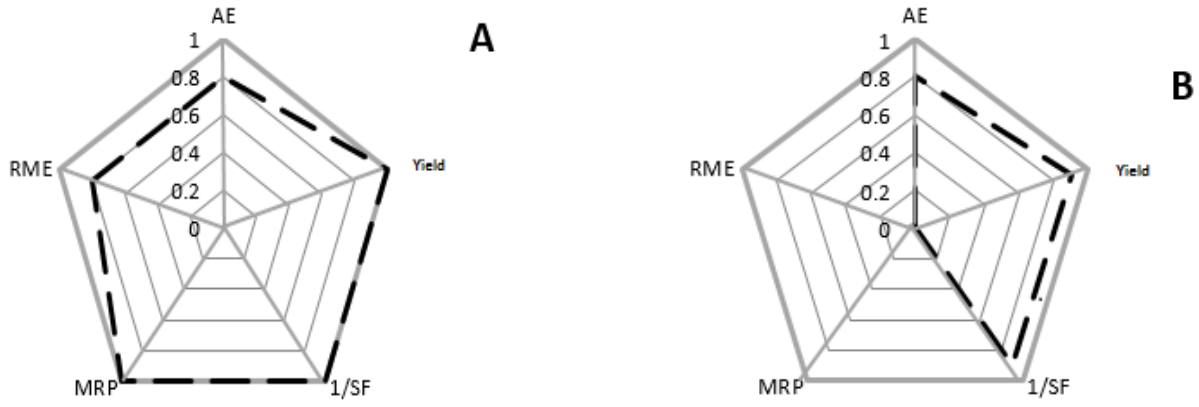
وضعیت "سبز" توسط پنج ضلعی منظم با شعاع یک (هر پارامتر برابر یک) نشان داده شده است. واکنشی که کمتر سبز است، پنج ضلعی بیش‌تر به سمت مرکز منحرف می‌شود (شکل۳–B) و در واکنش سبزتر شعاع پنج ضلعی به یک نزدیک‌تر است (شکل۳–A). بنابراین این نمودارها برای مقایسه‌ی دسته‌های گوناگون RME استفاده می‌شود به طوری که شیمیدان‌ها می‌توانند با یک نگاه واکنش سبز را معلوم کنند. میزان انحراف شعاع پنج ضلعی از شکل ایده‌آل منظم مربوط به پارامترهای مسئول انحراف می‌باشد. این نمودارها به ما نشان می‌دهد که چه واکنشی سبز و یا سبزتر است [۲۱].

(۱) Andraos

(۲) material recovery parameter

جدول۴: اشکال مختلف محاسبه کارایی جرم واکنش (معادلات با توجه به شرایط واکنش که در جدول با علامت نشان داده، نوشته شده است)

شکل معادله RME برای واکنش شیمیایی تحت شرایط مختلف			
شرایط	بازیافت	بدون بازیافت	شکل معادله RME=
واکنشگر اضافی **استفاده شده**			$(\varepsilon)(AE)(\frac{1}{SF})(\frac{1}{1+\frac{(\varepsilon)(AE)[c+s+w]}{(SF)(m_p)}})$
• کاتالیزور		√	
• حلال		√	
• مواد شیمیایی برای جداسازی و خالص سازی محصول		√	
واکنشگر اضافی **استفاده نشده**			$(\varepsilon)(AE)(\frac{1}{1+\frac{(\varepsilon)(AE)[c+s+w]}{(m_p)}})$
• کاتالیزور		√	
• حلال		√	
• مواد شیمیایی برای جداسازی و خالص سازی محصول		√	
واکنشگر اضافی **استفاده نشده**			$(\varepsilon)(AE)(\frac{1}{1+\frac{(\varepsilon)(AE)[c+w]}{(m_p)}})$
• کاتالیزور		√	
• حلال	√		
• مواد شیمیایی جداسازی و خالص سازی محصول		√	
واکنشگر اضافی **استفاده نشده**			$(\varepsilon)(AE)(\frac{1}{1+\frac{(\varepsilon)(AE)[c]}{(m_p)}})$
• کاتالیزور		√	
• حلال	√		
• مواد شیمیایی برای جداسازی و خالص سازی محصول	√		
واکنشگر اضافی **استفاده شده**			$(\varepsilon)(AE)(\frac{1}{SF})$
• کاتالیزور	√		
• حلال	√		
• مواد شیمیایی برای جداسازی و خالص سازی محصول	√		
واکنشگر اضافی **استفاده نشده**			$(\varepsilon)(AE)$
• کاتالیزور	√		
• حلال	√		
• مواد شیمیایی برای جداسازی و خالص سازی محصول	√		



