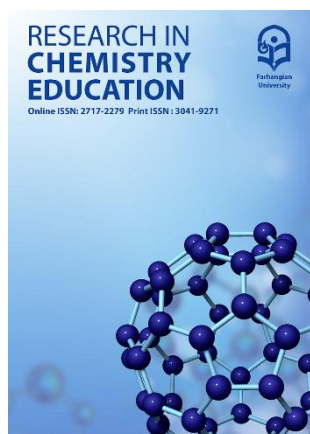


Challenges of teaching atomic models in chemistry: from Bohr's model to quantum mechanics

1. Sohrab Aghaei ^{*id}: Department of Physics Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran

*Corresponding Author's Email Address: s.aghaie@cfu.ac.ir



Abstract:

Background and Objective: Atomic models are among the key concepts in chemistry and physics education, as understanding them plays a crucial role in comprehending the structure of matter and their microscopic behavior. However, teaching these models—especially the transition from classical models such as Bohr's model to modern models based on quantum mechanics—faces numerous challenges.

Materials and Methods: This study aimed to identify and analyze the educational challenges of atomic models, based on a systematic review of scientific literature published between 2016 and 2023. The novelty of this research lies in presenting a three-fold analytical framework (content-based, cognitive, and technological) for categorizing challenges and proposing specific strategies for each category.

Findings: Findings indicate that one of the main issues is the presentation of different models separately and without attention to their historical and conceptual evolution, which leads to misconceptions and inaccurate scientific understanding among students. Furthermore, due to the abstract nature of quantum models, effective teaching requires interactive methods and technological tools—resources many teachers lack due to insufficient training or infrastructure.

Conclusion: Accordingly, curriculum reform, teacher empowerment, and purposeful use of educational technology can significantly improve the quality of learning fundamental concepts and foster scientific thinking in students. Addressing these challenges is essential not only for enhancing students' conceptual understanding but also for fostering scientific thinking and inquiry-based learning in science education.

Keywords: Atomic Models, Bohr Atomic Model, Quantum Model, Chemistry Education, Misconceptions.

REVIEW ARTICLE

How to Cite: Aghaei, S. (2026). Challenges of teaching atomic models in chemistry: from Bohr's model to quantum mechanics. *Research in Chemistry Education*, 8(3), 27-45.

DOI: [10.48310/chemedu.2025.18968.1321](https://doi.org/10.48310/chemedu.2025.18968.1321)



Extended Abstract

Introduction

In recent decades, quantum physics has played a crucial role in the development of modern technologies. The first quantum revolution addressed the limitations of classical physics, introducing foundational concepts such as quantized energy, the quantum model of the atom, and wave-particle duality, which paved the way for technologies like lasers and transistors. The second quantum revolution, beginning in the late 20th century, shifted focus to practical applications, including quantum computing, cryptography, and sensing. Despite global investments and technological advancements, public understanding of quantum mechanics has remained limited, especially among high school and early university students, due to its abstract nature and contrast with classical intuition.

To address this, many countries have integrated quantum topics into high school curricula, supported by educational tools such as visualizations, simulations, and virtual environments. However, students often struggle with the transition from classical to quantum models, especially in understanding atomic structure. Persistent misconceptions—like overreliance on the Bohr model—highlight the need for teaching approaches that emphasize model comparison and conceptual clarity.

From ancient times to the present, various models have been proposed to describe the structure of the atom. Philosophers such as Leucippus and Democritus were the first to introduce the idea of atoms as indivisible particles of matter, though their views were purely philosophical. In the 19th century, John Dalton introduced an atomic theory based on experimental evidence, describing elements as composed of identical atoms. Scientific progress led to J.J. Thomson's discovery of the electron and his "plum pudding" model. Later, Rutherford's gold foil experiment revealed the existence of a dense atomic nucleus. Niels Bohr further advanced the atomic model by combining classical mechanics with Planck's quantum theory to explain the hydrogen spectrum, although it was limited in explaining more complex elements.

In the 1920s, the quantum model of the atom, introduced by Erwin Schrödinger's wave equation, replaced earlier models. Instead of definite orbits, this model describes the probability of an electron's presence in specific orbitals and incorporates concepts such as Heisenberg's uncertainty principle. It remains the most accurate description of atomic structure and underpins advances in quantum chemistry, spectroscopy, and modern technologies. Nevertheless, teaching this model remains challenging due to the abstract nature of its concepts. Tools such as simulations, animations, and interactive environments can aid in comprehension, but many students still prefer simpler models like Bohr's. Thus, effective teaching of atomic models requires a gradual, visual, and integrative approach that combines historical development with foundational quantum principles.

This study analyzes 15 recent articles on teaching atomic models to identify common challenges and evaluate the effectiveness of modern instructional strategies, aiming to support educators in improving student comprehension of these abstract concepts.

Methodology

This study employed a systematic review method to investigate the challenges of teaching atomic models in chemistry. ERIC and Google Scholar were used as primary databases, and relevant articles were selected using advanced searches with keywords such as Atomic Models Education, Bohr Model Teaching Challenges, Quantum Mechanics in Chemistry Education, and Misconceptions in Atomic Models. The selection criteria included: publication date (only studies from 2016 onward), journal quality (7 from Q1, 5 from Q2, and 2 from Q3 journals), and topical relevance (focusing directly on teaching challenges). Articles unrelated to education, purely theoretical, or redundant reviews were excluded. For each selected paper, key information such as study summary, methodology, target population, findings, limitations, and future recommendations

were extracted and organized in tables to enable comparison. Through qualitative content analysis, common challenges and recurring patterns were identified. Limitations included restricted access to some paid articles, potential bias in article selection due to keyword and database limitations, and lack of original data analysis. Despite these, the study aimed to ensure reliable results through careful selection and comparative analysis of credible sources

Results and Discussion

Atomic models are among the key concepts in chemistry education, playing a crucial role in understanding the structure of matter and chemical behavior. However, teaching these models—from Dalton's model to the quantum model—has consistently posed challenges for both teachers and students. These challenges often stem from the complexity of the concepts, ineffective teaching methods, and students' difficulties in grasping abstract ideas. Research analysis shows that students frequently have an incomplete understanding of atomic models, especially during the transition from classical to modern models.

Teaching approaches for atomic models can be classified into three categories: traditional, experimental, and technology-based methods. Traditional methods, such as lectures and the use of static images, although common, often lead to misconceptions. Hands-on methods like spectroscopy experiments can enhance understanding, but face limitations such as restricted access to equipment and inadequate coverage of quantum models. In contrast, using simulation software like PhET and Atom Builder can strengthen visual understanding of atomic models, but their effective use requires teacher training and active student engagement.

The challenges of teaching atomic models can be grouped into three categories: conceptual, methodological, and cognitive. Conceptually, students often struggle to understand the probabilistic nature of electron positions, the distinction between orbitals and orbits, and the dual behavior of electrons. Methodological challenges include the lack of continuity between models, insufficient use of technology, and limited instructional time. Cognitively, students struggle with visualizing quantum concepts, understanding mathematical symbols, and accepting counterintuitive ideas.

To address these challenges, researchers suggest solutions such as designing progressive curricula, utilizing interactive technologies, and applying active teaching strategies. Combining historical narratives with computer simulations and group activities in class—especially in teacher education—can enhance the effectiveness of teaching atomic models. Ultimately, improving teachers' scientific knowledge and pedagogical skills in this area is essential for enhancing the quality of science education.

Conclusions

The findings of this study indicate that teaching atomic models—especially the transition from classical models like Bohr's to the modern quantum mechanical models—faces complex and multifaceted challenges. These challenges stem not only from the conceptual complexity of the scientific content but also from the teaching methods, availability of educational tools, and the preparedness of teachers. According to the analysis of the literature, one of the key factors contributing to students' conceptual misunderstandings is the lack of coherence in teaching atomic models. Often, these models are taught in isolation without emphasizing their historical and logical progression. This disjointed approach reinforces simplistic ideas, such as the planetary Bohr model, and makes it more difficult for students to grasp the more abstract concepts of quantum mechanics.

On the other hand, traditional teaching methods—mainly relying on lectures and static images—are insufficient for fostering a deep understanding of the dynamic and probabilistic nature of quantum models. While some teachers incorporate simple experiments or interactive tools, technical infrastructure and specialized teacher training to effectively use modern technologies, such as simulation and computer modeling software, are still lacking in many schools. From a cognitive perspective, students often struggle with abstract and intangible concepts such as the probability of electron location, wave-particle duality, and

quantum orbitals. These difficulties are exacerbated in the absence of active and interactive teaching methods, sometimes resulting in cognitive conflicts and resistance to accepting new models.

