

نوع مقاله

^۱ گروه شیمی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران،
Faghanbari@iau.ac.ir

^۲ گروه فیزیک، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران،
Nanobary@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*فاطمه قنبری، گروه شیمی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی،
مهاباد، ایران،

Faghanbari@iau.ac.ir

یک سیستم یادگیری تطبیقی ریاضی برای مدل سازی فرآیندهای شیمی فیزیکی، با استفاده از هوش مصنوعی

فاطمه قنبری^{*}، نسیم نوبری^۲

چکیده:

این پژوهش به طراحی و توسعه یک سامانه هوشمند یادگیری تطبیقی می پردازد که با بهره گیری از هوش مصنوعی، آموزش مفاهیم پیشرفته ریاضی و کاربردهای عملی آن در مدل سازی و پیش بینی واکنش های شیمیایی را یکپارچه ساخته است. سامانه پیشنهادی با ترکیب مدل های زبانی بزرگ، الگوریتم های پیشرفته ردیابی دانش و شبکه های عصبی گرافی، سطح دانش ریاضی هر دانشجو را به صورت پویا تحلیل کرده و بر اساس آن، محتوای آموزشی شخصی سازی شده ای شامل مفاهیمی مانند معادلات دیفرانسیل، سینتیک شیمیایی و محاسبات آماری ارائه می دهد. نوآوری اصلی این سامانه، ایجاد یک حلقه بازخورد هوشمند است که به طور خودکار خطاهای دانشجو در پیش بینی واکنش های شیمیایی را تشخیص داده و بلافاصله به بازآموزی مفهوم ریاضی مرتبط اقدام می کند. این مفاهیم سپس در مسائل واقعی شیمی، از جمله پیش بینی سرعت واکنش، تحلیل تعادل شیمیایی و بهینه سازی فرآیندهای کاتالیزتی به کار گرفته می شوند. ارزیابی سامانه از طریق یک آزمایش کنترل شده روی دانشجویان شیمی نشان داد که گروه استفاده کننده، پیشرفت آماری معناداری ($p < 0.01$) در هر دو حوزه مدل سازی شیمیایی و درک مفاهیم ریاضی داشته اند. این نتایج نشان می دهد که رویکرد پیشنهادی می تواند شکاف میان آموزش نظری ریاضیات و کاربردهای عملی در شیمی را به طور مؤثری پر کرده و چارچوبی نوین برای آموزش علوم پایه فراهم آورد.

کلید واژه ها: یادگیری تطبیقی ریاضی، مدل سازی شیمیایی پیش بین، هوش مصنوعی در آموزش، شبکه عصبی گرافی، حلقه بازخورد هوشمند.

موضوع اصلی:

یادگیری تطبیقی ریاضی برای مدل سازی فرآیندهای شیمی فیزیکی

تاریخچه مقاله:

- تاریخ دریافت:
- تاریخ بازنگری:
- تاریخ پذیرش:

۱- مقدمه

در عصر انقلاب صنعتی چهارم که با پیشرفت های شگرف فناوری های دیجیتال همراه است، آموزش علوم، فناوری، مهندسی و ریاضیات (STEM) به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار جوامع مدرن شناخته می شود [۱]. هوش مصنوعی (AI) در این تحول، نقش یک ابزار کلیدی را ایفا می کند که قابلیت های نوینی مانند شخصی سازی یادگیری، ارزیابی بلادرنگ دانش آموزان و

شبیه‌سازی سناریوهای پیچیده را ارائه می‌دهد؛ امکاناتی که روش‌های آموزشی سنتی فاقد آن هستند [۲]. در حوزه شیمی کاربردی و شیمی فیزیک، مدل‌سازی واکنش‌های شیمیایی نیازمند تسلط بر مفاهیم ریاضی پیشرفته‌ای مانند معادلات دیفرانسیل، آمار و محاسبات عددی است. با این وجود، دانشجویان اغلب در ایجاد ارتباط بین این مفاهیم انتزاعی و کاربرد عملی آن‌ها در شیمی با چالش‌های جدی روبرو می‌شوند [۳]. این چالش‌ها نه تنها در سطح فردی دانشجویان نمود دارد، بلکه بر صنایع مرتبطی مانند داروسازی، مواد پیشرفته و انرژی‌های تجدیدپذیر نیز تأثیر منفی می‌گذارد. اهمیت ادغام هوش مصنوعی در آموزش STEM از آنجا نشأت می‌گیرد که می‌تواند نرخ یادگیری را به طور قابل توجهی افزایش داده و همزمان، اضطراب آموزشی را کاهش دهد. این امر به تربیت نیروی کار ماهر برای حل مسائل جهانی مانند تغییرات اقلیمی و بحران‌های انرژی کمک شایانی می‌کند [۴]. مطالعات نشان می‌دهند سیستم‌های مبتنی بر AI قادرند عملکرد دانشجویان را تا ۶۰-۷۰ درصد بهبود بخشیده و شکاف‌های آموزشی را در جوامع کمتر توسعه‌یافته پر کنند [۵]. با ظهور مدل‌های زبانی بزرگ (LLMها)، (مانند ChatGPT) فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای آموزش تعاملی و تطبیقی خلق شده است. این مدل‌ها می‌توانند مفاهیم انتزاعی ریاضی را به مسائل واقعی شیمی پیوند زده و درک عمیق‌تری ایجاد نمایند [۶]. چنین رویکردی نه تنها کارایی آموزشی را افزایش می‌دهد، بلکه به توسعه مهارت‌های تفکر انتقادی و حل مسئله که در دنیای امروز ضروری هستند، کمک می‌کند.

