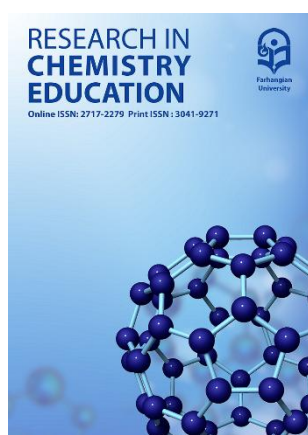


From past to future: a historical review of research in green chemistry and the role of pedagogical content knowledge

1. Younes Karimi Fardinpour : Department of Mathematics, Ah.C., Islamic Azad University, Ahar, Iran

*Corresponding Author's Email Address: Younes.karimiFardinpour@iau.ac.ir



RESEARCH ARTICLE

How to Cite: Karimi Fardinpour, Y. (2026). From past to future: a historical review of research in green chemistry and the role of pedagogical content knowledge. *Research in Chemistry Education*, 8(3), 46-70.

DOI: [10.48310/chemedu.2025.19344.1332](https://doi.org/10.48310/chemedu.2025.19344.1332)

Abstract:

Background and Objective: The aim of this study is to identify the dimensions and components of research conducted in the field of green chemistry education within the theoretical framework of pedagogical content knowledge (PCK). The study population consists of articles on green chemistry education published in reputable scientific journals.

Materials and Methods: By systematically reviewing the Noor specialized journals database, the National Publications Database, the Jihad Daneshgahi Scientific Information Center, and Google Scholar and removing duplicates, 30 articles published from 2004 to 2024 were retrieved. The titles, abstracts, and keywords of these articles were entered into MaxQDA software and analyzed after coding.

Findings: The results indicate that the first article related to green chemistry education was published in 2004. After that, we have evidence of increasing waves in the number of green chemistry education articles accepted by scientific journals, among which the journal titled 'Research in Chemistry Education' has the highest share. Among the chemistry subgroups, the largest contribution is given to 'electrochemistry, organic chemistry' and 'nanochemistry'. Among the twelve principles of green chemistry, the focus of the articles is on the sixth, the second, the first, and the seventh with 11, 7, 5, and 4 articles, respectively. Regarding the seventeen sustainable development goals, the attention of the articles is on the fourth goal, the eleventh, the seventh, the eighth, the third, and the sixth with 28, 13, 11, 7, 6, and 3 articles, respectively.

Conclusion: Based on the frequency analysis of codes, there is a hierarchy of importance of codes that reflects the main dimensions and components of research in green chemistry education.

Keywords: Education, Research, Green Chemistry, Sustainable Development, Pedagogical Content Knowledge, STEM education



Extended Abstract

Introduction

We live in a world that faces numerous problems such as water, air, energy, and industrial pollution crises (Gunbatar et al., 2025). In Iran's upstream documents such as the five-year development plans and especially in Article (2) of the Sixth Development Plan Law, reducing environmental pollution is a strategic goal. The goal of green chemistry is to reduce the harmful effects of industrial chemistry on the environment (Sheldon & Brady, 2022). For example, the use of water or ethanol instead of harmful organic solvents, the use of enzymes as catalysts (biocatalysis in biodiesel production), the production of biodegradable plastics from corn starch instead of petroleum-based plastics (polylactic acid PLA derived from corn starch), the design of chemical synthesis processes that minimize waste generation (such as the synthesis of pots), and energy efficiency using microwave-assisted synthesis that can significantly reduce reaction times and energy consumption compared to traditional heating methods are examples of the application of green chemistry.

Since about a quarter of a century ago, the green chemistry movement has been initiated with the twelve principles of Anastas and Warner (1998), aligned with the environment (Ganesh et al., 2021), and the seventeen Sustainable Development Goals of the United Nations (Carlsen & Bruggemann, 2022). Grieger et al. (2022) believe that there is a mismatch in the teaching of the twelve principles of green chemistry and the seventeen sustainable development goals. Armstrong et al. (2024) argued that there is an imbalance in the teaching of the principles of green chemistry and the sustainable development goals, and some principles and goals are given unequal emphasis. Li and Eilks (2021) pointed out that green chemistry education is mainly based on a laboratory and sustainability orientation, and controversial cultural and social issues have received less attention. Gunbatar et al. (2025) also concluded, by systematically reviewing research conducted in the field of green chemistry education within the framework of content education knowledge, that there are educational and research gaps in this field at the international level.

Just as the systematic review of Gunbatar et al. (2025) has provided valuable information on green chemistry education research at the international level, at the national level, we also need to review green chemistry education research to have a perspective on research in green chemistry education in Iran. The research trend of green chemistry education in Iran was examined. Is green chemistry education research in Iran based on sustainability or laboratory? Is there any inconsistency in green chemistry education research in Iran? Have the principles and objectives been addressed in a balanced manner in these researches? What are the main dimensions and components of green chemistry education in Iran? Which dimensions have received more and which components have received less attention? For this purpose, in the following, first the research background and then the theoretical framework are presented.

Methodology

The present study was conducted using a systematic review method. The screening process of selected articles was carried out according to the five-step checklist and PRISMA guidelines of 1) identification, 2) screening, 3) retrieval, 4) eligibility, and 5) review. In the first stage, the keywords 'green chemistry education' were searched in reputable databases including Google Scholar, Jihad Daneshgahi Scientific Database, Comprehensive Humanities Portal, Noormags Specialized Journals Database, and the National Publications Database. The number of sources found in Google Scholar (1070), Jihad Daneshgahi Scientific Database (60133), Comprehensive Humanities Portal (3), Normags Specialized Journals Database (10000), and the National Publications Database (243687). In the second stage, an advanced search for 'green chemistry education' in the title, abstract, and keywords was conducted in only approved Persian scientific articles without specifying a time period in the

National Publications Database. A total of 45 sources were found. The title of the article, publication date, and journal title for these 45 articles were fed into Excel. In the third step, an advanced search was repeated for Google Scholar, the Academic Jihad Database, the Comprehensive Humanities Portal, the Noormags Specialized Journals Database, and the National Journals Database, and the results were compared with the Excel file. In the fourth step, duplicate articles, articles without full text, conference papers, theses, and articles not related to green chemistry education were removed. In the fifth step, after a thorough review of the abstracts, 30 articles were selected. Table (1) lists the codes of the selected articles, their publication years, article titles, and journal titles.

Results and Discussion

To answer the research question, ‘What is the research trend in green chemistry education?’, it can be said that 30 articles have been published in the field of green chemistry education between 2004 and 2024. Figure (1) shows the number of articles published over time. This chart shows that research in green chemistry education began about two decades ago. In 2004, the first Persian article titled ‘Educational and Research Perspectives on Green Chemistry’ was published in the prestigious scientific journal ‘Environment’ published by the University of Tehran, which cooperates with the Iranian Society of Science, Engineering, and Waste Management. After starting with one article in 2004, There is evidence of a recession from 2005 to 2012. This eight-year recession was broken in 2013 with the publication of the second article. However, in 2015, there is evidence of the beginning of a four-year growth in the number of articles, which peaked in 2019 with five articles. In 2010, There is evidence of a second wave of increase in the number of articles, peaking in 2012 with seven articles. In 2014, we witnessed the third beginning of the increase in the number of articles. Therefore, in general, there has been an increase in the number of articles published in the field of green chemistry education, and we hope that if scientific and reputable journals support the acceptance and publication of green chemistry education articles, with the publication of these four articles in 2014, we will witness the beginning of the third wave of increase in the number of articles.

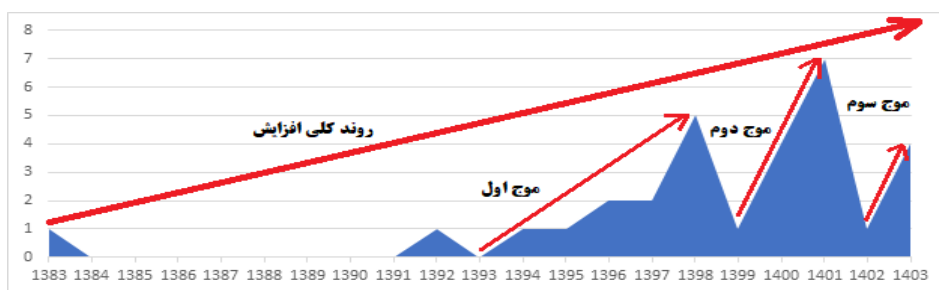


Fig. 1- Number of articles published over time and the first, second, and third waves in the increase in the number of articles in the field of green chemistry education

It is useful for researchers in the field of green chemistry education to know which scientific and reputable journals support the acceptance and publication of articles in this field. To answer the research question, ‘Which journals have a greater contribution to the publication of green chemistry education research?’, the data analysis shows that the first place goes to the journal ‘Research in Chemistry Education’ with 15 articles. The journals ‘Educational Innovations’, ‘Educational Technology’ and ‘Iranian Engineering Education’ are in the next rank. The rest of the journals have published only one article in the field of green chemistry education. Figure (2) shows the number of articles published in each journal.

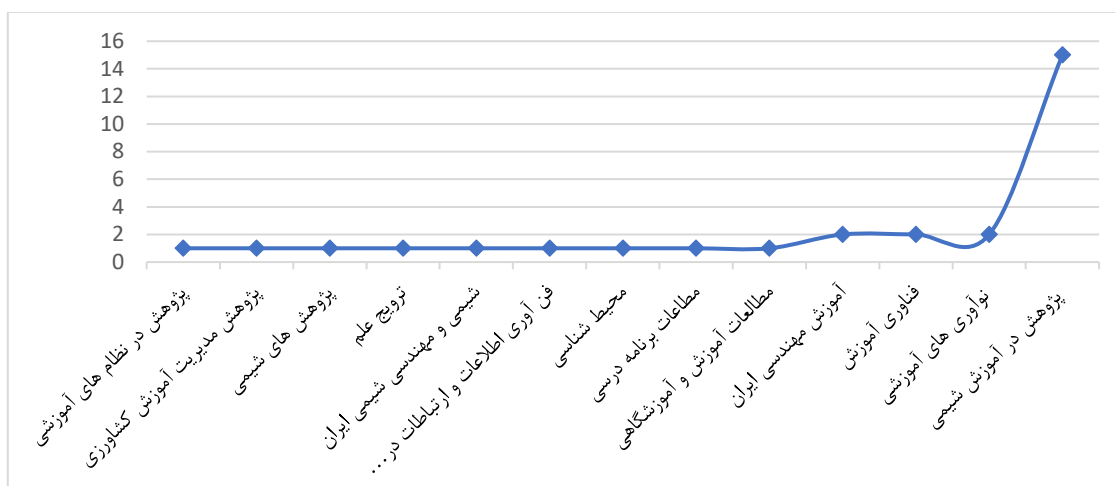


Fig. 2- Number of articles in the field of green chemistry education by journal

To answer the question ‘Which trends and subgroups of chemistry play a more prominent role in articles in the field of green chemistry education?’, the trends of chemistry were examined. The words ‘electro’, ‘nano’ and ‘organic’ appear in 7 (23.3%), 5 (16.6%) and 3 (10%) articles, respectively. Therefore, among the trends and subgroups of chemistry, ‘electrochemistry’, ‘organic chemistry’ and ‘nanochemistry’ are mentioned.

In response to the question ‘What is the dominant orientation in green chemistry education research?’, many articles (n=17) are dedicated to the sustainability model, which is a content-oriented approach, indicating that the main orientation of green chemistry education articles is to integrate green chemistry with sustainable development. Six articles refer to the use of laboratory work for green chemistry education, which is the traditional approach to chemistry education. However, 2 articles have both orientations, in which practical laboratory work and content related to sustainable development are simultaneously directed towards providing green chemistry education. The social model, which is related to the sociological approach to green chemistry education and hot social and political debates, and the real model, which is related to the applied approach to green chemistry education and the integration of green chemistry principles into the production process of an industrial institution, did not receive any articles.

In the case of the Twelve Principles of Green Chemistry, the focus of the articles is on the sixth, second, first and seventh principles with 11, 7, 5 and 4 articles, respectively. No article has emphasized all twelve principles of green chemistry. Only one article has mentioned all four principles, first, second, sixth, and seventh. In the case of the seventeen Sustainable Development Goals, the focus of the articles is on the fourth, eleventh, seventh, eighth, third, and sixth goals with 28, 13, 11, 7, 6, and 3 articles, respectively.

Conclusions

In response to the research question ‘Within the PCK framework, what are the dimensions and components of green chemistry education research?’, statistical analysis of the code list based on their repetitions shows a hierarchy of importance that potentially reflects the key dimensions and components in green chemistry education articles as follows.

1. The ‘Education’ dimension includes the components of teaching, learning, curriculum, and students, which indicates the essential role of this dimension in green chemistry education articles.
2. The ‘Sustainability’ dimension includes the components of green, environment, pollution, waste, and renewable, which indicates that green chemistry education articles intend to address environmental challenges.
3. The ‘Science and Technology’ dimension includes the components of engineering, technology, and STEM, which indicates the scientific and technical approach in green chemistry education articles.

4. The 'Application' dimension includes the practical and experimental components, which indicates the articles' emphasis on practical and applied learning of green chemistry in the real world.

5. The 'Future' dimension with the components of development and growth indicates the prospective perspective of green chemistry education articles, which focuses on evolving educational practices and the needs of future societies from green chemistry education.