شکل ۳: مقایسه شعاع پنج ضلعی با دوروش سنتز

سنجش‌های زیست محیطی

فاکتور زیست محیطی (E-factor):

آغاز صنایع شیمیایی دلیلی برای افزایش فشارهای زیست‌محیطی در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی بود. *راجر شلدون*[۱] فاکتور زیست محیطی را به عنوان یک سنجش برای تعیین کمیت میزان تولید زباله در یک فرایند شیمیایی مطرح کرد. زباله به عنوان "هر چیزی که فراورده‌ی مطلوب نیست" تعریف می شود، در سال‌های بعد فاکتور E به کاهش چشمگیر زباله‌ی صنعتی کمک کرد.

فاکتور زیست محیطی ذاتی و جهانی[۲]

در مورد ضایعات فرایندهای شیمیایی، فاکتور E با دو ارزیابی ذاتی و جهانی لحاظ می‌شود. روش ذاتی، که آندراوس آن را فاکتور اثرهای زیست محیطی نامید، براساس وزن مولکولی (MW)[۳] است. این اندازه‌گیری به عنوان نسبت وزن مولکولی فراورده‌های جانبی تقسیم بر وزن مولکولی فراورده‌ی مطلوب، محاسبه می شود. فاکتور زیست محیطی جهانی براساس جرم، یک دیدگاه کلی ارایه می‌دهد و به عنوان نسبت کل جرم ضایعات به جرم فراورده‌ی دلخواه محاسبه می‌شود معادله (۶).

$$\text{E factor} = \frac{\text{مجموع جرم ضایعات}}{\text{جرم محصول}} \qquad (۶)$$

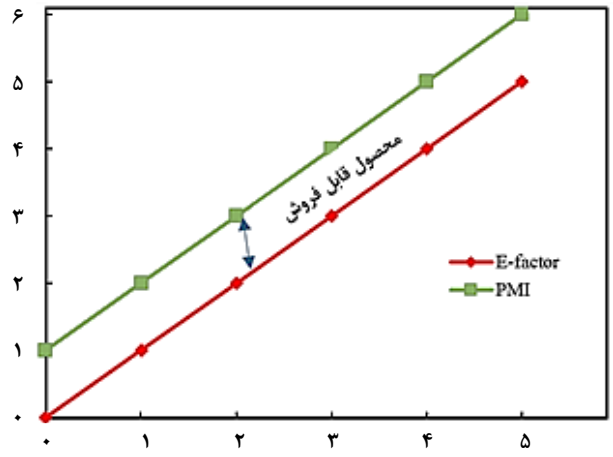
مشخص است که در اثرهای زیست محیطی جرم فراورده‌ی جانبی و ضایعات غیر قابل بازیافت با هم در نظر گرفته می شود که در فاکتور زیست محیطی ذاتی در نظر گرفته نمی شود. محاسبه‌های هر دو اندازه‌گیری در واکنشی که در آن واکنش دهنده های A و B (با غلظت برابر) در نظر گرفته شده که منجر به تولید فراورده‌ی دلخواه C، فراورده‌ی جانبی D و ضایعات غیرقابل بازیافت (Waste) می شود، در معادله نمادین زیر به طور اجمال بیان شده است [۲۳].

$$A + B \longrightarrow C + D + \text{Waste}$$

	A	B	C	D	Waste
جرم :	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
مول :	n_1	n_1	n_2	n_2	-
وزن مولکولی :	MW_1	MW_2	MW_3	MW_4	-

$$E_{mw} = \frac{MW_4}{MW_3}$$

$$\text{E factor} = \frac{(m_1 + m_2 + m_4 + m_5) - m_3}{m_3}$$



شکل ۴: E و PMI یک واحد باهم تفاوت دارند.