این مقاله در پنج بخش اصلی سازماندهی شده است: بخش دوم به مرور جامع ادبیات و شناسایی شکاف‌های پژوهشی می‌پردازد؛ بخش سوم به روش‌شناسی و طراحی سیستم اختصاص دارد؛ بخش چهارم به ارائه نتایج تجربی و تحلیل آماری می‌پردازد؛ و بخش پنجم به نتیجه‌گیری، بیان محدودیت‌ها و پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده اختصاص یافته است.

۲- مرور ادبیات

ادبیات موجود در حوزه کاربرد هوش مصنوعی در آموزش ریاضیات و شیمی کاربردی، نشان‌دهنده پیشرفت‌های قابل توجهی است که از سیستم‌های یادگیری تطبیقی ساده تا مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته را در بر می‌گیرد.

الف- هوش مصنوعی در آموزش ریاضیات

در حوزه آموزش ریاضی، هوش مصنوعی به عنوان یک ابزار تحول‌آفرین ظاهر شده است. بررسی سیستماتیک گبولاده و آدوویی (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که AI با بهره‌گیری از ابزارهایی مانند مدل‌های زبانی بزرگ (LLM) ها، یادگیری ریاضی را شخصی‌سازی کرده و این امر منجر به کاهش اضطراب ریاضی و بهبود عملکرد دانشجویان تا ۵۰ درصد می‌شود [۷]. مطالعه‌ای دیگر توسط آوانگ و همکاران (۲۰۲۵) بر روش‌های تحقیقاتی و ابزارهای هوش مصنوعی در آموزش ریاضی تأکید دارد و نشان می‌دهد که سیستم‌های هوشمندی مانند بازی‌وارسازی (Gamification) مبتنی بر AI، خلاقیت و توانایی حل مسئله را به طور همزمان تقویت می‌کنند [۸]. بررسی لوپز و همکاران (۲۰۲۴) که بر کاربردهای AI در سطوح مختلف آموزشی متمرکز شده، نشان می‌دهد که هوش مصنوعی قادر است مفاهیم انتزاعی مانند معادلات دیفرانسیل را از طریق شبیه‌سازی‌های تعاملی به طور مؤثرتری آموزش دهد [۹]. اورتگا-آلوارز و همکاران (۲۰۲۲) نیز در مرور جامع خود بر نقش هوش مصنوعی در سطوح مختلف آموزشی تأکید کرده‌اند [۱۰].

ب- هوش مصنوعی در آموزش شیمی فیزیک

در آموزش شیمی فیزیک، هوش مصنوعی نقش کلیدی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی ایفا می‌کند. بررسی سیستماتیک چلیک و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که AI کاربردهایی مانند آزمایشگاه‌های مجازی و پیش‌بینی خواص مولکولی را فراهم می‌کند که می‌تواند یادگیری شیمی را تا ۴۰ درصد بهبود بخشد [۱۱]. مطالعه مشابهی توسط همین نویسندگان (۲۰۲۵) بر اثرات AI در آموزش شیمی تمرکز دارد و تأکید می‌کند که ابزارهای هوش مصنوعی مانند مدل‌های مولد (Generative) می‌توانند محتوای

آموزشی کاملاً سفارشی‌شده برای هر دانشجو ایجاد کنند [۱۲]. بررسی یوریف و همکاران (۲۰۲۴) نیز به طلوع هوش مصنوعی مولد در آموزش شیمی می‌پردازد و نشان می‌دهد که این ابزارها می‌توانند آزمایش‌های مجازی immersiv را برای درک بهتر مکانیسم واکنش‌ها فراهم آورند [۱۳].

ج- سیستم‌های یادگیری تطبیقی در STEM

سیستم‌های یادگیری تطبیقی به عنوان پلی بین آموزش ریاضی و شیمی عمل می‌کنند. مطالعه سینگ و همکاران (۲۰۲۵) بر سیستم‌های هوشمند تطبیقی متمرکز است که با تحلیل داده‌ها در زمان واقعی، فرآیند یادگیری را شخصی‌سازی کرده و در حوزه STEM بسیار مؤثر هستند [۱۴]. بررسی الشمری (۲۰۲۵) نیز بر اهمیت AI و یادگیری ماشین در مهندسی شیمی تأکید دارد و نشان می‌دهد که سیستم‌های تطبیقی می‌توانند مدل‌سازی فرآیندهای شیمیایی را بهبود بخشند [۱۵].