6. The 'Global' dimension with the components of society, countries, and population indicates the articles' attention to green chemistry education on an international scale and broader than the national scale. In other words, the articles highlighted global challenges and joint efforts of different communities from all over the world to elevate the importance of the topic from the national to the international level.

7. The 'Challenges' dimension with the components of solutions, effectiveness and impact requires a critical examination of the existing green chemistry education system and exploring solutions to overcome the barriers to its quality education.

Generally, these dimensions and components show that the green chemistry education articles prioritized education for sustainable development and emphasized the integration of science and technology into its teaching methods to address the importance of preparing students to address environmental challenges through applied and interdisciplinary approaches, taking into account the global implications.

از گذشته تا آینده: بررسی تاریخچه پژوهش در آموزش شیمی سبز و نقش دانش آموزش محتوا

۱. یونس کریمی فردین پور *، گروه ریاضی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: Younes.karimiFardinpour@iau.ac.ir

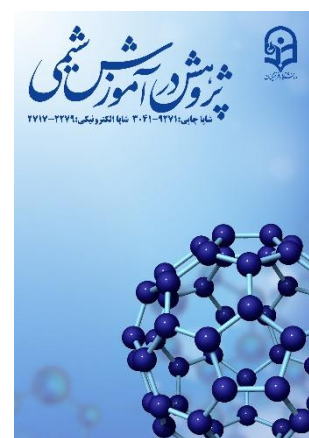
چکیده

پیشینه و اهداف: هدف از این پژوهش، شناسایی ابعاد و مولفه‌های مقالات منتشرشده در حوزه آموزش شیمی سبز در چارچوب نظری دانش آموزش محتوا (PCK) است. جامعه آماری این مطالعه، مقالات آموزش شیمی سبز منتشرشده در مجلات علمی و معتبر است.

روش‌ها: با مرور سیستماتیک در پایگاه اطلاعاتی مجلات تخصصی نور، بانک اطلاعات نشریات کشور، مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی و گوگل اسکالر و حذف موارد تکراری، تعداد ۳۰ مقاله در محدوده زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ بازیابی شده است. عنوان، چکیده و کلید واژگان این مقالات وارد نرم افزار MaxQDA شده و بعد از کدگذاری تحلیل شده است. **یافته‌ها:** نتایج حاکی از آن است که پس از سال ۱۳۸۳ شاهد موج‌های افزایشی در تعداد مقالات آموزش شیمی سبز پذیرش شده از طرف مجلات علمی هستیم که در این بین، نشریه «پژوهش در آموزش شیمی» دارای بیشترین سهم است. از بین زیر گروه‌های شیمی، بیشترین سهم به «الکتروشیمی»، «شیمی آلی» و «نانو شیمی» اختصاص دارد. اغلب جهت‌گیری مقالات، پایداری و آزمایشگاهی است. از بین اصول دوازده‌گانه شیمی سبز، تمرکز مقالات به ترتیب بر اصول ششم (طراحی بهینه برای استفاده از انرژی)، دوم (اقتصاد اتمی)، اول (پیشگیری از تولید زباله) و هفتم (استفاده از مواد تجدیدپذیر) به تعداد ۱۱، ۷، ۵ و ۴ مقاله است. در مورد اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار، توجه مقالات به ترتیب بر اهداف چهارم (آموزش با کیفیت)، یازدهم (شهرها و جوامع پایدار)، هفتم (انرژی مقرون به صرفه و پاک)، هشتم (کار شایسته و رشد اقتصادی)، سوم (سلامت و تندرستی خوب) و ششم (آب تمیز و فاضلاب) به تعداد ۲۸، ۱۳، ۱۱، ۷، ۶ و ۳ مقاله است.

نتیجه‌گیری: بر اساس تحلیل فراوانی کدها، سلسله مراتبی از اهمیت کدها وجود دارد که منعکس کننده ابعاد و مؤلفه‌های اصلی پژوهش در آموزش شیمی سبز ایران است.

کلیدواژگان: آموزش، پژوهش، شیمی سبز، توسعه پایدار، دانش آموزش محتوا، آموزش STEM



نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نحوه استناددهی: کریمی فردین پور، یونس. (۱۴۰۵). از گذشته تا آینده: بررسی تاریخچه پژوهش در آموزش شیمی سبز و نقش دانش آموزش محتوا. پژوهش در آموزش شیمی، ۸(۳)، ۷۰-۴۶.

DOI:

10.48310/chemedu.2025.19344.1332



مقدمه

ما در جهانی زندگی می‌کنیم که با مشکلات عدیده‌ای مانند بحران‌های آب، هوا، انرژی و آلودگی‌های صنعتی روبه‌رو هستیم (گونبتر و همکاران^۱، ۲۰۲۵). در اسناد بالادستی ایران مانند برنامه‌های توسعه پنج‌ساله و به‌ویژه در ماده (۲) قانون برنامه ششم توسعه، کاهش آلودگی‌های محیط زیست یک هدف راهبردی است (رضایی و همکاران، ۱۴۰۲). هدف شیمی سبز^۲ کاهش تأثیرات زیان‌بار شیمی صنعتی بر محیط زیست است (شلدون و بردی^۳، ۲۰۲۲). به عنوان مثال، استفاده از آب یا اتانول به جای حلال‌های آلی مضر، استفاده از آنزیم‌ها به عنوان کاتالیزور (بیوکاتالیزور در تولید بیودیزل)، تولید پلاستیک‌های زیست تخریب‌پذیر از نشاسته ذرت به جای پلاستیک‌های مبتنی بر نفت (پلی لاکتیک اسید PLA مشتق‌شده از نشاسته ذرت)، طراحی فرآیند سنتز شیمیایی که تولید ضایعات را به حداقل می‌رساند (مانند سنتز گل‌دان‌ها) و بهره‌وری انرژی با استفاده از سنتز به کمک میکروویو که می‌تواند زمان واکنش و مصرف انرژی را در مقایسه با روش‌های گرمایش سنتی به میزان قابل توجهی کاهش دهد، نمونه‌هایی از کاربرد شیمی سبز هستند.

از حدود ربع قرن پیش، جنبش شیمی سبز با اصول دوازده‌گانه آناستاس و وارنر^۴ (۱۹۹۸)، همسو با محیط زیست (گونش و همکاران^۵، ۲۰۲۱) و اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار^۶ سازمان ملل متحد (کارلسون و براگمن^۷، ۲۰۲۲) آغاز شده‌است. گریگر^۸ و همکاران (۲۰۲۲) معتقدند که در آموزش اصول دوازده‌گانه شیمی سبز و اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار، ناهماهنگی وجود دارد. آرمسترانگ^۹ و همکاران (۲۰۲۴) استدلال کردند که در آموزش اصول شیمی سبز و اهداف توسعه پایدار، تعادل برقرار نیست و بعضی اصل‌ها و هدف‌ها تأکید نابرابر دارند. لی و ایلکز^{۱۰} (۲۰۲۱) اشاره کردند که آموزش شیمی سبز عمدتاً مبتنی بر جهت‌گیری آزمایشگاهی و پایداری است و موضوعات بحث‌برانگیز فرهنگی و اجتماعی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. گونبتر و همکاران (۲۰۲۵) نیز با مرور سیستماتیک^{۱۱} پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه آموزش شیمی سبز در چارچوب دانش آموزش محتوا^{۱۲} نتیجه گرفته‌است که در سطح بین‌المللی، شکاف‌های آموزشی و پژوهشی در این زمینه وجود دارد.

همان‌طور که مرور گونبتر و همکاران (۲۰۲۵) اطلاعات ارزشمندی درباره پژوهش‌های جهانی در حوزه آموزش شیمی سبز ارائه می‌دهد، ضروری است که پژوهش‌های داخلی ایران نیز مورد بازنگری قرار گیرد تا تصویری جامع و واقعی از وضعیت پژوهش‌های آموزش شیمی سبز در کشورمان حاصل شود. این مطالعه قصد دارد، روند پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور را بررسی کند تا مشخص شود، آیا آموزش شیمی سبز در ایران بیشتر مبتنی بر اصول پایداری است یا صرفاً جزئی از فعالیت‌های آزمایشگاهی. همچنین می‌خواهیم، ناهماهنگی‌های موجود در پژوهش‌ها را دریابیم. بسنجیم که میزان توجه به اصول و اهداف متعادل است یا دچار نابرابری شده‌است. علاوه بر این، قصد داریم، ابعاد و مؤلفه‌های اصلی آموزش شیمی سبز در ایران را شناسایی کنیم و بدانیم کدام جنبه‌ها بیشتر و کدام، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. بنابراین هدف از این پژوهش، شناسایی ابعاد و مؤلفه‌های پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه آموزش شیمی سبز ایران در چارچوب نظری دانش آموزش محتوا (PCK) است. سوالات پژوهشی زیر، هدایت این مطالعه را بر عهده داشته‌اند.

۱) روند پژوهش‌ها در آموزش شیمی سبز ایران چگونه است؟

¹ Gunbatar et al.

² Green Chemistry

³ Sheldon, & Brady

⁴ Anastas & Warner

⁵ Ganesh et al.

⁶ SDGs (Sustainable

Development Goals)

⁷ Carlsen, & Bruggemann

⁸ Grieger, Hill, & Leontyev

⁹ Armstrong et al.

¹⁰ Li, & Eilks

¹¹ Systematic Review

¹² PCK (Pedagogical

Content Knowledge)

- ۲) کدام نشریات، سهم بیشتری در انتشار پژوهش‌های آموزش شیمی سبز ایران دارند؟
 - ۳) کدام گرایش‌های شیمی، نقش پررنگ‌تری در پژوهش‌های آموزش شیمی سبز ایران دارند؟
 - ۴) جهت‌گیری غالب در پژوهش‌های آموزش شیمی سبز ایران چیست؟
 - ۵) کدام یک از اصول دوازده‌گانه شیمی سبز مورد توجه بیشتر پژوهش‌های آموزش شیمی سبز ایران قرار گرفته است؟
 - ۶) کدام یک از اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار مورد توجه بیشتر پژوهش‌های آموزش شیمی سبز ایران قرار گرفته است؟
 - ۷) در چارچوب PCK (دانش آموزش محتوا)، ابعاد و مؤلفه‌های پژوهش‌های آموزش شیمی سبز ایران چیست؟
- برای رسیدن به این اهداف، در بخش‌های بعد، ابتدا پیشینه پژوهشی آموزش شیمی سبز و سپس چارچوب نظری آن ارائه شده است.

پیشینه پژوهش

یونسکو (۲۰۱۵) سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ را دهه آموزش برای توسعه پایدار نامید تا آموزش برای توسعه پایدار تبدیل به یک هدف سیاسی مشترک جهانی شود (هالپاپ، ۲۰۲۱). اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار عبارتند از (۱) ریشه‌کن کردن فقر، (۲) ریشه‌کن کردن گرسنگی، (۳) سلامت و رفاه، (۴) آموزش با کیفیت، (۵) برابری جنسیتی، (۶) دسترسی به آب آشامیدنی و بهداشت، (۷) انرژی مقرون به صرفه و پاک، (۸) کار شایسته و رشد اقتصادی، (۹) صنعت، نوآوری و زیرساخت، (۱۰) کاهش نابرابری، (۱۱) شهرها و جوامع پایدار، (۱۲) مصرف و تولید مسئولانه، (۱۳) اقدام برای جلوگیری از تغییرات آب‌وهوایی، (۱۴) حیات زیر آب، (۱۵) حیات روی زمین، (۱۶) صلح، عدالت و نهادهای قوی و (۱۷) مشارکت برای رسیدن به اهداف که تضمین می‌کند تا سال ۲۰۳۰ همه یادگیرندگان، دانش و مهارت‌های مورد نیاز برای ترویج توسعه پایدار را کسب می‌کنند (سازمان ملل متحد، ۲۰۱۵، هدف ۴.۷: ص ۱۷) یکی از مهم‌ترین رشته‌هایی که می‌تواند به کسب دانش و مهارت‌های مورد نیاز برای ترویج توسعه پایدار کمک کند، رشته شیمی است (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵). شیمی سبز بر اساس اصول دوازده‌گانه (۱) پیشگیری، (۲) اقتصاد اتمی، (۳) کاهش خطر، (۴) کاهش سمی بودن، (۵) حل‌ال‌های سبز، (۶) بازدهی انرژی، (۷) مواد تجدیدپذیر، (۸) کاهش مشتقات، (۹) کاتالیزور، (۱۰) تجزیه پذیری، (۱۱) تخمین زمان، (۱۲) کاهش اتفاقات ناگوار به ترویج پایداری می‌پردازد (آبرجت و همکاران، ۲۰۱۹). شیمی سبز برای آماده‌سازی دانش‌آموزان و دانشجویان برای آینده‌ای که بر پایه پایداری بنا شده است، مهم و ضروری است (زیون و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، در سال ۲۰۲۱ سازمان ملل ده اصل شیمی پایدار و سبز را پیشنهاد کرد که بر نوآوری‌ها برای پرداختن به مسائل پایداری با دیدگاه اجتماعی تکیه دارد و به عنوان مثال، محافظت از کارگران و گروه‌های آسیب‌پذیر، به حداکثر رساندن منافع اجتماعی و عدالت را برجسته می‌کرد (هالپاپ، ۲۰۲۱). این ده اصل با دوازده اصل شیمی سبز (به عنوان مثال، پیشگیری از ضایعات، سنتز مواد شیمیایی کم‌خطر و طراحی مواد شیمیایی ایمن‌تر) و هفده هدف سازمان ملل متحد (مانند مصرف و تولید پایدار) مطابقت دارند (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵). آندراوس و دیکس (۲۰۱۲) با مروری بر پژوهش‌های منتشرشده در خصوص آموزش شیمی سبز و پایدار برای دانشجویان مقطع کارشناسی نشان داد که پژوهش‌ها بیشتر در شاخه شیمی آلی قرار می‌گرفت، هرچند برای شاخه‌های دیگر شیمی (به عنوان مثال، شیمی عمومی و شیمی تجزیه) نیز وجود داشت. در این پژوهش شکاف آموزشی و پژوهشی مبنی بر وجود فقدان جزئیات در مورد رویه‌های تجربی آموزش شیمی سبز گزارش شده است. علاوه بر این، بیشتر مقالات به معیارها، ارزیابی‌های چرخه عمر و مصرف انرژی اشاره‌ای نکردند. پیشنهاد آنها ادغام شیمی سبز با سایر رشته‌ها مانند تجارت و اخلاق است.

