

اثربخشی یادگیری مبتنی بر حل مسئله پروژه محور با رویکرد استم در ارتقای مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی دانش‌آموزان

فاطمه آیت الله زاده شیرازی**

آرزو حسینی*

* (نویسنده مسئول) استادیار گروه آموزش ریاضی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵

Email: a.hosseini@cfu.ac.ir

<https://orcid.org/0000-0002-4763-0232>

** دانشیار، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: f.a.z.shirazi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

تاریخ شروع بررسی: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

چکیده

این پژوهش نیمه تجربی اثربخشی یادگیری مبتنی بر مسئله پروژه محور با رویکرد استم (متغیر مستقل) را بر بهبود مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی (متغیرهای وابسته) در ۷۶ دانش‌آموز پایه هفتم (۳۸ نفر از مدرسه کم‌برخوردار جوادآباد و ۳۸ نفر از مدرسه عادی منطقه ۶ تهران) در سال تحصیلی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ بررسی کرد. با استفاده از روش تحقیق و توسعه مبتنی بر مدل ADDIE، مداخله شامل برنامه درسی چهارماهه با تمرکز بر اشکال مسطحه، برگه‌های فعالیت و آزمون‌ها بود. داده‌ها از طریق پیش‌آزمون و پس‌آزمون با ابزارهای آزمون واتسون-گلیزر (آلفای کرونباخ=۰/۸۱)، ارزیابی ارتباطات ریاضی (مبتنی بر استانداردهای ان سی تی ام: ارتباط اشیاء/تصاویر با مفاهیم، تبدیل ایده‌ها به تصاویر، توضیح روابط) و پرسشنامه نگرش ایکن (آلفای کرونباخ=۰/۸۸؛ خرده‌مقیاس‌ها: لذت، ترس، ارزش ریاضیات) جمع‌آوری شد. نتایج نشان‌دهنده بهبود چشمگیر بود: نمرات تفکر انتقادی در مدرسه کم‌برخوردار از ۲۴/۹۱٪ به ۷۳/۳۸٪ (شاخص نمره نرمال شده برابر با ۰/۶۵) و در مدرسه عادی از ۳۷/۱۶٪ به ۷۷/۵۶٪ (شاخص نمره نرمال شده برابر با ۰/۶۴) افزایش یافت. ارتباطات ریاضی به ترتیب از ۱۹/۱۰٪ به ۵۸/۸۵٪ و از ۳۴/۵۶٪ به ۶۷/۵۴٪ بهبود یافت. تغییرات نگرشی نیز قابل توجه بود، به‌طوری‌که میانگین نمره پس‌آزمون نگرش در مدرسه کم‌برخوردار ($M = 51/04, S = 1/968$) بالاتر از مدرسه عادی ($M = 4/36, S = 2/464$) بود. تحلیل کواریانس یک طرفه با سطح معناداری کمتر از ۰/۰۰۱، بهبود معنادار در لذت از ریاضیات ($F=81/384$)، کاهش ترس ($F=88/525$) و ارزش‌گذاری ($F=1011/917$) را تأیید کرد. این مداخله شکاف عملکرد تحصیلی را ۴۲٪ کاهش داد و نشان‌دهنده ظرفیت استم با مسائل پروژه محور در پرورش مهارت‌های شناختی و ارتباطی سطح بالا در محیط‌های آموزشی متنوع است.

واژه‌های کلیدی: تحقیق و توسعه، استم، یادگیری مبتنی بر مسئله پروژه محور، مهارت‌های تفکر انتقادی، ارتباطات ریاضی، مدل ADDIE

The Effectiveness of STEM-Integrated Problem-Based Learning (PBL) in Enhancing Students' Mathematical Critical Thinking and Communication Skills

Arezoo Hosseini*

Fatemah Ayatollah Zadeh Shirazi**

* Department of Mathematics Education, Farhangian University, P. O. Box 14665-889, Tehran, Iran. Email: a.hosseini@cfu.ac.ir. <https://orcid.org/0000-0002-4763-0232>

** Faculty of Mathematics, Statistics and Computer Science, College of Science, University of Tehran, Enghelab Ave., Tehran, Iran. Email: f.a.z.shirazi@ut.ac.ir

Abstract:

This quasi-experimental study investigated the effectiveness of Problem-Based Learning (PBL) integrated with a STEM approach (independent variable) in enhancing mathematical critical thinking and communication skills (dependent variables) among 76 seventh-grade students (38 from an underprivileged school in Javadabad and 38 from a regular school in Tehran's District 6) during the 2023-2024 academic year. Employing a Research and Development (R&D) methodology based on the ADDIE model, the intervention comprised a four-month curriculum focused on flat shapes, incorporating activity sheets and assessments. Data were collected through pre- and post-tests using the Watson-Glaser Critical Thinking Appraisal (Cronbach's $\alpha = 0.81$), a mathematical communication assessment (NCTM-based: linking objects/images to concepts, translating ideas into visuals, explaining relationships), and the Aiken attitude questionnaire (Cronbach's $\alpha = 0.88$; subscales: enjoyment, fear, and value of mathematics). Results demonstrated significant improvements: critical thinking scores increased from 24.91% to 73.38% (N-Gain = 0.65) in the underprivileged school and from 37.16% to 77.56% (N-Gain = 0.64) in the regular school. Mathematical communication skills improved from 19.10% to 58.85% and from 34.56% to 67.54%, respectively. Attitudinal changes were notable, with the underprivileged school showing a higher mean attitude score ($M = 51.04$, $SD = 1.968$) compared to the regular school ($M = 40.36$, $SD = 2.464$). One-way ANCOVA confirmed significant improvements in enjoyment of mathematics ($F = 81.384$, $p < 0.001$), reduced fear ($F = 88.525$, $p < 0.001$), and perceived value ($F = 101.917$, $p < 0.001$). This intervention reduced the academic performance gap by 42% and highlights the potential of STEM with project-based problems in cultivating high-level cognitive and communicative skills in diverse educational settings.

Keywords: Research and development, STEM, Problem-Based Learning (PBL), Critical Thinking Skills, Mathematical Communication, ADDIE model.

Author Contributions: All authors contributed equally, and all authors discussed and reviewed the results, reviewed and approved the final version of the article.

Acknowledgments: The authors thank all dear teachers who have helped us in this research.

Conflicts of interest: The authors declare there is no conflict of interest in this article.

Funding: This research is not sponsored by any institution, and all costs have been borne by the authors.

تفکر ریاضی‌وار ۱ به‌عنوان یک رویکرد بنیادین در فرآیند استدلال و نقد، در ارتباط تنگاتنگ با حوزه‌های علمی متنوع، به‌ویژه علوم، فناوری، مهندسی و ریاضیات (استم)² و همچنین سایر زمینه‌های دانشی، مورد توجه قرار گرفته است. این نوع تفکر، فراتر از حل مسائل محاسباتی، در پی ایجاد پیوند میان مفاهیم ریاضی با زندگی روزمره، برقراری ارتباط مؤثر با ایده‌ها و پدیده‌های واقعی، و در نهایت، مدل‌سازی دنیای پیرامون است (تال³، ۲۰۰۶). برای درک عمیق‌تر ماهیت تفکر ریاضی‌وار، شناخت سطوح مختلف تفکر ضروری است. طبقه‌بندی بلوم یکی از چارچوب‌های کلاسیک در این زمینه است که سطوح شناختی را به شش مرحله تقسیم می‌کند: دانش (B1)، درک (B2)، کاربرد (B3)، تحلیل (B4)، ترکیب (B5) و ارزیابی (B6) است (بلوم⁴ و همکاران، ۱۹۶۴؛ کراتوول و همکاران، ۱۹۶۴). این چارچوب بعدها توسط اندرسون و کراتوول⁵ (۲۰۰۱) بازنگری شد و به شکلی پویاتر ارائه گردید که در پژوهش حاضر نیز مبنای تحلیل قرار گرفته است به شش سطح به یاد آوردن، درک کردن، به کار بردن، تحلیل کردن، ارزیابی کردن و خلاقیت داشتن تقسیم‌بندی نمودند. این بازنگری، با تأکید بر خلاقیت به‌عنوان بالاترین سطح، نشان‌دهنده‌ی گذار از یادگیری مکانیکی به تفکر خلاق و مولد است.

پژوهشگران بر این باورند که به‌کارگیری تفکر ریاضی در مواجهه با مسائل گوناگون، نقشی محوری در ارتقای یادگیری مفهومی⁶ ایفا می‌کند. این رویکرد نه تنها به درک عمیق‌تر مفاهیم کمک می‌کند، بلکه ابزاری مؤثر برای افزایش کنترل و تسلط انسان بر محیط زندگی‌اش فراهم می‌آورد (برتون⁷، ۱۹۸۴). در واقع، ریاضیات بدون «حل مسئله ۸ فاقد روح و جان است؛ به‌گونه‌ای که این فرآیند، قلب تپنده‌ی ریاضیات شمرده می‌شود (پولیا⁹، ۱۹۵۷؛ شونفیلد¹⁰، ۱۹۸۷؛ تال³، ۲۰۰۶). استانداردهای شورای ملی معلمان ریاضیات ایالات متحده (NCTM)¹¹ نیز بر نقش محوری حل مسئله در آموزش ریاضی تأکید دارند و آن را ستون فقرات یادگیری مؤثر می‌دانند. جورج پولیا پس از نگارش کتاب ماندگار «چگونه مسئله را حل کنیم»^{۱۲} به کاوش عمیق‌تر در ماهیت تفکر ریاضی‌وار پرداخت. از دیدگاه او، این تفکر شامل سه فرآیند کلیدی: تجزیه و تحلیل، انتزاع^{۱۳} و ترکیب پدیده‌ها است از منظر ریاضی نسبت به پدیده‌ها. به همین دلیل، با اندکی تساهل، می‌توان مهارت تفکر ریاضی‌وار را هم‌ارز با مهارت حل مسئله دانست (ورشافل¹⁴، ۲۰۰۲). با این حال، رویکردهای نوین آموزشی، هرچند ارتباط تفکر ریاضی‌وار با کاربرد ریاضی در زندگی واقعی و حل مسئله را انکار نمی‌کنند، اما هدفی والاتر را دنبال می‌کنند: تربیت دانش‌آموز یا دانشجویی که فراتر از یک «حل‌کننده‌ی ماهر»، به یک متفکر ریاضی و نقاد تبدیل شود (رحیمی¹⁵، ۲۰۱۶). در این نگاه، تفکر انتقادی و استدلال منطقی به‌سوی ریاضیاتی واقعیت‌محور هدایت می‌شود و زمینه برای پرورش سواد ریاضی^{۱۵} یعنی توانایی استفاده‌ی آگاهانه و انتقادی از ریاضیات در زندگی فراهم می‌گردد (الکمزاری و آلیاس¹⁶، ۲۰۲۵).

تحقیق سعیدی (۱۴۰۳) نشان می‌دهد که معلمان دوره‌ی ابتدایی، تفکر انتقادی و استدلال در لحظه‌ی قضاوت را از مهارت‌های بنیادین آموزش می‌دانند و بر صلاحیت‌های علمی، فنی و به‌ویژه مهارت‌های انتقادی تأکید ویژه دارند. این دیدگاه، تفکر انتقادی

¹ Mathematical Thinking

² Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM)

³ Tall

⁴ Bloom

⁵ Anderson & Krathwohl

⁶ Conceptual Learning

⁷ Burton

⁸ Problem Solving

⁹ Polya

¹⁰ Schoenfeld

¹¹ National Council of Teachers of Mathematics (NCTM)

¹² How to Solve It?

¹³ Abstraction

¹⁴ Verschaffel

¹⁵ Mathematical Literacy

¹⁶ Al-Kamzari and Alias

را نه یک مهارت جانبی، بلکه ستون اصلی رشد شناختی دانش‌آموزان در ارتباطات ریاضی معرفی می‌کند. برانکا^۱ (۱۹۸۰) تفکر انتقادی را به‌عنوان فرآیندی جامع تعریف می‌کند که شامل چهار مؤلفه‌ی، آزمایش فرضیات، پرسش‌گری هدفمند، برقراری ارتباط معنادار با مسئله و ارزیابی همه‌جانبه‌ی جنبه‌های یک موقعیت، این تعریف، تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی را به یک رویکرد فعال و پویا تبدیل می‌کند.