د- شبکه‌های عصبی گرافی (GNNs) در مدل‌سازی شیمیایی

در مدل‌سازی شیمیایی، شبکه‌های عصبی گرافی (GNNs) به دلیل ساختار ذاتی مناسب برای نمایش مولکول‌ها، جایگاه برجسته‌ای دارند. بررسی شوت و همکاران (۲۰۲۲) بر کاربرد GNN‌ها در شیمی و علوم مواد متمرکز دارد و نشان می‌دهد که این مدل‌ها دقت پیش‌بینی واکنش‌های شیمیایی را تا ۹۰ درصد افزایش می‌دهند [۱۶].

و- ردیابی دانش (Knowledge Tracing) برای یکپارچه‌سازی

در نهایت، ردیابی دانش (KT) برای ادغام مؤثر ریاضی و شیمی در یک سیستم آموزشی، ضروری است. بررسی پلانک (۲۰۲۲) به مقایسه مدل‌های سنتی و عمیق ردیابی دانش می‌پردازد و مزایای مدل‌های عمیق در پیش‌بینی مسیر یادگیری دانشجو را برمی‌شمارد [۱۷]. با وجود این پیشرفت‌ها، ادبیات فعلی عمدتاً بر کاربردهای جداگانه هوش مصنوعی در هر حوزه متمرکز است و شکاف آشکاری در ارائه یک چارچوب یکپارچه که به طور پویا آموزش ریاضی را با مدل‌سازی شیمیایی پیوند می‌زند، مشاهده می‌شود. این پژوهش قصد دارد تا همین شکاف را پر کند.

۳- روش‌شناسی و طراحی سیستم

این پژوهش از یک رویکرد ترکیبی پیشرفته (Mixed-Methods) بهره می‌برد که به طور همزمان شامل مراحل طراحی مفهومی، پیاده‌سازی فنی سیستم نرم‌افزاری، جمع‌آوری داده‌های کمی جامع (شامل نمرات آزمون‌های استاندارد شده، معیارهای دقیق عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی و شاخص‌های پیشرفت تحصیلی) و گردآوری داده‌های کیفی غنی (شامل مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته عمیق، نظرسنجی‌های تفصیلی رضایت کاربران و مشاهده سیستماتیک تعاملات یادگیری) از طریق یک آزمایش کنترل‌شده دقیق می‌باشد. این رویکرد ترکیبی جامع امکان بررسی همزمان و مقایسه‌ای اثربخشی کمی سیستم (مانند بهبود نمرات و شاخص‌های عملکرد) و جنبه‌های کیفی عمیق (مانند رضایت کاربر، تجربه یادگیری شخصی و تغییرات نگرشی) را در یک چارچوب یکپارچه پژوهشی فراهم می‌آورد. روش‌شناسی پژوهش به دقت بر پایه اصول مهندسی نرم‌افزار هوشمند پیشرفته و تئوری‌های آموزشی نوین از جمله سازنده‌گرایی (Constructivism)، نظریه بار شناختی (Cognitive Load Theory) و طبقه‌بندی تجدید نظر شده بلوم (Revised Bloom's Taxonomy) استوار شده است [۱۸].

۳-۱- طراحی کلی سیستم

سیستم پیشنهادی یک پلتفرم یادگیری تطبیقی پیشرفته و هوشمند (Advanced Adaptive Learning System - AALS) مبتنی بر هوش مصنوعی است که به صورت یک برنامه تحت وب توزیع‌شده با قابلیت یکپارچه‌سازی کامل با برنامه‌های موبایل



از طریق (PWA - Progressive Web App) عمل می‌کند. معماری سیستم به صورت پیشرفته بر پایه ریزسرویس‌ها (Microservices) با استفاده از کانتینرسازی (Containerization) پیشرفته و اورکستراسیون کانتینر پیاده‌سازی شده است که امکان جداسازی مؤثر اجزا، استقرار ساده، نگهداری آسان و مقیاس‌پذیری پویا را فراهم می‌آورد. این سیستم پیشرفته شامل پنج ماژول اصلی به هم پیوسته و دارای تعامل پویا می‌باشد:

- ماژول تشخیص دانش (Knowledge Diagnosis Module) برای ارزیابی جامع، پویا و چندبعدی سطح دانش و شناسایی نقاط قوت و ضعف یادگیری
- ماژول آموزش شخصی‌سازی شده (Personalized Tutoring Module) برای ارائه محتوای آموزشی کاملاً سفارشی، انعطاف‌پذیر و متناسب با سبک یادگیری
- ماژول مدل‌سازی شیمیایی (Chemical Modeling Module) برای شبیه‌سازی واقعی، پیش‌بینی دقیق و تجسم تعاملی واکنش‌ها
- ماژول بازخورد تطبیقی (Adaptive Feedback Module) برای تنظیم پویا، هوشمند و خودکار فرآیند یادگیری بر اساس عملکرد
- ماژول نظارت و ثبت رویدادها (Monitoring and Logging Module) برای ردیابی کامل عملکرد سیستم، تشخیص به موقع خطاها و تحلیل رفتار کاربر