شدت جرم فرایند[۴] (PMI):

فاکتور دیگری به نام شدت جرم فرایند (PMI معکوس RME) توسط گروه گلاکسو ارایه شده است. PMI به عنوان جرم کل مواد مورد نیاز برای تولید جرم واحد از فراورده‌ی مورد نظر تعریف شده است معادله (۷).

$$\text{PMI} = \frac{1}{\text{RME}} = \frac{\text{جرم مواد شیمیایی (Kg)}}{\text{جرم محصول (Kg)}} \qquad (۷)$$

PMI نیز مانند فاکتور E موادی مانند حلال‌ها، مواد کمکی و کاتالیست‌ها را محاسبه می‌کند. در شرایط ایده‌آل ارزش PMI، معادل یک و یا نزدیک به آن (در نتیجه E=0) است. توجه داشته باشید که E و PMI معادل یک واحد باهم تفاوت دارند (معادله ۸). این تفاوت مربوط به مقدار فراورده‌ی مورد نظر به‌دست آمده در این فرایند است، که عملکرد واقعی فرایند می‌باشد [۲۳].

$$\text{PMI} = \frac{\text{جرم ضایعات} + \text{جرم محصول}}{\text{جرم محصول}} = \text{E} + 1$$

$$\text{PMI} = \text{E} + 1 \qquad (۸)$$

هنگام برنامه‌ریزی تولید، PMI پارامتر مناسب‌تری از فاکتور زیست محیطی در نظر گرفته می شود. زیرا به جای کاهش زباله به افزایش سود (فراورده‌ی قابل فروش) پرداخته است. این پارامتر با اولین اصل شیمی سبز (پیشگیری) منطبق‌تر است، زیرا به جای این‌که در جستجوی راهی برای مدیریت زباله‌ی تولید شده باشد، در نخست از تولید آن جلوگیری می‌کند [۱۸].

(۱) Roger Sheldon
(۲) Intrinsic and Global E Factors
(۳) Molecular Weight
(۴) Process Mass Intensity (PMI)

E و PMI مناسب‌ترین پارامتر برای یک ارزیابی اولیه یک فرایند می باشد (و به سادگی محاسبه می‌شود). محدودیت این دو پارامتر در سنجش سمیت مواد شیمیایی است [۱۸].

بازده جرم موثر[1] (EMY):

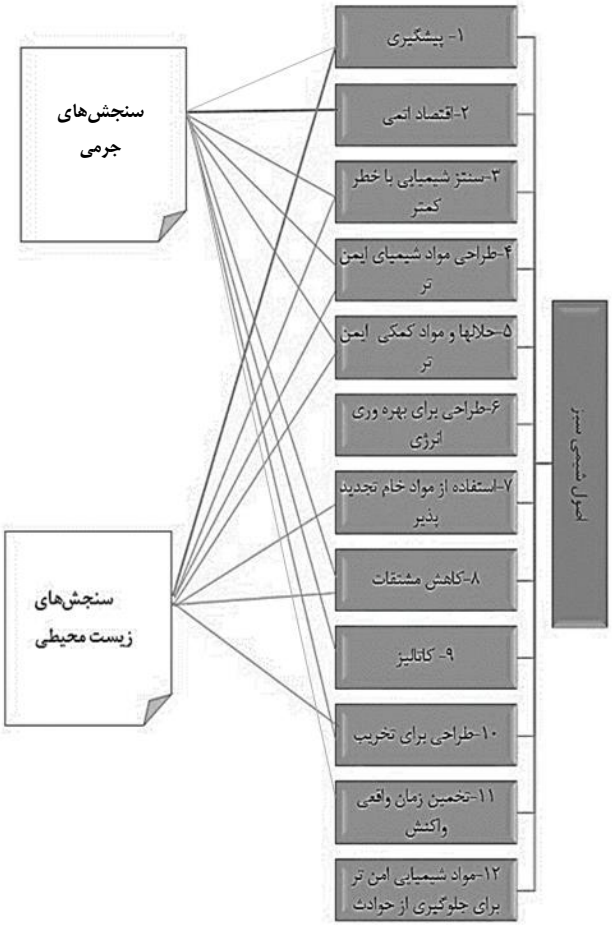
سمیت واکنش دهنده‌ها و معرف‌ها بسیار مهم است که بیش‌تر در بازده نادیده گرفته می‌شود، اما از آن‌جا که اغلب مواد شیمیایی دارای سمیت می‌باشند استفاده از این اندازه گیری برای اغلب سنتزهای مواد شیمیایی دشوار است. بازده جرم موثر به عنوان درصد جرم فراورده‌ی دلخواه نسبت به جرم تمام مواد ناسازگار (سمی) مورد استفاده در سنتز معرفی شده است معادله (۹) [۲۳، ۲۲، ۱۸].