Based on these findings, several recommendations can be proposed to improve the teaching of atomic models:

1. Revising the curriculum to emphasize the continuity and historical-conceptual evolution of atomic models.
2. Purposeful and organized use of educational technologies such as interactive simulations and modeling tools.
3. Empowering teachers through training courses on quantum concepts and active teaching strategies.
4. Developing multimedia educational resources that simplify abstract and complex concepts through visual and intuitive representations.
5. Addressing cognitive aspects of learning by designing activities that turn cognitive conflicts into opportunities for deeper understanding.

Ultimately, successful instruction of atomic models requires not only scientifically accurate content but also an integrated, interdisciplinary, and student-centered approach. By utilizing modern teaching strategies, educators can enhance students' conceptual understanding and critical thinking. Paying serious attention to these challenges can play a vital role in improving the quality of science education and in preparing the next generation of scientists and science educators.

چالش‌های آموزش مدل‌های اتمی در شیمی: از مدل بوهر تا مکانیک کوانتومی

۱. سهراب آقایی*؛ گروه آموزش فیزیک، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۱۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران.

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.aghaie@cfu.ac.ir

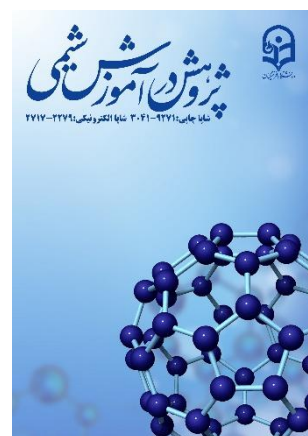
چکیده

پیشینه و اهداف: مدل‌های اتمی یکی از مفاهیم کلیدی در آموزش شیمی و فیزیک هستند که فهم آن‌ها نقش مهمی در درک ساختار ماده و ویژگی‌های میکروسکوپی آن دارد. با این حال، آموزش این مدل‌ها، به‌ویژه در گذار از مدل‌های کلاسیکی مانند مدل بوهر به مدل‌های جدید بر پایه مکانیک کوانتومی، با چالش‌های متعددی همراه است.

روش‌ها: این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل چالش‌های آموزشی مدل‌های اتمی انجام شد و بر مبنای مرور نظام‌مند منابع علمی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ طراحی گردید. نوآوری این مطالعه در ارائه یک چارچوب تحلیلی سه‌گانه (محتوایی، شناختی و فناورانه) برای طبقه‌بندی چالش‌ها و ارائه راهبردهای مشخص برای هر دسته است.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان می‌دهند که یکی از مشکلات اصلی، ارائه مدل‌های مختلف به صورت جداگانه و بدون توجه به سیر تاریخی و تکاملی آن‌هاست، که موجب بدفهمی مفاهیم علمی و ایجاد تصورات نادرست در ذهن دانش‌آموزان می‌شود. همچنین، آموزش مدل‌های کوانتومی به دلیل ماهیت انتزاعی آن‌ها، نیازمند بهره‌گیری از روش‌های تدریس تعاملی و ابزارهای فناورانه است. درحالی‌که بسیاری از معلمان به دلیل کمبود آموزش‌های تخصصی یا امکانات فنی، به شیوه‌های سنتی تدریس اکتفا می‌کنند.

نتیجه‌گیری: بر این اساس، بازنگری در برنامه‌های درسی، توانمندسازی معلمان و استفاده هدفمند از فناوری‌های آموزشی می‌تواند به ارتقای کیفیت یادگیری مفاهیم بنیادین و پرورش تفکر علمی در دانش‌آموزان کمک کند. همچنین، توجه به این چالش‌ها نقش مهمی در بهبود یادگیری مفاهیم بنیادین علم و پرورش تفکر علمی در دانش‌آموزان خواهد داشت.



نوع مقاله: مقاله مروری

نحوه استناددهی: آقایی، سهراب. (۱۴۰۵).

چالش‌های آموزش مدل‌های اتمی در شیمی: از مدل بوهر تا مکانیک کوانتومی. پژوهش در

آموزش شیمی، ۸(۳)، ۴۵-۲۷.

DOI:

10.48310/chemedu.2025.18968.1321

کلیدواژگان: مدل‌های اتمی، مدل اتمی بوهر، مدل کوانتومی، آموزش شیمی، بدفهمی‌ها



مقدمه

در دهه‌های اخیر، فیزیک کوانتومی به عنوان یکی از بنیادی‌ترین شاخه‌های علم، نقش کلیدی در توسعه فناوری‌های نوین ایفا کرده است. از رایانه‌های کوانتومی تا ارتباطات امن کوانتومی، بسیاری از پیشرفت‌های علمی و صنعتی به درک عمیق از اصول مکانیک کوانتومی وابسته هستند. انقلاب کوانتومی اول، که در اوایل قرن بیستم شکل گرفت، پاسخی به چالش‌های فیزیک کلاسیک، مانند تابش جسم سیاه و اثر فوتوالکتریک بود. ماکس پلانک با معرفی نظریه کوانتای انرژی و اینشتین با توضیح اثر فوتوالکتریک، مفهوم گسسته‌بودن انرژی را مطرح کردند. نیلز بور مدل کوانتومی اتم را پیشنهاد داد و شرودینگر و هایزنبرگ با توسعه معادلات موجی و اصل عدم قطعیت، بنیان‌های مکانیک کوانتومی را بنا نهادند. این مفاهیم منجر به فناوری‌هایی مانند ترانزیستورها، لیزر و شیمی کوانتومی شدند و تغییرات عمیقی در فلسفه علم ایجاد کردند. در ادامه، انقلاب کوانتومی دوم که از اواخر قرن بیستم آغاز شد، بر کاربردهای عملی مفاهیم مکانیک کوانتومی متمرکز شد و تحولی اساسی در فناوری و صنایع مختلف ایجاد کرد. برخلاف انقلاب اول که بر کشفیات نظری تأکید داشت، این دوره بر توسعه فناوری‌هایی مانند رمزنگاری کوانتومی، محاسبات کوانتومی و حسگرهای کوانتومی تمرکز دارد. مفاهیمی مانند درهم‌تنیدگی و برهم‌نهی کوانتومی، امکان پردازش اطلاعات با سرعتی فراتر از کامپیوترهای کلاسیک را فراهم کرده‌اند. سرمایه‌گذاری‌های کلان در کشورهای مختلف، از جمله اتحادیه اروپا، آمریکا و چین، نشان‌دهنده اهمیت این تحول در سطح جهانی است. همکاری‌های بین‌المللی و مشارکت شرکت‌های بزرگی مانند گوگل و IBM در توسعه این فناوری، نشان می‌دهد که انقلاب کوانتومی دوم نه تنها در علم، بلکه در اقتصاد جهانی نیز نقش کلیدی ایفا خواهد کرد (ساتاناسی^۱، فالیتیک^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، مونرو^۳، آقایی (۲۰۲۴)).

با وجود این پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های کوانتومی، درک عمومی از مفاهیم بنیادی فیزیک کوانتومی همچنان با چالش‌های جدی روبه‌رو است. آموزش این مفاهیم، به دلیل تفاوت اساسی آن‌ها با شهود کلاسیکی، چالش‌های زیادی در فرآیند آموزش و یادگیری ایجاد کرده‌اند و نیازمند رویکردهای نوین هستند. در حالی که این حوزه برای درک بهتر رفتار بنیادی ذرات ضروری است، بسیاری از دانش‌آموزان فرصت آشنایی با مفاهیم اولیه آن را ندارند (مولر^۴ و همکاران (۲۰۰۲)). پس از آموزش سنتی، دانشجویان معمولاً دچار بدفهمی‌های کلاسیکی شده و مفاهیم کلاسیک و کوانتومی را با هم اشتباه می‌گیرند. برای نمونه، دانشجویان گاهی تصور می‌کنند، الکترون‌ها همانند سیارات در مدارهای دقیق به دور هسته می‌چرخند، عدم قطعیت مکان الکترون را ناشی از نقص ابزارهای اندازه‌گیری می‌دانند، انرژی ذرات را پیوسته در نظر می‌گیرند، یا رفتار دوگانه موج-ذره را به صورت کاملاً ذره‌ای یا کاملاً موجی تفسیر می‌کنند.