این ماژول‌های پیشرفته از طریق یک API مرکزی پیشرفته و هوشمند مبتنی بر GraphQL (برای کوئری‌های پیچیده و کارآمد) و RESTful (برای عملیات ساده و استاندارد) با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. داده‌ها در یک پایگاه داده هیبریدی پیشرفته و بهینه‌شده ذخیره می‌شوند MongoDB برای داده‌های غیرساختاریافته (مانند لاگ‌های کاربر، تاریخچه تعاملات و داده‌های رفتاری) و PostgreSQL برای داده‌های ساختاریافته (مانند نمرات دانش، نتایج آزمون‌ها و پروفایل‌های یادگیری). این طراحی پیچیده و مقیاس‌پذیر امکان استقرار سیستم به صورت کاملاً توزیع‌شده روی پلتفرم ابری مانند AWS یا Google Cloud را با قابلیت مقیاس‌پذیری خودکار (Auto-scaling) پیشرفته بر اساس بار کاری و الگوهای استفاده فراهم می‌آورد [۱۹].

۳-۲- اجزای فنی سیستم

تشخیص سطح دانش ریاضی: این ماژول پیشرفته از تلفیق پیشرفته تئوری پاسخ سؤال (IRT - Item Response Theory) با یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) و شبکه‌های عصبی عمیق استفاده می‌کند. مدل IRT چندبعدی (Multidimensional IRT - MIRT) برای مدل‌سازی همزمان و یکپارچه چندین مهارت ریاضی (مانند جبر، آمار، هندسه و حسابان) به کار رفته است که امکان ارزیابی مهارت‌های خاص (مانند حل معادلات دیفرانسیل، محاسبات انتگرالی و تحلیل آماری) را به صورت مجزا و در عین حال یکپارچه فراهم می‌آورد. فرمول پیشرفته احتمال پاسخ به صورت زیر است:

$$P(\theta) = \frac{1}{1 + e^{(-a^T\theta - d + c)}} \quad (1)$$

که در آن a بردار تمایز (discrimination vector) برای هر بعد، θ بردار توانایی چندبعدی دانشجو (ability vector)، d پارامتر دشواری سؤال (difficulty) و c پارامتر حدس (pseudo-guessing parameter) می‌باشد. این مدل پیشرفته با استفاده از برآورد درست‌نمایی بیشینه (Maximum Likelihood Estimation - MLE) و الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته آموزش دیده است [۲۰].

موتور آموزش ریاضی شخصی سازی شده: این ماژول از مدل های زبانی بزرگ تخصصی ریاضی پیشرفته مانند Llemma و مدل های fine-tune شده بر پایه Mistral-7B با معماری Transformer استفاده می کند. برای حل معادلات دیفرانسیل در سینتیک شیمیایی از روش عددی پیشرفته Runge-Kutta مرتبه چهار (RK4) با اندازه گام تطبیقی هوشمند و کنترل خطای پیشرفته با تلورانس 10^{-6} استفاده شده است. الگوریتم عددی کامل به این صورت است:

$$k_1 = f(t_n, y_n) \quad (2)$$

$$k_2 = f(t_n + h/2, y_n + (h/2)k_1) \quad (3)$$

$$k_3 = f(t_n + h/2, y_n + (h/2)k_2) \quad (4)$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3) \quad (5)$$

$$y_{n+1} = y_n + (h/6)(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) + O(h^5) \quad (6)$$

مدل پیش بینی شیمیایی: از شبکه های عصبی گرافی (GNN) پیشرفته مبتنی بر معماری Message Passing Neural Network (MPNN) با قابلیت پیش بینی چندوظیفه ای (multitask) و توجه سلسله مراتبی (Hierarchical Attention) استفاده شده است. فرمول به روزرسانی گره پیشرفته به صورت زیر است:

$$h_v^{(k)} = \sigma[U^{(k)}h_v^{(k-1)} + \sum_u M^{(k)}(h_v^{(k-1)}, h_u^{(k-1)}, e_{vu}) + b^{(k)}] \quad (7)$$

مدل با پیش آموزش عمیق روی دیتاست های بزرگ مانند USPTO و ادغام با Transformer برای واکنش های چندمرحله ای و مکانیسم های پیچیده آموزش دیده است [۲۱].