$$EMY = \frac{\text{جرم محصول نهایی}}{\text{جرم واکنش دهنده های سمی(ناسازگار)}} \qquad (۹)$$

نتیجه‌گیری

یک برنامه درسی باید همسو با نیازهای جامعه باشد. با گسترش علم شیمی و تاثیر آن در زندگی و صنعت، استفاده از این علم باید همراه با حذف خطرها و آلاینده‌ها و یا کمینه کردن آن‌ها باشد. در این پژوهش با معرفی شیمی سبز به یکی از این راهکارها پرداخته شده است. سنجش‌های شیمی سبز که در این پژوهش معرفی شد امکان بررسی واکنش‌های شیمیایی، پیش از انجام واکنش را می‌دهد. آموزش سنجش‌های شیمی سبز راهی برای رسیدن به اصول شیمی سبز است، با بررسی اصول شیمی سبز می‌توان گفت سنجش‌های کمی ذکر شده در این پژوهش تمام اصول را شامل می‌شود. آموزش شیمی سبز در دوره کارشناسی شیمی باعث ایجاد خلاقیت و نوآوری در دانشجویان و حتی اساتید برای انجام واکنش‌های شیمیایی می‌شود.

شایان ذکر است محاسبه اقتصاد اتمی پیش از انجام واکنش دیدی صحیح برای انجام واکنش به پژوهشگر می‌دهد که آیا همه واکنش دهنده‌ها به فراورده تبدیل می‌شود؟ با محاسبه کارایی جرم واکنش می‌توان تمامی مواد واکنش دهنده، مواد کمکی و حلال‌ها را از نظر سبز بودن سنجید. پنج ضلعی کارایی جرم واکنش، روشی است برای مقایسه سریع روش‌های سنتزی یک واکنش یعنی با مقایسه کلی پنج ضلعی‌ها می‌توان با انتخاب پنج ضلعی منتظم‌تر روش سنتزی مناسب را انتخاب کرد.



شکل ۵: اصول شیمی سبز و سنجش‌های آن

بهتر است دانشجویان واحد درسی شیمی سبز را پس از گذراندن شیمی آلی ۲ اخذ نمایند. زیرا در این دوره دانشجویان باید با ساختار ترکیب‌های آلی، واکنش‌های آلی و مکانیسم‌های آن آشنایی داشته باشند.

نتیجه‌های به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که سنجش‌های ذکر شده در شیمی سبز بیش‌تر اصول شیمی سبز را شامل می‌شود (شکل۵). یک دانشجو می‌تواند با دانستن این سنجش‌ها و با در دست داشتن اطلاعات مورد نیاز یک واکنش شیمیایی را از منظر سبز بودن بسنجد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۶

(۱) Effective Mass Yield (EMY)

مراجع

[1] Hjeresen D. L., Anastas P. T., New Paid Affiliate Members Mean More Sponsored Affiliates in Developing Countries, *Chemistry International*, **24**(1): 13-14, (2002).

[2] Kirchhoff M., Education for a Sustainable Future, *Chem. Edu*., **87**, 121, (2010).

[3] Abhyankar S. B., "Introduction to Teaching Green Organic Chemistry", CRC Press: Boca Raton, (2012).

[4] Goes L.F., Leal S.H., Corio P., Fernandez C., "Pedagogical Content Knowledge Aspects of Green Chemistry of Organic Chemistry University Teachers", esera.org, (2013).

[5] Abraham M. A., Clark J., Winterton N., "Green Chemistry Metrics: Measuring and Monitoring Sustainable Processes", Edited by Alexei L., David J., Constable, Blackwell Publishing Ltd, ISBN: 978-1-405-15968-5, (2009).