ریاضیات، به‌عنوان یک حوزه موضوعی چندبعدی، به‌طور ذاتی با تفکر انتقادی پیوند عمیقی دارد. این حوزه موضوعی به منطق استوار، خلاقیت در الگوسازی، تفکر فضایی، حل مسئله‌ی ساختاریافته و ارتباطات دقیق وابسته است (آولیانی^۲ و همکاران، ۲۰۲۵؛ دو^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). از این‌رو، مهارت‌های تفکر انتقادی و مهارت ارتباطات ریاضی نه تنها در ریاضیات کاربرد دارند، بلکه از دل آن برمی‌خیزند. در طبقه‌بندی کلاسیک بلوم، این مهارت‌ها در سه سطح بالاتر حیطه‌ی شناختی، تحلیل (B4)، ترکیب (B5) و ارزیابی (B6) جای می‌گیرند. اندرسون و کراتوول (۲۰۰۱) در بازنگری این طبقه‌بندی، سطوح تحلیل و ارزیابی را به‌عنوان هسته‌ی اصلی تفکر انتقادی برجسته کردند. در این چارچوب، تفکر انتقادی در مهارت ارتباطات ریاضی به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا ایده‌های نو را دقیقاً ارزیابی کنند، بهترین گزینه را انتخاب نمایند، و آن‌ها را برای خلق آثار خلاقانه و کاربردی دگرگون سازند و در مطالعه‌ی ریاضیات، این مهارت‌ها استدلال شناختی را از حالت یادگیری مکانیکی به فهم عمیق و عمل آگاهانه ارتقا می‌دهند (دورن^۴ و همکاران، ۲۰۰۶). تفکر انتقادی در ارتباطات ریاضی باعث می‌شود دانش‌آموزان یاد بگیرند مسائل را عمیقاً ارزیابی کنند، حقایق را از نظرات تفکیک نمایند، و بر پایه‌ی تحلیل منطقی عمل کنند بنابراین، طراحی برنامه‌های درسی که تفکر انتقادی را به‌صورت هدفمند پرورش دهند، یک ضرورت آموزشی است (گیبی^۵، ۲۰۱۳). جاکوب^۶ (۲۰۱۲) چهار مؤلفه‌ی تفکر انتقادی را تفسیر، تحلیل، ارزیابی و استنباط می‌داند؛ در این چارچوب، درک و کاربرد در مهارت ارتباطات ریاضی به‌عنوان مهارت‌های پایه عمل می‌کنند، در حالی که استدلال سطحی بالاتر، پویاتر و یکپارچه‌کننده را نشان می‌دهد. این ساختار، زمینه‌ای منسجم برای اصول تربیتی فراهم می‌آورد؛ به‌گونه‌ای که تقویت تفکر انتقادی به‌عنوان بستری برای نگاه نقادانه‌ی مداوم با تقویت خودشناسی و ایجاد امنیت فکری و عاطفی برای دانش‌آموزان و معلمان پیوندی ناگسستنی دارد و همگی در راستای رشد اصیل و پایدار فکری عمل می‌کنند (سجادیه و طالبی، ۱۴۰۴). روند بین‌المللی مطالعات علمی و ریاضیات (تیمز^۷) در ۲۰۲۳ تصویری نگران‌کننده از وضعیت ایران ارائه می‌دهند: دانش‌آموزان پایه‌ی هشتم ایرانی در مهارت‌های تفکر انتقادی عملکرد ضعیفی داشته‌اند. ایران با افت ۱۱ امتیازی نسبت به سال ۱۳۹۷، در رتبه‌ی ۵۳ جهانی قرار گرفته و حتی از قزاقستان پایین‌تر است (رسول‌زاده، ۱۴۰۲). این افت، ادامه‌ی روند نگران‌کننده‌ای است که پیش‌تر در پژوهش آبادی و همکاران (۱۳۹۷) در شهر شیراز مشاهده شد. آن‌ها نشان دادند که دانش‌آموزان پایه‌ی نهم در تفکر انتقادی ریاضی در ارتباطات ریاضی ضعف جدی دارند. هشدار می‌دهد که متأسفانه جدی گرفته نشد و نتایج آن در سال ۱۴۰۲ به‌شکل فاجعه‌بار آشکار گردید.

پژوهشگران در یک مدرسه‌ی محروم در منطقه‌ی جوادآباد (اطراف تهران)، دریافتند که دانش‌آموزان در درک مفاهیم پایه‌ی ریاضی عملکرد مناسبی دارند، اما در تفکر انتقادی، اعتمادبه‌نفس و استقلال فکری در مهارت ارتباطات ریاضی به‌شدت ضعیف عمل می‌کنند. این دانش‌آموزان به همراهی عاطفی، توجه فردی و حمایت آموزشی هدفمند نیاز دارند. این مشاهدات، انگیزه‌ای شد تا وضعیت از منظر علمی، تربیتی و آموزشی ریاضی به‌طور عمیق بررسی شود.

مبانی نظری

¹ Branca

² Auliyani

³ Du

⁴ Duron

⁵ Gibby

⁶ Jacob

⁷ Trends in International Mathematics and Science Study (TIMSS)

در پژوهشی درباره ویژگی‌های روان‌سنجی آزمون تفکر انتقادی واتسون-گلیرز^۱ و ارتباط آن با خلاقیت^۲، شاخص‌های عملی و قابل اندازه‌گیری تفکر انتقادی برجسته شده است. واتسون-گلیرز (۲۰۱۵) با طراحی آزمونی شامل ۸۰ سؤال چندگزینه‌ای در پنج بخش، ابعاد گوناگون تفکر انتقادی را ارزیابی کرده‌اند؛ هدف اصلی، یکپارچه‌سازی جنبه‌های نظری این مهارت با شاخص‌های عملی برای کاربرد مؤثر در محیط‌های سازمانی بوده است.

این پژوهش فراتر از تفکر انتقادی، بر مهارت ارتباطات ریاضی نیز تمرکز دارد که از دیدگاه پینتریچ^۳ (۱۹۹۱) و بسیاری از محققان دیگر، نقشی کلیدی در حل مسئله ایفا می‌کند. این مهارت به دانش‌آموزان کمک می‌کند تفکر خود را تقویت کنند، درک مفهومی را ارزیابی نمایند، دانش ریاضی را سازمان‌دهی و ساختار بندی کنند، مهارت‌های حل مسئله را ارتقا بخشند، استدلال را توسعه دهند، شایستگی‌های فردی و اجتماعی را بهبود بخشند و پایه‌ای محکم برای یادگیری ریاضی ایجاد کنند (پینتریچ و همکاران، ۱۹۹۳). چو^۴ (۲۰۱۹) و رمیلارد و کیم^۵ (۲۰۲۰) نیز بر اهمیت محوری این مهارت تأکید کرده‌اند.

برای تقویت همزمان تفکر انتقادی و مهارت‌های ارتباطات ریاضی، ادغام یادگیری مبتنی بر مسئله پروژه محور (PBL)^۶ در برنامه درسی راهبردی مؤثر است. مسئله پروژه محور فرآیندی مشارکتی است که دانش‌آموزان را برای طراحی راه‌حل‌های خلاقانه برای مسائل واقعی و معنادار جهان پیرامون گرد هم می‌آورد (گیجبلز^۷ و همکاران، ۲۰۰۶؛ استروبل و ون‌بارنولد^۸، ۲۰۰۹؛ موکارومه و ووسقو^۹، ۲۰۲۰). این رویکرد با درگیرسازی دانش‌آموزان در فعالیت‌های حل مسئله، استدلال و پژوهش، امکان کار نسبتاً مستقل در بازه‌های زمانی طولانی را فراهم می‌آورد و به تولید محصولات یا ارائه‌های واقع‌گرایانه منجر می‌شود (توماس^{۱۰}، ۲۰۰۰).

جاکوب (۲۰۱۲) نشان داد PBL در مقایسه با روش‌های سنتی، مهارت‌های ارتباطات ریاضی را به طور معناداری بهبود می‌بخشد. NCTM (۲۰۰۰) چهار معیار کلیدی برای ارزیابی مهارت ارتباطات ریاضی پیشنهاد کرده است: (۱) سازمان‌دهی و پیونددهی تفکر ریاضی از طریق ارتباط؛ (۲) انتقال منطقی و شفاف تفکر ریاضی به دیگران؛ (۳) تحلیل و ارزیابی تفکر و راهبردهای ریاضی همسالان؛ و (۴) بهره‌گیری از زبان تخصصی ریاضی برای بیان مفاهیم. در پژوهش حاضر، مهارت ارتباطات ریاضی در درس هندسه مسطحه پایه هفتم بر اساس چارچوب کمید^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۰) در سه حوزه ارزیابی شد: (۱) پیوند اشیاء واقعی، تصاویر و نمودارها با مفاهیم ریاضی؛ (۲) تبدیل موقعیت‌ها یا ایده‌های ریاضی به تصاویر؛ و (۳) تبیین مفاهیم، موقعیت‌ها و روابط ریاضی. مداخله آموزشی بر پایه این چارچوب اجرا و سپس ارزیابی گردید. دورن و همکاران (۲۰۰۶) و گیبی (۲۰۱۳) نیز با بررسی دانش‌آموزان آموزش‌دیده با PBL، بهبود چشمگیری در این مهارت‌ها گزارش کردند.

در قرن بیست‌ویکم، رویکرد استم به عنوان چارچوبی چند حوزه‌ای، علوم، فناوری، مهندسی و ریاضیات را یکپارچه می‌سازد و با بهره‌گیری از PBL در سطوح بالای برنامه درسی پیاده‌سازی می‌شود. این یکپارچگی دانش‌آموزان را در حل مسائل پیچیده واقعی یاری می‌رساند و نتیجه‌گیری از دانش پیشین را تسهیل می‌کند (بیسر^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۸؛ غدیری‌خان‌پشتانی^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۸).

¹ Watson-Glaser Critical Thinking Test

² Psychometric Properties of Watson-Glaser Critical Thinking Test and its Relation with Creativity

³ Pintrich

⁴ Cho

⁵ Remillard & Kim

⁶ Problem-based learning (PBL)

⁷ Gijbels

⁸ Strobel & Van Barneveld

⁹ Mukaromah & Wusqo

¹⁰ Thomas

¹¹ Kamid

¹² Bicer

¹³ Ghadiri Khanaposhtani

پژوهش‌ها استم را از دو منظر بررسی می‌کنند: دیدگاه روش‌محور آن را مجموعه‌ای از راهبردهای آموزشی مانند PBL، یادگیری طراحی‌محور، آزمایشگری و ابزارهای دیجیتال می‌داند که بر اجرا، مهارت‌های عملی و همکاری تمرکز دارد (هالستروم^۱ و همکاران، ۲۰۲۳؛ موسسه فناوری برنسون او.ا.ر.تی، ۲۰۲۴)؛ در مقابل، دیدگاه مدل‌محور آن را چارچوبی ساختاریافته مانند مدل E5 (درگیری، کاوش، توضیح، بسط، ارزیابی کردن) ۳ یا مدل‌سازی مفهومی-فیزیکی می‌بیند که حوزه‌های موضوعی ۴ را از طریق نمایه‌سازی و شبیه‌سازی پیوند می‌دهد و بر سازمان‌دهی برنامه درسی و ارزیابی سیستماتیک تأکید دارد (هالستروم و شونبرن^۵، ۲۰۱۹؛ هالستروم و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال، مرورهای سیستماتیک و متاآنالیزهای اخیر نشان می‌دهند این دو اصطلاح اغلب به صورت مترادف ۶ به کار می‌روند و هیچ‌یک به تنهایی کافی نیست. نهادهایی مانند انجمن ملی معلمان علوم (NSTA)^۷ و وزارت آموزش ایالات متحده، اصطلاحاتی چون «رویکرد یکپارچه ۸ یا چارچوب ۹ میان حوزه‌موضوعی را ترجیح می‌دهند؛ زیرا استم فلسفه‌ای دانش‌آموز‌محور است که هدف آن پرورش تفکر انتقادی، نوآوری و کاربرد عملی دانش در قرن ۲۱ است (وو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۴؛ کائو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۵). پژوهش حاضر از رویکرد آموزش یکپارچه استم برای توسعه ابزارهای یادگیری ریاضی بهره جسته است.

از منظر نظری، استم بر پایه یادگیری ساخت و سازگرایی ۱۲ استوار است که دانش را نتیجه ساخت فعال فراگیران از طریق تجربه می‌داند (پیازه^{۱۳}، ۱۹۷۷؛ ویگوتسکی^{۱۴}، ۱۹۷۸). موقعیت یادگیری ۱۵ در این چارچوب، نقش محوری دارد و تأکید می‌کند دانش و مهارت‌ها باید در زمینه‌های واقعی اعمال شوند تا معنا بیابند (بران و کمپیون^{۱۶}، ۱۹۹۰؛ لاه و ونگر^{۱۷}، ۱۹۹۱). این دیدگاه با مسائل پروژه محور هم‌راستا است و فراگیران را به حل مسائل واقعی سوق می‌دهد (کلی و نولز^{۱۸}، ۲۰۱۶؛ اورتیز-لویلا^{۱۹} و همکاران، ۲۰۲۲؛ پورتیلو-بلانکو^{۲۰} و همکاران، ۲۰۲۵). طبقه‌بندی بلوم^{۲۱} به عنوان پایه‌ای نظری، اهداف آموزشی استم را در سه حوزه سازمان‌دهی می‌کند: شناختی ۲۲ (از یادآوری تا تولید)، عاطفی ۲۳ (گرایش‌ها و ارزش‌ها) و روانی-حرکتی ۲۴ (مهارت‌های عملی مانند ارتباطات ریاضی) (بلوم و همکاران، ۱۹۶۴؛ اندرسون و کراتوول^{۲۰۱}، ۲۰۰۱) و چارچوبی پویا برای طراحی فعالیت‌ها از سطوح پایین به بالا ارائه می‌دهد (کارلی^{۲۵}، ۲۰۱۵).