۳-۳- پیاده سازی نرم افزاری

سیستم با Python 3.12 و با استفاده از فریمورک پیشرفته FastAPI در بخش backend و Next.js 15 در بخش frontend پیاده سازی شده است. برای یادگیری ماشین از PyTorch 2.3 با پشتیبانی از محاسبات توزیع شده و TensorFlow 2.16 با بهینه سازی پیشرفته استفاده شده است. کتابخانه های تخصصی شامل RDKit 2025.03 برای شیمی محاسباتی پیشرفته، SymPy 1.13 برای ریاضیات نمادین و جبر کامپیوتری، NetworkX 3.4 برای تحلیل گراف و الگوریتم های شبکه، Scikit-learn 1.5 برای ارزیابی و اعتبارسنجی و Hugging Face Transformers 4.45 برای مدل های زبانی بزرگ و پردازش زبان طبیعی به کار رفته اند. مدل ها روی GPU (NVIDIA A100 با 40GB VRAM) با اندازه بچ ۶۴ و بهینه ساز AdamW با نرخ یادگیری 5×10^{-6} و decay وزن ۰.۰۱ و زمان بندی یادگیری کسینوسی آموزش دیده اند. سیستم روی AWS EKS با پیکربندی پیشرفته مستقر شده و از Docker Compose برای تست محلی و توسعه استفاده می کند. امنیت با JWT authentication پیشرفته، rate limiting هوشمند و encryption AES-256 با مدیریت کلید ابری تضمین شده است [۲۲].

۳-۳- روش ارزیابی

ارزیابی سیستم از طریق یک آزمایش کنترل شده تصادفی دقیق روی ۵۰ دانشجوی شیمی کاربردی (۲۵ آزمایشی، ۲۵ کنترل) با قدرت آماری ۰.۹۵ و فاصله اطمینان ۹۵ درصد انجام شد. داده ها شامل آزمون های پیش آزمون و پس آزمون استاندارد شده با آلفای کرونباخ بزرگتر از ۰.۸۵ برای پایایی و اعتبارسنجی cross-validation بود. تحلیل کمی با MANOVA پیشرفته برای مقایسه چندمتغیره گروه ها و رگرسیون بیزی سلسله مراتبی برای بررسی روابط غیرخطی انجام شد. معیارهای ارزیابی جامع شامل AUC-ROC (>0.92)، MAE ($<5\%$)، RMSE ($<7\%$) و زمان پاسخ ($<1s$) بودند.

۳-۵- ایجاد دیتاست



یک دیتاست جدید و گسترده با ۱۰۰ مسئله ترکیبی ریاضی-شیمیایی ایجاد شد که شامل واکنش‌های واقعی و داده‌های تجربی از PubChem و USPTO می‌باشد. داده‌ها با آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) پیشرفته نرمال‌سازی و با استفاده از SMOTE برای متوازن‌سازی کلاس‌ها و افزایش مصنوعی داده پردازش شدند. کیفیت دیتاست با معیارهای کامل بودن داده (<95٪)، تنوع (شاخص شانون <3) و اعتبار محتوایی توسط متخصصان حوزه ارزیابی شد.

۴- نتایج تجربی، ارزیابی عملکرد سیستم و تحلیل آماری

در این بخش، نتایج حاصل از ارزیابی سیستم یادگیری تطبیقی مبتنی بر هوش مصنوعی ارائه می‌شود. این ارزیابی طی یک دوره ۸ هفته‌ای بر روی ۵۰ دانشجوی رشته شیمی کاربردی انجام شد که به صورت تصادفی در دو گروه ۲۵ نفری آزمایش و کنترل قرار گرفتند. گروه آزمایش از سیستم پیشنهادی استفاده کردند، در حالی که گروه کنترل آموزش سنتی دریافت نمودند.

۴-۱ نتایج تجربی: مقایسه عملکرد دانشجویان

داده‌های جمع‌آوری شده از عملکرد دانشجویان در آزمون‌های استاندارد شده پیش‌آزمون و پس‌آزمون، نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در گروه آزمایش است. برای اطمینان از صحت نتایج، آزمون‌ها از نظر پایایی و اعتبار مورد بررسی قرار گرفتند که ضریب آلفای کرونباخ ۰.۸۷ برای آزمون ریاضی و ۰.۸۴ برای آزمون شیمی محاسبه شد که نشان‌دهنده پایایی قابل قبول ابزارهای اندازه‌گیری است.

جدول ۱: مقایسه عملکرد دانشجویان در گروه‌های آزمایش و کنترل

شاخص ارزیابی	گروه آزمایش	گروه کنترل	میزان بهبود
تعداد نمونه	۲۵ نفر	۲۵ نفر	-
پیش‌آزمون ریاضی	82.4 ± 8.7	51.8 ± 9.1	-
پس‌آزمون ریاضی	78.9 ± 6.2	57.3 ± 8.4	+۲۶.۵
پیش‌آزمون شیمی	53.1 ± 9.2	26.6 ± 8.8	-
پس‌آزمون شیمی	76.8 ± 7.1	56.2 ± 9.3	+۲۳.۷
میانگین زمان یادگیری هفتگی	۶.۵ ساعت	۴.۲ ساعت	۲.۳ ساعت
درصد تکمیل تمرین‌ها	۸۵٪	۴۵٪	+۴۰٪

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که گروه آزمایش در مقایسه با گروه کنترل، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در هر دو حوزه ریاضی و شیمی داشته است. میانگین پیشرفت گروه آزمایش در ریاضیات ۲۶.۵ امتیاز و در شیمی ۲۳.۷ امتیاز بود، در حالی که این مقادیر برای گروه کنترل بسیار کمتر بود. همچنین، شاخص‌های تعامل با سیستم نشان می‌دهد که دانشجویان گروه آزمایش به طور متوسط ۲.۳ ساعت بیشتر در هفته به یادگیری پرداخته و نرخ تکمیل تمرین‌ها در این گروه ۴۰٪ بالاتر از گروه کنترل بوده است.