یکی از رویکردهای مهم در آموزش علوم، ترویج مفاهیم کوانتومی از سنین پایین‌تر است تا دانش‌آموزان آمادگی لازم برای درک این حوزه را در سال‌های بعدی تحصیل کسب کنند. به همین دلیل، از چندین سال قبل، فیزیک کوانتومی در بسیاری از کشورها از جمله انگلستان، آلمان، ایتالیا، هلند و فرانسه به بخشی از

1 Satanassi

2 Faletic

3 Monroe

4 Müller

برنامه درسی دبیرستان تبدیل شده است (ماشادی^۱ و همکاران (۱۹۹۹)، مولر^۲ و همکاران (۲۰۰۲)، میچلینی^۳ و همکاران (۲۰۰۰)، کریتنبورگ^۴ و همکاران (۲۰۱۷)). به عنوان نمونه، پروژه رله کوانت^۵ یک طرح آموزشی برای بهبود تدریس و یادگیری مباحث فیزیک مدرن مانند مکانیک کوانتومی و نسبیت عام در دوره متوسطه است. در این پروژه، ماژول‌های آموزشی مبتنی بر وب توسعه یافته‌اند که با استفاده از شبیه‌سازی‌ها، انیمیشن‌ها و فعالیت‌های گروهی، به دانش‌آموزان در درک بهتر مفاهیم انتزاعی و غیر شهودی کمک می‌کنند. این رویکرد، علاوه بر تقویت فهم مفهومی، تفکر فلسفی درباره ماهیت فیزیک مدرن را نیز در دانش‌آموزان پرورش می‌دهد. هرچند این پروژه متناسب با برنامه درسی نروژ طراحی شده است، اما می‌تواند الگویی الهام‌بخش برای آموزش مفاهیم فیزیک نوین در سایر کشورها نیز باشد (هرینکسن^۶ و همکاران (۲۰۱۴)).

از آنجا که مدل‌های اتمی زیربنای درک ساختار مواد در شیمی محسوب می‌شوند، نحوه آموزش آن‌ها تأثیر مستقیمی بر یادگیری دانش‌آموزان و دانشجویان دارد. با این حال، انتقال از مدل‌های کلاسیک مانند مدل بوهر به مدل‌های پیشرفته‌تر مکانیک کوانتومی با چالش‌های مفهومی متعددی همراه است. زیرا مفاهیم مربوط به اتم و اوربیتال‌ها برای دانش‌آموزان دشوارند و دانش‌آموزان در درک و تصویرسازی پدیده‌های اتمی با مشکل مواجه می‌شوند (آقازاده (۱۴۰۲)، خانزاد و همکاران (۱۴۰۲)).

استفاده از تصاویر دوبعدی، انیمیشن‌ها، شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی و محیط‌های واقعیت مجازی، ابزاری برای کمک به درک بهتر مدل کوانتومی اتم است. در مدل کوانتومی، رفتار الکترون‌ها به صورت احتمال حضور در اوربیتال‌ها بیان می‌شود که ماهیتی فضایی و چندبعدی دارد. بازنمایی‌های دوبعدی (مانند نمودارهای چگالی احتمال) کمک می‌کنند که ساختار کلی اوربیتال‌ها نمایش داده شود، در حالی که انیمیشن‌ها تغییرات زمانی چگالی احتمال را بهتر نشان می‌دهند. شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی و محیط‌های واقعیت مجازی، امکان تجسم فضایی دقیق‌تر توزیع الکترون‌ها در اوربیتال‌های اتمی را فراهم می‌کنند. این ابزارها می‌توانند از طریق ارائه‌ی تجربه‌های بصری و تعاملی، به دانش‌آموزان در درک ویژگی‌های انتزاعی و غیر شهودی مدل کوانتومی کمک کنند.

با این حال، هیچ تصویری نمی‌تواند مدل کوانتومی را به طور کامل و دقیق نمایش دهد، زیرا ذات این مدل مبتنی بر احتمال و عدم قطعیت است. بنابراین، بهترین راهکار در تصویرسازی مدل کوانتومی، ترکیب چندین بازنمایی (تصاویر، انیمیشن‌ها، شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی) همراه با تأکید معلمان بر محدودیت‌های هر بازنمایی و توضیح شفاهی مفاهیم انتزاعی مانند احتمال و چگالی احتمال است. این ترکیب به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا بفهمند که بازنمایی‌های بصری، ابزارهای تقریبی برای فهم مفاهیم انتزاعی مدل کوانتومی هستند، نه بازتاب کامل واقعیت فیزیکی.

معلمان باید هنگام استفاده از مدل‌ها، قوانین، مزایا و محدودیت‌های آن‌ها را توضیح دهند تا از بدفهمی دانش‌آموزان جلوگیری شود. شبیه‌سازی‌ها و محیط‌های مجازی می‌توانند به تصویرسازی بهتر مفاهیم انتزاعی کمک کرده و یادگیری را جذاب‌تر کنند. با این حال، بسیاری از دانش‌آموزان مدل اوربیتالی را گیج‌کننده

¹ Mashadi

² Muller

³ Michelini

⁴ Krijtenburg

⁵ ReleQuant

⁶ Henriksen

می‌دانند و مدل منظومه شمسی را به دلیل ملموس‌تر بودن ترجیح می‌دهند. بنابراین، شناخت پیش‌زمینه دانش‌آموزان و مقایسه‌ی مدل‌های تاریخی برای درک بهتر تکامل نظریه‌های اتمی ضروری است (نتزل^۱ (۲۰۱۴)، باوردی مقدم (۱۴۰۱)).

در این پژوهش، قصد داریم با بررسی و تحلیل ۱۵ مقاله‌ی اخیر منتشرشده در حوزه‌ی آموزش مدل‌های اتمی، روندهای رایج در آموزش این مفاهیم را شناسایی کنیم. هدف اصلی این بررسی، ارزیابی روش‌های مختلف تدریس، چالش‌های رایج در یادگیری مدل‌های اتمی و تأثیر فناوری‌های نوین بر بهبود درک دانش‌آموزان است. با تحلیل این مطالعات، تلاش خواهیم کرد تا استراتژی‌های مؤثرتری برای آموزش مدل‌های اتمی پیشنهاد دهیم که بتوانند گذار مفهومی از دیدگاه‌های سنتی به چارچوب‌های نظری پیچیده‌تر در مکانیک کوانتومی را تسهیل کنند. نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمایی برای معلمان و طراحان برنامه‌های درسی باشد تا شیوه‌های آموزشی خود را بر اساس یافته‌های علمی به‌روز کنند و یادگیری این مفاهیم انتزاعی را برای دانش‌آموزان و دانشجویان قابل‌فهم‌تر سازند.

مبانی نظری مدل‌های اتمی

مفهوم اتم به عنوان کوچک‌ترین جزء سازنده ماده، از دوران باستان مورد توجه فیلسوفان بوده است. لئوکیپوس^۲ و دموکریتوس^۳ در قرن پنجم پیش از میلاد، نخستین کسانی بودند که نظریه اتمی را مطرح کردند. آنان اعتقاد داشتند که تمام مواد از ذرات ریز، تجزیه‌ناپذیر و غیرقابل تقسیم به نام اتم تشکیل شده‌اند. این نظریه، بدون شواهد تجربی، صرفاً بر پایه تفکر فلسفی استوار بود. در مقابل، ارسطو (۳۸۴-۳۲۲ ق.م.) نظریه‌ای متفاوت ارائه داد و ماده را متشکل از چهار عنصر اصلی (آب، خاک، هوا و آتش) دانست. نظریه اتمی دموکریتوس تا قرن‌ها مورد توجه نبود و تنها در دوران مدرن مجدداً مطرح شد.

در اوایل قرن نوزدهم، جان دالتون (۱۷۶۶-۱۸۴۴) با ارائه نظریه اتمی خود، اتم را به‌عنوان کوچک‌ترین واحد ماده معرفی کرد. بر اساس نظریه دالتون:

- تمام عناصر از ذرات ریزی به نام اتم تشکیل شده‌اند که غیرقابل تجزیه‌اند.
- همه اتم‌های یک عنصر مشابه‌اند و جرم و خواص یکسانی دارند.
- ترکیبات شیمیایی از نسبت‌های مشخصی از اتم‌های مختلف تشکیل می‌شوند.
- واکنش‌های شیمیایی به تغییر در نحوه‌ی ترکیب اتم‌ها منجر می‌شوند، نه تغییر در خود اتم‌ها.

نظریه دالتون بر پایه مشاهدات تجربی استوار بود و توانست برخی از قوانین بنیادی شیمی مانند قانون بقای جرم و قانون نسبت‌های معین را توضیح دهد. با این حال، این مدل هنوز نمی‌توانست ساختار داخلی اتم را توصیف کند.

در سال ۱۸۹۷، تامسون با کشف الکترون نشان داد که اتم دارای ساختار داخلی است. او مدل خود را به‌صورت کره‌ای از بار مثبت با الکترون‌هایی پراکنده در آن پیشنهاد داد. این مدل که به مدل «کیک کشمش» معروف شد، نخستین گام در شناخت ساختار الکترونی اتم بود. با این حال، این مدل توضیح دقیقی درباره‌ی پایداری و آرایش الکترون‌ها ارائه نمی‌داد.

¹ Netzell
² Leucippus
³ Democritus

رادرفورد در سال ۱۹۱۱ با آزمایش پراکندگی ذرات آلفا (آزمایش فویل طلا) نشان داد که بار مثبت و جرم اتم در یک هسته‌ی کوچک و متمرکز شده است و الکترون‌ها در فضای اطراف آن پراکنده‌اند. این مدل، ساختار هسته‌ای اتم را معرفی کرد اما نمی‌توانست توضیح دهد که چرا الکترون‌ها، که در حال حرکت به دور هسته‌اند، انرژی خود را از دست نمی‌دهند و به داخل هسته سقوط نمی‌کنند.