در مطالعه دیگری، لی و ایلکز (۲۰۲۱) با یک مرور سیستماتیک و جستجوی کلمات کلیدی "آموزش شیمی سبز"، "آموزش شیمی پایدار"، "مسائل علمی-اجتماعی" در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی Google Scholar, Web of Science، و مرکز اطلاعات منابع آموزشی (ERIC) و پایگاه داده زیرساخت دانش ملی چین بین سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۲۰ مشخص کردند که تعداد مقالات آموزش شیمی سبز برای مقطع آموزش عالی خیلی بیشتر از تعداد مقالات آموزش شیمی سبز برای مقطع دبیرستان است. آموزش شیمی سبز اغلب مدرس محور، با تدریس تئوریک (نظری) در کلاس درس و یا کار آزمایشگاهی (عملی) با شیمی آلی است و رویکردهای دیگری مانند بحث‌های اجتماعی و سیاسی نادر است.

مارکز و همکاران (۲۰۲۱) مقالات مربوط به آموزش شیمی سبز منتشرشده در مجله آموزش شیمی را در سال ۲۰۱۹ بررسی کردند. جستجوی آن‌ها با کلیدواژه آموزش شیمی سبز، به هیچ سطح آموزشی محدود نشد. ۲۸۶ مقاله برای تجزیه و تحلیل تعیین شد. هدف بیشتر این مقالات بهبود و تولید منابع آموزشی بود. گروه‌های هدف بیشترشان دانشجویان مقطع کارشناسی بود. بیشتر مقالات آزمایشگاهی و عمدتاً شیمی آلی بود. ادغام بین رشته‌ای تنها در ۸ درصد از مقالات صورت گرفته بود. یکی از شکاف‌های آموزشی این بود که منابع آموزشی به تفصیل شرح داده نشدند. این امر اجرای فعالیت‌های آموزشی توسط معلمان یا مدرسان دیگر را دشوار می‌کند. اهمیت بخشی به بعضی از اصول دوازده‌گانه شیمی سبز، کم‌رنگ‌تر بوده است.

چن و همکاران (۲۰۲۰) مروری بر ادبیات آموزش شیمی سبز انجام دادند. آنها ادغام شیمی سبز با سایر رشته‌ها، سطوح دانش، مهارت‌های تفکر، روش‌های آموزشی و راهبردهای مورد استفاده برای آموزش شیمی سبز در مقالات منتشر شده در مجلات نمایه شده در Web of Science بین ژانویه ۲۰۰۰ و آوریل ۲۰۲۰ را بررسی کردند. از نظر ادغام با سایر رشته‌ها، در نیمی از ۴۵ مقاله منتخب، ادغام شیمی سبز با علوم طبیعی، علوم اجتماعی، فلسفه، بیوتکنولوژی، اکولوژی، فیزیولوژی و هوش مصنوعی انجام شده بود. در ۶ مقاله، ادغام با روانشناسی بود. بیشتر مقالات از ترکیبی از روش‌های تدریس مانند سخنرانی، یادگیری مشارکتی و یادگیری مبتنی بر مسئله، استفاده می‌شد. نیمی از مقالات تدریس آزمایشگاهی را ذکر کردند. مهارت‌های تفکر سطح پایین مانند دانش و درک مطلب در بیشتر مقالات و مهارت‌های تفکر سطح بالا مانند ارزشیابی کمتر نشان داده شده است.

گونتر و همکاران (۲۰۲۵) تحقیقات آموزش شیمی سبز و پایدار را که آموزش در سطح عالی را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ ارائه می‌کرد، مرور کرد. پایگاه داده Web of Science و ERIC با استفاده از عنوان و بررسی چکیده غربالگری شدند. در مجموع، ۴۹ مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ابزار تجزیه و تحلیل دانش آموزش محتوا برای آموزش شیمی سبز بود. نتایج نشان داد که شیمی آلی (n=۱۵) مهم‌ترین شاخه شیمی در مقالات است. در مورد مؤلفه یادگیرنده، مطالعات ناکافی بودند و مطالعات بسیار کمی اطلاعاتی را در مورد تصورات نادرست و مشکلاتی که دانشجویان ممکن است در حین یادگیری شیمی سبز با آن مواجه شوند، ارائه کردند. در مورد مؤلفه برنامه درسی، در میان اصول شیمی سبز، «استفاده از مواد اولیه تجدیدپذیر» بیشترین تأکید را داشت، در حالی که کمترین تأکید «کاهش مشتقات» و «پیشگیری از آلودگی» بود. چهارده مطالعه از راهبردهای تدریس موضوعی خاص (به عنوان مثال، آموزش مشارکتی و راهبردهای پروژه محور) استفاده کردند اما فناوری آموزش استفاده نشد. بیشتر مطالعات شامل مطالعات آزمایشگاهی (n = 31) است. در نهایت، در مورد ارزشیابی، مطالعات بسیار کمی بر سنجش مهارت‌های دانش‌آموزان (مهارت‌های آزمایشگاهی، مهارت‌های بحث و غیره) و متغیرهای عاطفی متمرکز شده‌اند. پیشنهاد شده است از ابزارهای ارزشیابی جایگزین (به عنوان مثال، روبریک‌ها و نقشه‌های مفهومی) استفاده شود. اتزکون و فرگوسن (۲۰۲۳) معتقدند که از طریق یادگیری شیمی سبز، یادگیرندگان بین شیمی و موضوعات دیگر زندگی روزمره ارتباط برقرار می‌کنند. آنها آموزش شیمی سبز را هم برای مدرسان و هم برای یادگیرندگان چالش

برانگیز می‌داند. چرا که از طریق آموزش شیمی سبز علاوه بر اصول دوازده‌گانه، باید مفاهیم مرتبط با اهداف هفده‌گانه نیز معرفی شود که مستندات آموزشی و پژوهشی کمی برای آن وجود دارد. مارکز و همکاران (۲۰۲۰) بر فقدان مستندات آموزشی و پژوهشی در مورد ویژگی‌های تدریس شیمی سبز تأکید کردند.

با توجه به پیشینه پژوهشی، می‌توان گفت که تاکنون تحقیقات متعددی در مرور پژوهش‌های آموزش شیمی سبز در سطح بین‌المللی صورت گرفته‌است. روندهای کلی پژوهش‌های پیشین و ارتباط بین آنها نشان می‌دهد که آموزش شیمی سبز عمدتاً بر کاربردهای آزمایشگاهی، شاخه‌های خاص شیمی و هدف‌های خاص آموزشی تمرکز دارند. یافته‌های آندراوس و دیکس (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که بیشتر مقالات آموزش شیمی سبز، بر شیمی آلی متمرکز شده‌اند. لی و ایلکز (۲۰۲۱) بر تفاوت چشمگیر در کمیت مقالات بین دوره‌های مختلف تحصیلی تأکید می‌کنند در حالی که غالباً بر رویکردهای تئوری و آزمایشگاهی محدودند. بررسی مارکز و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که غالب پژوهش‌ها تمرکز بر بهبود منابع آموزشی در سطح دانشگاهی است. چن و همکاران (۲۰۲۰) بر ضرورت توجه بیشتر به مهارت‌های سطح بالا، مانند ارزشیابی و تفکر انتقادی تأکید دارند، که در پژوهش‌های جاری کمبود قابل توجهی دارد. گونبتر و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که بدفهمی‌ها، مشکلات یادگیری، متغیرهای شناختی و عاطفی نیازمند توجه بیشتر پژوهشگران است.

بنابراین علی‌رغم وجود پژوهش‌های متنوع و غنی در سطح بین‌المللی، کاستی‌هایی در شناخت کامل ویژگی‌های آموزش شیمی سبز در سطح ملی وجود دارد که نیازمند مطالعات عمیق‌تر در این حوزه‌ها هستیم. بنابراین، مرور و تحلیل جامع پژوهش‌های داخلی در این حوزه، می‌تواند چشم‌اندازی جدید و متناسب با نیازهای ملی ارائه دهد و مسیر توسعه آموزش شیمی سبز در کشورمان را هموار سازد. نیاز به مطالعه بیشتر برای ارائه یک حس گسترده‌تر از جزئیات دانش آموزش شیمی سبز وجود دارد (چن و همکاران، ۲۰۲۰؛ لی و ایلکز، ۲۰۲۱). بنابراین برای بررسی ویژگی‌های خاص دانش آموزش شیمی سبز، نیازمند یک چارچوب نظری هستیم. در ادامه این چارچوب نظری بیان می‌شود.

چارچوب نظری

گونبتر و همکاران (۲۰۲۵) بر این باورند که مشکلات آموزش شیمی سبز، چیزی نیست که فقط با دانستن اینکه مدرس آن چقدر باید راجع به شیمی سبز تخصص داشته باشد، پاسخ داده‌شود. بلکه جنبه‌های مختلفی از صلاحیت‌های پیش، حین و بعد از تدریس را در بر می‌گیرد. متخصصان آموزش ریاضی و علوم از آن صلاحیت‌ها به عنوان دانش آموزش محتوا (PCK) یاد می‌کنند که با دانش محتوا (CK) متفاوت است. منظور از دانش محتوا، دانشی است که آموزش داده می‌شود تا یادگیرندگان، آن را فراگیرند. طبیعی است که مدرسان شیمی سبز باید آگاهی و دانش لازم در مورد دانش محتوا، یعنی اصول دوازده‌گانه شیمی سبز را داشته باشند. اما دانش آموزش، دانشی از جنس دیگر است که نحوه تدریس شیمی سبز را مورد مطالعه قرار می‌دهد. برای مدرس شیمی سبز، کسب دانش محتوا، شرط لازم است، اما کافی نیست. به این معنی که کسب دانش محتوا، تضمین کننده کسب دانش آموزش آن محتوا، نیست (نیلسون و ویکستروم^۱، ۲۰۱۵). علاوه بر این، کسب دانش آموزش به طور عمومی، تضمین کننده کسب دانش آموزش برای هر محتوایی نیست (مهدوی و همکاران، ۱۴۰۳). یعنی ساده‌انگاری است

¹ Nilsson, & Vikström

اگر تصور شود، فردی که به طور عمومی، دانش آموزش را کسب کرده است، توانایی آموزش هر محتوایی را به دست آورده است. به عبارت دیگر، در چارچوب نظری دانش آموزش محتوا، دانش محتوا و دانش آموزش جدا از هم نیستند بلکه دانش آموزش محتوا ترکیبی مناسب و تلفیقی متناسب از هردو آنها است.

ایده دانش آموزش محتوا اولین بار توسط لی شولمن^۱ در دهه هشتاد میلادی مطرح شد و بر اهمیت ترکیب دانش آموزش و دانش محتوا تأکید داشت (مهدوی و همکاران، ۱۴۰۳). شولمن معتقد بود این نوع دانش، ویژگی متمایز معلمان حرفه‌ای از متخصصان دانش موضوعی است (مگنوسون و همکاران، ۱۹۹۹). دانش آموزش شیمی سبز، ترکیبی مناسب و تلفیقی متناسب از دانشی با عنوان شیمی سبز با دانشی با عنوان آموزش آن است که یکی از عوامل تأثیرگذار در کیفیت یادگیری شیمی سبز است (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵). چراکه دانش آموزش محتوا، دقیقاً همان چیزی است که راه‌های مؤثر ارائه محتوای با کیفیت به یادگیرندگان را مطالعه می‌کند (نالیک و همکاران، ۲۰۲۳).

به باور گونبتر و همکاران (۲۰۲۵) در حالی که از مطرح شدن دانش آموزش محتوا به عنوان یک چارچوب پژوهشی، بیش از سه دهه می‌گذرد و از شروع پژوهش در آموزش شیمی سبز بیش از دو دهه می‌گذرد، دانش آموزش شیمی سبز در چارچوب نظری دانش آموزش محتوا، کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. علاوه بر این، از نظر مهدوی و همکاران (۱۴۰۳) دانشگاه فرهنگیان که یک دانشگاه ماموریت محور است، باید توجه ویژه‌ای به دانش آموزش محتوا داشته باشد تا بین مدرس شیمی سبز و شیمیدان سبز تمیز قایل شود. بنابراین، مطابق چارچوب نظری دانش آموزش شیمی سبز، پنج مؤلفه مجزا اما مرتبط (۱) جهت گیری، (۲) برنامه درسی، (۳) درک یادگیرنده، (۴) راهبردهای تدریس و (۵) راهبردهای ارزشیابی، به شرح زیر وجود دارد.