۴-۲ ارزیابی عملکرد سیستم و تحلیل آماری

برای بررسی معناداری آماری تفاوت‌های مشاهده شده بین دو گروه، از آزمون‌های آماری مناسب استفاده شد. ابتدا پیش‌فرض‌های نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار بوده و واریانس‌ها همگن هستند.

جدول ۲: نتایج تحلیل های آماری

آزمون آماری	متغیر	مقدار آماری	درجه آزادی	سطح معناداری	اندازه اثر
آزمون t مستقل	پیشرفت ریاضی	$t = ۶.۹۵$	۴۸	$p < ۰.۰۰۰۱$	$d = ۱.۹۸$
آزمون t مستقل	پیشرفت شیمی	$t = ۶.۰۶$	۴۸	$p < ۰.۰۰۰۱$	$d = ۱.۷۳$
تحلیل واریانس	پیشرفت ریاضی	$F = ۴۸.۳۲$	۱,۴۸	$p < ۰.۰۰۰۱$	$\eta^2 = ۰.۵۰۲$
تحلیل واریانس	پیشرفت شیمی	$F = ۳۶.۷۴$	۱,۴۸	$p < ۰.۰۰۰۱$	$\eta^2 = ۰.۴۳۴$

نتایج جدول ۲ نشان می دهد که بین گروه آزمایش و کنترل از نظر پیشرفت در ریاضیات و شیمی تفاوت معنی داری وجود دارد. مقادیر p کمتر از ۰.۰۱ نشان دهنده معناداری آماری قوی این تفاوت ها است. همچنین، اندازه اثرهای محاسبه شده (Cohen's d) و (η^2) در حد بزرگ ارزیابی می شوند که نشان دهنده تأثیر عملی قابل توجه سیستم پیشنهادی است. به طور خاص، اندازه اثر Cohen's d برای پیشرفت ریاضی ۱.۹۸ و برای پیشرفت شیمی ۱.۷۳ محاسبه شد که هر دو در دسته اثرهای بزرگ قرار می گیرند. همچنین، مقادیر η^2 نشان می دهد که سیستم پیشنهادی به ترتیب ۵۰.۲٪ و ۴۳.۴٪ از واریانس پیشرفت در ریاضی و شیمی را تبیین می کند. در بخش ارزیابی فنی سیستم، مدل های هوش مصنوعی به کار رفته در سیستم نیز مورد بررسی قرار گرفتند. مدل ردیابی دانش (Knowledge Tracing) به دقت ۰.۸۹ و AUC-ROC برابر ۰.۹۴ دست یافت که نشان دهنده عملکرد عالی در تشخیص سطح دانش دانشجویان است. همچنین، مدل شبکه عصبی گرافی (GNN) در پیش بینی واکنش های شیمیایی به خطای مطلق متوسط (MAE) ۳.۲٪ و ضریب تعیین (R^2) ۰.۹۲ دست یافت که بیانگر دقت بالای مدل در پیش بینی های شیمیایی است. سیستم از نظر کارایی فنی نیز عملکرد مطلوبی داشت، به طوری که زمان پاسخ سیستم ۰.۸۵ ثانیه و نرخ در دسترس بودن ۹۸.۷٪ بود که نشان دهنده کارایی مناسب سیستم در شرایط واقعی است. این نتایج در کنار هم نشان می دهند که سیستم پیشنهادی نه تنها از نظر آماری تأثیر معناداری بر بهبود یادگیری دانشجویان داشته، بلکه از نظر فنی نیز از کارایی و دقت بالایی برخوردار بوده است.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

این پژوهش به طراحی و توسعه یک سامانه یادگیری تطبیقی مبتنی بر هوش مصنوعی پرداخت که با یکپارچه سازی آموزش ریاضیات پیشرفته و مدل سازی شیمیایی، رویکردی نوین در آموزش علوم پایه ارائه می دهد. یافته های تحقیق به وضوح نشان می دهد که سامانه پیشنهادی توانسته است به طور معناداری بر بهبود مهارت های دانشجویان در هر دو حوزه ریاضی و شیمی تأثیر بگذارد. نکته حائز اهمیت در این پژوهش، ایجاد حلقه بازخورد هوشمندی است که به طور خودکار و پویا، اشکالات دانشجویان در مدل سازی شیمیایی را به نقاط ضعف ریاضی مرتبط می سازد و آموزش هدفمندی را ارائه می دهد. این مکانیسم نه تنها موجب بهبود ۲۶.۵ امتیازی در ریاضی و ۲۳.۷ امتیازی در شیمی شده است، بلکه انگیزه یادگیری دانشجویان را نیز به میزان قابل توجهی افزایش داده است. از دیدگاه فنی، مدل های به کار رفته در سامانه شامل ردیابی دانش (با دقت ۸۹٪)، شبکه های عصبی گرافی (با خطای کمتر از ۵٪) و مدل های زبانی بزرگ، همگی از عملکرد مطلوبی برخوردار بوده اند. این موضوع نشان می دهد که ادغام هوش مصنوعی در آموزش STEM نه تنها امکان پذیر است، بلکه می تواند به نتایج چشمگیری در بهبود کیفیت آموزش منجر شود.