بور در سال ۱۹۱۳، با ترکیب مفاهیم مکانیک کلاسیک و نظریه کوانتومی پلانک، مدل جدیدی برای اتم هیدروژن پیشنهاد کرد. ویژگی‌های اصلی این مدل عبارت‌اند از:

- الکترون‌ها در مدارهایی مشخص با انرژی‌های کوانتیده به دور هسته حرکت می‌کنند.
 - تنها مدارهایی با انرژی‌های معین برای الکترون مجاز هستند.
 - جذب یا گسیل انرژی تنها به صورت جهشی بین این سطوح انجام می‌شود.
- مدل بور توانست طیف گسیلی هیدروژن را توضیح دهد اما در توصیف طیف‌های پیچیده‌تر عناصر ناکام ماند و نمی‌توانست پدیده‌هایی مانند اثر زیمن یا اثر اشتارک را تبیین کند.

با توسعه مکانیک کوانتومی در دهه ۱۹۲۰، مدل کوانتومی اتم جایگزین مدل بور شد. اروین شرودینگر با ارائه معادله موجی خود، رفتار الکترون‌ها را در چارچوب توابع موجی توصیف کرد. بر اساس این مدل:

- الکترون‌ها در مدارهای مشخص حرکت نمی‌کنند، بلکه احتمال حضور آن‌ها در فضاهای خاصی به نام اوربیتال تعریف می‌شود.
 - اصل عدم قطعیت هایزنبرگ بیان می‌کند که نمی‌توان مکان و سرعت الکترون را هم‌زمان با دقت بالا اندازه‌گیری کرد.
 - اوربیتال‌های اتمی با استفاده از چهار عدد کوانتومی توصیف می‌شوند.
- مدل کوانتومی اتم دقیق‌ترین مدل موجود برای توصیف ساختار الکترونی است و مبنای بسیاری از پیشرفت‌های علمی و فناوری، از جمله شیمی کوانتومی و طیف‌سنجی، محسوب می‌شود.

تحول مدل‌های اتمی از دوران باستان تا مکانیک کوانتومی نشان‌دهنده‌ی تلاش مستمر دانشمندان برای درک بهتر ساختار ماده است. هر مدل جدید، بر اساس شواهد تجربی و نظریه‌های علمی زمان خود توسعه یافته و محدودیت‌های مدل‌های پیشین را برطرف کرده است. این روند نشان می‌دهد که درک ما از جهان طبیعی همواره در حال تکامل است و مدل‌های علمی نیز با پیشرفت فناوری و دانش تجربی بهبود می‌یابند. همچنین در طول تاریخ، آموزش مدل‌های اتمی همواره با چالش‌های متعددی همراه بوده است. مدل‌های اولیه مانند نظریه‌های دموکریت و دالتون به دلیل سادگی مفهومی، به راحتی درک می‌شدند، اما مدل‌های پیچیده‌تر مانند مدل مکانیک کوانتومی شرودینگر نیازمند آموزش مفاهیم پیشرفته‌تری هستند. تدریس مدل کوانتومی مستلزم درک دقیق از تابع موج، تعبیر احتمالاتی بورن و اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است، که همگی برخلاف شهود کلاسیکی دانش‌آموزان و دانشجویان هستند. در این راستا، روش‌های نوین تدریس مانند استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، انیمیشن‌های آموزشی، آزمایش‌های مجازی و محیط‌های تعاملی، می‌توانند به درک بهتر این مفاهیم کمک کنند. با این حال، همچنان بسیاری از دانش‌آموزان مدل‌های ساده‌تری مانند مدل بوهر را ترجیح می‌دهند و در پذیرش ماهیت موجی-ذره‌ای الکترون‌ها دچار دشواری می‌شوند.

از این رو، آموزش موفق مدل‌های اتمی نیازمند استفاده از رویکردهای ترکیبی است که نه تنها تاریخچه‌ی تکامل این مدل‌ها را ارائه دهند، بلکه مفاهیم اساسی مکانیک کوانتومی را به صورت تدریجی و در قالبی ملموس و بصری آموزش دهند.

روش پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از روش مرور سیستماتیک، به تحلیل مطالعات مرتبط با آموزش مدل‌های اتمی در شیمی پرداخته است. جستجو در پایگاه‌های ERIC و Google Scholar با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌هایی مانند *Atomic Models Education* و *Bohr Model Teaching Challenges* انجام شد. مقالات بر اساس معیارهای زیر انتخاب شدند:

۱. محدوده زمانی: فقط مقالات منتشرشده از سال ۲۰۱۶ به بعد بررسی شدند.
 ۲. کیفیت انتشار: هفت مقاله از مجلات دارای رتبه Q1 و پنج مقاله از مجلات دارای رتبه Q2 و دو مقاله از مجلات دارای رتبه Q3 انتخاب شدند.
 ۳. ارتباط موضوعی: پژوهش‌هایی که چالش‌های آموزشی مدل‌های اتمی را به طور مستقیم بررسی کرده باشند.
- مقالاتی که به موضوعات غیر آموزشی، مدل‌های نظری بدون کاربرد آموزشی یا مرورهای تکراری پرداخته بودند، کنار گذاشته شدند.
- پس از انتخاب مقالات، اطلاعات زیر از هر مقاله استخراج شد:
- خلاصه پژوهش
 - روش تحقیق (تجربی، کیفی، کمی، مروری و غیره)
 - جمعیت نمونه (دانش‌آموزان، معلمان، دانشجویان و غیره)
 - یافته‌های کلیدی
 - محدودیت‌ها و پیشنهادات تحقیقات آینده
- این اطلاعات طبقه‌بندی شدند تا امکان مقایسه‌ی چالش‌ها و راهکارهای ارائه‌شده در مطالعات مختلف فراهم شود. در ادامه، تحلیل محتوای کیفی برای شناسایی مضامین مشترک و دسته‌بندی چالش‌ها و راهکارها به کار گرفته شد. با وجود محدودیت‌هایی چون تعداد پایگاه‌ها و واژگان جستجو، تلاش شده با استفاده از منابع معتبر، نتایجی قابل اتکا ارائه گردد.

بررسی مطالعات انجام شده

در این بخش خلاصه پانزده مقاله‌ای را که جهت بررسی و تحلیل انتخاب شده اند؛ ارائه می‌کنیم:

۱- فعالیت‌ها و بازی‌های مبتنی بر پرس‌وجو که دانش‌آموزان را در یادگیری اوربیتال‌های اتمی درگیر می‌کند

این مقاله به بررسی یک مجموعه فعالیت یادگیری فعال و بازی‌محور برای آموزش اوربیتال‌های اتمی به دانشجویان پرداخته است. این فعالیت‌ها بر اساس یک رویکرد پژوهش‌محور طراحی شده‌اند تا دانشجویان را در درک ویژگی‌های فضایی اوربیتال‌های اتمی و ارتباط آن‌ها با اعداد کوانتومی مشارکت دهند. ابزار **Orbital Explorer** برای تجسم اوربیتال‌ها و تحلیل ویژگی‌های آن‌ها در این فعالیت‌ها استفاده شده است. مطالعه مقایسه‌ای بین داده‌های سال ۲۰۱۸ (که از ابزار

دیگری استفاده شده بود) و سال ۲۰۱۹ نشان داد که این روش یادگیری باعث بهبود درک مفاهیم، کاهش مشکلات فنی و افزایش کارایی در جمع‌آوری داده‌ها شده است (لی^۱ و همکاران (۲۰۲۲)).

۲- توسعه یک بازی رومیزی مبتنی بر واقعیت افزوده برای آموزش مدل‌های اتمی

این مقاله به طراحی و ارزیابی یک بازی رومیزی مبتنی بر واقعیت افزوده^۲ (AR) برای آموزش مدل‌های اتمی پرداخته است. هدف پژوهش بررسی میزان اثربخشی این بازی در بهبود یادگیری دانش‌آموزان و تقویت مهارت‌های آنان در زمینه‌هایی همچون خلاقیت، همکاری و سواد اطلاعاتی بوده است. نتایج نشان می‌دهد که این بازی تأثیر مثبتی بر افزایش انگیزه دانش‌آموزان و بهبود تجربه یادگیری دارد (ابوالرب^۳ و همکاران (۲۰۲۴)).

۳- قیاس‌های موسیقی برای آموزش دانش‌آموزان دوره راهنمایی موضوعات مدل کوانتومی اتم

این مقاله به بررسی استفاده از ایجاد یک هم‌ارزی بین موسیقی و مفاهیم علمی، برای آموزش مدل کوانتومی اتم به دانش‌آموزان موسیقیدان می‌پردازد. نویسندگان با بهره‌گیری از مفاهیم آشنا در موسیقی، تلاش کرده‌اند درک دانش‌آموزان از ساختار اتم، ذرات زیراتمی و بارهای الکتریکی را افزایش دهند. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد نه تنها به بهبود یادگیری شیمی کمک کرده بلکه علاقه و انگیزه دانش‌آموزان را نیز افزایش داده است (ویریا^۴ و همکاران (۲۰۲۲)).