۱- جهت گیری آموزش شیمی سبز

مگنوسون و همکاران (۱۹۹۹) جهت گیری آموزش را «چشم انداز عمومی یا تدریس مفهومی علوم» یا «فلسفه آموزش» تعریف کرد (ص ۹۷). جهت گیری، یکی از مؤلفه‌های دانش آموزش شیمی سبز است (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵). این مؤلفه با اهداف کلی و جزئی تدریس شیمی سبز، انتخاب منابع آموزشی و کتاب‌های درسی، راهبردهای تدریس و انتخاب مثال‌های ارائه شده، هنگام تدریس و نوع تکالیف بعد از تدریس و راهبردهای ارزشیابی آن مرتبط است. جهت گیری آموزش شیمی سبز دارای چهار مدل (زیرمؤلفه): (۱) آزمایشگاهی، (۲) پایداری، (۳) اجتماعی و (۴) واقعی است. جهت گیری مدل آزمایشگاهی، استفاده از آزمایشگاه برای آموزش شیمی سبز است. به عنوان مثال، در این مدل با استفاده از مقیاس‌های آزمایشگاهی، مواد شیمیایی خطرناک با مواد کم‌خطر جایگزین می‌شوند یا از کاتالیزورها استفاده می‌شود. جهت گیری مدل پایداری، تلفیق اصول دوازده‌گانه شیمی سبز با اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار است. در این مدل از مثال‌های مؤثر در مورد انرژی پاک و سوخت‌های تجدیدپذیر استفاده می‌شود. جهت گیری مدل اجتماعی، به بحث گذاشتن موضوعات بحث‌برانگیز اجتماعی و سیاسی از قبیل گرمایش زمین یا بحران آب در سطح ملی و بین‌المللی است. جهت گیری مدل واقعی، یکپارچه‌سازی کل برنامه‌های درسی و فعالیت‌های آموزشی است تا یادگیرندگان، شیمی سبز را زندگی کنند.

۲- برنامه درسی شیمی سبز

¹ Lee S. Shulman

² Magnusson et al

³ Nahlik et al

⁴ a general way of viewing
or conceptualizing science
teaching

برنامه درسی شیمی سبز بر اساس اهداف و محتوا، به طور افقی (ارتباط بین دروس در یک پایه) و عمودی (ارتباط بین دروس در پایه‌های مختلف) به هم ارتباط پیدا می‌کنند. گونبتر و همکاران (۲۰۲۵) معتقدند که هر مدرس شیمی سبز باید درباره برنامه درسی افقی و عمودی آن اطلاع کافی داشته و به اجرای آن باور قلبی داشته باشند. به باور آنها برنامه درسی شیمی سبز دارای سه زیر مؤلفه (۱) یکپارچه‌سازی اصول دوازده‌گانه شیمی سبز، (۲) تلفیق شیمی سبز و توسعه پایدار و (۳) ارتباط طولی و عرضی شیمی سبز با سایر درس‌ها است.

۳- درک یادگیرنده از شیمی سبز

این مؤلفه مطابق پیشنهاد مگنوسون و همکاران (۱۹۹۹) دارای دو زیر مؤلفه (۱) دانش پیشین و (۲) بدفهمی است. بر اساس نظریه یادگیری سازنده گرابی^۱، یادگیرندگان، خودشان، دانش خود را می‌سازند که با دانش قبلی‌شان که ممکن است، نادرست باشد، در ارتباط است. بنابراین در آموزش شیمی سبز دانش پیشین یادگیرندگان مهم است. چراکه یادگیرندگان شیمی سبز دانش جدید خودشان را بر اساس دانش موجودشان تفسیر می‌کنند که ممکن است باعث بدفهمی در آموزش شیمی سبز شود. دانش پیشین^۲ به مفاهیم، اطلاعات و مهارت‌های پایه‌ای اشاره دارد که انتظار می‌رود، یادگیرندگان قبل از درگیر شدن در فعالیت یادگیری شیمی سبز آن‌ها را درک کنند. دانش پیشین، زیربنای یادگیری^۳ و تسهیل‌کننده درک^۴ مفاهیم جدید در شیمی سبز است. کج‌فهمی‌ها^۵ و فهم‌های جایگزین^۶ به درک نادرست یا ناقصی اطلاق می‌شود که ممکن است در مورد یک مفهوم شیمی سبز وجود داشته باشد. این سوء تفاهم‌ها می‌تواند از تجربیات قبلی، تأثیرات فرهنگی یا حتی نحوه ارائه نادرست اطلاعات ناشی شود. پرداختن به بدفهمی‌ها یا فهم‌های جایگزین در آموزش شیمی سبز بسیار مهم است زیرا آنها می‌توانند، یادگیری مؤثر را مختل کنند. ماهیت کج‌فهمی^۷ مداومت و مقاومت^۸ آن در برابر تغییر و اصلاح است که اغلب چالش برانگیز است. تحقیقات جامعی در مورد بدفهمی‌ها در آموزش شیمی سبز انجام نشده است و مثال‌های مشهوری برای آن مطرح نشده است (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵).

۴- راهبردهای تدریس شیمی سبز

به استناد مگنوسون و همکاران (۱۹۹۹) راهبردهای تدریس از سه زیر مؤلفه (۱) راهبردهای عمومی، (۲) فعالیت‌های ویژه و (۳) فناوری آموزش تشکیل شده است. راهبردهای عمومی برای تدریس هر موضوعی قابل استفاده هستند در حالی که فعالیت‌های ویژه برای آموزش موضوعی خاص مانند شیمی سبز، کاربرد اختصاصی دارند. هدف راهبردهای عمومی از قبیل راهبرد 5E^۹، راهبرد یادگیری مبتنی بر پرسش^{۱۰}، راهبرد یادگیری پروژه محور^{۱۱}، راهبرد یادگیری بر پایه مسائل علوم اجتماعی^{۱۲}، راهبرد کلاس درس معکوس^{۱۳} و راهبرد یادگیری مشارکتی^{۱۴} ایجاد محیط‌های یادگیری جذاب و یادگیرنده محور است. هدف فعالیت‌های ویژه از قبیل نقشه مفهومی^{۱۵}، فعالیت آزمایشگاهی^{۱۶} و تحلیل چرخه زندگی^{۱۷} ایجاد تجربیات متنوع در یادگیری است. تفاوت‌های کلیدی راهبردهای عمومی و فعالیت‌های ویژه این است که اولاً راهبردها، عمومی‌تر و گسترده‌تر از فعالیت‌های ویژه هستند و در کل یک برنامه درسی به کار می‌روند، در حالی که فعالیت‌های ویژه بر روی یک عنوان خاص در داخل برنامه درسی متمرکز می‌شوند. ثانیاً راهبردها رویکردی را برای تسهیل یادگیری در کل موضوع ارائه می‌دهند، در حالی

¹ Constructionism (learning theory)

² Prerequisite knowledge

³ Foundation for Learning

⁴ Facilitates

Comprehension

⁵ Misconceptions

⁶ Alternative Conceptions

⁷ Nature of Misconceptions

⁸ Persistent and Resistant

^۹ یک رویکرد سازنده گرایانه

constructivist approach

برای آموزش علوم در پنج

مرحله: تعامل، کاوش، توضیح،

تفصیل، و ارزیابی Engage,

Explore, Explain,

Elaborate, and Evaluate

¹⁰ (IBL) Inquiry-Based

Learning

¹¹ (PBL) Project-Based

Learning

¹² (SSI) Socioscientific Issues

¹³ Flipped Classroom

¹⁴ Cooperative Learning

¹⁵ Concept Map

¹⁶ Laboratory Work

¹⁷ Life-Cycle Analysis (LCA)

که فعالیت‌ها وظایف مشخصی هستند که برای تمرین عملی یا ارزیابی یک عنوان خاص طراحی شده‌اند. زیرمؤلفه سوم، فناوری آموزش است که شامل پویانمایی^۱ و شبیه‌سازی^۲ است. در آموزش شیمی سبز، پویانمایی و شبیه‌سازی می‌توانند، فرایندها یا مفاهیم پیچیده را به تصویر بکشند تا با ارائه تجسم‌های پویا از مفاهیم انتزاعی، درک آسان‌تر و ملموس‌تر آنها را فراهم کند (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵). شبیه‌سازی، نمایش مجازی از یک سیستم یا فرآیند دنیای واقعی است که به فراگیران اجازه می‌دهد، با آن تعامل داشته باشند و رفتار آن را تحت شرایط مختلف بررسی کنند. هدف شبیه‌سازی، فراهم کردن یک محیط امن و کنترل‌شده برای آزمایش در فضای مجازی است تا به یادگیرندگان اجازه دهد تا تصمیم‌گیری و حل مسئله را بدون عواقب واقعی تمرین کنند.

۵- راهبردهای ارزشیابی از یادگیری شیمی سبز

به گفته مگنوسون و همکاران (۱۹۹۹) ارزشیابی دارای دو زیرمؤلفه (۱) هدف و (۲) ابزار است. یعنی چه چیزی هدف ارزشیابی است و چه چیزی ابزار ارزشیابی است. بر حسب طبقه‌بندی هدف‌های آموزشی بلوم، اهداف آموزش شیمی سبز در سه حوزه اندیشیدن شناختی، نگرش عاطفی و فعالیت‌های بدنی روانی-حرکتی تقسیم بندی می‌شود که با ابزارهای ارزشیابی از قبیل آزمون‌های تستی و تشریحی، نقشه‌های مفهومی، پرسشنامه‌ها، پروژه‌ها، مصاحبه‌ها و مشاهدات میزان دستیابی یادگیرندگان به آن اهداف قابل ارزشیابی است (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵).

ایده کلی در مورد پنج مؤلفه مجزا اما مرتبط (۱) جهت‌گیری، (۲) برنامه درسی، (۳) درک، (۴) تدریس و (۵) ارزشیابی این است که دانش آموزش محتوا برای آموزش شیمی سبز تلفیقی منحصر به فرد از انواع مختلف دانش است. به عبارت دیگر، آموزش شیمی سبز نیاز به توسعه دانش آموزش محتوای مختص خود است. یعنی با توجه به همه دانش‌ها و موضوعاتی که در طراحی آموزش شیمی سبز به عنوان یک ساختار واحد با نام دانش آموزش محتوا، دخیل هستند و همه اجزای آن به عنوان قسمتی از یک کل عمل می‌کنند و در صورت عدم پیوستگی و تناسب بین اجزای آن، نتیجه حاصل نخواهد شد. همچنین توجه و تمرکز بر هر یک از این اجزا، به تنهایی برای بهبود آموزش شیمی سبز کافی نخواهد بود. یعنی نه تنها به کارگیری همه اجزا این مدل در پیشرفت و بهبود کیفیت آموزش شیمی سبز مهم است، بلکه یک مدرس شیمی سبز باید بداند، هر کدام از این اجزا چگونه در کنار هم عمل می‌کنند (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵).

روش پژوهش

پژوهش حاضر به روش مرور سیستماتیک^۳ انجام شد. فرآیند غربالگری مقالات انتخابی مطابق چک لیست و دستورالعمل پنج مرحله‌ای پریزما^۴ (۱) شناسایی، (۲) غربالگری، (۳) بازیابی، (۴) واجد شرایط‌بودن و (۵) بررسی انجام شد. در مرحله اول، کلیدواژگان «آموزش شیمی سبز» در پایگاه‌های معتبر شامل گوگل اسکولار^۵، پایگاه اطلاعاتی علمی جهاد دانشگاهی^۶، پرتال جامع علوم انسانی، پایگاه مجلات تخصصی نورمگز^۷ و بانک اطلاعات نشریات کشور^۸ انجام شد. تعداد منابع یافت‌شده در گوگل اسکولار (۱۰۷۰)، پایگاه اطلاعاتی علمی جهاد دانشگاهی (۶۰۱۳۳)، پرتال جامع علوم انسانی (۳)، پایگاه مجلات تخصصی نورمگز (۱۰۰۰۰) و بانک اطلاعات نشریات کشور (۲۴۳۶۸۷) شد. در مرحله دوم، جستجوی پیشرفته «آموزش شیمی سبز» در عنوان، چکیده و کلیدواژه در فقط مقالات علمی مصوب فارسی بدون تعیین دوره زمانی در بانک اطلاعات نشریات کشور انجام شد. تعداد ۴۵ منبع یافت شد. عنوان مقاله، تاریخ انتشار و عنوان نشریه برای این

¹ Animation
² Simulation
³ Systematic Review

⁴ Preferred Reporting
Items for Systematic

Reviews and Meta-
Analyses (PRISMA)
⁵ Google Scholar

⁶ SID
⁷ Noormags
⁸ Magiran

۴۵ مقاله وارد اکسل شد. در مرحله سوم، جستجوی پیشرفته برای گوگل اسکولار، پایگاه اطلاعاتی علمی جهاد دانشگاهی، پرتال جامع علوم انسانی، پایگاه مجلات تخصصی نورمگز و بانک اطلاعات نشریات کشور تکرار شد و نتایج با فایل اکسل مقایسه شد. در مرحله چهارم، مقالات تکراری، مقالات فاقد متن کامل، مقالات کنفرانس‌ها، پایان‌نامه‌ها و مقالات نامرتبط با آموزش شیمی سبز حذف شدند. در مرحله پنجم، پس از بررسی کامل چکیده‌ها، تعداد ۳۰ مقاله انتخاب شد. در جدول (۱) کد مقالات منتخب، سال انتشارشان، عنوان مقالات و عنوان نشریات فهرست شده است.