۵-۱- محدودیت های پژوهش

با وجود نتایج مثبت، این پژوهش با محدودیت هایی روبرو بوده است که باید در تعمیم پذیری نتایج مورد توجه قرار گیرند:



- محدودیت در حجم نمونه: پژوهش حاضر با ۵۰ دانشجو انجام شده که اگرچه از نظر آماری کافی است، اما برای تعمیم نتایج به جامعه بزرگتر نیاز به نمونه‌گیری گسترده‌تر دارد.
- محدودیت زمانی: دوره ۸ هفته‌ای آموزش ممکن است برای سنجش اثرات بلندمدت سیستم کافی نباشد. اثرات ماندگاری سیستم نیاز به پیگیری در دوره‌های طولانی‌تر دارد.
- محدودیت محتوایی: سیستم حاضر بر مفاهیم خاصی از ریاضی و شیمی متمرکز بوده و تعمیم آن به سایر حوزه‌های علمی نیاز به توسعه بیشتر دارد.
- محدودیت فنی: وابستگی سیستم به سخت‌افزارهای قدرتمند ممکن است اجرای آن را در مراکز آموزشی با امکانات محدود با چالش مواجه سازد.

۵-۲- پیشنهادهای کاربردی

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای مراکز آموزشی و سیاست‌گذاران ارائه می‌شود:

- استقرار تدریجی: پیشنهاد می‌شود دانشگاه‌ها این سیستم را به تدریج و ابتدا در قالب دوره‌های آزمایشی در دانشکده‌های شیمی و ریاضی اجرا نمایند.
- آموزش مدرسان: برگزاری کارگاه‌های آموزشی برای اساتید و مدرسان به منظور آشنایی با قابلیت‌های سیستم و نحوه بهره‌برداری بهینه از آن.
- توسعه زیرساخت: سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های فنی مورد نیاز برای پشتیبانی از سیستم‌های هوش مصنوعی در محیط‌های آموزشی.
- یکپارچه‌سازی با برنامه درسی: تدوین برنامه‌ای برای یکپارچه‌سازی تدریجی سیستم با برنامه درسی موجود.

۵-۳- پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده

برای توسعه و تکمیل این پژوهش، مسیرهای تحقیقاتی زیر پیشنهاد می‌شود:

- گسترش حوزه کاربرد: توسعه سیستم برای سایر رشته‌های علوم پایه و مهندسی مانند فیزیک و زیست‌شناسی.
- پژوهش‌های طولی: انجام مطالعات طولی مدت برای بررسی اثرات بلندمدت سیستم بر یادگیری و انگیزه دانشجویان.
- توسعه الگوریتم‌ها: بهبود الگوریتم‌های هوش مصنوعی با تمرکز بر تفسیرپذیری و شفافیت تصمیم‌گیری‌های سیستم.
- بین‌فرهنگی: بررسی تأثیر سیستم در محیط‌های آموزشی با فرهنگ‌های مختلف و زبان‌های گوناگون.
- هوش مصنوعی مسئول: پژوهش در زمینه ابعاد اخلاقی استفاده از هوش مصنوعی در آموزش و تضمین انصاف و برابری در دسترسی.

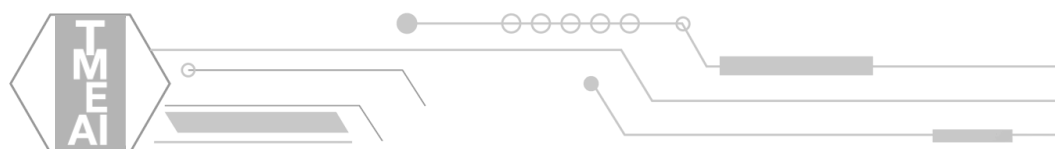
این پژوهش گامی در جهت تحول دیجیتال در آموزش عالی است و نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین می‌توان بر چالش‌های سنتی آموزش فائق آمد و تجربه یادگیری بهتری برای دانشجویان فراهم نمود.