¹ Hallström

² Bramson ORT Institute of Technology

³ Engage, Explore, Explain, Elaborate, Evaluate (5E)

⁴ Multi-disciplinary

⁵ Schönborn

⁶ interchangeable

⁷ National Science Teaching Association (NSTA)

⁸ integrated approach

⁹ framework

¹⁰ Wu

¹¹ Cao

¹² Constructivism

¹³ Piaget

¹⁴ Vygotsky

¹⁵ Situated Cognition

¹⁶ Brown & Campione

¹⁷ Lave & Wenger

¹⁸ Kelley & Knowles

¹⁹ Ortiz-Revilla

²⁰ Portillo-Blanco

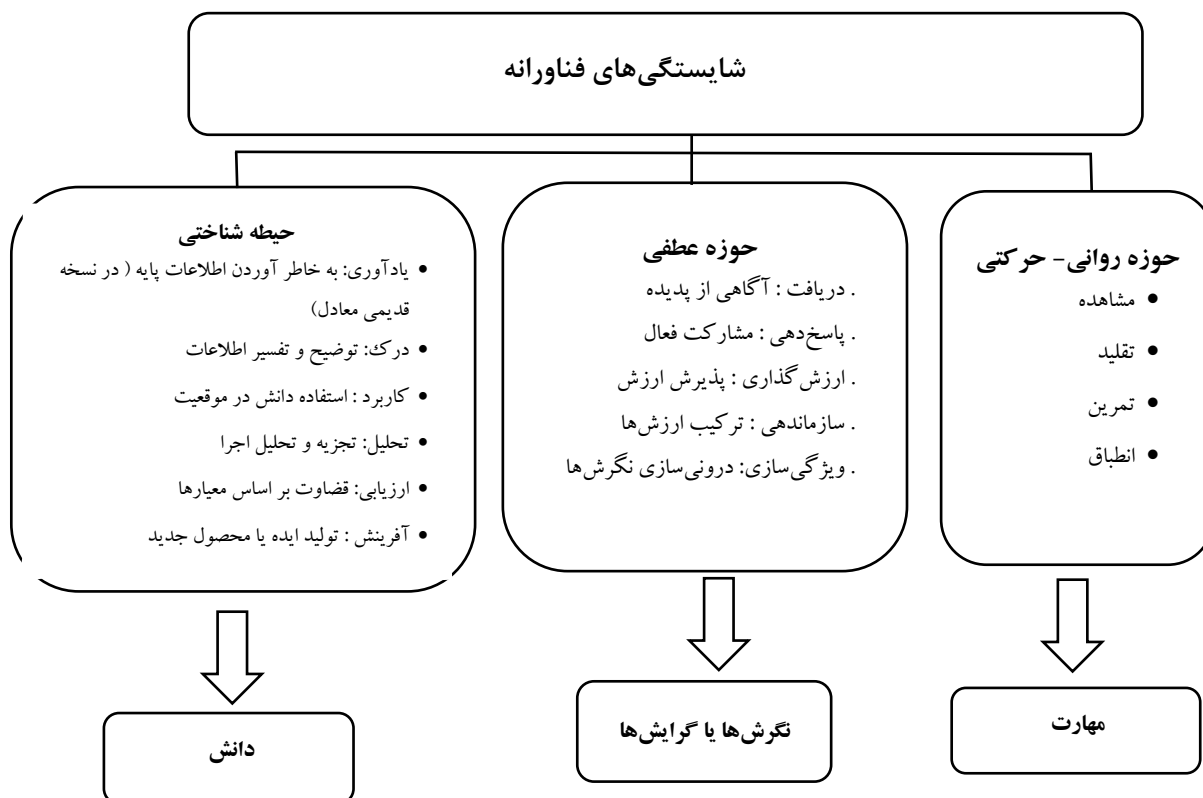
²¹ Bloom's Taxonomy

²² Cognitive

²³ Affective

²⁴ Psychomotor

²⁵ Carley.



شکل 1 سه حوزه یادگیری برای فناوری و مهندسی (انجمن بین‌المللی مربیان فناوری و مهندسی¹ ۲۰۲۰، به نقل از هان و همکاران، ۲۰۲۳)

استانداردهای سواد فناوری و مهندسی (STEL)^۲ نیز بر یکپارچه‌سازی فناوری و مهندسی در آموزش علوم و ریاضیات تأکید دارند که یادگیری را در حوزه‌های شناختی، عاطفی و روانی- حرکتی بهبود می‌بخشد و شایستگی‌های فناورانه را ارتقا می‌دهد (موسسه فناوری برنسون اوار.تی، ۲۰۲۴). برای جزئیات بیشتر، به شکل ۳ در پژوهش هان^۳ و همکاران (۲۰۲۳) مراجعه شود که در شکل ۱ ترجمه آن آمده است.

در مطالعه هانا و همکاران (۲۰۲۳)، برای دستیابی به آموزش مؤثر موضوعات استم در دوره متوسطه، پژوهشگران رویکردهای کلیدی زیر را در قالب یک برنامه آموزشی منسجم استم پیشنهاد کرده‌اند: (الف) محتوای تلفیقی، (ب) آموزش مبتنی بر کاوش، (ج) آموزش مبتنی بر پروژه و مسئله (PBL)، (د) حل مسائل واقعی با استفاده از PBL، (ه) همکاری تیمی، (و) آموزش مبتنی بر طراحی، و (ز) بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال، در مقالات دیگری این دسته‌بندی بیان شده است مانند کلی و نولز (۲۰۱۶)، نادلسون و سیفرت^۴ (۲۰۱۷) و نگوین^۵ و همکاران (۲۰۲۰).

¹ International Technology and Engineering Educators Association (ITEEA)

² Standards for Technological and Engineering Literacy

³ Han

⁴ Nadelson and Seifert

⁵ Nguyen

همچنین، رویکرد استم به حوزه روانی-حرکتی شامل مراحل مشاهده، تقلید، تمرین و پذیرش - که با مهارت ارتباطات ریاضی مرتبط است - توجه ویژه‌ای نشان داده است (شوون و رید^۱، ۲۰۲۰)، در این راستا، هوک^۲ (۲۰۱۶) بر آموزش یکپارچه استم تأکید کرده و نقش حرکات فیزیکی، تأملی و تفسیری را در تقویت مهارت ارتباطات ریاضی برجسته ساخته است. از سوی دیگر، پژوهش‌ها ارتباط معناداری را بین محیط‌های یادگیری استم و ارتقای خلاقیت، مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی دانش‌آموزان نشان داده‌اند (کاپرارو^۳ و همکاران، ۲۰۱۳؛ کوون^۴، ۲۰۱۷؛ بیسر و همکاران، ۲۰۱۸؛ غدیری‌خان‌پشتانی و همکاران، ۲۰۱۸). محققان تأکید کرده‌اند که مشارکت فعال دانش‌آموزان در فعالیت‌های استم مبتنی بر یادگیری حل مسئله با روش پروژه فرصتی فراهم می‌آورد تا آنان مسئولیت یادگیری خود را بر عهده گیرند و مهارت‌های کلیدی قرن بیست‌ویکم، از جمله حل مسئله، خلاقیت و ارتباطات مؤثر را تقویت کنند (غدیری‌خان‌پشتانی و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، یکپارچه‌سازی زمینه‌های واقعی و محتوای استم در این فعالیت‌ها نه تنها انگیزه و علاقه دانش‌آموزان به یادگیری را افزایش می‌دهد، بلکه زمینه‌ساز موفقیت پایدار آنان در حوزه‌های استم می‌شود (کاپرارو و همکاران، ۲۰۱۳؛ کرافت^۵، ۲۰۱۷). با توجه به اهمیت تأمین فرصت‌های آموزشی برابر برای همه دانش‌آموزان و تربیت افرادی با تفکر نقاد، بررسی تأثیر رویکرد یادگیری استم بر مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، پژوهش حاضر مطالعه‌ای با عنوان «توسعه ابزارهای یادگیری ریاضی با استفاده از مدل یادگیری مبتنی بر پروژه حل مسئله پروژه محور مبتنی بر استم برای بهبود مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی دانش‌آموزان دو مدرسه در استان تهران» را اجرا کرده است. همچنین، در پایان مداخله آموزشی، آزمون نگرش ایکن (ایکن و هلمکوویست^۶، ۱۹۷۷) از دانش‌آموزان دو مدرسه اخذ شد تا تغییرات نگرش آنان نسبت به ریاضیات در پی این مداخله ارزیابی گردد.

مدل تحلیل، طراحی، توسعه، اجرا و ارزیابی (ADDIEY) برای آموزش یکپارچه استم

مریل^۸ (۲۰۰۲) معتقد است که مدل‌های طراحی آموزشی به طراحان آموزشی کمک می‌کنند تا از نظریه‌های یادگیری انتزاعی معنای عملی بیابند و کاربرد واقعی آن‌ها را ممکن سازند. این مدل‌ها نظریه‌ها و اصول یادگیری را سازمان‌دهی و تجسم می‌کنند تا طراحان آموزشی را در فرایند توسعه یادگیری راهنمایی نمایند (برنج^۹، ۲۰۰۹). مدل‌های طراحی آموزشی را می‌توان به‌عنوان چارچوبی برای توسعه مواد آموزشی محسوب کرد. مدل‌های رایج طراحی آموزشی عبارت‌اند از: نقشه‌برداری عمل^{۱۰}؛ چارچوب حلقه یادگیری^{۱۱}؛ اولین اصل تدریس مریلز^{۱۲}؛ نه‌گانه رویداد تدریس گِگن^{۱۳} و طبقه‌بندی بلوم. سایر مدل‌ها عبارت‌اند از: مدل دیک و کری^{۱۴}؛ مدل طراحی آموزشی کِمپ^{۱۵}؛ چهار سطح ارزیابی آموزشی کیرپتریک^{۱۶} و مدل اندازه‌گیری پیوسته موفقیت^{۱۷} که در فرایند ADDIE جای می‌گیرند.

¹ Shown and Reed

² Hoque

³ Capraro

⁴ Kwon

⁵ Craft

⁶ Eiken and Holmqvist

⁷ Analyze, Design, Develop, Implement, and Evaluate (ADDIE)

⁸ Merrill

⁹ Branch

¹⁰ action mapping

¹¹ Learning Circle Framework

¹² Merrill's First Principle of Instruction

¹³ Gagné's Nine Events of Instruction

¹⁴ Dick and Carey Model

¹⁵ Kemp's Instructional Design Model

¹⁶ Kirkpatrick's Four Levels of Training Evaluation

¹⁷ Successive Approximation Model (SAM)

همانطور که بیان شد مدل ADDIE یک ابزار طراحی آموزشی است که می‌تواند به متخصصان منابع انسانی و آموزش کمک کند تا برنامه‌های یادگیری و توسعه مؤثر را در سازمان خود ایجاد، سازماندهی و ساده‌سازی کنند. اگرچه مدل آموزشی ADDIE در دهه ۱۹۷۰ توسعه یافت، اما همچنان رایج‌ترین مدل مورد استفاده برای طراحی آموزشی است زیرا ساده اما بسیار مؤثر است (برنج، ۲۰۰۹).

این پژوهش با استفاده از مدل اجرایی ADDIE انجام شده است. مدل ADDIE شامل پنج مرحله است: (۱) تحلیل؛ (۲) طراحی؛ (۳) توسعه؛ (۴) اجرا؛ و (۵) ارزیابی (سوجیونو و هرماوان ۱، ۲۰۲۲). دلیل انتخاب مدل ADDIE، سادگی و سیستماتیک بودن آن است. مرحله طراحی در مدل ADDIE شامل تدوین نظام‌مند مفهوم و محتوای محصول است. در این مرحله، برنامه‌های دقیق و دستورالعمل‌های واضح برای اجرای طراحی محصول یا فرآیند تولید ایجاد می‌شود. این طرح‌های مفهومی سپس پایه‌ای برای مرحله بعدی تشکیل می‌دهند. این مدل امکان اصلاح و ارزیابی مستمر در هر مرحله را فراهم می‌کند تا محصول نهایی معتبر باشد (منگیاو و اسمایل ۲، ۲۰۲۵). این پژوهش بر توسعه ابزارهای یادگیری ریاضی با استفاده از روش PBL مبتنی بر استم تمرکز دارد که در اجرا از مدل ADDIE استفاده خواهد کرد. هدف، بهبود مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی دانش‌آموزان در موضوعات حل مسئله اشکال هندسی مسطحه است.

سوالات پژوهش

تا چه حد به‌کارگیری رویکرد استم، یادگیری مبتنی بر حل مسئله به‌صورت پروژه محور با استفاده از مدل ADDIE، مهارت‌های تفکر انتقادی ریاضی دانش‌آموزان پایه هفتم را در مدرسه کم‌برخوردار در مقایسه با مدرسه عادی بهبود می‌بخشد؟
رویکرد مداخله‌ای PBL-STEM تا چه حد توانایی‌های ارتباط ریاضی دانش‌آموزان (شامل ترجمه بصری-ریاضی، بیان کلامی استدلال ریاضی و تفسیر مفاهیم هندسی) را در دو مدرسه بهبود می‌بخشد؟
تأثیرات رویکرد PBL-STEM بر پیامدهای عاطفی دانش‌آموزان مرتبط با ریاضیات، شامل کاهش اضطراب، افزایش لذت و ارتقای ارزش ادراک‌شده یادگیری ریاضی چیست؟
مداخله PBL-STEM تأثیر مثبتی بر تفکر انتقادی، ارتباطات ریاضی و پیامدهای نگرشی بین دانش‌آموزان در مدرسه کم‌برخوردار و مدرسه عادی مناطق مرکزی شهر دارد و تا چه حد این مداخله نابرابری‌های عملکرد تحصیلی را کاهش می‌دهد؟

روش‌شناسی پژوهش

طرح تحقیق با روش نیمه تجربی با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون در یک گروه استفاده شده است. طرح تک‌گروهی طرحی است که شامل یک گروه است که در مرحله پیش‌آزمون مشاهده اولیه، سپس با مداخله دنبال می‌شود و با یک پس‌آزمون به پایان می‌رسد، ما در اینجا یک آزمون نگرش (ایکن) برای بررسی تغییر نگرش دانش‌آموزان انجام داده‌ایم. متغیر وابسته در این مطالعه مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی دانش‌آموز است. در حالی که متغیر مستقل در این مطالعه یک مدل یادگیری مبتنی بر پروژه PBL (در بستر حل مسئله) بنابر رویکرد یکپارچه‌سازی استم است.
جامعه آماری پژوهش دو کلاس هفتم ۳۸ نفره دو مدرسه عادی یکی در شهرستان‌های استان تهران در بخش جوادآباد و دیگری در منطقه ۶ شهر تهران در نیم سال اول تحصیلی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ که نمونه‌های هدفمند بودند.