جدول ۱- کد مقالات منتخب، سال انتشارشان، عنوان مقالات و عنوان نشریه‌ای که در آن چاپ شده‌اند.

کد	سال	عنوان مقاله	عنوان نشریه
۱	۱۴۰۳	تحول آموزشی لازمه توسعه شیمی سبز و پایدار	پژوهش در آموزش شیمی
۲	۱۳۹۴	تأثیر آموزش به کمک بازی رایانه‌ای دالان سبز در افزایش یادآوری مفاهیم شیمی اول دبیرستان	فن آوری اطلاعات و ارتباطات در علوم تربیتی
۳	۱۳۹۸	تحلیل محتوای کتاب‌های درسی شیمی دوره دوم متوسطه براساس مؤلفه‌های آموزش زیست محیطی با استفاده از روش آنتروپی شانون	پژوهش در آموزش شیمی
۴	۱۳۹۹	طراحی محتوای آموزش سنجش‌های شیمی سبز برای دانشجویان کارشناسی شیمی: سنجش‌های جرمی و زیست‌محیطی	شیمی و مهندسی شیمی ایران
۵	۱۴۰۰	تأثیر آموزش با رویکرد تلفیقی علوم، فناوری، مهندسی و ریاضیات در بافتار انرژی خورشیدی بر نگرش و پیشرفت تحصیلی دانش‌آموزان دختر	پژوهش در نظام‌های آموزشی
۶	۱۴۰۱	آشنایی دانش‌آموزان با مفهوم نانو مواد و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف و لزوم درج آن در کتب درسی	پژوهش در آموزش شیمی
۷	۱۴۰۱	بررسی مباحث تدریسی شیمی در مدارس ایران و فنلاند در جهت دستیابی به توسعه پایدار و بهبود نظام آموزشی شیمی	پژوهش در آموزش شیمی
۸	۱۴۰۱	طراحی آزمایش تهیه نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن جهت تفهیم علم نانو به عنوان یک فناوری نوین در زمینه توسعه پایدار	پژوهش در آموزش شیمی
۹	۱۴۰۱	طراحی محتوای آموزشی برای موضوع الکترونی می با تلفیق دو رویکرد TPACK و STEM	پژوهش در آموزش شیمی
۱۰	۱۴۰۱	محتوای کاربردی طراحی شده برای مبحث الکترونی مبتنی بر رویکرد کاوشگری	پژوهش در آموزش شیمی
۱۱	۱۴۰۳	مروری بر آموزش مهندسی شیمی: گذشته، حال و جهت‌گیری‌های آینده در ایران و جهان	آموزش مهندسی ایران
۱۲	۱۴۰۳	مهندسی شیمی سبز	آموزش مهندسی ایران
۱۳	۱۳۹۵	آموزش شیمی سبز، با طراحی و اجرای آزمایش‌های سبز در مبحث استوکیومتری شیمی متوسطه	فناوری آموزش
۱۴	۱۴۰۳	لزوم تلفیق و آموزش فناوری‌های نوین در مدارس: فناوری نانو مبتنی بر اصول شیمی سبز	پژوهش در آموزش شیمی
۱۵	۱۴۰۱	تلفیق برنامه درسی آموزش شیمی برای توسعه پایدار در دوره دوم متوسطه	مطالعات آموزش و آموزشگاهی
۱۶	۱۳۹۷	شناسایی اهداف برنامه درسی شیمی در راستای اقتصاد مقاومتی با استفاده از تکنیک دلفی فازی	مطالعات برنامه درسی
۱۷	۱۳۹۲	ارائه راه کارهای مناسب برای ورود آموزش شیمی سبز به برنامه درسی شیمی دوره متوسطه	نوآوری‌های آموزشی

۱۸	۱۴۰۲	تحلیل محتوای مفاهیم الکتروشیمی ارائه شده در کتاب شیمی (۳) دوره دوم متوسطه بر ترویج علم اساس اصول شیمی سبز
۱۹	۱۳۹۸	آموزش شیمی سبز با به کارگیری محاسبات در آزمایشگاه دبیرستان پژوهش در آموزش شیمی
۲۰	۱۳۹۸	بررسی اثر بخشی آموزش کاربرد فناوری شیمی سبز در دانشگاه فرهنگیان پژوهش در آموزش شیمی
۲۱	۱۴۰۰	بررسی برنامه درسی اجرایی آزمایشگاه‌های شیمی آلی (۱) از دیدگاه شیمی سبز پژوهش در آموزش شیمی
۲۲	۱۴۰۰	بررسی راهکارهای ورود علم شیمی سبز در برنامه مطالعاتی تحصیلی و مقایسه اهداف و ویژگی‌های آن با سایر کشورهای توسعه یافته پژوهش در آموزش شیمی
۲۳	۱۳۹۷	تاثیر آموزش شیمی سبز مبتنی بر فعالیت عملی بر یادگیری و نگرش دانشجو معلمان فناوری آموزش شیمی
۲۴	۱۴۰۱	در آموزش باتری برای دانشجویان رشته شیمی تلفیق شیمی سبز و STEM پژوهش‌های شیمی
۲۵	۱۳۹۸	چالش‌ها و فرصت‌های آموزش شیمی سبز و ارتباط آن با توسعه پایدار پژوهش در آموزش شیمی
۲۶	۱۳۸۳	دیدگاه‌های آموزشی و پژوهشی شیمی سبز محیط شناسی
۲۷	۱۴۰۰	طراحی محتوای آموزشی برای موضوع خوردگی با رویکرد شیمی سبز پژوهش در آموزش شیمی
۲۸	۱۳۹۸	طراحی یک آزمایش سبز برای آزمایشگاه شیمی فیزیک - سیستم ساده تعادل فاز دو پژوهش در آموزش شیمی
۲۹	۱۳۹۶	مطالعه تطبیقی آموزش شیمی سبز در برنامه درسی مدارس متوسطه (ایران و چهار کشور نوآوری‌های آموزشی پیشرفته)
۳۰	۱۳۹۶	نقش برنامه‌های آموزشی و ترویجی در کاربرد آلاینده‌های زیست محیطی در کشت سبزی و صیفی شهرستان شوشتر پژوهش مدیریت آموزش کشاورزی

عنوان، چکیده و کلیدواژگان ۳۰ مقاله منتخب وارد نرم‌افزار MaxQDA شد. برای واکاوی ابعاد و مؤلفه‌های پژوهش‌های حوزه آموزش شیمی سبز، معیارهای کدگذاری مدل (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵) مطابق جدول (۲) و تحلیل آنها بر اساس تکرار کدها است. در این مدل، برای واکاوی پژوهش‌های حوزه آموزش شیمی سبز از چارچوب نظری دانش آموزش محتوا (PCK) که شامل پنج مقوله: (۱) جهت‌گیری، (۲) برنامه درسی، (۳) درک، (۴) تدریس و (۵) ارزشیابی است، کمک گرفته شده است. مقوله جهت‌گیری شامل چهار زیر مقوله: ۱: آزمایشگاهی، ۲: پایداری، ۳: اجتماعی و ۴: واقعی، است. به عنوان مثال، برای تشخیص اینکه در یک مقاله آموزش شیمی سبز جهت‌گیری آزمایشگاهی وجود دارد، واژه‌های مرتبط با «آزمایشگاه» جستجو و کدگذاری شده است. به طور مشابه برای تشخیص اینکه در مقالات منتخب، به چه چیزهایی تاکید شده است، چه چیزهایی نادیده گرفته شده است و پیوند آن با سایر علوم چگونه است، از کدگذاری بر اساس مقوله برنامه درسی کمک گرفته شده است که شامل سه زیر مقوله: (۱) اصول دوازده‌گانه شیمی سبز، (۲) اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار و (۳) ارتباط با علوم دیگر است. مقوله درک، معیاری است برای تشخیص اینکه آیا سه زیر مقوله: (۱) دانش پیش‌نیاز، (۲) بدفهمی‌ها و (۳) مشکلات یادگیری در مقالات آموزش شیمی سبز مورد توجه قرار گرفته است یا خیر. سه زیر مقوله: (۱) راهبردهای عمومی، (۲) فعالیت‌های ویژه و (۳) فناوری آموزش معیاری برای تشخیص مقوله تدریس شیمی سبز است. در آخر، مقوله ارزشیابی شامل دو زیر مقوله (۱) چه چیزی و (۲) چگونه است. نتایج حاصل از کدگذاری و تجزیه و تحلیل آنها در بخش یافته‌ها بیان شده است.

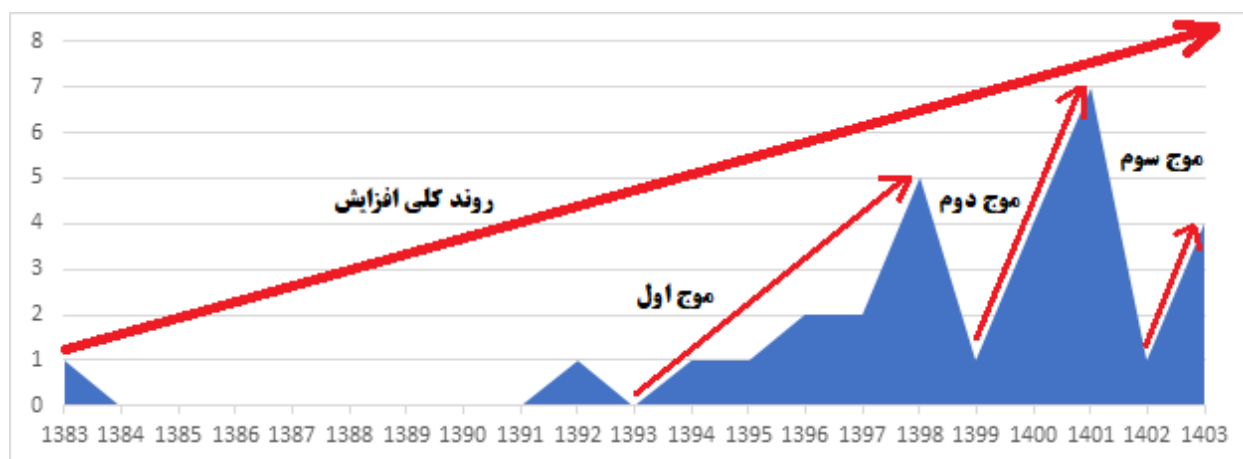
جدول ۲- معیارهای کدگذاری مطابق مدل (گوینتر و همکاران، ۲۰۲۵) برای دانش آموزش شیمی سبز

معیار	مقوله	زیر مقوله‌ها	توضیحات
دانش آموزش محتوا (PCK)	پایه‌گذاری	رویکرد سنتی (آزمایشگاهی)	آموزش آزمایشگاه محور (استفاده از آزمایشگاه برای آموزش شیمی سبز)
		رویکرد زمینه محتوایی توسعه پایدار (پایداری)	آموزش محتوا محور (تلفیق اصول دوازده گانه شیمی سبز با اهداف هفده گانه توسعه پایدار)
		رویکرد ترکیب آزمایشگاهی و پایداری	ترکیب محتوا و آزمایش
	برنامه درسی	رویکرد بحث‌های جنجالی سیاسی (اجتماعی)	جامعه محور (به بحث گذاشتن موضوعات بحث‌برانگیز اجتماعی و سیاسی)
		رویکرد کاربردی و عملی (واقعی)	کاربرد محور (یکپارچه سازی کل برنامه‌های درسی و فعالیت‌های آموزشی)
		اصول دوازده‌گانه شیمی سبز	۱) پیشگیری، ۲) اقتصاد اتمی، ۳) کاهش خطر، ۴) کاهش سمی بودن، ۵) حلال‌های سبز، ۶) بازدهی انرژی، ۷) مواد تجدید پذیر، ۸) کاهش مشتقات، ۹) کاتالیزور، ۱۰) تجزیه پذیری، ۱۱) تخمین زمان، ۱۲) کاهش اتفاقات ناگوار
دانش	اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار	1) ریشه کن کردن فقر، ۲) ریشه کن کردن گرسنگی، ۳) سلامت و رفاه، ۴) آموزش با کیفیت، ۵) برابری جنسیتی، ۶) دسترسی به آب آشامیدنی و بهداشت، ۷) انرژی مقرون به صرفه و پاک، ۸) کار شایسته و رشد اقتصادی، ۹) صنعت، نوآوری و زیرساخت، ۱۰) کاهش نابرابری، ۱۱) شهرها و جوامع پایدار، ۱۲) مصرف و تولید مسئولانه، ۱۳) اقدام برای جلوگیری از تغییرات آب‌وهوایی، ۱۴) حیات زیر آب، ۱۵) حیات روی زمین، ۱۶) صلح، عدالت و نهادهای قوی و ۱۷) مشارکت برای رسیدن به اهداف	
	مرتبط با علوم دیگر	ریاضی، فیزیک، اقتصاد، محیط زیست، زیست شناسی	
	دانش پیش‌نیاز	دانش پیش نیاز برای یادگیری موثر ضروری است تا زمینه درک مفاهیم شیمی سبز فراهم شود.	
تدریس	بدهمی‌ها یا مفاهیم جایگزین	درک نادرست یا ناقصی که ممکن است از تجربیات قبلی، تأثیرات فرهنگی یا حتی نحوه ارائه اطلاعات ناشی شود.	
	مشکلات یادگیری	چالش‌های متنوعی برای آموزش شیمی سبز وجود دارد که عمدتاً به دلیل ماهیت بین رشته‌ای آن است.	
	راهنماهای عمومی تدریس شیمی سبز	راهنماهای تدریس که محیط‌های یادگیری جذاب و دانش آموز محور ایجاد می‌کند و بر مشارکت فعال، همکاری و تفکر انتقادی تأکید می‌کند و به دانش آموزان کمک می‌کنند شیمی سبز را با مسائل کاربردی دنیای واقعی مرتبط کنند.	
	فعالیت‌های ویژه تدریس شیمی سبز	فعالیت‌های تدریس که در ایجاد تجربیات متنوع یادگیری، حمایت از اهداف آموزشی مختلف، مفید هستند و مشارکت فعال، تفکر انتقادی و کاربردهای عملی دانش را تشویق می‌کنند.	