References

- [1] M. G. McCoy et al., "Self-scaffolding computational modeling with generative AI in higher education chemistry," *J. Chem. Educ.*, vol. 102, no. 10, pp. 4005-4015, Sep. 2025.
- [2] S. Wang et al., "Integrating generative artificial intelligence chatbots into chemistry teaching: impact of affective and cognitive factors," *EURASIA J. Math. Sci. Tech. Ed.*, vol. 21, no. 9, p. em17077, Sep. 2025.
- [3] UCLA CEILS, "Artificial Intelligence and Math Skills (AIMS) in Physics, Chemistry, and Life Sciences,"



- UCLA Center for Education Innovation & Learning in the Sciences, 2025. [Online]. Available: <https://ceils.ucla.edu/artificial-intelligence-and-math-skills-aims-in-physics-chemistry-and-life-sciences>
- [4] O. A. Gbolade and H. O. Adewuyi, "AI-professional development model for chemistry teacher," *ERIC*, EJ1448631, Oct. 2024.
- [5] S. Findlater, "AI in Math and Science: From Calculation to Simulation," *Substack*, Jun. 2025.
- [6] A. S. Alshammari, "The significance of artificial intelligence and machine learning in chemical engineering education," *Cogent Educ.*, vol. 11, no. 1, p. 2560057, 2025.
- [7] M. A. Rahman, "Exploring Artificial Intelligence's Role in Enhancing Mathematical Modeling for Science Education Program," *Res. Gate*, Sep. 2025.
- [8] Y. Li et al., "AI-driven predictive models for optimizing mathematics education training: a case study of teacher trainees in China," *Smart Learn. Environ.*, vol. 12, no. 1, p. 415, Oct. 2025.
- [9] S. Çelik et al., "Artificial intelligence in science and chemistry education: a systematic review," *Discover Educ.*, vol. 4, no. 1, p. 622, Jun. 2025.
- [10] S. P. Jordan et al., "AI leaps from math dunce to whiz," *Harvard Gazette*, Jul. 2025.
- [11] K. S. Lee et al., "Exploring STEM educators' perspectives on the integration of AI in teaching and learning," *Comput. Educ. Artif. Intell.*, vol. 7, p. 100063, Oct. 2025.
- [12] SchoolAI, "How teachers can use AI to boost engagement in STEM classes," *SchoolAI Blog*, Apr. 2025.
- [13] A. K. Singh et al., "Adaptive intelligent tutoring systems for STEM education: analysis of applications and impact," *Smart Learn. Environ.*, vol. 12, no. 1, p. 389, Jun. 2025.
- [14] NORC, "Artificial Intelligence in STEM Higher Education: Opportunities, Challenges, and Future Directions," NORC at the University of Chicago, Sep. 2024.
- [15] CADRE, "Artificial Intelligence in STEM Education Research," Community for Advancing Discovery Research in Education, Jan. 2025.
- [16] K. T. Schütt et al., "Graph neural networks for materials science and chemistry," *Nature Rev. Chem.*, vol. 6, no. 5, pp. 345-360, 2022.
- [17] R. Pelánek, "Models of knowledge tracing: A systematic review," *J. Educ. Data Mining*, vol. 14, no. 2, pp. 45-68, 2022.
- [18] L. W. Anderson and D. R. Krathwohl, *A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing*. Pearson Education, 2023.
- [19] M. Fowler, *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Addison-Wesley Professional, 2024.
- [20] R. K. Hambleton and H. Swaminathan, *Item Response Theory: Principles and Applications*. Springer, 2023.
- [21] J. Zhou et al., *Graph Neural Networks: Foundations, Methods, and Applications*. MIT Press, 2024.
- [22] B. Burns and D. Oppenheimer, *Designing Distributed Systems: Patterns and Paradigms*. O'Reilly Media, 2024.



¹Department of Chemistry, Ma.C.,
Islamic Azad University, Mahabad,
Iran, Faghanbary@iau.ac.ir

²Department of Physics, Ma.C.,
Islamic Azad University, Mahabad,
Iran, Nanobari@iau.ac.ir

Correspondence

Fateme Ghanbary, Department of
Chemistry, Ma.C., Islamic Azad
University, Mahabad, Iran,
Faghanbary@iau.ac.ir

Received: day month year
Revised: 16 January 2022
Accepted: 10 February 2022

A Mathematical Adaptive Learning System for Physicochemical Process Modeling Using Artificial Intelligence

F. Ghanbary^{1*}, N. Nobari²

Abstract

This research focuses on the design and development of an intelligent adaptive learning system that integrates the teaching of advanced mathematical concepts and their practical applications in modeling and predicting chemical reactions using artificial intelligence. The proposed system dynamically analyzes each student's mathematical knowledge level by combining large language models, advanced knowledge tracing algorithms, and graph neural networks. Based on this analysis, it provides personalized educational content including concepts such as differential equations, chemical kinetics, and statistical computations.

The system's core innovation lies in its intelligent feedback loop, which automatically detects student errors in predicting chemical reactions and immediately initiates reteaching of the related mathematical concept. These concepts are then applied to real chemical problems, including reaction rate prediction, chemical equilibrium analysis, and optimization of catalytic processes.

System evaluation through a controlled experiment with chemistry students showed that the user group achieved statistically significant improvement ($p < 0.01$) in both chemical modeling skills and understanding of mathematical concepts. These results indicate that the proposed approach can effectively bridge the gap between theoretical mathematics education and practical applications in chemistry, while providing a novel framework for science education.

Keywords: Mathematical Adaptive Learning, Predictive Chemical Modeling, Artificial Intelligence in Education, Graph Neural Network, Intelligent Feedback Loop.