۴- استفاده از مقیاس‌بندی چند بعدی برای نمایش ساختارهای مفهومی ساختار اتمی در معلمان و دانش‌آموزان دوره متوسطه دوم

این پژوهش به بررسی ساختارهای مفهومی معلمان و دانش‌آموزان دوره متوسطه دوم در مورد ساختار اتمی با استفاده از مقیاس‌بندی چندبعدی^۵ (MDS) پرداخته است. با نظرسنجی از متخصصان، ۴۰ مفهوم کلیدی انتخاب شده و سپس در میان ۱۶۸ معلم شیمی و ۳۳۶ دانش‌آموز پایه دهم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج، نشان داد که مدل سه‌بعدی، مناسب‌ترین روش برای نمایش ساختار مفهومی این گروه‌ها است. همچنین، مشخص شد که ساختار مفهومی معلمان علمی‌تر از دانش‌آموزان است و دانش‌آموزانی با عملکرد تحصیلی بالاتر نیز ساختار مفهومی علمی‌تری دارند (لین^۶ و همکاران (۲۰۲۲)).

۵- مدل‌های ذهنی دانش‌آموزان دبیرستان علوم ترکیه از ابر الکترونی

این پژوهش به بررسی مدل‌های ذهنی دانش‌آموزان پایه یازدهم و دوازدهم یک دبیرستان علوم در ترکیه درباره مفهوم ابر الکترونی پرداخته است. نمونه‌ی مطالعه شامل ۷۲ دانش‌آموز است که پیش‌نیاز این تحقیق را با گذراندن مبحث نظریه اتمی مدرن در کلاس شیمی داشته‌اند. داده‌ها از طریق پرسش‌های باز در سه دسته مفهومی، ارتباطی و تصویری گردآوری شده و برای تحلیل آن‌ها، از روبریک و کدگذاری سطح درک دانش‌آموزان استفاده شده است. بر اساس نتایج، سه مدل ذهنی کلی شناسایی شد: مدل ابر الکترونی علمی (۵۶٪)، مدل ترکیبی/سنتزی ابر الکترونی (۷۵/۲۹٪)، مدل ابتدایی (۲/۷۸٪). علاوه بر این، هشت دسته‌بندی مدل‌های ذهنی شامل کاملاً علمی، نیمه‌علمی، مفهومی، ارتباطی، مفهومی-ارتباطی، تصویری، ارتباطی-تصویری و ناسازگار مشخص شد. یافته‌ها نشان

¹ Li

² Augmented Reality

³ Abualrob

⁴ Vieira

⁵ Multidimensional Scaling

⁶ Lin

داد که درک دانش‌آموزان از مفاهیم انتزاعی در نظریه مدرن اتمی با چالش‌هایی همراه است، از جمله درک احتمالات، اصل عدم قطعیت و چگالی بار الکترونی. همچنین، به نظر می‌رسد که مدل‌های اولیه اتمی تأثیر پایداری در ذهن دانش‌آموزان دارند (چالیش^۱ (۲۰۲۴)).

۶- پرداختن به باورهای نادرست دانش‌آموزان در مورد اتم‌ها و بررسی راهبردهای مربی برای غلبه بر آنها

این مقاله به بررسی بدفهمی‌های دانش‌آموزان در مورد اتم‌ها و راهکارهای پیشنهادی مدرسان برای رفع این مشکلات می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که بسیاری از دانش‌آموزان درک نادرستی از مفهوم اتم دارند که ممکن است ناشی از ارائه مفاهیم به ترتیب تاریخی و استفاده از روش‌های آموزشی نامناسب باشد. در نتیجه، پیشنهاد شده است که مدل‌های اتمی در دوره ابتدایی تدریس نشوند. همچنین، سه روش آموزشی برای بهبود درک دانش‌آموزان معرفی شده است: (۱) آموزش مدل‌های اتمی بر اساس سیر تاریخی آن‌ها، از مدل‌های اولیه مانند دالتون و تامسون تا مدل مدرن؛ (۲) ترسیم مدل‌ها به صورت زمان‌مند روی تخته همراه با تأکید بر کاستی‌های هر مدل؛ و (۳) طراحی جدولی مقایسه‌ای برای نشان‌دادن این‌که هر نظریه چه ویژگی‌هایی از اتم را توضیح می‌دهد. این روش‌ها، همراه با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های تعاملی، می‌توانند به ارائه‌ای یکپارچه و منسجم از نظریه‌های اتمی و کاهش بدفهمی‌های مفهومی منجر شوند (کایا^۲، (۲۰۲۳)).

۷- دانش‌آموزان معدنی چگونه اوربیتال‌های مولکولی را نشان می‌دهند؟ یک مطالعه چند نهادی از دوره شیمی معدنی سطح پایه

این مقاله بررسی می‌کند که چگونه دانشجویان در دوره‌های شیمی معدنی، اوربیتال‌های مولکولی^۳ را نمایش می‌دهند و تا چه حد در درک اطلاعات کدگذاری‌شده در این نمایش‌ها موفق هستند. از دانشجویان چندین مؤسسه آموزشی خواسته شد تا اوربیتال‌های پیوندی و ضد پیوندی یک مولکول لیتیم هیدرید را ترسیم کنند. نتایج نشان داد که در حالی که بیشتر دانشجویان پایه‌های درستی را برای نمایش انتخاب کردند، در درک جزئیات مانند سهم اوربیتال‌های اتمی، میزان هم‌پوشانی و شکل کلی اوربیتال‌ها با چالش‌هایی مواجه بودند. یافته‌ها حاکی از آن است که مدرسان باید استراتژی‌های آموزشی بهتری برای تقویت درک دانشجویان از نمایش‌های گرافیکی اوربیتال‌های مولکولی به کار بگیرند (ریزنر^۴ و همکاران، (۲۰۲۴)).

۸- امتیازدوس^۵، یک بازی آموزشی برای یادگیری ساختار اتمی

این مقاله به بررسی تأثیر یک بازی آموزشی به نام امتیازدوس بر یادگیری ساختار اتم در دانش‌آموزان پایه نهم با مشکلات یادگیری شیمی می‌پردازد. مطالعه بر روی ۱۱ دانش‌آموز اسپانیایی که دارای مشکلات یادگیری مختلف (مانند اختلال کم‌توجهی-بیش‌فعالی، ناتوانی ذهنی مرزی، و مشکلات خواندن، نوشتن و ریاضی) بودند، انجام شده است. نتایج نشان داد که ۶۳/۶۳٪ از این دانش‌آموزان به سطح یادگیری آگاهانه از ساختار اتم دست یافتند و این میزان پیشرفت از نظر آماری نسبت به گروه کنترل (که از بازی استفاده نکرده بودند) معنادار بود. همچنین، دانش‌آموزان دیدگاه مثبتی نسبت به بازی داشتند و آن را جذاب و مؤثر در یادگیری خود ارزیابی کردند (گیرون گامبرو^۶ و همکاران، (۲۰۲۳)).

۹- بررسی یادگیری ایده‌های سطح اتمی درباره واکنش‌های بارش با چارچوب منابع

¹ Çalış

² Kaya

³ Molecular Orbitals

⁴ Reisner

⁵ Atomizados

⁶ Girón-Gamero

این مقاله به بررسی نحوه درک دانشجویان از فرآیندهای شیمیایی در سطح اتمی پرداخته و بررسی می‌کند که دانشجویان اطلاعات ماکروسکوپی را برای درک و توجیه آنچه در سطح اتمی رخ می‌دهد، چگونه به کار می‌گیرند. دانشجویان در این پژوهش سه تمرین انجام دادند: دسته‌بندی کارت‌ها برای انتخاب واکنش‌دهنده‌ها و محصولات، ساخت مدل اتمی از یک واکنش شیمیایی شامل مخلوط کردن نیترا ت نقره و کلرید سدیم، تحلیل سه انیمیشن متناقض از واکنش و انتخاب دقیق‌ترین انیمیشن از نظر علمی. نتایج نشان می‌دهد که دانشجویان در حین انجام این تمرین‌ها، از منابع دانشی مختلفی استفاده می‌کنند اما این منابع گاهی به درستی یا به اشتباه به کار گرفته می‌شوند که بر درک آن‌ها از واکنش‌های شیمیایی در سطح اتمی تأثیر دارد (کلی^۱ و همکاران (۲۰۲۱)).