ارزشیابی	فناوری آموزش شیمی سبز	انیمیشن‌ها، شبیه سازی‌ها ابزارهای مؤثری در آموزش شیمی سبز برای تسهیل درک عمیق‌تر و تعامل با موضوعات پیچیده آن هستند. ابعاد مختلف و ضروری یادگیری شیمی سبز از جنبه‌های عاطفی و روانی گرفته تا مهارت‌های شناختی و فیزیکی را در بر می‌گیرد تا به ایجاد راهبردهای آموزشی مؤثری که به رشد کل نگر دانش آموزان کمک کند.
	چگونه ارزشیابی شود؟	ابزارهای متنوعی وجود دارد. آزمون‌ها دانش شیمی سبز را ارزیابی می‌کنند، مقیاس‌ها ادراکات را کمیت می‌کنند، گزارش‌های آزمایشگاهی تحقیقات علمی را مستند می‌کنند و مقالات بازتابی بینش‌های یادگیری هر شخصی را ارتقا می‌دهند.

یافته‌ها

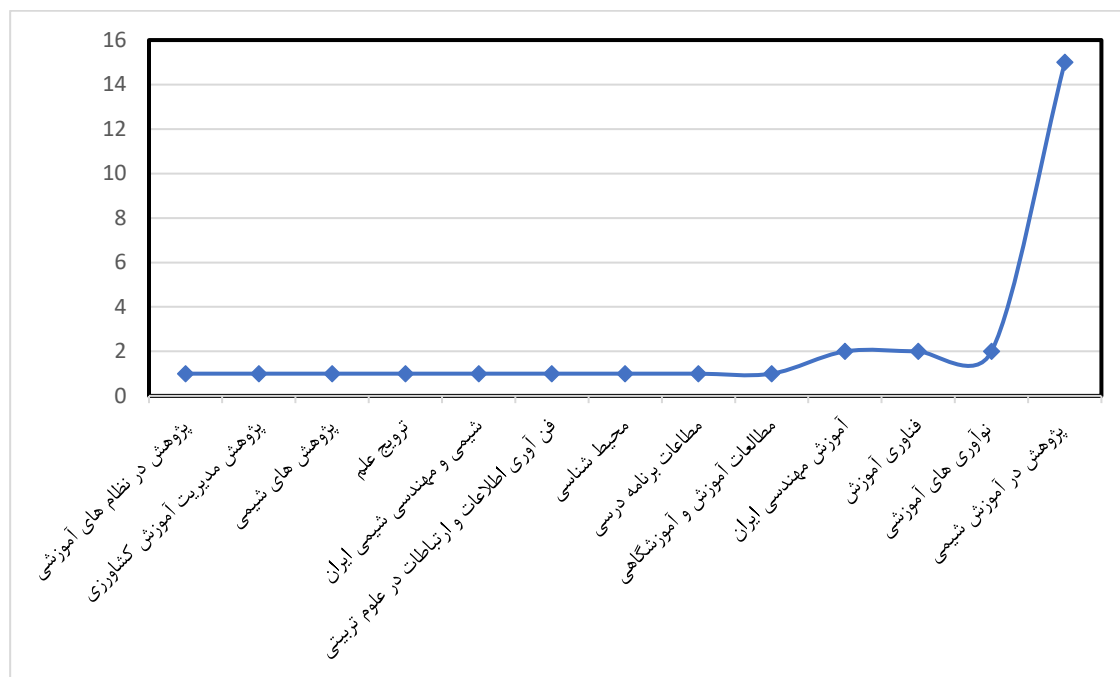
برای پاسخ به این سوال پژوهشی که «روند پژوهش‌ها در آموزش شیمی سبز چگونه است؟» می‌توان گفت که تعداد ۳۰ مقاله در زمینه آموزش شیمی سبز بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ منتشر شده است^۱. نمودار (۱) نشان می‌دهد که در سال ۱۳۸۳ اولین مقاله^۲ منتشر شده و در حالت کلی، شاهد افزایش در تعداد مقالات هستیم.



نمودار ۱- تعداد مقالات منتشر شده در گذر زمان و موج‌های اول، دوم و سوم در افزایش تعداد مقالات حوزه آموزش شیمی سبز

برای محققان حوزه آموزش شیمی سبز مفید است که بدانند کدام مجلات علمی و معتبر از پذیرش و چاپ مقاله در این زمینه حمایت می‌کنند. برای پاسخ به این سوال پژوهشی که «کدام نشریات، سهم بیشتری در انتشار پژوهش‌های آموزش شیمی سبز دارند؟» بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که رتبه نخست به نشریه «پژوهش در آموزش شیمی» با ۱۵ مقاله اختصاص دارد. نشریات «نوآوری‌های آموزشی»، «فناوری آموزش» و «آموزش مهندسی ایران» در رتبه بعدی قرار دارند. بقیه نشریه‌ها فقط یک مقاله در زمینه آموزش شیمی سبز منتشر کرده‌اند. نمودار (۲) تعداد مقالات منتشر شده در هریک از نشریات را نشان می‌دهد.

است «Journal of Environmental Studies (JES)»	درسی مدارس ایران» به این حوزه اختصاص دارد.	نیازمند مطالعه تکمیلی است. به عنوان مثال، پایان‌نامه ارزشمندی در سال ۱۳۹۱ با عنوان «شناسایی جایگاه شیمی سبز در برنامه درسی کشورهای پیشرفته به منظور ارائه راهکارهای مناسب برای برنامه	^۱ جامعه آماری مطالعه حاضر، فقط شامل مقالات تخصصی «آموزش شیمی سبز» منتشر شده در مجلات معتبر است. بررسی تمام بروندهای علمی در این حوزه،
--	--	---	--



نمودار ۲- تعداد مقالات حوزه آموزش شیمی سبز به تفکیک نشریه

برای پاسخ به این سوال که «کدام گرایش ها و زیرگروه های شیمی نقش پررنگ تری در مقالات حوزه آموزش شیمی سبز دارند؟» گرایش های شیمی مورد بررسی قرار گرفت. واژه های «الکترو»، «نانو» و «آلی» به ترتیب در ۷ (۲۳.۳٪)، ۵ (۱۶.۶٪) و ۳ (۱۰٪) مقاله آمده است. بنابراین از بین گرایش ها و زیر گروه های شیمی، به «الکتروشیمی»، «شیمی آلی» و «نانو شیمی» اشاره شده است. در جدول (۳) کد مقالاتی که از الکتروشیمی، شیمی آلی و نانو شیمی یاد کرده اند، آمده است. مقاله های ۸ و ۱۱ واژه های الکتروشیمی و نانو شیمی را هم زمان به کاربرده اند. سایر گرایش ها و زیرگروه های شیمی در مقالات استناد مستقیم نداشتند.

جدول ۳- کد مقالات و فراوانی مقالات به تفکیک گرایش ها و زیر گروه های شیمی

گرایش (زیر گروه شیمی)	فراوانی	کد مقالات
الکتروشیمی Chemistry Electro	۷	۲۴-۱۹-۱۸-۱۱-۱۰-۹-۸
شیمی نانو Nano Chemistry	۵	۶-۸-۱۱-۱۴-۱۵
شیمی آلی Organic Chemistry	۳	۲۶-۲۱-۴

در پاسخ به این سوال که «جهت گیری غالب در پژوهش های آموزش شیمی سبز چیست؟» همانطور که در جدول (۴) قابل مشاهده است، مقالات زیادی (n=17) به مدل پایداری اختصاص دارند که رویکردی محتو محور است و نشان می دهد، جهت گیری اصلی مقالات آموزش شیمی سبز، تلفیق شیمی سبز با توسعه پایدار است. ۶ مقاله به استفاده از کار آزمایشگاهی برای آموزش شیمی سبز که همان رویکرد سنتی آموزش شیمی است، اشاره دارند. البته ۲ مقاله هر دو جهت گیری را دارند و در آن ها کار عملی آزمایشگاهی و محتوای مربوط به توسعه پایدار، هم زمان به ارائه آموزش شیمی سبز جهت داده اند. مدل اجتماعی که به رویکرد جامعه شناسانه آموزش شیمی سبز و بحث های داغ اجتماعی و سیاسی مربوط است و مدل واقعی که به رویکرد کاربردی آموزش شیمی سبز و ادغام اصول شیمی سبز در فرآیند تولیدات یک مؤسسه صنعتی مربوط است، هیچ مقاله ای را به خود اختصاص ندادند.

جدول ۴- کد مقالات و فراوانی مقالات به تفکیک جهت گیری

جهت گیری دانش آموزش محتوا	فراوانی	کد مقالات
آزمایشگاهی Laboratory	۶	۲۸-۲۷-۲۳-۲۱-۱۹-۸
پایداری Sustainability	۱۷	۲۵-۲۲-۱۹-۱۸-۱۷-۱۶-۱۵-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۷-۱
آزمایشگاهی و پایداری Laboratory & Sustainability	۲	۱۹-۸

در مورد اصول دوازده گانه شیمی سبز، تمرکز مقالات به اصول ششم (طراحی بهینه برای استفاده از انرژی)، دوم (اقتصاد اتمی)، اول (پیشگیری از تولید زباله) و هفتم (استفاده از مواد تجدیدپذیر) به ترتیب با ۱۱، ۷، ۵ و ۴ مقاله است. فراوانی و کد مقالات مرتبط با هریک از اصول دوازده گانه شیمی سبز در جدول (۵) ارائه شده است. هیچ مقاله ای همه اصول دوازده گانه شیمی سبز را مورد تاکید قرار نداده است. مقاله ۲۶ تنها مقاله ای است که به هر چهار اصل اول، دوم، ششم و هفتم اشاره داشته است.

جدول ۵- کد مقالات و فراوانی مقالات به تفکیک تمرکز بر اصول دوازده گانه شیمی سبز

اصول دوازده گانه شیمی سبز	فراوانی	کد مقالات
پیشگیری از تولید زباله (pollution prevention)	۵	۳۰-۲۶-۲۳-۶-۳
اقتصاد اتمی (atom economy)	۷	۲۶-۲۳-۱۹-۱۸-۱۷-۱۶-۴
طراحی بهینه برای استفاده از انرژی (design for energy efficiency)	۱۱	۲۷-۲۶-۲۴-۲۳-۱۹-۱۸-۱۱-۱۰-۵-۳-۱
استفاده از مواد تجدیدپذیر (use of renewable feedstocks)	۴	۲۶-۲۲-۱۱-۱

در مورد اهداف هفده گانه توسعه پایدار، تمرکز مقالات به ترتیب بر اهداف چهارم (آموزش با کیفیت)، یازدهم (شهرها و جوامع پایدار)، هفتم (انرژی مقرون به صرفه و پاک)، هشتم (کار شایسته و رشد اقتصادی)، سوم (سلامت و تندرستی خوب) و ششم (آب تمیز و فاضلاب) با ۲۸، ۱۳، ۱۱، ۷، ۶ و ۳ مقاله است. فراوانی و کد مقالات مرتبط با هریک از این اهداف در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- کد مقالات و فراوانی مقالات به تفکیک اهمیت در اهداف هفده گانه توسعه پایدار

اهداف هفده گانه توسعه پایدار	فراوانی	کد مقالات
Good health and well-being سلامت و تندرستی خوب	۶	۴-۱۱-۲۰-۲۳-۲۵-۲۸
Quality education آموزش با کیفیت	۲۸	
Clean water and sanitation آب تمیز و فاضلاب	۳	۱-۱۱-۲۶
Affordable and clean energy انرژی مقرون به صرفه و پاک	۱۱	۱-۳-۵-۱۰-۱۱-۱۸-۱۹-۲۳-۲۴-۲۶-۲۷
Decent work and economic growth کار شایسته و رشد اقتصادی	۷	۴-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۳-۲۶
Sustainable cities and communities شهرها و جوامع پایدار	۱۳	۱-۷-۸-۱۰-۱۱-۱۲-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۲-۲۵

در پاسخ به سوال پژوهشی «در چارچوب PCK (دانش آموزش محتوا)، ابعاد و مؤلفه‌های پژوهش‌های آموزش شیمی سبز چیست؟» تجزیه و تحلیل آماری فهرست کدها بر اساس تکرار آنها سلسله مراتبی از اهمیت را نشان می‌دهد که به طور بالقوه منعکس کننده ابعاد و مؤلفه‌های کلیدی در مقالات آموزش شیمی سبز کشور به شرح زیر است:

۱. بعد «آموزش» شامل مؤلفه‌های تدریس، یادگیری، برنامه درسی و دانش‌آموزان است که نشان‌دهنده نقش اساسی این بعد در مقالات آموزش شیمی سبز ایران است.