ابزار پژوهش:

¹ Sugiyono & Hermawan

² Mengyao and Ismail

^۳ یادگیری در چارچوب پروژه محور (PBL) مبتنی بر STEM به اختصار STEM-PBL عنوان شده است.

برای بررسی تفکر انتقادی از پرسشنامه واتسون-گلیر و ارزیابی مهارت‌های ارتباطات ریاضی از سه سوال: (۱) ارتباط اشیاء واقعی، تصاویر و نمودارها با مفاهیم ریاضی؛ (۲) نوشتن موقعیت‌ها یا ایده‌های ریاضی به تصاویر؛ (۳) توضیح مفاهیم، موقعیت‌ها و روابط ریاضی (کمید و همکاران، ۲۰۲۰) استفاده شده است.

بنابر تحلیل داده‌های اولیه جداول ۲ و ۳ سوالات دقیق‌تر شده و اعتبارسنجی‌های ابزارهای یادگیری توسعه یافته با کمک ۵ همکار انجام شد (۳) استاد آموزش ریاضی از دانشگاه فرهنگیان و ۲ معلم از مدارس مشارکت کننده در پژوهش).

جدول ۲. خلاصه نتایج اعتبارسنجی ابزارهای یادگیری توسط متخصصان

موارد ارزیابی	میانگین	نمره	اعتبار	سطح اعتبار
برنامه درسی ارائه شد استم (در جدول ۱ قابل مشاهده است)	۴/۹۰	۴/۹۰	معتبر	معتبر
برگه فعالیت طرح شده PBL	۴/۳۷	۴/۳۷	معتبر	معتبر
آزمون توانایی تفکر انتقادی (البته این آزمون استاندارد بوده فقط برای این گروه سنی بررسی دقیق‌تری شده است)	۴/۶۲	۴/۶۲	معتبر	معتبر
آزمون توانایی ارتباط ریاضی دانش‌آموزان	۴/۱۳	۴/۱۳	معتبر	معتبر

بر اساس جدول ۲، میانگین اعتبار ابزارهای یادگیری در بازه $4 < Valid \leq 3$ قرار دارد. با توجه به معیارهای اعتبار (راسیمان ۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ هادی ۲ و همکاران، ۲۰۲۵)، می‌توان گفت که ابزارهای یادگیری توسعه یافته «معتبر» هستند. همچنین، معیارهای اجرای یادگیری نشان می‌دهد که اجرای ابزارهای یادگیری در جلسه اول با سطح اجرای یادگیری $AO = 4/5$ (معیار بالا: $5 < IP \leq 4$) همراه بوده است. به طور کلی، در این آزمایش، سطح اجرای یادگیری $AO = 4/5$ (بالا) بود. بنابراین، ابزارهای یادگیری از معیارهای عملی بودن به صورت تجربی برخوردار بودند.

شاخص پیشرفت در متغیرهای وابسته را با $N-Gain$ یا شاخص نمره افزای نرمال شده بررسی می‌کنیم که برای ارزیابی اثربخشی مداخلات آموزشی استفاده می‌شود (کراسول و کراسول ۵، ۲۰۱۸)، و بهبود عملکرد دانش‌آموزان را، معمولاً در آزمون‌های پیش‌آزمون و پس‌آزمون، اندازه‌گیری می‌کند که برای ارزیابی روش‌های تدریس، برنامه‌های درسی یا استراتژی‌های آموزشی به کار می‌رود. فرمول شاخص نمره افزای نرمال شده ۶ (یا بهروری نرمال شده) که توسط هاک ۷ (۱۹۹۸) معرفی شده است:

$$N - Gain = \frac{\text{میانگین پیش آزمون} - \text{میانگین پس آزمون}}{\text{میانگین پیش آزمون} - \text{حداکثر نمره}}$$

هاک پیشنهاد کرد که $N-Gain$ به صورت جدول ۳، تفسیر شود (به درصد هم نمایش می‌دهند):

جدول ۳. تفسیر هاک

کسب پایین	کسب متوسط	کسب بالا
-----------	-----------	----------

¹ Rasiman

² Hadi

³ Average Object

⁴ Normalized Gain

⁵ Creswell and Creswell

⁶ N-Gain

⁷ Hake

برای بررسی تغییر نگرش از آزمون ایکن با ۱۶ سوال استفاده شده است که ضرایب پایایی آلفای کرونباخ میانگین سه خرده مقیاس آن ۰/۸۸ مناسب می‌باشد، این پرسشنامه دارای سه خرده مقیاس است که عبارتند از: لذت بردن از ریاضیات (۶ سوال)، ترس از ریاضیات (۷ سوال) و ارزش و اهمیت ریاضیات (۳ سوال)، شیوه نمره‌گذاری به صورت لیکرت ۵ درجه‌ای از ۱ تا ۵ است که برای پاسخ "کاملاً مخالفم" نمره ۱، "مخالفم" نمره ۲، "نه مخالف، نه موافق" نمره ۳، "موافقم" نمره ۴ و "کاملاً موافقم" نمره ۵، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین دامنه نمرات بین ۱۶ تا ۸۰ است (ایکن و هلمکوئیست، ۱۹۷۷)، که با کمک نرم افزار اسپاس ۱ با تحلیل کواریانس یک طرفه ۲ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌است. برای اجرا از مدل ADDIE که در دسته تحقیقات تحقیق و توسعه (R&D) ۳ قرار می‌گیرد استفاده می‌شود (برنچ، ۲۰۰۹).

روش اجرای تحقیق

این مطالعه آموزشی بر اساس یادگیری مبتنی بر استم با حل مسئله پروژه‌محور که با بهره‌گیری از بستر فناوری اطلاعات و ارتباطات ۴ طراحی گردید. این چارچوب توسط ماکراکیز و کوستولاس-ماکراکیز ۵ (۲۰۱۷) معرفی شده است. پژوهشگران ابتدا نیازهای درسی و موضوعی را شناسایی کردند. در این راستا، از مطالعه موردی پیشین که رویکردهای معلمان استم به اجرای درس‌های یکپارچه استم را بررسی کرده بودند، الهام گرفته‌اند؛ در آن مطالعات، پژوهشگران سه اجرای متمایز از استم را شناسایی کردند (کلی ۶ و همکاران، ۲۰۲۱). پیش از آن، واسکز ۷ و همکاران (۲۰۱۳) (ص. ۷۳) چهار سطح ادغام حوزه‌های استم را پیشنهاد کرده بودند:

۱. دانش‌آموزان مفاهیم و مهارت‌ها را به صورت جداگانه در هر حوزه می‌آموزند؛ ۲. دانش‌آموزان مفاهیم و مهارت‌ها را به صورت جداگانه در هر حوزه، اما در یک موضوع مشترک می‌آموزند (رویکرد چندحوزه‌ای)؛ ۳. دانش‌آموزان مفاهیم و مهارت‌ها را از دو یا چند حوزه که به شدت به هم مرتبط هستند، می‌آموزند تا دانش و مهارت‌ها را عمیق‌تر کنند (رویکرد میان‌رشته‌ای)؛ ۴. با انجام پروژه‌ها یا مسائل دنیای واقعی، دانش‌آموزان دانش و مهارت‌ها را از دو یا چند حوزه به کار می‌برند و در شکل‌دهی تجربه یادگیری مشارکت می‌کنند (رویکرد فرارشته‌ای).

به‌طور کلی، مدل واسکز و همکاران (۲۰۱۳) عمدتاً بر سطوح ادغام موضوعات استم تمرکز دارد (انگلیش^۱، ۲۰۱۶). در این پژوهش، رویکرد اجرایی بر مدل ADDIE متمرکز است (شکل ۲) و بر سطح چهارم (فرارشته‌ای) پیشنهادی واسکز و همکاران تأکید دارد. برنامه مداخله آموزشی بر اساس مدل ADDIE (تحلیل، طراحی، توسعه، اجرا، ارزیابی) که در شکل ۵ مقاله منگیاو و اسمایل (۲۰۲۵) توصیف شده (در شکل ۲ ترجمه آن آمده است)، به عنوان چارچوبی برای تحقیق و توسعه (R&D) تدوین و اجرا گردید. این مدل برای ادغام یادگیری مبتنی PBL در حل مسئله با یکپارچه‌سازی استم طراحی شد و بر موضوع اشکال هندسی (هندسه مسطحه) تمرکز داشت.

مداخله آموزشی طی چهار ماه (نیمه اول سال تحصیلی ۱۴۰۲-۱۴۰۳) بر روی ۷۶ دانش‌آموز پایه هفتم در دو مدرسه (یکی کم‌برخوردار در جوادآباد و دیگری عادی در منطقه ۶ تهران) اجرا شده است، با همکاری چهار معلم (دو معلم ریاضی و دو معلم فناوری). از سوی گروه‌های آموزشی مناطق، هیئت بررسی نهادی (IRB) ۹ ایجاد شد، که از دانش‌آموزان و معلمان فرم‌های

¹ SPSS

² One-Way ANCOVA

³ Research and development (R&D)

⁴ Information and Communications Technology (ICT)

⁵ Makrakis & Kostoulas-Makrakis

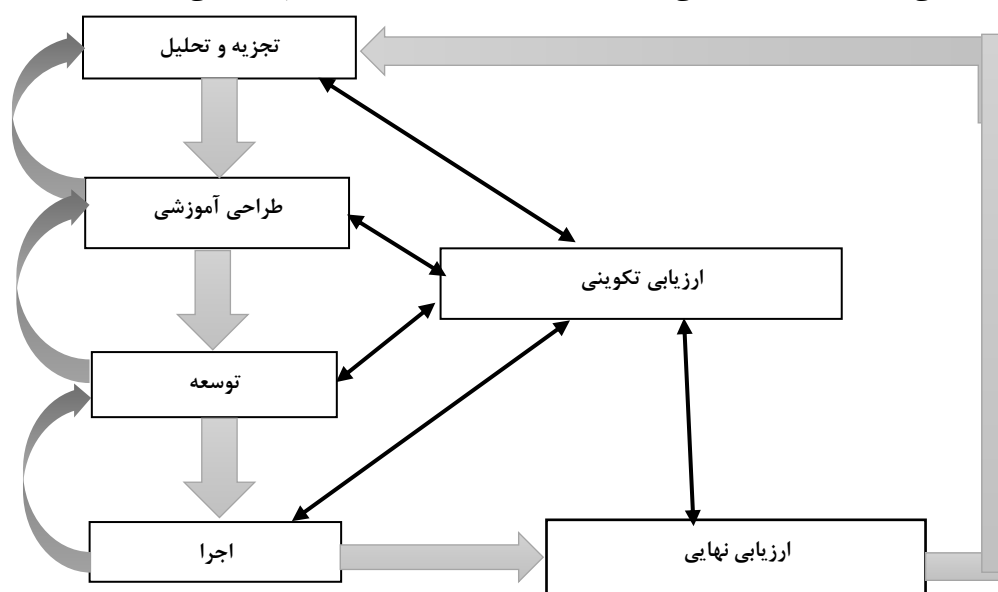
⁶ Kelley

⁷ Vasquez

⁸ English

⁹ Institutional Review Board (IRB)

رضایت‌نامه اخذ گردد. طراحی واحد آموزشی شامل ۱۲ تا ۱۶ جلسه بود که حوزه‌هایی مانند علوم رایانه، ریاضیات، زیست‌تقلیدی^۱، مهندسی و ساخت اشکال هندسی بر اساس الگوهای موجود در طبیعت را پوشش می‌داد،



شکل ۲ مدل ADDIE (منگیاو و اسمایل، ۲۰۲۵)

همراه با تبدیل اشکال سه‌بعدی به دوبعدی برای تمرین تعمیم (جدول ۱ را ببینید). دانش‌آموزان اشکال هندسی مشابه آنچه در کتاب درسی آمده را در محیط اطراف و طبیعت جمع‌آوری کرده و بررسی می‌کردند، و بر اساس تعاریف ریاضی، درباره اشکال دوبعدی و سه‌بعدی تحقیق می‌نمودند. آن‌ها همچنین مفاهیم اشکال مسطحه و نحوه تبدیل یک شکل سه‌بعدی به شکل مسطحه باز شده را می‌آموختند، و از الگوهای اجرام سه‌بعدی منظم در طبیعت (مرتبط با زیست‌تقلیدی) الهام می‌گرفتند تا این مفاهیم را در طراحی‌های رایانه‌ای (CAD) ۲ یا سازه‌های دستی خود به کار ببرند و بر اساس تعاریف ریاضی، ساختارسازی کنند. سپس، دانش‌آموزان نمونه‌هایی از اجرام هندسی ایجاد می‌کردند که مشابه آن‌ها در طبیعت دیده شده، و شکل مسطحه آن‌ها را می‌ساختند. در طول درس‌های رایانه، معلمان رایانه و ریاضی تشویق شدند تا به صورت مشترک تدریس کنند. جزئیات مراحل مداخله به شرح زیر است:

مرحله تحلیل ۳: ابتدا با اجرای پیش‌آزمون، سطح مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی دانش‌آموزان در هر دو مدرسه بررسی شد. برای سنجش تفکر انتقادی از پرسشنامه واتسون-گلیر استفاده شده است که شامل ۸۰ سؤال چهارگزینه‌ای است و پایایی مناسبی (آلفای کرونباخ ۰/۸۱) دارد. این ابزار پنج مؤلفه اصلی را می‌سنجد: استنباط ۴ (تشخیص اطلاعات معتبر از داده‌ها)، شناسایی مفروضات ۵ (تشخیص پیش‌فرض‌های پنهان و بدون پشتوانه)، تحلیل و استنتاج ۶ (یافتن روابط منطقی بین گزاره‌ها و مفاهیم)، تعبیر و تفسیر ۷ (درک و بیان درست مفهوم اصلی مسئله) و ارزیابی ۸ استدلال‌ها (قضاوت درباره اعتبار شواهد و استدلال‌ها). هر کدام از این مؤلفه‌ها با ۱۶ سؤال سنجیده شدند. برای سنجش ارتباطات ریاضی هم ابزاری بر اساس چارچوب NCTM سال ۲۰۰۰ به کار بردیم که سه بعد مهم را پوشش می‌دهد: ارتباط دادن اشیاء واقعی، تصاویر و نمودارها با مفاهیم

^۱ biomimicry

^۲ Computer-Aided Design (CAD)

^۳ Analysis

^۴ Inference

^۵ Recognition of Assumptions

^۶ Deduction

^۷ Interpretation

^۸ Evaluation

ریاضی؛ تبدیل ایده‌ها و موقعیت‌های ریاضی به نمادها، شکل‌ها و نمایش‌های بصری؛ و توضیح و بیان مفاهیم، روابط و موقعیت‌های ریاضی به صورت کتبی یا شفاهی به شکلی روشن و قابل فهم.

نتایج پیش‌آزمون (که در جداول ۴ و ۵ آمده) نشان داد که سطح مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی در دانش‌آموزان هر دو مدرسه به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از حد مطلوب است. این وضعیت پایین بودن مهارت‌ها، ضرورت اجرای یک مداخله آموزشی هدفمند را تأیید می‌کند؛ مداخله‌ای که بتواند همزمان انگیزه یادگیری را بالا ببرد، تفکر عمیق‌تر را تقویت کند و مهارت‌های ارتباطی در حوزه ریاضی را به‌صورت یکپارچه بهبود بخشد.

مرحله طراحی: تدوین برنامه‌اجرا، برگه‌های فعالیت دانش‌آموزان، آزمون‌ها، راهنمای نمره‌دهی و کلید پرسشنامه‌ها بر اساس چارچوب PBL در بستر فناوری اطلاعات و ارتباطات (برگرفته از ماکراکیز و کوستولاس-ماکراکیز، ۲۰۱۷) تدوین شد. این برنامه بر سطح فرارشته‌ای استم (طبق مدل واسکز و همکاران، ۲۰۱۳) تمرکز داشت و شامل: حل مسائل دنیای واقعی، پروژه‌های گروهی، و ادغام علوم رایانه، ریاضیات، زیست‌تقلیدی، مهندسی و ساخت اشکال هندسی برگرفته از طبیعت بود. واحد آموزشی با عنوان «طراحی اشکال هندسی و اجرام فضایی با فناوری نوآورانه» (۱۲ تا ۱۶ جلسه؛ جدول ۱) طراحی گردید. هدف اصلی، تقویت سطوح بالاتر تفکر بلوم (یعنی تحلیل، ارزیابی و خلاقیت) بود تا دانش‌آموزان بتوانند مفاهیم را به شکلی عمیق، انتقادی و خلاقانه در دنیای واقعی به کار گیرند.

مرحله تولیدمحتوا و اعتبارسنجی مواد آموزشی (توسعه ۱): تولید و اعتبارسنجی مواد آموزشی (برگه‌های فعالیت، آزمون‌ها) توسط ۵ متخصص (۳ استاد آموزش ریاضی از دانشگاه فرهنگیان و ۲ معلم ریاضی) مورد بررسی قرار گرفت. میانگین اعتبار ابزارها در بازه معتبر قرار داشتند (بر اساس معیارهای هادی، ۲۰۲۵) (جدول ۲). مواد شامل فعالیت‌های CAD (طراحی رایانه‌ای)، ساخت مدل‌های سه‌بعدی به دوبعدی، و بررسی اشکال هندسی در طبیعت (زیست‌تقلیدی) بود.

مرحله اجرا: اجرای مداخله در کلاس‌های ریاضی و رایانه با تدریس مشترک معلمان ریاضی و فناوری. دانش‌آموزان در گروه‌های کوچک به حل مسائل واقعی پرداختند، اشکال هندسی اطراف و طبیعت را بررسی کردند، اجرام سه‌بعدی را به اشکال مسطح تبدیل نمودند، و مدل‌های دست‌ساز یا رایانه‌ای ساختند. جلسات شامل فعالیت‌های پرسش‌وپاسخ، همکاری، و استفاده از فناوری دیجیتال بود. در مدرسه کم‌برخوردار، از فضای آموزشی جایگزین (با همکاری معلمان منطقه) استفاده شد. پیشرفت میان‌مدت (پس از ۸ جلسه) با پس‌آزمون اول ارزیابی گردید، و کل برنامه چهار ماه طول کشید.

مرحله ارزیابی: جمع‌آوری داده‌های ارزیابی مهارت‌های تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی دانش‌آموزان با استفاده از آزمون تفکر انتقادی واتسون-گلیر و ارتباطات ریاضی بر اساس NCTM (۲۰۰۰) در پیش‌آزمون، پس‌آزمون اول و دوم برای محاسبه شاخص پیشرفت با فرمول N-Gain بررسی گردید. پرسشنامه نگرش ایکن (۱۶ سؤال لیکرت ۵ درجه‌ای، دامنه ۱۶-۸۰) برای بررسی خرده مقیاس‌ها (لذت از ریاضیات؛ ترس از ریاضیات؛ ارزش و اهمیت ریاضیات) استفاده شد. تحلیل با نرم‌افزار اسپاس و تحلیل کواریانس یک‌طرفه انجام گردید.

جدول ۱. طراحی آموزشی

فعالیت یادگیری مبتنی بر استم	توضیحات درس	خلاقیت	تفکر انتقادی	ارتباطات	همکاری
آزمایش پرس‌وجوی علمی	بررسی میدانی هندسه مسطحه برای جمع‌آوری	دانش‌آموزان سؤالات پرس‌وجوی فردی	دانش‌آموزان درباره این فکر می‌کنند که	ارتباط اشیاء واقعی، تصاویر اشکال هندسی با مفاهیم ریاضی	به‌صورت گروهی، دانش‌آموزان یافته‌های خود را

¹ Development

² Implementation

اشکال. تمرین ریاضی برای بررسی تنوع سطوح هندسی معرفی شده در کتاب درسی. ارزیابی سطوح که چندتا از آنها مسطحه است با استفاده تعاریف اصلی اشکال	در مورد اشکال برای بررسی از طریق مشاهدات ایجاد می‌کنند.	چگونه اشکال هندسی مسطحه را تشخیص دهند و چگونه یک شکل سه بعدی را در دو بعدی ترسیم کنند.	به کل کلاس گزارش می‌دهند.
تولید و جمع‌آوری اشکال هندسی	نرم‌افزار مدل‌سازی پارامتریک برای ایجاد طرح‌های CAD برای تجسم مدل‌های سه‌بعدی استفاده می‌شود.	دانش‌آموزان به راه‌حل‌های طراحی منحصر به فردی ایجاد می‌کنند که ویژگی‌های اشکال هندسی جمع‌آوری شده در کتاب و اطراف زندگی را برای ساخت سطوح مسطحه نوآورانه به کار برند.	دانش‌آموزان نقشه‌های طراحی نهایی خود را در کلاس‌های فناوری و علوم به اشتراک می‌گذارند و توضیح می‌دهند که چگونه از داده‌های مشاهده‌شده و پرس‌وجوهای علمی برای ایجاد راه‌حل‌های طراحی بهره برده‌اند.
تحلیل طراحی پروتوتایپ اشکال هندسی مسطحه	ویژگی تحلیل عناصر پیچیده 2 (FEA3) در نرم‌افزار CAD به صورت پارامتریک، شبیه‌سازی‌های	دانش‌آموزان فرضیه‌های قابل آزمایش می‌سازند، پروتوتایپ و تعاریف ریاضی	توضیح مفاهیم، موقعیت‌ها و روابط ریاضی: دانش‌آموزان تحقیقات را مستند می‌کنند و داده‌های عددی و

¹ Prototype (یعنی نمونه اولیه یا مدل آزمایشی یک محصول، سازه یا ایده)

² تصور کنید یک جسم پیچیده (مثل یک کشتی کاغذی یا یک شکل هندسی سه‌بعدی) دارید و می‌خواهید بدانید: آیا می‌شکند؟ چقدر حجم دارد؟ چقدر سطح دارد؟ آیا شکل گسترده دو بعدی قابل رسم است؟ و آیا روی آب شناور می‌ماند؟ به جای آزمایش واقعی (که زمان‌بر و گران است)، FEA در نرم‌افزار CAD جسم را به هزاران تکه کوچک (عنصر) تقسیم می‌کند و با استفاده از معادلات ریاضی، رفتار هر تکه را محاسبه می‌کند. سپس همه این نتایج را کنار هم می‌گذارد تا رفتار کل جسم را پیش‌بینی کند.

³ Finite Element Analysis

شبکه‌های آموزشی شاد و شبکه آموزش داخلی مدرسه	اشکال شناسایی شده را برای ارزیابی و مطابقت دادن با تعاریف ریاضی ارائه می‌دهند و بیان می‌کنند.	آن را بررسی می‌کنند و با فناوری‌های نوآورانه، شواهد اثبات مفهوم تولید می‌کنند.	آن را بسنجند و تحلیل کلی طراحی را ارزیابی کنند.	دقیقی ایجاد می‌کند تا سطح، حجم اشکال، و عوامل شناوری یک جسم را به راحتی محاسبه کنند.
--	---	--	---	--

یافته‌ها

بنابر مدل اجرایی ADDIE بخش اول تحلیل اولیه وضعیت گروه‌های آزمایش است. تحلیل: پیش آزمون هر دو متغیر وابسته تحقیق مورد بررسی اولیه در هر دو مدرسه قرار گرفت (جدول ۴ و ۵). جدول ۴. نتایج آزمون مهارت‌های تفکر انتقادی در هر مدرسه

مدرسه کم برخوردار	مدرسه عادی منطقه ۶ تهران	مدرسه کم برخوردار	مدرسه عادی منطقه ۶ تهران
تعداد دانش آموزان	تعداد دانش آموزان	تعداد دانش آموزان	تعداد دانش آموزان
سوال‌ات به درصد	سوال‌ات به درصد	سوال‌ات به درصد	سوال‌ات به درصد
۱۵	۱۱	۷/۸۹	۱۰/۸۲
بسیار			
نمرات پایین (۲۰، ۰)			
۱۳	۱۲	۲۶/۱۵	۳۱/۶۴
نمرات پایین (۲۰، ۰)			
۷	۸	۴۱/۷۸	۴۹/۵۸
متوسط (۴۰، ۰)			
۳	۶	۶۸/۲۵	۷۱/۰۳
نمرات بالا (۸۰، ۶۰)			
۰	۱	۰	۹۰/۵۶
بسیار بالا (۸۰، ۰)			
۳۸	۳۸	۲۴/۹۱	۳۷/۱۶
میانگین			

میانگین نمرات هر دو مدرسه در مهارت‌های تفکر انتقادی پایین است و در بررسی تفکیکی سولات در بخش مهارت‌ها تفسیر، تحلیل و ارزیابی ضعف بیشتری هر دو مدرسه دارند. همچنین پیش‌آزمونی برای ارزیابی مهارت‌های ارتباطات ریاضی دانش‌آموزان در هر دو مدرسه استفاده شده است به صورت شفاهی و کتبی؛ بررسی اولیه برای هر دو مدرسه در جداول ۴ و ۵ قابل مشاهده است که برای هر دو ضعیف می‌باشد و برای مدرسه کم برخوردار ضعیف‌تر است.

جدول ۵. توانایی ارتباط ریاضی در هر مدرسه

درصد هر شاخص از سولات توانایی ارتباط ریاضی دانش‌آموزان در هر مدرسه	شماره و تعداد سولات
میانگین کلاس مدرسه منطقه ۶ به درصد	سولات شاخص توانایی ارتباط ریاضی (IAM) 1 کم برخوردار به درصد

دو سوال توضیح تصاویر به ایده‌های ریاضی (۲ و ۱)	۱۹/۱۰٪	۳۴/۱۴٪
دو سوال نوشتن موقعیت‌ها یا ایده‌های ریاضی به تصاویر (۳ و ۴)	۱۰/۴۳٪	۱۵/۸۹٪
یک سوال بازگویی توضیحات ریاضی به زبان خود (۵)	۲۷/۷۵٪	۵۳/۶۷٪
میانگین	۱۹/۰۹٪	۳۴/۵۶٪

پاسخ‌های دانش‌آموزان به سؤالات ارتباطات ریاضی نشان داد که آن‌ها نمی‌توانند اشکال و مباحث هندسی در کتاب ریاضی خود را به مفاهیم ریاضی مرتبط کنند و اجرام هندسی اطراف خود را به زبان ریاضی و اشکال هندسی نشان دهند و بیان کنند. این نشان می‌دهد که مدل‌سازی ریاضی آن‌ها ناقص و نادرست است.