۱۰- تفسیرهای چندگانه دانشجویان شیمی دانشگاه از بازنمایی اتم هلیوم

این پژوهش به بررسی درک دانشجویان کارشناسی شیمی از مدل‌های مختلف نمایش اتم هلیوم پرداخته است. محققان از ۲۶ دانشجوی سال اول و ۸ دانشجوی ترم دوم شیمی فیزیک مصاحبه گرفتند تا نحوه تفسیر و رتبه‌بندی چهار نمایش مختلف اتم را ارزیابی کنند. نتایج نشان داد که بسیاری از دانشجویان در ترکیب مفاهیم مدل‌های مختلف دچار مشکل بوده و مفاهیم کلاسیک و کوانتومی را به اشتباه تلفیق می‌کنند. این امر نشان می‌دهد که یادگیری مفاهیم آستانه‌ای مانند کوانتیده بودن انرژی و احتمال، به تنهایی برای درک مدل کوانتومی اتم کافی نیست و نیاز به فرصت‌های آموزشی بیشتری برای ترکیب این مفاهیم وجود دارد (آلرد^۲ و همکاران (۲۰۱۹)).

۱۱- نمایش‌های دانش‌آموزان از ساختار اتمی - تأثیر برخی تفاوت‌های فردی در زمینه‌های خاص وظیفه

این مطالعه بررسی می‌کند که چگونه دانش‌آموزان با ویژگی‌های فردی مختلف (مانند استدلال رسمی و وابستگی/استقلال حوزه) ساختار اتمی را درک می‌کنند. مدل بور و مدل مکانیک کوانتومی در وظایف مختلف مورد استفاده قرار گرفتند تا مشخص شود که چگونه زمینه ارائه اطلاعات بر درک دانش‌آموزان تأثیر می‌گذارد. مطالعه بر روی ۴۲۱ دانش‌آموز مقاطع هشتم، نهم و دوازدهم در شمال یونان انجام شد. نتایج نشان داد که زمینه وظیفه تأثیر بیشتری از عوامل فردی بر درک دانش‌آموزان دارد و نمایش‌های آن‌ها بیشتر وابسته به شرایط ارائه دانش هستند تا ساختارهای ذهنی پایدار (پاپاگئورگیو^۳ و همکاران (۲۰۱۶)).

۱۲- پرداختن به بدفهمی‌ها در فیزیک دانشگاهی: تجارب مدرسان فیزیک کوانتومی

این مقاله به بررسی بدفهمی‌های دانشجویان در فیزیک کوانتومی می‌پردازد و بررسی می‌کند که آیا استراتژی‌های مورد استفاده در فیزیک کلاسیک برای رفع این بدفهمی‌ها در فیزیک کوانتومی نیز کارآمد هستند یا خیر. پژوهشگران یک چارچوب برای دسته‌بندی تحقیقات گذشته درباره بدفهمی‌های آموزشی ایجاد کرده و سپس از طریق مصاحبه با ۱۲ مدرس فیزیک کوانتومی در مؤسسه محاسبات کوانتومی دانشگاه واترلو و مؤسسه پریمتر، تجربیات آنان را تحلیل کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدرسان از همان استراتژی‌هایی که در فیزیک کلاسیک برای شناسایی و اصلاح بدفهمی‌ها استفاده می‌شود، در فیزیک کوانتومی نیز بهره می‌برند (مجیدی، (۲۰۲۴)).

۱۳- درک اتم و بدفهمی‌های مرتبط: بررسی پروفایل‌های دانش‌آموزان در ارتباط با سه متغیر شناختی

¹ Kelly

² Allred

³ Papageorgiou

این مقاله به بررسی درک دانش‌آموزان از ویژگی‌های بنیادی اتم و بدفهمی‌های مرتبط با آن می‌پردازد. پژوهشگران با بهره‌گیری از روش‌های آماری خوشه‌بندی، الگوهای شناختی متفاوتی از دانش‌آموزان را بر اساس ایده‌های آنان درباره ویژگی‌های اتم تحلیل کرده‌اند. نتایج نشان داد که بدفهمی‌های مفهومی رایجی در بین تمام گروه‌های دانشجویی وجود دارد و تفاوت‌های فردی مانند استدلال رسمی و تفکر واگرا نقش مهمی در شکل‌گیری الگوهای دانشجویان دارند. از جمله بدفهمی‌های رایج می‌توان به عدم تمایز بین اتم، مولکول و یون، فرض ارتباط مستقیم ویژگی‌های ماده با ویژگی‌های اتم‌های تشکیل‌دهنده و همچنین سردرگمی بین ویژگی‌های اتم و سلول اشاره کرد. همچنین، برنامه درسی و تجربه آموزشی دانش‌آموزان بر نحوه شکل‌گیری این بدفهمی‌ها تأثیرگذار بوده است (پاپاگوئورجیو و همکاران (۲۰۱۶)).

۱۴- معرفی مفاهیم فیزیک کوانتومی و نمادگذاری دیراک در سطح دبیرستان: بررسی استدلال دانش‌آموزان از طریق یک نظرسنجی پذیرش

این مقاله به بررسی امکان معرفی نمادگذاری دیراک و مفاهیم اساسی فیزیک کوانتومی در سطح دبیرستان می‌پردازد. محققان، یک نمادگذاری دیراک ساده‌شده را طراحی و در یک توالی آموزش-یادگیری ارائه کردند. سپس از طریق یک نظرسنجی پذیرش، میزان درک و پذیرش دانش‌آموزان از این روش را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که دانش‌آموزان به‌طور کلی این روش را پذیرفته‌اند، اما برخی دشواری‌های مفهومی، به‌ویژه درک عدم وجود مسیر مشخص برای یک فوتون منفرد، وجود دارد (هنینگ^۱ و همکاران (۲۰۲۴)).

۱۵- تحلیل چارچوب معرفتی دانش‌آموزان متوسطه در حین آموزش فیزیک کوانتومی

این مطالعه به بررسی چارچوب‌های معرفتی دانش‌آموزان متوسطه در هنگام یادگیری فیزیک کوانتومی می‌پردازد. چارچوب‌های معرفتی شامل روش‌هایی هستند که دانش‌آموزان برای درک و تفسیر مفاهیم علمی از آن‌ها استفاده می‌کنند. با تحلیل استدلال‌های دانش‌آموزان، سه خوشه‌ی اصلی چارچوب شناسایی شد: اتکا به مرجع، تجربی، و درک مبتنی بر شواهد. یافته‌ها نشان می‌دهند که چارچوب درک مبتنی بر شواهد بهترین عملکرد را در ادغام دانش انتزاعی فیزیک کوانتومی دارد. این مقاله به محدودیت‌های آموزش فیزیک کوانتومی در سطح متوسطه پرداخته و پیشنهادهایی برای بهبود راهبردهای تدریس ارائه می‌دهد (پترسون^۲ و همکاران (۲۰۲۵)).

یافته‌ها

از زمان معرفی اولین مدل‌های اتمی مانند مدل دالتون، تا مدل‌های پیچیده‌تر همچون مدل بوهر و مکانیک کوانتومی، آموزش این مفاهیم چالش‌های متعددی را برای معلمان و دانش‌آموزان ایجاد کرده است. این چالش‌ها عمدتاً ناشی از پیچیدگی‌های مفهومی، محدودیت‌های روش‌های تدریس و موانع شناختی دانش‌آموزان در درک مفاهیم انتزاعی هستند.

¹ Hennig

² Patterson

بررسی این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از دانش‌آموزان درک ناقصی از مدل‌های اتمی دارند و اغلب با سردرگمی‌هایی در عبور از مدل‌های شهودی اولیه به مدل‌های انتزاعی‌تر مواجه می‌شوند. در این بخش، با استفاده از تحلیل مقالات ارائه شده در بخش قبل، چالش‌های کلیدی مرتبط با آموزش مدل‌های اتمی بررسی و دسته‌بندی شده است.

۱- نحوه‌ی تدریس مدل‌های اتمی و موانع آموزشی گزارش شده در تحقیقات

مطالعات بررسی شده، روش‌های مختلف تدریس مدل‌های اتمی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. این روش‌ها به سه دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند

✓ روش‌های سنتی مبتنی بر ارائه‌ی مفاهیم نظری (غیرفعال)

✓ روش‌های آزمایشگاهی و تجربی

✓ روش‌های تعاملی و مبتنی بر فناوری‌های نوین

هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌هایی دارند که در ادامه بررسی خواهند شد.