۲. بعد «پایداری» شامل مؤلفه‌های سبز، محیط زیست، آلودگی، ضایعات و تجدیدپذیر است که نشان می‌دهد، مقالات آموزش شیمی سبز قصد دارند، به چالش‌ها زیست محیطی بپردازند.

۳. بعد «علوم و فنون» شامل مؤلفه‌های مهندسی، تکنولوژی و STEM است که نشان‌دهنده رویکرد علمی و فنی در مقالات آموزش شیمی سبز ایران است.

۴. بعد «کاربرد» شامل مؤلفه‌های عملی و تجربی است که تأکید مقالات بر یادگیری عملی و کاربردی شیمی سبز در دنیای واقعی را نشان می‌دهد.

۵. بعد «آینده» با مؤلفه‌های توسعه و رشد نشان دهنده دیدگاه آینده‌نگر مقالات حوزه آموزش شیمی سبز است که بر رویه‌های آموزشی در حال تحول و نیازهای جامعه آینده ایران از آموزش شیمی سبز تمرکز دارد.

۶. بعد «جهانی» با مؤلفه‌های جامعه، کشورها و جمعیت، توجه مقالات به آموزش شیمی سبز در مقیاس بین‌المللی و گسترده‌تر از مقیاس ملی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر مقالات، چالش‌های جهانی و تلاش‌های مشترک جوامع مختلف از سراسر دنیا را برجسته کرده‌اند تا اهمیت موضوع را از سطح ملی به سطح بین‌المللی ارتقا دهند.

۷. بعد «چالش‌ها» با مؤلفه‌های راه حل‌ها، اثربخشی و تاثیر مستلزم بررسی انتقادی نظام آموزش شیمی سبز موجود و کاوش در راه حل‌هایی برای غلبه بر موانع در آموزش با کیفیت آن است.

به طور کلی، این ابعاد و مؤلفه‌ها نشان می‌دهند که مقاله‌های آموزش شیمی سبز، آموزش برای توسعه پایدار را اولویت‌بندی کرده‌اند و بر ادغام علوم و فنون در شیوه‌های آموزشی آن تأکید دارند تا به اهمیت آماده‌سازی دانش‌آموزان و دانشجویان با در نظر گرفتن پیامدهای جهانی مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی از طریق رویکردهای کاربرد و بین رشته بپردازند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مقالات آموزش شیمی سبز چاپ شده در نشریات علمی معتبر کشور مورد مرور سیستماتیک قرار گرفت تا ابعاد و مؤلفه‌های اساسی آن‌ها ارائه شود. این بررسی نقاط قوت و ضعف آموزش شیمی سبز ایران را به شرح زیر بیان می‌کند تا جنبه‌های نادیده گرفته شده، مشخص شود.

با توجه به تحلیل داده‌ها، گرایش‌های الکتروشیمی، شیمی آلی و نانو شیمی در بین سایر گرایش‌ها، پر رنگ‌ترند. در تحقیقات بین‌المللی، به عنوان نمونه، مارکز و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش داده‌اند که از بین گرایش‌های مختلف شیمی، شیمی تجزیه، شیمی آلی و نانو شیمی بیشترین سهم را در مقالات آموزش شیمی سبز به خود اختصاص داده‌اند. گونبتر و همکاران (۲۰۲۵) دلیل آن را نقش واکنش‌ها، کاتالیزورها، فرآیندها و محصولات مورد استفاده در این گرایش‌ها دانسته‌اند. مقالات آموزش شیمی سبز در ایران به اصول دوازده‌گانه شیمی سبز توجه یکسانی ندارند. اصول ششم (طراحی بهینه برای استفاده از انرژی)، دوم (اقتصاد اتمی)، اول (پیشگیری از تولید زباله) و هفتم (استفاده از مواد تجدیدپذیر) نسبت به سایر اصول توجه بیشتری را کسب کرده‌اند. پیشنهاد پژوهشی نیز مؤید این مطلب است که برخی اصول، بیشتر مورد توجه بوده است. نتیجه پژوهش (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵) نشان داد که اصول هفتم (استفاده از مواد اولیه تجدیدپذیر) و ششم (طراحی برای بهره‌وری انرژی) بیشترین توجه و اصول سوم (سنتز کم خطرتر) و هشتم (مشتقات کاهش دهنده) کمترین توجه را داشته‌اند. توجه به بعضی از اصول دوازده‌گانه در آموزش شیمی سبز به ویژگی آموزش‌پذیر بودن آنها نسبت داده شده است. به عنوان مثال میتریس و همکاران (۲۰۲۳) ادعا کرده‌اند که اصول اول (پیشگیری از ضایعات)، پنجم (حلال‌ها و مواد کمکی ایمن‌تر)، ششم (طراحی برای بهره‌وری انرژی)، هفتم (استفاده از مواد اولیه تجدیدپذیر) و دوازدهم (شیمی ایمن‌تر برای پیشگیری حوادث) از قابلیت آموزش‌پذیری بیشتری برخوردارند و راحت‌تر در برنامه درسی گنجانده می‌شوند.

در مقالات آموزش شیمی سبز کشورمان، اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار از اهمیت متفاوتی برخوردارند. اهداف چهارم (آموزش با کیفیت)، یازدهم (شهرها و جوامع پایدار)، هفتم (انرژی مقرون به صرفه و پاک)، هشتم (کار شایسته و رشد اقتصادی)، سوم (سلامت و تندرستی خوب) و ششم (آب تمیز و فاضلاب) به ترتیب بیشترین اهمیت را کسب کرده‌اند. ادبیات آموزش شیمی سبز نیز همین مطلب را تایید می‌کند. (گونبتر و همکاران، ۲۰۲۵) گزارش کرده است که هدف دوازدهم که بر مصرف و تولید مسئولانه تمرکز دارد و هدف سیزدهم که بر اقدامات آب و هوایی تاکید دارد، از بیشترین اهمیت برخوردار شده‌اند. در حالیکه اهداف دوم (هدف دستیابی به گرسنگی صفر)، هشتم (کار شایسته و رشد اقتصادی) شانزدهم (ارتقای صلح، عدالت و نهادهای قوی) کمترین اهمیت را به خود جلب کرده‌اند. در گزارش مارکز و همکاران (۲۰۲۰) اهداف اول (بدون فقر)، پنجم (برابری جنسیتی)، نهم (ترویج صنعت، نوآوری و زیرساخت) و هفدهم (مشارکت برای اهداف) کمتر اهمیت داده شده‌اند. میتریس و همکاران (۲۰۲۳) گفته‌اند که بعضی از اهداف مانند اهداف دوازدهم و سیزدهم بیشتر اهمیت داده شده‌اند، در حالی که بعضی از اهداف، مانند اهداف اول، پنجم، نهم و هفدهم اصلاً اهمیت داده نشده‌اند. در حالت کلی، از نظر گونبتر و همکاران، (۲۰۲۵) اهداف مربوط به محیط زیست اهمیت داده شده‌اند در حالی که اهداف اجتماعی و اقتصادی نادیده گرفته شده‌اند. تحقیقات کریمی فردین‌پور و مصلحی میلانی (۱۴۰۰) نشان داده است که از بین اهداف مربوط به محیط زیست، آلودگی آب و خاک اهمیت داده شده‌اند، در حالی که آلودگی صدا نادیده گرفته شده است.

این پژوهش نشان داد که مقالات آموزش شیمی سبز ایرانی عمدتاً جهت‌گیری آزمایشگاهی و پایداری دارند که نشان‌دهنده تلفیق شیمی سبز با توسعه پایدار از طریق امور آزمایشگاهی است. مطالعات قبلی (به عنوان نمونه: لی و ایلکز، ۲۰۲۱؛ مارکز و همکاران، ۲۰۲۰) نیز این یافته را با بیان اینکه آموزش شیمی سبز بیشتر از طریق تدریس آزمایشگاهی جهت‌گیری شده‌اند، تأیید کرده‌اند. از یک طرف، گونبتر و همکاران (۲۰۲۵) معتقد هستند، از آنجایی که استفاده از آزمایشگاه، ساده‌ترین و آسان‌ترین روش تدریس شیمی است و معمولاً نیازی به تغییرات در برنامه درسی شیمی ندارد، بیشترین جهت‌گیری آموزش شیمی سبز، آزمایشگاهی است، در حالیکه این نوع جهت‌گیری در توسعه مهارت‌های شیمی سبز چندان موثر نیست. از طرف دیگر، ایلکز و لینکویتز^۱ (۲۰۲۲) با اینکه جهت‌گیری پایداری

¹ Eilks, & Linkwitz

در آموزش شیمی سبز را مفید دانسته‌اند اما آن را در توسعه مهارت‌های شیمی سبز، ناکافی دانسته‌اند. گونتر و همکاران (۲۰۲۵) ادعا کرده‌اند که جهت‌گیری‌های اجتماعی و واقعی، امیدوارکننده‌ترین تأثیر را در توسعه مهارت‌های شیمی سبز دارند، در حالی‌که مطالعه آنها و همین‌طور دیگر مطالعات (به عنوان نمونه: لی و ایلکز (۲۰۲۱)) نشان داد که جهت‌گیری‌های اجتماعی و واقعی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. آنها دلیل این اتفاق را محدودبودن منابع کمک آموزش شیمی سبز، محدودبودن منابع پژوهشی آموزش شیمی سبز و از همه مهم‌تر، محدودبودن دانش آموزش محتوای مدرسان شیمی سبز دانسته‌اند. علاوه بر اینها، ایلکز و لینکویتز (۲۰۲۲) خاطرنشان کردند، اگرچه مدل واقعی می‌تواند، بیشترین سهم را در توسعه مهارت‌های شیمی سبز داشته باشد اما استفاده از آن، دشوار است، زیرا جهت‌گیری واقعی در آموزش شیمی سبز نیازمند به کارگیری اصول شیمی سبز در کل یک مؤسسه است که یک رویکرد عملی و بین رشته‌ای را نیاز دارد که حتی ممکن است با عناصر برنامه درسی موجود مطابقت نداشته باشد.

مطالعه حاضر نشان داد که ناکافی‌بودن دانش آموزش محتوا PCK از بعد «درک یادگیرندگان از شیمی سبز» یکی از ویژگی‌های مشترک تحقیقات آموزش شیمی سبز در ایران است. یعنی تحقیقات موجود، دانش پیش‌نیاز و بدفهمی‌های یادگیرندگان را مورد مطالعه قرار نداده‌اند. گونتر و همکاران (۲۰۲۵) مطالعه چالش‌های «درک یادگیرندگان از شیمی سبز» را مؤثر و مهم می‌دانند، زیرا یادگیری مفاهیم شیمی سبز متأثر از «درک یادگیرندگان از شیمی سبز» است (آرمسترانگ و همکاران، ۲۰۲۴). به باور گونتر و همکاران (۲۰۲۵) عدم توجه به آن ممکن است، ناشی از جدیدبودن حوزه آموزش شیمی سبز نسبت به حوزه‌های دیگر آموزش شیمی باشد. از آنجایی که آموزش شیمی سبز یک حوزه نسبتاً جدید است، راهبردهای آموزشی برای اجرای آن در ادبیات مرتبط ناچیز است. هرچند که مطالعه راهبردهای آموزشی برای تعامل بین شیمی ریاضی و محیط زیست می‌تواند، مفید واقع شود (کریمی فردین پور ۱۳۹۹).

تحقیقات فارسی‌زبان مرتبط با حوزه آموزش شیمی سبز، به پتانسیل فناوری‌های نوین آموزش شیمی سبز اشاره نکرده‌اند. هیچ یک از مطالعات از انیمیشن‌ها یا شبیه‌سازی‌های مربوط به آموزش شیمی سبز استفاده نکردند. مارکز و همکاران (۲۰۲۰) با اشاره به قابلیت‌های فناوری آموزش به فقدان محسوس در استفاده از فناوری اشاره کرده‌اند که یکی از دلایل احتمالی این وضعیت می‌تواند، کمبود منابع و مثال‌های عینی از نحوه استفاده از فناوری‌های نوین آموزش شیمی سبز باشد. در همین راستا، کریمی فردین پور، (۱۴۰۲) به امکان سنجی کاربرد اپلیکیشن گوشی همراه هوشمند در آموزش شیمی پرداخته و پیشنهادهایی برای نحوه استفاده از فناوری‌های نوین آموزش شیمی داشته است.

مطالعات آموزش شیمی سبز در کشورمان به هر دو زیرمؤلفه ارزشیابی، «چه چیزی را باید ارزشیابی کرد؟ و چگونه باید ارزشیابی کرد؟» کم‌توجهی کرده‌اند. بخصوص متغیرها و مهارت‌های عاطفی نادیده گرفته شده‌اند. آرمسترانگ و همکاران (۲۰۲۴) ارزشیابی را یک جزء اصلی در آموزش شیمی سبز می‌دانند. یکی از دلایل این اتفاق، جوان‌بودن حوزه آموزش شیمی سبز است. به باور آنها، غفلت از مؤلفه‌های ارزشیابی، مشکلی فراگیر در تمام حوزه آموزش STEM است.