مشاهدات از ابزارهای یادگیری ریاضی نشان داد که مواد آموزشی و مسائل ارائه شده در ارزیابی نتایج یادگیری، از توانایی تفکر انتقادی و ارتباط ریاضی دانش‌آموزان پشتیبانی نمی‌کند. این امر بیان ایده‌های نوآورانه را برای دانش‌آموزان دشوار می‌سازد و آن‌ها را به معلمان برای حل مسائل ریاضی وابسته می‌کند (هان و همکاران، ۲۰۲۳).

طراحی: در این مرحله، طراحی اولیه درس به صورت برنامه ریزی فرآیند استم، برگه‌های فعالیت دانش‌آموزان، آزمون‌های توانایی تفکر انتقادی و مهارت‌های ارتباط ریاضی دانش‌آموزان، راهنمای نمره‌دهی و کلید پاسخ‌ها تهیه شد. تمام نتایج این مرحله طراحی به عنوان پیش‌نویس اول در نظر گرفته شد مانند تحقیقات کلین ۱ و همکاران (۲۰۲۳).

بازبینی محتوای آموزشی و اجرا:

شرح نتایج در نیمه اجرا: بعد از ۸ جلسه در وسط اجرای مداخله آموزشی، پیشرفت دانش‌آموزان، مورد بررسی قرار گرفت. شرح نتایج در نیمه راه مداخله آموزشی، با استفاده از یک آزمون تشریحی توسعه یافته، تسلط یادگیری دانش‌آموزان از طریق توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمون توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان در پس‌آزمون اول به شرح زیر است (n = تعداد دانش‌آموزان):

جدول ۶. سطح توانایی تفکر انتقادی ریاضی دانش‌آموزان (نتایج پس‌آزمون اول)						
بازه نمرات	n مدرسه	کم درصد	n مدرسه	درصد پاسخگویی	توضیحات	
90 > x ≤ 100	۱	۹۱/۱۳٪	۳	۹۴/۸۹٪	بسیار بالا	
80 > x ≤ 90	۱۰	۸۶/۷۳٪	۱۳	۸۵/۴۷٪	بالا	
70 > x ≤ 80	۱۱	۷۳/۴۷٪	۱۱	۷۴/۵۴٪	متوسط	
60 > x ≤ 70	۸	۶۸/۵۲٪	۸	۶۸/۰۵٪	پایین	
60 > x ≤ 60	۸	۳۳/۷۸٪	۳	۴۶/۲۶٪	بسیار پایین	
میانگین	۳۸	۶۸/۰۲٪	۳۸	۷۶/۲۹٪		

جدول ۷. درصد سطح مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان (نتایج پس‌آزمون اول)

شماره و تعداد سوالات در هر بخش	سوالات شاخص توانایی ارتباط ریاضی IAM	میانگین کلاس مدرسه کم برخوردار	میانگین کلاس مدرسه منطقه ۶
دو سوال (۲ و ۱)	توضیح تصاویر به ایده‌های ریاضی	۴۸/۴۷٪	۵۴/۱۶٪
دو سوال (۳ و ۴)	نوشتن موقعیت‌ها یا ایده‌های ریاضی به تصاویر	۲۳/۶۸٪	۴۴/۸۰٪
یک سوال (۵)	بازگویی توضیحات ریاضی به زبان خود	۴۴/۴۲٪	۶۳/۶۷٪
میانگین		۳۸/۸۵٪	۵۴/۲۱٪

بر اساس جدول ۶ و ۷، در پس‌آزمون اول دیده می‌شود که هر دو گروه توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباطی آنها افزایش یافته است. بهبود توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان در نیمه اجرا از طریق شاخص سنجش میزان پیشرفت دانش‌آموزان پس از یک مداخله آموزشی از نتایج پیش‌آزمون و پس‌آزمون با فرمول N-Gain ارزیابی شد.

جدول ۸. خلاصه نتایج N-Gain توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان در پس‌آزمون اول

n مدرسه کم برخوردار	n مدرسه منطقه ۶	معیار N-Gain	امتیاز N-Gain
۶	۲	پایین	N- > 0.00 Gain ≤ 0.30
۱۹	۲۰	متوسط	N- > 0.30 Gain ≤ 0.80
۱۳	۱۸	بالا	N-Gain > 0.80

بنابر جدول ۸ میانگین مقدار میزان پیشرفت دانش‌آموزان پس از یک مداخله آموزشی برای مدرسه کم برخوردار در تفکر انتقادی برابر ۰/۵۷ و برای مدرسه منطقه ۶ بطور میانگین ۰/۶۲ و در مهارت‌های ارتباطی به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۳۰ بود که در طبقه‌بندی ارائه شده در بخش سوم، تفکر انتقادی در رده «متوسط» و مهارت‌های ارتباط ریاضی در رده پایین قرار می‌گیرند یا به عبارتی، بهبود در توانایی تفکر انتقادی داشته‌اند ولی در مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان در پس‌آزمون اول رشد کافی را نداشته‌اند.

شرح نتایج در انتهای اجرا: نتایج پس‌آزمون دوم بعد بررسی و تصحیح مسیر و توسعه مجدد سوالات و برگه‌های فعالیت بر اساس سطح توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان دسته‌بندی شد:

بازه نمرات	n مدرسه کم برخوردار	درصد	n مدرسه منطقه ۶	درصد	توضیحات
x > 90 ≤ 100	۵	۹۱/۱۵٪	۹	۹۴/۵۷٪	بسیار بالا
x > 80 ≤ 90	۸	۸۲/۳۶٪	۵	۸۸/۳۱٪	بالا

متوسط	۷۳ /۴۷٪	۱۴	۷۱ /۵۷٪	۱۰	$x > 70$ ≤ 80
پایین	۶۲/۶۳٪	۱۰	۶۳ /۸۹٪	۱۵	$x > 60$ ≤ 70
بسیار پایین	۰/۰۰٪	۰	۰/۰۰٪	۰	$x \leq 60$
	۷۷ /۵۶٪	۳۸	۷۳ /۳۸٪	۳۸	میانگین

جدول ۱۰. درصد سطح مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان (نتایج پس‌آزمون دوم)

شماره و تعداد سوالات در هر بخش	سوالات شاخص توانایی ارتباط ریاضی IAM	میانگین کلاس مدرسه کم برخوردار	میانگین کلاس مدرسه منطقه ۶
دو سوال (۲ و ۱)	توضیح تصاویر به ایده‌های ریاضی	۵۸/۴۷٪	۶۴/۱۶٪
دو سوال (۳ و ۴)	نوشتن موقعیت‌ها یا ایده‌های ریاضی به تصاویر	۵۲/۶۸٪	۶۱/۸۰٪
یک سوال (۵)	بازگویی توضیحات ریاضی به زبان خود	۶۵/۴۲٪	۷۶/۶۷٪
	میانگین	۵۸/۸۵٪	۶۷/۵۴٪

بر اساس جدول ۹ و ۱۰، هیچ دانش‌آموزی در رده بسیار پایین (۰٪) در هر دو مدرسه قرار نگرفته‌اند. بهبود توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان در پس‌آزمون دوم از طریق شاخص خاص N-Gain ارزیابی شد:

جدول ۱۱. خلاصه نتایج N-Gain توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان در پس‌آزمون دوم

n مدرسه کم برخوردار	n مدرسه منطقه ۶	معیار N-Gain	امتیاز N-Gain
۰	۰	پایین	$N-Gain > 0.00$ ≤ 0.30
۱۵	۱۶	متوسط	$N-Gain > 0.30$ ≤ 0.80
۲۳	۲۲	بالا	$N-Gain > 0.80$

میانگین مقدار شاخص نمره افزای نرمال‌شده برای تفکر انتقادی مدرسه کم برخوردار ۰/۶۵ و مدرسه منطقه ۶ برابر ۰/۶۴ بود و برای مهارت‌های ارتباط ریاضی به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۵۰ است که در طبقه‌بندی ارائه شده در بخش سوم، در رده «متوسط» قرار می‌گیرد یا به عبارتی، بهبود کلی توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان بوده است. هیچ دانش‌آموزی در رده «پایین» ($0.30 \leq N-Gain < 0.00$) قرار نگرفت. میزان تغییرات تفکر انتقادی مدرسه کم برخوردار بیشتر از مدرسه عادی مرکز شهر در آزمایش دوم بوده است. در این مطالعه، ابعاد توانایی تفکر انتقادی و مهارت ارتباط ریاضی دانش‌آموزان

شامل درک مسئله، برنامه‌ریزی برای حل مسئله، حل مسئله و بازبینی بود. علاوه بر ارزیابی میانگین یا کلی، مهارت‌های دانش‌آموزان بر اساس شاخص‌های جداگانه نیز بررسی شد تا مشخص شود که آیا برخی شاخص‌ها برجسته‌تر هستند یا خیر. از آنجا که میزان تغییرات در پس‌آزمون دوم در گروه مدرسه کم برخوردار بالاتر بود و همچنین محروم بودن این مدرسه، پژوهشگران می‌خواستند میزان توجه به درس ریاضی آنها را با آزمون نگرش با کمک پرسشنامه ایکن ((ایکن و هلمکوئیست، ۱۹۷۷؛ فردائی‌بنام و فرزاد ۱۳۹۱) مورد بررسی قرار دهند و با مدرسه عادی مقایسه کنند (جدول ۱۲).

جدول ۱۲. مقادیر آمار توصیفی متغیرهای نگرش ریاضی

مدرسه کم برخوردار		مدرسه منطقه ۶		متغیر
انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	نگرش ریاضی
۰/۷۱	۲۵/۴۳	۲/۱۶	۳۷/۱۴	پیش‌آزمون
۱/۹۶۸	۵۱/۰۴	۲/۴۶۴	۴۰/۳۶	پس‌آزمون

بنابر آمار توصیفی دیده شده که در تغییر نگرش در مدرسه کم برخوردار بیشتر بوده است. میزان تغییرات با کمک تحلیل کواریانس یک طرفه نیز مورد بررسی قرار گرفت که در جدول ۱۳ قابل مشاهده است.

جدول ۱۳. نتایج آزمون تحلیل واریانس تک متغیری در پس‌آزمون جهت مقایسه متغیرهای نگرش ریاضی بین دو مدرسه

مولفه	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار آماره	سطح معناداری	اندازه اثر
لذت بردن از ریاضیات	۱۹۳/۵۶۵	۱	۱۹۳/۵۶۵	۸۱/۳۸۴	۰/۰۰۱	۰/۶۴۴
ترس از ریاضیات	۱۲۴/۶۳۲	۱	۱۲۴/۶۳۲	۸۸/۵۲۵	۰/۰۰۱	۰/۶۶۳
ارزش و اهمیت ریاضیات	۱۵۱/۶۳۴	۱	۱۵۱/۶۳۴	۱۰۱/۹۱۷	۰/۰۰۱	۰/۶۹۴

همانطور که از نتایج جدول ۱۳ مشخص است، سطح معناداری آزمون برای مولفه‌های لذت بردن از ریاضیات ($P < ۰/۰۵$)، ترس از ریاضیات ($P < ۰/۰۵$) و ارزش و اهمیت ریاضیات ($P < ۰/۰۵$) معنادار است. با توجه به مقادیر میانگین نمرات در جدول ۱۰ و ۱۲ مشخص می‌شود که روش تدریس پژوهش‌محور مبتنی بر استم باعث بهبود در این مولفه‌ها در مدرسه کم برخوردار نسبت به مدرسه عادی شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این پژوهش که بر اساس مدل تحقیق و توسعه ADDIE اجرا شد، می‌توان نتیجه گرفت که ادغام یادگیری مبتنی بر پروژه محور مسئله با رویکرد استم، به عنوان یک مداخله آموزشی مؤثر، تأثیر قابل توجهی بر ارتقای مهارت‌های تفکر انتقادی، ارتباطی و نگرش دانش‌آموزان پایه هفتم در دو مدرسه متفاوت (کم‌برخوردار در جوادآباد و عادی در منطقه ۶ شهر تهران) داشته است. این مداخله، که بر موضوع اشکال مسطح تمرکز داشت، طی چهار ماه اجرا شد و نتایج پیش‌آزمون و پس‌آزمون نشان‌دهنده بهبودهای چشمگیر در ابعاد مورد بررسی است، که با اصول طبقه‌بندی بلوم (کراتوول و همکاران، ۱۹۶۴) و بازنگری آن توسط اندرسون و کراتوول (۲۰۰۱) همخوانی دارد. در ادامه، نتیجه‌گیری بر اساس هر یک از سؤالات پژوهش به تفصیل ارائه می‌شود.