الف) روش‌های سنتی و مشکلات آن‌ها

در بسیاری از کلاس‌های درس، مدل‌های اتمی از طریق روش‌های سنتی همچون تدریس شفاهی، کتاب‌های درسی و نمایش تصاویر ارائه می‌شوند. در این روش‌ها، مدل‌های مختلف به صورت خطی و بدون ارائه‌ی ارتباطات عمیق بین آن‌ها تدریس می‌شوند. اما مقالات متعدد (از جمله مقالات ۱، ۳، ۶ و ۱۱) نشان داده‌اند که این روش‌ها باعث برداشت‌های نادرست و تثبیت تصورات ساده‌انگارانه می‌شوند. برای مثال:

- ارائه‌ی مدل بوهر به عنوان مدل نهایی بدون زمینه‌سازی مناسب برای مدل‌های کوانتومی، باعث می‌شود، دانش‌آموزان ساختار اتم را با مدارهای سیاره‌ای مشابه بدانند.
- تصاویر ایستای کتاب‌های درسی، درک پویایی رفتار الکترون‌ها را دشوار می‌کنند و انتقال مفاهیم انتزاعی مانند احتمال حضور الکترون را غیرممکن می‌سازند.
- عدم ارائه‌ی پیوندهای مناسب میان مدل‌های مختلف، که سبب می‌شود دانش‌آموزان نتوانند سیر تحول مدل‌های اتمی را درک کنند.

ب) روش‌های آزمایشگاهی و محدودیت‌های آن‌ها

- بسیاری از پژوهش‌ها (از جمله مقالات ۴، ۷ و ۱۳) نشان داده‌اند که آموزش عملی، مانند انجام آزمایش‌هایی برای نمایش طیف‌های گسیلی یا بررسی خواص فیزیکی عناصر، می‌تواند تأثیر بسزایی در درک بهتر مدل‌های اتمی داشته باشد. با این حال، چالش‌های متعددی نیز در این روش‌ها وجود دارد:
- آزمایش‌های عملی عمدتاً محدود به مدل بوهر هستند و برای مدل‌های کوانتومی کاربرد محدودی دارند.
 - تجهیزات لازم برای آزمایش‌های پیچیده معمولاً در مدارس و حتی دانشگاه‌ها در دسترس نیست.
 - درک بسیاری از مفاهیم کوانتومی از طریق آزمایش‌های سنتی دشوار است.

ج) روش‌های تعاملی و فناوری محور

مطالعات اخیر (مانند مقالات ۲، ۵، ۸، ۱۰ و ۱۵) نشان می‌دهند با پیشرفت فناوری، ابزارهای شبیه‌سازی و مدل‌سازی رایانه‌ای توسعه یافته‌اند که می‌توانند به درک بهتر مفاهیم اتمی کمک کنند. به‌عنوان مثال، نرم‌افزارهایی مانند فت^۱، کیو ام تولز^۲ و اتم بیلدر^۳ می‌توانند مدل‌های بصری از اوربیتال‌های اتمی و حرکت الکترون‌ها ارائه دهند. تحقیقات نشان داده‌اند که این روش‌ها می‌توانند تأثیر مثبت داشته باشند، اما همچنان برخی چالش‌ها باقی می‌ماند:

- برخی از دانش‌آموزان تنها به مشاهده‌ی این مدل‌ها بسنده می‌کنند و تحلیل عمیقی از آن‌ها ندارند.
- استفاده از این ابزارها نیاز به آموزش معلمان دارد، اما بسیاری از معلمان آموزش کافی در این زمینه ندیده‌اند.
- برخی از مدل‌های ارائه‌شده در شبیه‌سازی‌ها هنوز به‌اندازه‌ی کافی واقع‌گرایانه نیستند.

۲- دسته‌بندی چالش‌های آموزشی

با بررسی مقالات، می‌توان چالش‌های اصلی در تدریس مدل‌های اتمی را در سه دسته‌ی کلی جای داد: چالش‌های مفهومی، روش‌شناختی و شناختی.

الف) چالش‌های مفهومی

چالش‌های مفهومی به موانعی اشاره دارند که دانش‌آموزان در درک صحیح اصول مدل‌های اتمی با آن‌ها مواجه هستند. مهم‌ترین چالش‌های مفهومی که در مقالات مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از:

- عدم درک نقش احتمال در تعیین موقعیت الکترون‌ها: بسیاری از دانش‌آموزان فکر می‌کنند که الکترون‌ها در یک مسیر دقیق حرکت می‌کنند، درحالی‌که مدل کوانتومی نشان می‌دهد که تنها می‌توان احتمال حضور الکترون را در یک ناحیه مشخص پیش‌بینی کرد.
- اشتباه‌گرفتن اوربیتال‌های اتمی با مدارهای کلاسیک: مدل بوهر به دلیل شباهت به مدل‌های سیاره‌ای، باعث ایجاد درک نادرستی از حرکت الکترون‌ها می‌شود.
- مشکل در پذیرش رفتار دوگانه‌ی موجی-ذره‌ای الکترون: بسیاری از دانش‌آموزان نمی‌توانند هم‌زمان ویژگی‌های موجی و ذره‌ای الکترون را درک کنند.

ب) چالش‌های روش‌شناختی در تدریس

در بخش مهمی از مقالات (مانند مقاله‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲) اشاره شده است که چالش‌های روش‌شناختی به مشکلاتی مربوط می‌شوند که در نحوه‌ی ارائه‌ی مدل‌های اتمی توسط معلمان و برنامه‌های درسی وجود دارد و عبارت‌اند از:

- عدم پیوستگی در آموزش مدل‌ها: در برخی از برنامه‌های درسی، مدل‌های اتمی به‌صورت جداگانه و بدون ارتباط منطقی با یکدیگر تدریس می‌شوند.
- عدم استفاده‌ی مؤثر از فناوری‌های آموزشی: اگرچه ابزارهای دیجیتال برای آموزش مفاهیم کوانتومی وجود دارند، اما استفاده‌ی مناسب از آن‌ها هنوز در سطح مطلوبی نیست.
- کمبود زمان کافی برای آموزش مفاهیم پیچیده: بسیاری از معلمان فرصت کافی برای توضیح عمیق مفاهیم مکانیک کوانتومی ندارند.

ج) چالش‌های شناختی در یادگیری دانش‌آموزان

¹ PhET

² QMtools

³ Atom Builder

برخی از چالش‌های شناختی که دانش‌آموزان هنگام یادگیری مدل‌های اتمی با آن‌ها مواجه می‌شوند عبارت‌اند از:

- تعارض شناختی: مواجهه دانش‌آموزان با مفاهیمی که با تفکر شهودی آن‌ها سازگار نیست، باعث ایجاد مقاومت در برابر یادگیری می‌شود.
- دشواری در تجسم مدل‌های کوانتومی: بسیاری از دانش‌آموزان در تجسم ساختارهای انتزاعی مانند ابرهای الکترونی مشکل دارند.
- مشکل در فهم نمادهای ریاضی و معادلات: مکانیک کوانتومی وابستگی زیادی به ریاضیات دارد و این موضوع می‌تواند در یادگیری دانش‌آموزان اختلال ایجاد کند.

تحلیل پژوهش‌ها نشان می‌دهد که آموزش مدل‌های اتمی، به‌ویژه در زمینه انتقال از مدل بوهر به مکانیک کوانتومی، با چالش‌های زیادی همراه است. راهکارهای پیشنهادی برای بهبود آموزش این مفاهیم شامل موارد زیر است:

- طراحی برنامه‌های درسی که مسیر تدریجی از مدل‌های کلاسیک به مدل‌های کوانتومی را فراهم کند.
- استفاده گسترده‌تر از فناوری‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی دیجیتال.
- توسعه روش‌های تدریس که بر مشارکت فعال دانش‌آموزان تأکید داشته باشد.

با توجه به چالش‌های شناسایی‌شده، پیشنهاد می‌شود مدلی ترکیبی از آموزش تدریجی مدل‌های اتمی با تکیه بر روایت تاریخی، استفاده هدفمند از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای و فعالیت‌های گروهی در کلاس اجرا شود که به‌ویژه در دوره تربیت معلم می‌تواند، اثربخشی بیشتری داشته باشد. با توجه به نقش محوری معلمان در انتقال مفاهیم علمی، تقویت شایستگی‌های علمی و پداگوژیک معلمان در زمینه آموزش مدل‌های اتمی امری حیاتی است.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که آموزش مدل‌های اتمی، به‌ویژه در گذار از مدل‌های کلاسیک مانند مدل بوهر به مدل‌های نوین مکانیک کوانتومی، با چالش‌های چندلایه و عمیقی مواجه است. این چالش‌ها نه تنها به پیچیدگی مفاهیم علمی بازمی‌گردند، بلکه به شیوه‌های تدریس، ابزارهای آموزشی و آماده‌سازی معلمان نیز مربوط می‌شوند.

بر اساس تحلیل مقالات، یکی از عوامل کلیدی در شکل‌گیری بدفهمی‌های مفهومی، آموزش ناپیوسته و غیرتاریخی مدل‌هاست؛ به‌گونه‌ای که اغلب مدل‌ها به‌صورت منفرد، بدون نمایش سیر تحول و دلایل جایگزینی آن‌ها تدریس می‌شوند. این موضوع سبب تثبیت انگاره‌های پیش‌علمی مانند مدل سیاره‌ای در ذهن دانش‌آموزان و مقاومت در برابر پذیرش مفاهیم کوانتومی می‌شود.