در این مطالعه، از روشی نظام‌مند برای جستجو استفاده شد و فقط ۳۰ مقاله فارسی در حوزه «آموزش شیمی سبز» پیدا شد که در مجلات علمی منتشر شده‌اند. یکی از محدودیت‌های این مطالعه، محدودشدن جامعه آماری آن به مقالات منتشرشده در مجلات است. لازم است تمام بروندهای علمی حوزه «آموزش شیمی سبز» از قبیل پایان‌نامه‌ها، مقالات کنفرانس‌ها و کتاب‌ها در یک مطالعه تکمیلی، پوشش داده شود. بخصوص با رویکرد علم‌سنجی آموزش شیمی سبز، ارزیابی کمی و تحلیل موضوعی پایان‌نامه‌های مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری (سلیمانی راد و همکاران^۱، 2025b)، ترسیم نقشه‌ی علمی و تحلیل شبکه‌ی هم‌رخدادی

¹ Soleymani Rad et al

واژگان (سلیمانی راد و همکاران^۱، 2025a) و واکاوی انطباق برنامه درسی با مأموریت‌های متناظر در اسناد بالادستی کشور (عظیم‌پور و همکاران^۲، 2025a)، لازم است.

اگرچه در مطالعه حاضر، به مقالات فهرست شده در جدول (۱) ارجاع داده نشده است تا فهرست منابع پایان مقاله طولانی نشود، اما به عنوان یک مطالعه تکمیلی، پیشنهاد می‌شود، محتوای این مقالات تحلیل کیفی شده و سهم فعالیت‌های پژوهشی مجله «پژوهش در آموزش شیمی» در اقناع مخاطب برای آموزش شیمی سبز، با سایر مجلات مقایسه شود (کریمی فردین پور و همکاران، ۱۳۹۹). چنین مطالعه‌ای لازم است تا پرتکرارترین کلید واژه‌ها در مقالات تخصصی آموزش شیمی سبز شناسایی شود. این مطالعه می‌تواند به خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی کلیدواژه‌های مقالات منتشر شده در مجله «پژوهش در آموزش شیمی» و سایر مجلات بپردازد. چنین تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها و خوشه‌بندی موضوعی می‌تواند، اشتراک‌ها و تفاوت‌ها بین مقالات منتشر شده در مجله «پژوهش در آموزش شیمی» و مقالات منتشر شده در سایر مجلات را روشن سازد. نتیجه چنین تحلیلی می‌تواند هم برای هیئت تحریریه و هم برای نویسندگان با هدف علم‌سنجی پژوهش‌های حوزه آموزش شیمی، مفید باشد.

یکی از نتایج این مطالعه حاکی از آن است که تعادل در توجه به تمامی اصول دوازده‌گانه شیمی سبز و تمامی اهداف هفده‌گانه توسعه پایدار وجود ندارد. به عبارت دیگر، برخی اصول و اهداف مورد غفلت قرار گرفته‌اند. بررسی عوامل فرهنگی، آموزشی، یا زیرساختی که ممکن است باعث این عدم تعادل شده باشند، نیازمند مطالعه‌ای مستقل است. یکی دیگر از نتایج این مطالعه، وجود خلا در ابزارهای ارزشیابی، فناوری‌های نوین و راهکارهای رفع بدفهمی‌های آموزش شیمی سبز است. این موضوع برای مخاطبان، به‌ویژه معلمان و مدرسان، بسیار اهمیت دارد. پیشنهاد می‌شود، در مطالعه‌ای تکمیلی، راهکارهای عملی برای پیاده‌سازی آموزش شیمی سبز در کلاس‌های درس یا آزمایشگاه‌ها، مانند استفاده از فناوری‌های ساده یا فعالیت‌های آزمایشگاهی کم‌هزینه در چارچوب «درک یادگیرنده»، مورد بحث قرار گیرد.

تحقیقاتی در آموزش STEM وجود دارند که از راهبرد بصری‌سازی برای افزایش درک یادگیرنده حمایت می‌کنند (کریمی فردین پور و گویا^۳، ۲۰۱۷). چنین مطالعاتی می‌توانند، به ارائه‌ی یک مدل مفهومی پیشنهادی بومی از آموزش شیمی سبز در چارچوب PCK منجر شود.

در کل، هدف این مطالعه، توصیف وضعیت موجود با شناسایی ابعاد و مولفه‌های پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه آموزش شیمی سبز ایران در چارچوب نظری دانش آموزش محتوا بوده است. تحلیل دلایل برای وضعیت فعلی و ارائه راهکار نیازمند مطالعات تکمیلی است تا به ارائه پیشنهادی راهبردی برای سیاست‌گذاران، معلمان، مدرسان و نویسندگان بینجامد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

¹ Soleymani Rad et al

² Azimpour et al

³ KarimiFardinpour and

Gooya

موازين اخلاقي

در انجام اين پژوهش تمامي موازين و اصول اخلاقي رعايت گرديده است.

مشاركت نويسندگان

همه نويسندگان به صورت برابر در نگارش اين مقاله مشاركت داشته اند.

تشكر و قدرداني

نويسنده، قدردان حمايت هاي معنوي رياست محترم مركز تحقيقات مديريت توسعه پايدار حوضه آبريز درياچه اروميه و رودخانه ارس است.

References

- Andraos, J., & Dicks, A. P. (2012). Green chemistry teaching in higher education: a review of effective practices. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(2), 69-79. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2012/rp/c1rp90065j>
- Armstrong, L. B., Irie, L. M., Chou, K., Rivas, M., Douskey, M. C., & Baranger, A. M. (2024). What's in a word? Student beliefs and understanding about green chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 25(1), 115-132. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/rp/d2rp00270a>
- Aubrecht, K. B., Bourgeois, M., Brush, E. J., MacKellar, J., & Wissinger, J. E. (2019). Integrating green chemistry in the curriculum: Building student skills in systems thinking, safety, and sustainability. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2872-2880. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jchemed.9b00354>
- Azimpour, S., KarimiFardinpour, Y. and Mahmoodi, F. (2025). Analyzing The Conformity of The New Curriculum of The Bachelor's Course in Mathematical Education of Farhangian University with The Fundamental Evolution Document. *Educational and Scholastic studies*, 13(4), 21-39. doi: 10.48310/pma.2025.15485.4365 https://pma.cfu.ac.ir/article_3934.html?lang=en
- Carlsen, L., & Bruggemann, R. (2022). The 17 United Nations' sustainable development goals: A status by 2020. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 29(3), 219-229. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13504509.2021.1948456>
- Chen, M., Jeronen, E., & Wang, A. (2020). What lies behind teaching and learning green chemistry to promote sustainability education? A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 7876. <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/21/7876>
- Eilks, I., & Linkwitz, M. (2022). Greening the chemistry curriculum as a contribution to education for sustainable development: When and how to start?. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 37, 100662. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452223622000748>
- Etzkorn, F. A., & Ferguson, J. L. (2023). Integrating green chemistry into chemistry education. *Angewandte Chemie International Edition*, 62(2), e202209768. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/anie.202209768>
- Ganesh, K. N., Zhang, D., Miller, S. J., Rossen, K., Chirik, P. J., Kozlowski, M. C., ... & Voutchkova-Kostal, A. M. (2021). Green chemistry: a framework for a sustainable future. *Environmental Science & Technology*, 55(13), 8459-8463. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.1c03762>
- Grieger, K., Hill, B., & Leontyev, A. (2022). Exploring curriculum adoption of green and sustainable chemistry in undergraduate organic chemistry courses: Results from a national survey in the United States. *Green Chemistry*, 24(22), 8770-8782. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/gc/d2gc02999e/unauth>
- Gunbatar, S. A., Kiran, B. E., Boz, Y., & Oztay, E. S. (2025). A systematic review of green and sustainable chemistry training research with pedagogical content knowledge framework: current trends and future directions. *Chemistry Education Research and Practice*. DOI: 10.1039/D4RP00166D (Review Article) *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2025, 26, 34-52. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/rp/d4rp00166d>
- Halpaap A., (2021), Green and Sustainable Chemistry: Framework Manual, UNEP - UN Environment Programme. Available Online: <https://www.unep.org/resources/toolkits-manuals-and-guides/green-and-sustainable-chemistry-framework-manual> (Accessed on 17 September 2024).
- Karimi Fardinpour, Younes, & Moslehi Milani. (2020). Content analysis of the journal Application of Chemistry in the Environment based on Shannon entropy with environmental assumptions. *Application of Chemistry in the Environment*, 10(40), 27-37. https://journals.iau.ir/article_685008.html?lang=en
- Karimi Fardinpour, Younes, Moslehi Milani, & Entezari. (2020). A study of persuasion in the most viewed articles in the Journal of Applied Chemistry in the Environment. *Applied Chemistry in the Environment*, 11(42), 37-52. https://ace.ahar.iau.ir/article_690367.html

- Karimi Fardinpour, Younes. (2021). Interaction of Mathematical Chemistry and Environment. Application of Chemistry in the Environment, 11(44), 47-55. https://journals.iau.ir/article_695301.html?lang=en
- Karimi Fardinpour, Younes. (2023). Feasibility study of the use of a smartphone application in chemistry education. Application of Chemistry in the Environment, 14(54), 57-64. https://journals.iau.ir/article_707113.html?lang=en
- KarimiFardinpour, Y. & Gooya, Z. (2017). Comparing Three Methods of Geometrical Approach in Visualizing Differential Equations. Int. J. Res. Undergrad. Math. Ed. DOI: 10.1007/s40753-017-0061-6, Part of ISSN: 2198-9745, Part of ISSN: 2198-9753 <https://doi.org/10.1007/s40753-017-0061-6>
- Li, B., & Eilks, I. (2021). A systematic review of the green and sustainable chemistry education research literature in mainland China. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 21, 100446. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352554121000735>
- Magnusson, S., Krajcik, J., & Borko, H. (1999). Nature, sources, and development of pedagogical content knowledge for science teaching. In Examining pedagogical content knowledge: The construct and its implications for science education (pp. 95-132). Dordrecht: Springer Netherlands. https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-47217-1_4
- Mahdavi, N. , Niknam, Z. , Attaran, M. , Mousapour, N. and Azimi, M. (2024). pedagogy content knowledge. Theory and Practice in Teachers Education, 10(17), 33-18. doi: 10.48310/itt.2023.3021. https://eduphil.cfu.ac.ir/article_3021.html?lang=en
- Marques, C. A., Marcelino, L. V., Dias, É. D., Rüntzel, P. L., Souza, L. C. A. B., & Machado, A. (2021). Green chemistry teaching for sustainability in papers published by the Journal of Chemical Education. Química Nova, 43, 1510-1521. <https://www.scielo.br/j/qn/a/hccH6GxXJTgT5FNL8Tf9dkB>
- Nahlik, P., Kempf, L., Giese, J., Kojak, E., & Daubenmire, P. L. (2023). Developing green chemistry educational principles by exploring the pedagogical content knowledge of secondary and pre-secondary school teachers. Chemistry Education Research and Practice, 24(1), 283-298. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/rp/d2rp00229a>
- Nilsson, P., & Vikström, A. (2015). Making PCK explicit—Capturing science teachers' pedagogical content knowledge (PCK) in the science classroom. International Journal of Science Education, 37(17), 2836-2857. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500693.2015.1106614>
- Rezaee, M. , Naderi, F. and Hosseinzadeh, M. (2023). Assessment of the Country's Development Plans in the Field of Environment and Providing Strategies for the Seventh Plan. Majlis and Rahbord, 30(115), 335-374. doi: 10.22034/mr.2023.5562.5366. https://nashr.majles.ir/article_9628.html?lang=en
- Sheldon, R. A., & Brady, D. (2022). Green chemistry, biocatalysis, and the chemical industry of the future. ChemSusChem, 15(9), e202102628. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cssc.202102628>
- Soleymani Rad, V., Karimi Fardinpour, Y., Behzadi, M. H., & Shahvarani Semnani, A. (2025). Drawing a Scientific Map and Analyzing the Co-occurrence Network of Master's Dissertations and Doctoral Theses in Mathematics Education at Iranian Universities. Scientometrics Research Journal, 11((Issue 1, spring & summer)), 235-260. doi: 10.22070/rsci.2024.19206.1738. https://rsci.shahed.ac.ir/article_4630.html?lang=en
- Soleymani Rad, V., KarimiFardinpour, Y., Behzadi, M. H., & Shahvarani Semnani, A. (2025b). Quantitative evaluation and thematic analysis of master's dissertations and doctoral theses in mathematics education at Shahid Rajaee University and Islamic Azad University, Tehran Science and Research Branch, from 2003 to 2022. Scientometrics Research Journal, doi: 10.22070/rsci.2025.19249.1739. https://rsci.shahed.ac.ir/article_4692.html?lang=en
- UN, (2015), Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable development. <https://www.undp.org/ukraine/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development>
- UNESCO, (2005), United nations decade of education for sustainable development (2005–2014): international implementation scheme. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000148654>
- Zuin, V. G., Eilks, I., Elschami, M., & Kümmerer, K. (2021). Education in green chemistry and in sustainable chemistry: perspectives towards sustainability. Green Chemistry, 23(4), 1594-1608. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/gc/d0gc03313h>