[6] Andraos J., Dicks P. A., Green Chemistry Teaching in Higher Education: A Review of Effective Practices, *Chem. Educ. Res.*, **13**:69-79, (2012).

[7] Falah H., Environmental Chemistry is the Importance of Chemistry to the Environment, *Arabian Journal of Chemistry*, **7**:1-4, (2013).

[8] Anastas P., Warner J., "Green Chemistry: Theory and Practice", New York: Oxford University Press (1998).

[9] Poliakoff M., Fitzpatrick M., Farren T.R., Anastas P., Green Chemistry: Science and Politics of Change, *Science*, **297**: 807-810, (2002).

[10] Tobiszewski M., Marć M., Gałuszka A., Namieśnik J., Green Chemistry Metrics with Special Reference to Green Analytical Chemistry, *Molecules*, **20**: 10928-10946, (2015).

[۱۱] مستشاری، سید رضا، دیدگاه‌های آموزشی و پژوهشی شیمی سبز، *مجله محیط شناسی*، **۳۳**: ۱۰۰ تا ۱۰۴، (۱۳۸۳).

[۱۲] شاهی بیگباغی، جهان؛ صباغان، مریم؛ امام جمعه، محمدرضا، آموزش شیمی سبز، با طراحی و اجرای آزمایش‌های سبز در مبحث استوکیومتری شیمی متوسطه ، *نشریه فناوری آموزش*، **۱۱**: ۲۱ تا ۳۴، (۱۳۹۵).

[۱۳] حبیبی، لیلا؛ صباغان، مریم؛ امام جمعه، محمدرضا، مطالعه تطبیقی آموزش شیمی سبز در برنامه درسی مدارس متوسطه (ایران و چهار کشور پیشرفته) ، *فصلنامه نوآوری‌های آموزشی*، **۶۱**: ۶۷ تا ۹۰، (۱۳۹۵).

[۱۴] عابدینی، مژگان؛ صباغان، مریم؛ امام جمعه، محمدرضا، "طراحی برنامه درسی آزمایشگاه شیمی آلی بر مبنای شیمی سبز"، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، (۱۳۹۴).

[۱۵] حسن‌زاده مقیمی، ژیلا؛ صباغان، مریم؛ امام جمعه، محمدرضا، "بررسی تجارب جهانی در زمینه آموزش شیمی سبز به معلمان به منظور ارایه راهکارهای مناسب در ایران"، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، (۱۳۹۵).

[۱۶] نبی‌زاده کوکیا، شبنم؛ صباغان، مریم؛ قلخانی، معصومه؛ احمدی، غلامعلی، "طراحی محتوای آموزشی تولید سوخت های زیستی از زیست توده ها برای دانشجویان رشته شیمی: تاکید بر نانو فناوری"، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، (۱۳۹۵).

[۱۷] سرمد، زهره؛ بازرگان، عباس؛ حجازی، الهه، روش‌های تحقیق در علوم رفتاری، *تهران: انتشارات آگاه*، (۱۳۹۳).

[18] Albini A., Protti S., Paradigms in Green Chemistry and Technology, Springer Briefs in Green Chemistry for Sustainability, DOI 10.1007/978-3-319-25895-9_2, (2016).

[19] Dicks A.P., Hent A., "Green Chemistry Metrics A Guide to Determining and Evaluating Process Greenness", Springer Cham Heidelberg, ISBN 978-3-319-10500-0.(2015)

[20] Tobiszewski M., Mać M., Gałuszka A., Namieśnik J., Green Chemistry Metrics with Special Reference to Green Analytical Chemistry, *Molecules*. **20**: 10928-10946, (2015).

[21] Lapkin A., Constable D., "Green Chemistry Metrics: Measuring and Monitoring Sustainable Processes", Blackwell Publishing Ltd, ISBN: 978-1-405-15968-5,(2009).

[22] Constable D., Curzons A., Cunningham V., Metrics to 'Green' Chemistry—Which are the Best? *Green Chemistry* **4**: 521-527 (2002).

[23] Zhang W., Berkeley W., "Green Techniques for Organic Synthesis and Medicinal Chemistry", Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, ISBN 9781119288176 (pdf), P:6, (2018).