در این راستا، راهبردهای مشخص و عملیاتی زیر برای بهبود آموزش مدل‌های اتمی پیشنهاد می‌شوند:

۱. **بازطراحی برنامه درسی** برای آموزش پیوسته‌ی مدل‌های اتمی با تأکید بر بستر تاریخی، مفهومی و فلسفی آن‌ها؛ مانند استفاده از روایت داستانی تحول مدل‌ها در قالب پروژه‌های گروهی.
۲. **بهره‌گیری هدفمند از فناوری آموزشی** از جمله شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای دینامیکی، مانند فت، برای نمایش رفتار الکترون‌ها و مقایسه مدل‌ها در محیط تعاملی.

۳. برگزاری کارگاه‌های تخصصی برای معلمان با تمرکز بر مباحث کوانتومی و تدریس مفاهیم انتزاعی با تکنیک‌های چندحسی (دیداری-شنیداری-حرکتی).

۴. طراحی فعالیت‌های کلاسی شناخت‌محور مانند آزمون‌های مفهومی، گفت‌وگوهای انتقادی و بازی‌های علمی، به منظور تبدیل تعارض‌های شناختی به محرک‌های یادگیری.

۵. ارزیابی دوره‌ای یادگیری با ابزارهای کیفی (مصاحبه‌های تشخیصی، نقشه مفهومی، دفترچه یادداشت علمی) برای شناسایی بدفهمی‌ها و پایش روند فهم دانش‌آموزان.

از منظر کلان، اجرای چنین راهبردهایی می‌تواند پیامدهای آموزشی گسترده‌ای داشته باشد؛ از جمله ارتقای سواد علمی عمومی، پرورش مهارت‌های تفکر انتقادی و علمی در دانش‌آموزان و تقویت ظرفیت نظام آموزشی برای آموزش مفاهیم بنیادین علم مدرن. همچنین، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای بازنگری محتوای کتاب‌های درسی، طراحی دوره‌های تربیت معلم و تدوین سیاست‌های آموزشی در حوزه آموزش علوم تجربی قرار گیرد. در نهایت، آموزش موفق مدل‌های اتمی مستلزم رویکردی تلفیقی، بین‌رشته‌ای و یادگیرنده‌محور است که با تکیه بر پژوهش‌های آموزشی و نوآوری در تدریس، به شکل‌گیری درک عمیق‌تر و پایدارتر مفاهیم علمی در ذهن فراگیران منجر شود.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافع وجود ندارد.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به صورت برابر در نگارش این مقاله مشارکت داشته‌اند.

References

- Abualrob, M., & Awaad, T. (2024). Developing an Augmented Reality-based Board Game for Teaching Atomic Models. *Science Education International*, 35(3), 198-206, <https://doi.org/10.33828/sei.v35.i3.3>.
- Aghaei, S. (2024). Quantum revolutions: from discovery to application and teaching it to the next generation. *Quarterly Journal of Education in Basic Sciences*, 10(36) 92-108, <https://doi.org/10.48310/basic.2024.17691.1508>.
- Aghazadeh, F. (2023). Designing the learning activity with the approach of solving the educational misunderstanding of the eighth grade student in order to teach Bohr model drawing. *Research in Chemistry Education*, 5(3), 28-42, <https://doi.org/10.48310/chemedu.2023.3188>.
- Allred, Z. D. R., & Bretz, S. L. (2019). University chemistry students' interpretations of multiple representations of the helium atom. *Chemistry Education Research and Practice*, 20(2), 358-368, <https://doi.org/10.1039/C8RP00296G>.
- Bavardi moghaddam, J., Oula, E., Rezaei, R. (2023). Comparing the Content of Bohr's Atomic Model and Quantum Numbers in the Chemistry Textbooks of Iran and Ethiopia, *Research in Chemistry Education* 4(1), 59-78.
- Çalış, S. (2024). Turkish science high school students' mental models of the electron cloud. *Chemistry Education Research and Practice*, 25(4), 1105-1121, <https://doi.org/10.1039/d4rp00083h>.

- Faletic, S., Bitzenbauer, P., Bondani, M., Chiofalo, M., Goorney, S., Krijtenburg-Lewerissa, K., ... & Zabello, O. (2023). Contributions from pilot projects in quantum technology education as support action to quantum flagship. arXiv preprint arXiv:2303.07055, https://doi.org/10.1007/978-3-031-72541-8_15.
- Girón-Gamero, J. R., & Franco-Mariscal, A. J. (2023). "Atomizados": An Educational Game for Learning Atomic Structure. A Case Study with Grade-9 Students with Difficulties Learning Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 100(8), 3114-3123, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00614>.
- Hennig, F., Tóth, K., Veith, J., & Bitzenbauer, P. (2024). Introducing quantum physics concepts and Dirac notation at the secondary school level: Insights into student reasoning from an acceptance survey. *Physical Review Physics Education Research*, 20(2), 020147, <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.20.020147>.
- Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T., & Bøe, M. V. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), 678, <https://doi.org/10.1088/0031-9120/49/6/678>.
- Kaya, A. (2023). Addressing Student Misconceptions about Atoms and Examining Instructor Strategies for Overcoming Them. *Journal of Pedagogical Research*, 7(4), 251-262, <https://doi.org/10.33902/JPR.202323077>.
- Kelly, R. M., Akaygun, S., Hansen, S. J., Villalta-Cerdas, A., & Adam, J. (2021). Examining learning of atomic level ideas about precipitation reactions with a resources framework. *Chemistry Education Research and Practice*, 22(4), 886-904, <https://doi.org/10.1039/d0rp00071j>.
- Khanzad, Z., Nikrou Shaldehi, N. (2023). Investigating some basic and common misconceptions of tenth grade students in the first chapter of chemistry book, *Research in Chemistry Education*, 5(3), 43-62, <https://doi.org/10.48310/chemedu.2023.3278>.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & van Joolingen, W. R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical review physics education research*, 13(1), 010109, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>.
- Li, X., Muñoz, M., Chun, K., Tai, J., Guerra, F., & York, D. M. (2022). Inquiry-based activities and games that engage students in learning atomic orbitals. *Journal of chemical education*, 99(5), 2175-2181, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c01023>.
- Lin, H., Qian, Y., Wen, J., & Mai, Y. (2022). Utilizing Multidimensional Scaling to Represent the Conceptual Structures of Atomic Structure in Upper-Secondary School Teachers and Students. *Journal of Baltic Science Education*, 21(3), 481-494, <https://doi.org/10.33225/jbse/22.21.481>.
- Majidy, S. (2024). Addressing misconceptions in university physics: A review and experiences from quantum physics educators. arXiv preprint arXiv:2405.20923, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.20923>.
- Mashhadi, A., & Woolnough, B. (1999). Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities. *European Journal of Physics*, 20(6), 511, <https://doi.org/10.1088/0143-0807/20/6/317>.
- Michellini, M., Ragazzon, R., Santi, L., & Stefanel, A. (2000). Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education*, 35(6), 406, <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/6/305>.
- Monroe, C., Raymer, M. G., & Taylor, J. (2019). The US national quantum initiative: From act to action. *Science*, 364(6439), 440-442, <https://doi.org/10.1126/science.aax0578>.
- Müller, R., & Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of physics*, 70(3), 200-209, <https://doi.org/10.1119/1.1435346>.
- Netzell, E. (2014). Using models and representation in learning and teaching about the atom.
- Papageorgiou, G., Markos, A., & Zarkadis, N. (2016). Students' representations of the atomic structure—the effect of some individual differences in particular task contexts. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(1), 209-219, <https://doi.org/10.1039/c5rp00201j>.
- Papageorgiou, G., Markos, A., & Zarkadis, N. (2016). Understanding the Atom and Relevant Misconceptions: Students' Profiles in Relation to Three Cognitive Variables. *Science Education International*, 27(4), 464-488.
- Patterson, Z., & Ding, L. (2025). Epistemic framing analysis of secondary students during instruction on quantum physics. *Physical Review Physics Education Research*, 21(1), 010116, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.21.010116>.
- Reisner, B. A., Kinkaid, M. M., Pratt, J. M., Bentley, A. K., Stewart, J. L., Smith, S. R., ... & Lin, S. (2024). How Do Inorganic Students Represent Molecular Orbitals? A Multi-Institutional Study from the Foundation-Level Inorganic Chemistry Course. *Journal of Chemical Education*, 101(2), 456-466, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00823>.
- Satanassi, S. (2023). Investigating the learning potential of the Second Quantum Revolution: development of an approach for secondary school students, <https://doi.org/10.48676/unibo/amsdottorato/10716>.
- Vieira, H., & Morais, C. (2022). Musical analogies to teach middle school students topics of the quantum model of the atom. *Journal of Chemical Education*, 99(8), 2972-2980, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00289>.