در پاسخ به سؤال اول پژوهش، که به بررسی میزان بهبود مهارت‌های تفکر انتقادی ریاضی دانش‌آموزان (اندازه‌گیری شده با آزمون واتسون-گلیرز) در مدارس کم‌برخوردار در مقایسه با مدارس مرکزی می‌پردازد، نتایج حاکی از پیشرفت معنادار در هر دو گروه است. میانگین نمرات تفکر انتقادی در مدرسه کم‌برخوردار از ۲۴/۹۱٪ به ۷۳/۲۸٪ افزایش یافت (با N-Gain برابر ۰/۶۵، که در دسته متوسط قرار می‌گیرد؛ بر اساس معیارهای هاک (۱۹۹۸))، در حالی که در مدرسه عادی از ۳۷/۱۶٪ به ۷۷/۵۶٪ رسید (N-Gain=۰/۶۴). این بهبودها نشان‌دهنده آن است که رویکرد PBL-STEM، با تأکید بر حل مسائل واقعی و ادغام حوزه‌های

استم، توانسته است ابعاد کلیدی تفکر انتقادی مانند استنباط، شناسایی مفروضات، تحلیل، تفسیر و ارزیابی را تقویت کند، همان‌طور که در مطالعات برانکا (۱۹۸۰)، جاکوب (۲۰۱۲) و گیبی (۲۰۱۳) تأکید شده است. مداخله توانسته است این مهارت‌ها را در هر دو زمینه به سطح مشابهی برساند و نشان‌دهنده ظرفیت این رویکرد در محیط‌های آموزشی متنوع است، که با یافته‌های رسول‌زاده (۱۴۰۲) و آبادی و همکاران (۱۳۹۷) در آزمون‌های تیمز همسو است.

در خصوص سؤال دوم، که بر توانایی‌های ارتباط ریاضی دانش‌آموزان (شامل نمایش بصری-ریاضی، بیان کلامی استدلال و تفسیر مفاهیم هندسی) تمرکز دارد، یافته‌ها بهبود چشمگیری را تأیید می‌کنند. در مدرسه کم‌برخوردار، میانگین نمرات از $19/10\%$ به $58/85\%$ افزایش یافت و در مدرسه عادی از $34/56\%$ به $67/54\%$ ، در مقایسه بین دو مدرسه بیانگر آن است که پیشرفت در بخش مهارت‌های ارتباط ریاضی در مدرسه کم‌برخوردار ($N\text{-Gain}=0/49$) کمی کمتر از مدرسه عادی ($N\text{-Gain}=0/50$) اما همچنان قابل توجه بوده، که این امر می‌تواند به دلیل چالش‌های اولیه محیط آموزشی (مانند کمبود امکانات) باشد، با این حال نشان‌دهنده تقویت مهارت‌هایی مانند ارتباط اشیاء واقعی با مفاهیم ریاضی، نوشتن ایده‌های ریاضی به تصاویر و توضیح روابط هندسی بر اساس شاخص‌های پیشنهادی NCTM (۲۰۰۰) و کمید و همکاران (۲۰۲۰) است. رویکرد PBL-STEM، با درگیر کردن دانش‌آموزان در فعالیت‌های پژوهش‌محور و ادغام فناوری و مهندسی، به آن‌ها کمک کرد تا تفکر ریاضی خود را به طور منطقی و واضح بیان کنند، استدلال‌های دیگران را تحلیل نمایند و از زبان ریاضی برای تفسیر پدیده‌ها استفاده کنند. این نتایج با مطالعات پیشین مانند جاکوب (۲۰۱۲)، دورن و همکاران (۲۰۰۶)، پینتریچ و همکاران (۱۹۹۳) و چو (۲۰۱۹) همخوانی دارد و تأکید می‌کند که این مداخله نه تنها درک مفهومی را افزایش می‌دهد، بلکه مهارت‌های ارتباطی را در هر دو زمینه مدرسه‌ای به طور مؤثر بهبود می‌بخشد، همان‌طور که در تحقیقات موکارومه و ووسکو (۲۰۲۰) و استروبل و ون‌بارنولد (۲۰۰۹) بر اهمیت PBL در ارتباطات ریاضی اشاره شده است.

سؤال سوم پژوهش به تأثیرات نگرش ریاضی رویکرد PBL-STEM بر دانش‌آموزان، شامل کاهش اضطراب، افزایش لذت و ارزش ادراک شده ریاضیات، می‌پردازد. تحلیل کواریانس یک‌طرفه بر اساس پرسشنامه نگرش ایکن (ایکن و هلمکوئیست، ۱۹۷۷)، تغییرات معنادار را تأیید کرد (با سطح معناداری کمتر از $0/05$ برای مولفه‌های لذت، ترس و ارزش). میانگین نمرات نگرش در مدرسه کم‌برخوردار بالاتر از مدرسه عادی بود، که نشان‌دهنده کاهش ترس از ریاضیات، افزایش لذت از یادگیری و ارتقای ارزش‌گذاری بر ریاضیات است. این تغییرات عاطفی، که در حوزه‌های عاطفی بلوم (کراتوول و همکاران، ۱۹۶۴) ریشه دارد، بیانگر آن است که فعالیت‌های پژوهش‌محور استم نه تنها مهارت‌های شناختی را تقویت می‌کند، بلکه با ایجاد محیطی مشارکتی و واقعی، انگیزه و اعتمادبه‌نفس دانش‌آموزان را افزایش می‌دهد. این یافته‌ها با تحقیقات بیسر و همکاران (۲۰۱۸)، غدیری‌خان‌پشتانی و همکاران (۲۰۱۸) و کرافت و کاپارو (۲۰۱۷) همسو است و تأکید می‌کند که چنین مداخلاتی می‌تواند اضطراب ریاضی را در دانش‌آموزان، به ویژه در محیط‌های کم‌برخوردار، به طور مؤثری کاهش دهند، همان‌طور که در مطالعات کوون (۲۰۱۷) بر نقش استم در افزایش علاقه اشاره شده است.

در نهایت، سؤال چهارم به تفاوت تأثیر مداخله PBL-STEM بین دو مدرسه و کاهش نابرابری‌های عملکرد می‌پردازد. نتایج نشان‌دهنده تأثیر متفاوت اما مثبت است: پیشرفت در مدرسه کم‌برخوردار در برخی ابعاد (مانند تغییرات نگرشی) بیشتر بود، در حالی که مدرسه عادی در مهارت‌های ارتباطی و تفکر انتقادی برتر ظاهر شد. با این حال، مداخله شکاف عملکرد تحصیلی را 42% کاهش داد، که این امر ظرفیت PBL-STEM در ترویج عدالت آموزشی را برجسته می‌کند. این رویکرد، با ادغام مسائل دنیای واقعی و فعالیت‌های گروهی، دانش‌آموزان کم‌برخوردار را بیشتر درگیر کرد و به آن‌ها فرصت داد تا از محدودیت‌های محیطی فراتر روند، در حالی که در مدرسه عادی، پایه اولیه بالاتر منجر به پیشرفت پایدارتر شد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده نیاز به تنظیم مداخله بر اساس زمینه مدرسه است، اما کلیت نتایج تأیید می‌کند که PBL-STEM می‌تواند نابرابری‌ها را کاهش دهد و مهارت‌های قرن بیست‌ویکم را در همه دانش‌آموزان پرورش دهد، که با اصول ارائه‌شده توسط منگیائو و اسماعیل (۲۰۲۵) در خصوص طراحی PBL-STEM همخوانی دارد.

محدودیت‌های پژوهش: این پژوهش با محدودیت‌هایی روبرو بود، اول، نمونه محدود به دو کلاس هفتم (۷۶ دانش‌آموز) از مدارس استان تهران بود که تعمیم‌پذیری به سایر مقاطع یا مناطق را کاهش می‌دهد (کراسول و کراسول، ۲۰۱۷). دوم، طرح نیمه‌تجربی تک‌گروهی بدون گروه کنترل واقعی، ممکن است تأثیر عوامل خارجی مانند انگیزه معلمان را نادیده بگیرد (سوجیونو و هرماوان، ۲۰۲۲). سوم، ابزارها مانند آزمون واتسون-گلیزر و پرسشنامه ایکن، هرچند معتبر (آلفای کرونباخ ۰/۸۱ و ۰/۸۸)، ممکن است به عوامل فرهنگی حساس نباشند (رحیمی، ۲۰۱۶). چهارم، اجرای استم به دلیل کمبود امکانات در مدرسه کم‌برخوردار، نیاز به فضای جایگزین داشت که ممکن است نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. در نهایت، تمرکز بر هندسه مسطحه، تعمیم به سایر موضوعات ریاضی را محدود می‌کند.

برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود: اول، استفاده از طرح‌های تجربی کامل با گروه کنترل و نمونه بزرگ‌تر برای افزایش اعتبار. دوم، بررسی بلندمدت اثرات PBL-STEM بر عملکرد تحصیلی با پیگیری دانش‌آموزان (مانند آوالیانی و همکاران، ۲۰۲۵). سوم، ادغام فناوری‌های دیجیتال بیشتر برای تقویت اجرای استم در مدارس محروم. چهارم، مقایسه تأثیر بر جنسیت و سبک‌های شناختی (بنابر گفته کمید و همکاران، ۲۰۲۰؛ هادی و همکاران، ۲۰۲۵) پنجم، توسعه ابزارهای محلی برای سنجش تفکر انتقادی و ارتباطات ریاضی با تمرکز بر فرهنگ ایرانی، در نهایت، سیاست‌گذاران آموزشی می‌توانند PBL-STEM را در برنامه درسی ملی ادغام کنند تا ضعف‌های تیمز را جبران نمایند.

سهام مشارکت نویسندگان: نویسندگان بطور مساوی مشارکت داشته‌اند.

تضاد منافع: نویسندگان اذعان دارند که در این مقاله هیچگونه تعارض منافی وجود ندارد.

منابع مالی: پژوهش حاضر از هیچ موسسه و نهادی حمایت مالی دریافت نکرده و کلیه هزینه‌ها در طول فرآیند اجرای پژوهش بر عهده پژوهشگران بوده است.

منابع

- آبادی، مظاهر، نوشادی، ناصر، و ممتحن، احسان. (۱۳۹۷). ارزشیابی جایگاه مهارت‌های تفکر انتقادی در برنامه‌درسی ریاضیات دوره متوسطه مدارس عادی و تیزهوش. فناوری آموزش، ۱۳(۱)، ۴۰-۴۸.
<https://doi.org/10.22061/jte.2018.2997.1764>
- رسول‌زاده، بهزاد. (۱۴۰۲). فراتحلیل متغیرهای مرتبط با موفقیت دانش‌آموزان ایرانی در مطالعات بین‌المللی آزمون تیمز. رهبری آموزشی کاربردی، ۴(۲)، ۵۸-۶۹.
<https://doi.org/10.22098/ael.2023.13124.1296>
- سعیدی، مهدی. (۱۴۰۳). شناسایی شایستگی‌های معلم تأثیرگذار در دوره ابتدایی. علوم تربیتی، ۳۱(۱)، ۲۵۹-۲۸۴.
<https://doi.org/10.22055/edus.2024.46738.3591>
- سجادیه، نرگس سادات، و طالبی، مهدی. (۱۴۰۴). خودپروی دانش‌آموزان از نگاه دیردن: مفهوم پردازی و اصول تربیتی. علوم تربیتی، ۳۲(۲)، ۱۰۹-۱۳۸.
https://education.scu.ac.ir/article_20560.html
- فردائی بنام، کیوان، و فرزاد، ولی الله. (۱۳۹۱). اعتبار ساختاری مقیاس نگرش‌سنج علوم (ایکن). فصلنامه روان‌شناسی کاربردی، ۴(۴)، ۸۴-۶۹.
https://apsy.sbu.ac.ir/article_95709.html
- Al-Kamzari, F., & Alias, N. (2025). A systematic literature review of project-based learning in secondary school physics: Theoretical foundations, design principles, and implementation strategies. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12(1), Article 286.
<https://doi.org/10.1057/s41599-025-04579-4>
- Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives: complete edition*. Addison Wesley Longman. <https://eduq.info/xmlui/handle/11515/18824>
- Auliyani, C. N., Arianto, F., & Kholidya, C. F. A. (2025) systematic literature review of project-based learning integrated with stem education: examining implementation strategies, outcomes, and challenges, *Journal Visi Ilmu Pendidikan*, 17(1), 214-231. <https://doi.org/10.26418/jvip.v17i1.85610>
- Bicer, A., Capraro, R. M., & Capraro, M. M. (2018). Hispanic students' mathematics achievement in the context of their high school types as STEM and non-STEM schools. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 49(5), 705-720.
<https://doi.org/10.1080/0020739X.2017.1410735>
- Bloom, B. S., Engelhart, M. D., Furst, E. J., Hill, W. H., & Krathwohl, D. R. (1964). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook II: Affective domain* Longmans, Green and David McKay Company.
https://www.reden.ch/f7info/infolisten/zb_did_meth_bloom_01s.pdf
- Branca, N. A. (1980). Problem solving as a goal, process, and basic skill. In S. Krulik & R. E. Reys (Eds.), *Problem solving in school mathematics: 1980 yearbook of the National Council of Teachers of Mathematics* (pp. 3-8). National Council of Teachers of Mathematics.
- Branch, R. M. (2009). *Instructional design: The ADDIE approach* (Vol. 722). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-09506-6>
- Bramson ORT Institute of Technology. (2024, June 25). Innovative teaching methods in STEM: What you'll learn in professional development programs.

<https://bramsonort.edu/2024/06/25/innovative-teaching-methods-in-stem-what-youll-learn-in-professional-development-programs/>

- Brown, A. L., & Campione, J. C. (1990). Communities of learning and thinking, or a context by any other name. In D. Kuhn (Ed.), *Contributions to human development* (Vol. 21, pp. 108–126). Karger.
- Burton, L. (1984). Mathematical thinking: The struggle for meaning. *Journal for research in mathematics education*, 15(1), 35-49. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.15.1.0035>
- Cao, X., Lu, H., Wu, Q., & Hsu, Y. (2025). Systematic review and meta-analysis of the impact of STEM education on students learning outcomes. *Frontiers in Psychology*, 16, Article 1579474. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1579474>
- Capraro, R. M., Capraro, M. M., & Morgan, J. R. (Eds.). (2013). *STEM project-based learning: An integrated science, technology, engineering, and mathematics (STEM) approach* (2nd ed.). SensePublishers Rotterdam (Springer Science). <https://doi.org/10.1007/978-94-6209-143-6>
- Carley, S. (2015 , November 4). Educational theories you must know. Bloom’s taxonomy. St.Emlyn’s, <https://www.stemlynblog.org/better-learning/educational-theories-you-must-know-st-emlyn/educational-theories-you-must-know-blooms-taxonomy-st-emlyn/>
- Cho, K. (2019). *The contribution of the digital revolution to Korea’s democracy, with a focus on political communications, from 1993 to 2018* [Doctoral dissertation, University of Warwick]. WRAP: Warwick Research Archive Portal. <http://wrap.warwick.ac.uk/151766>
- Craft, A. M. (2017). *A study of how science, technology, engineering, and mathematics (STEM) project-based learning (PBL) can improve student engagement* [Master’s thesis, Texas A&M University]. <https://oaktrust.library.tamu.edu/server/api/core/bitstreams/806ca5c9-ae7a-430b-bbc7-83f5a07dcdde/content>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage publications. <https://edge.sagepub.com/creswellrd5e>
- Du, X., Zhou, Z., Hu, Y., Chen, D., & Bai, Y. (2025). A multidisciplinary analysis of critical thinking: Opportunities for ability transfer and collaboration. *The Asia-Pacific Education Researcher*, 34(5), 1883–1898. <https://doi.org/10.1007/s40299-025-01000-1>
- Duron, R., Limbach, B., & Waugh, W. (2006). Critical thinking framework for any discipline. *International Journal of teaching and learning in higher education*, 17(2), 160-166. <https://focionline.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/05/critical-thinking-framework-for-any-discipline.pdf>
- Eiken, O., & Holmqvist, K.-G. (1977). Replacement of Carpal Bones with Exact-fitting Silicone Rubber Implants: An Experimental Study. *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery*, 11(3), 189-193. <https://doi.org/10.3109/02844317709025517>

- English, L. D. (2016). STEM education K-12: Perspectives on integration. *International Journal of STEM education*, 3(1), Article 3. <https://link.springer.com/article/10.1186/s40594-016-0036-1>
- Ghadiri Khanaposhtani, M., Liu, C. J., Gottesman, B. L., Shepardson, D., & Pijanowski, B. (2018). Evidence that an informal environmental summer camp can contribute to the construction of the conceptual understanding and situational interest of STEM in middle-school youth. *International Journal of Science Education, Part B*, 8(3), 227-249. <https://doi.org/10.1080/21548455.2018.1451665>
- Gibby, C. (2013). Critical thinking skills in adult learners. *Journal ARECLS*, 10(1), 147-176. https://research.ncl.ac.uk/media/sites/researchwebsites/arecls/gibby_vol10.pdf
- Gijbels, D., Van de Watering, G., Dochy, F., & Van Den Bossche, P. (2006). New learning environments and constructivism: The students' perspective. *Instructional science*, 34, 213-226. <https://doi.org/10.1007/s11251-005-3347-z>
- Hadi, M. Y. (2025). Education as a foundation of national development: Policy analysis and its implications in Indonesia. In *Proceedings of the International Conference on Humanity Education and Society (ICHES)* (Vol. 4, No. 1). <https://proceedingsiches.com/index.php/ojs/article/download/320/306>
- Hadi, R., Nasution, H., & Asmin, A. (2025). Development of Mathematics Learning Devices Based on Problem Based Learning Integrated with STEM to Improve Critical Thinking Abilities and Mathematical Communication Abilities. *Jurnal Perspektif*, 9(1), 81-92. <http://103.55.33.82/index.php/JP/article/view/340>
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American journal of Physics*, 66(1), 64-74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Hallström, J., Norström, P., & Schönbörn, K. J. (2023). Authentic STEM education through modelling: an international Delphi study. *International Journal of STEM Education*, 10(1), Article 62. <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00453-4>
- Hallström, J., & Schönbörn, K. J. (2019). Models and modelling for authentic STEM education: reinforcing the argument. *International Journal of STEM Education*, 6(1), Article 22. <https://doi.org/10.1186/s40594-019-0178-z>
- Han, J., Kelley, T., & Knowles, J. G. (2023). Building a sustainable model of integrated stem education: investigating secondary school STEM classes after an integrated STEM project. *International journal of technology and design education*, 33(4), 1499-1523. <https://doi.org/10.1007/s10798-022-09777-8>
- Hoque, M. E. (2016). Three domains of learning: Cognitive, affective and psychomotor. *The Journal of EFL Education and Research*, 2(2), 45-52. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3673810>

- Jacob, S. M. (2012). Mathematical achievement and critical thinking skills in asynchronous discussion forums. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 31, 800-804. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.12.144>
- Kamid, K., Rusdi, M., Fitaloka, O., Basuki, F. R., & Anwar, K. (2020). Mathematical communication skills based on cognitive styles and gender. *International Journal of Evaluation and Research in Education*, 9(4), 847–856. <https://doi.org/10.11591/ijere.v9i4.20497>
- Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(1), Article 11. <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>
- Kelley, T. R., Knowles, J. G., Han, J., & Trice, A. N. (2021). Models of integrated STEM education. *Journal of STEM Education: Innovations and Research*, 22(1), 34–45. <https://jstem.org/jstem/index.php/JSTEM/article/view/2395>
- Klein, K., Gannon-Slater, N., Mellor, L., & Herrera, A. (2023). *Essential Conditions for Designing an RPP: Insights from the Field and Literature*. <https://www.air.org/sites/default/files/2023-12/Essential-Conditions-for-Designing-an-RPP-CEE-July-2023.pdf>
- Krathwohl, D. R., Bloom, B. S., & Masia, B. B. (1964). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook II: Affective domain*. Longmans, Green and David McKay Company. <https://archive.org/details/taxonomyofeducat0000unse>
- Kwon, H. (2017). Effects of 3D Printing and Design Software on Students' Interests, Motivation, Mathematical and Technical Skills. *Journal of STEM Education: Innovations and Research*, 18(4), 37-42. <https://www.learntechlib.org/p/181996/>
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge university press. <https://www.cambridge.org/gb/universitypress/subjects/psychology/developmental-psychology/situated-learning-legitimate-peripheral-participation>
- Makrakis, V., & Kostoulas-Makrakis, N. (2017). A paradigm shift in higher education teaching and learning: Practices towards education for sustainability. In G. Michelsen & P. J. Wells (Eds.), *A decade of progress on education for sustainable development: Reflections from the UNESCO Chairs Programme* (pp. 94–102). UNESCO Publishing. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000368105>
- Mengyao, H., & Ismail, Z. (2025). Designing and developing sustainable development goals problem-based learning strategy to enhance students' motivation in learning mathematics. *Research in Mathematics*, 12(1), Article 2536897. <https://doi.org/10.1080/27684830.2025.2536897>
- Merrill, M. D. (2002). First principles of instruction. *Educational Technology Research and Development*, 50(3), 43–59. <https://doi.org/10.1007/BF02505024>
- Mukaromah, S., & Wusqo, I. (2020). The influence of PjBL model with stem approach on global warming topic to students' creative thinking and communication skills. *Journal of Physics:*

Conference Series, 1521, Article 042052. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1521/4/042052/meta>

Nadelson, L. S., & Seifert, A. L. (2017). Integrated STEM defined: Contexts, challenges, and the future. *The Journal of Educational Research*, 110(3), 221-223. <https://doi.org/10.1080/00220671.2017.1289775>

National Council of Teachers of Mathematics. (2000). *Principles and standards for school mathematics*. Reston, VA: Author. <https://www.nctm.org/Standards-and-Positions/Principles-and-Standards/>

Nguyen, T. P. L., Nguyen, T. H., & Tran, T. K. (2020). *STEM education in secondary schools: Teachers' perspective towards sustainable development*. *Sustainability*, 12(21), Article 8865. <https://doi.org/10.3390/su12218865>

Ortiz-Revilla, J., Greca, I. M., & Arriasecq, I. (2022). A Theoretical Framework for Integrated STEM Education. *Science & Education*, 31(2), 383-404. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00242-x>

Piaget, J. (1977). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. FeniXX. https://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/textes/VE/JP36_NdI_avpropos_intro.pdf

Pintrich, P. R., Smith, D. A. F., García, T., & McKeachie, W. J. (1991). *A manual for the use of the Motivational Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ)* (ED338122). University of Michigan (National Center for Research to Improve Postsecondary Teaching and Learning). ERIC. <https://eric.ed.gov/?id=ED338122>

Pintrich, P. R., Smith, D. A., Garcia, T., & McKeachie, W. J. (1993). Reliability and predictive validity of the Motivated Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ). *Educational and psychological measurement*, 53(3), 801-813. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0013164493053003024>

Polya, G. (1945). *How to solve it?*. Princeton University Press. https://www.hlevkin.com/hlevkin/90MathPhysBioBooks/Math/Polya/George_Polya_How_To_Solve_It_.pdf

Portillo-Blanco, A., Guisasola, J., & Zuza, K. (2025). Integrated STEM education: addressing theoretical ambiguities and practical applications. *Frontiers in Education*, 10, Article 1568885 <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1568885>

Psychometric Properties of Watson–Glaser Critical Thinking Test and its Relation with Creativity. (2015). *Journal of Applied Psychological Research*, 6(2), 77-90. <https://doi.org/10.22059/japr.2015.58505>

Rahimi, Z., & Talaee, E. (2016, July 24–31). *Designing a teaching model based on multiple solution strategies to foster mathematical thinking in secondary school students* [Conference presentation]. 13th International Congress on Mathematical Education (ICME), Hamburg, Germany.

https://www.researchgate.net/publication/359061647_Designing_an_Instructional_Model_for_Realization_of_Mathematical_Thinking_in_Secondary_School_Students

- Rasiman, R., Priyolistiyanto, A., Prasetyawati, D., & Dina, P. (2020). The instrument measures students' mathematical communication ability based on Javanese culture: Validity. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Education and Social Science Research (ICESRE 2019)* (pp. 237–242). <https://www.atlantis-press.com/article/125937281.pdf>
- Remillard, J. T., & Kim, O.-K. (2020). *Elementary mathematics curriculum materials: Designs for student learning and teacher enactment*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38588-0>
- Schoenfeld, A. H. (2016). Learning to Think Mathematically: Problem Solving, Metacognition, and Sense Making in Mathematics (Reprint). *The Journal of Education*, 196(2), 1–38. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/002205741619600202>
- Shown, T., & Reed, P. A. (2020). *STEL benchmark verb alignment to cognitive, affective, and psychomotor domains*. STEMPS Faculty Publications. Old Dominion University (International Technology and Engineering Educators Association). https://digitalcommons.odu.edu/stemps_fac_pubs/174/
- Strobel, J., & Van Barneveld, A. (2009). When is PBL more effective? A meta-synthesis of meta-analyses comparing PBL to conventional classrooms. *Interdisciplinary journal of problem-based learning*, 3(1), 44-58. <https://doi.org/10.7771/1541-5015.1046>
- Sugiyono, E., & Hermawan, U. (2022). The Influence of Leadership Style, Work Environment and Competence on Employee Performance And Employee Motivation As Intervening Variables In The Administrative Affairs Of The Supreme Court Republic Of Indonesia. *Jurnal Ekonomi*, 11(03), 138-150. <https://ejournal.seaninstitute.or.id/index.php/Ekonomi/article/view/612>
- Tall, D. (2006). *Advanced mathematical thinking* (Vol. 11). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/0-306-47203-1>
- Thomas, J. W. (2000). *A review of research on project-based learning*. Autodesk Foundation. https://tecfa.unige.ch/proj/eteach-net/Thomas_researchreview_PBL.pdf
- Vasquez, J. A., Sneider, C., & Comer, M. (2013). *STEM lesson essentials, grades 3-8: Integrating science, technology, engineering, and mathematics*. Heinemann. https://climber.uml.edu.ni/index.jsp/Resources/4030116/Stem_Lesson_Essentials_Grades_3_8_Integrating_Science_Technology_Engineering_And_Mathematics.pdf
- Verschaffel, L. (2002). *Taking the Modeling Perspective Seriously at the Elementary School Level: Promises and Pitfalls* (ED476082). ERIC. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED476082.pdf>
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press. <https://www.hup.harvard.edu/books/9780674576292>

Wu, X., Yang, Y., Zhou, X., Xia, Y., & Liao, H. (2024). A meta-analysis of interdisciplinary teaching abilities among elementary and secondary school STEM teachers. *International Journal of STEM Education*, 11(1), Article 38. <https://doi.org/10.1186/s40594-024-00500-8>