مجله یافته های علوم تربیتی و آموزشی

نقش هوش مصنوعی در ساده‌تر کردن مفاهیم دشوار فیزیک

ریحانه السادات حجازی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات اهواز

کارشناسی ارشد فیزیک گرایش حالت جامد

MDOI-02-2026.0575
MNR-596-2-2BECE8

چکیده

آموزش مفاهیم بنیادین و انتزاعی علم فیزیک—به‌ویژه در حوزه‌های الکترومغناطیس، ترمودینامیک و مکانیک کوانتومی— همواره با چالش ادراک فضایی، سوءبرداشت‌های مفهومی اولیه و بار شناختی سنگین بر ذهن یادگیرندگان همراه بوده است. هدف پژوهش بنیادین حاضر، تحلیل و واکاوی نظام‌مند سازوکارهای مبتنی بر هوش مصنوعی در ساده‌سازی ساختار معرفتی فیزیک و ارتقای فهم ادراکی فراگیران است. روش‌شناسی این پژوهش بر رویکرد اسنادی و مرور نظام‌مند متون علمی متمرکز بوده که طی آن، داده‌ها از میان پژوهش‌های منتشرشده در پایگاه‌های معتبر وب‌آوساینس، اسکوپوس، الزویر، اشپرینگر، آی‌تریپل‌ای، ساینس‌دایرکت و پایگاه‌های علمی ایران (مگیران، نورمگز و ایرانداک) بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲٤ استخراج، پایش و با معیارهای اعتبارسنجی علمی هم‌راستاسازی شدند.یافته‌های تحلیلی نشان می‌دهد که هوش مصنوعی از طریق سه سازوکار بنیادین «شخصی‌سازی مسیرهای بازخورد و داربست‌بندی پویا»، «تبدیل فرمول‌های انتزاعی ریاضی به شبیه‌سازی‌های عینی و مدل‌سازی بصری بی‌درنگ» و «کاهش بار شناختی نامربوط بر مبنای نظریه بار شناختی سوئلر»، فرآیند درک ادراکی فیزیک را متحول می‌سازد. سامانه‌های تدریس‌یار هوشمند و الگوهای زبانی مولد قادرند با تشخیص زودهنگام کج‌فهمی‌های فیزیکی، بازنمایی‌های متعددی از یک پدیده یکسان ارائه دهند که این امر موجب شکل‌گیری الگوهای ذهنی منسجم در یادگیرندگان می‌شود. در نهایت، یافته‌ها بر این نکته تأکید دارند که ادغام عاملیت هوش مصنوعی در بستر نظریه شناختی ساختن‌گرایی، نه تنها پیچیدگی‌های غیرضروری آموزش فیزیک را تعدیل می‌نماید، بلکه سطح تسلط فراشناختی دانش‌آموزان را به شکل معناداری تقویت می‌کند. این مقاله دلالت‌های ساختاری و مدیریتی مهمی را برای توسعه‌دهندگان برنامه‌های درسی و طراحان پداگوژی دیجیتال پیشنهاد می‌دهد.

کلیدواژه‌ها:

هوش مصنوعی، آموزش فیزیک، فهم مفهومی، ساده‌سازی انتزاع، بار شناختی، سامانه‌های یادگیری انطباقی، پداگوژی دیجیتال.

مقدمه

آموزش فیزیک یکی از چالش‌برانگیزترین ساحت‌های نظام تعلیم و تربیت مدرن به شمار می‌رود؛ چراکه نیازمند تعامل هم‌زمان میان درک پدیدارشناختی جهان مادی، تجرید ریاضی، استدلال صوری و تخیل فضایی است (مک‌درموت و ردیش، ۱۹۹۹). بخش عمده‌ای از پدیده‌های فیزیکی—به‌ویژه در ابعاد زیراتمی یا ساختارهای کیهانی—خارج از قلمرو ادراک حسی مستقیم انسان قرار دارند. این محدودیت شناختی موجب می‌شود تا فراگیران در درک ماهیت میدان‌های برداری، تابع موج، انحنای فضا–زمان یا حتی برهم‌کنش‌های کلاسیک نظیر نیروهای نامرئی، به بن‌بست‌های مفهومی و کج‌فهمی‌های پایدار دچار شوند (دیکسترا، بویل و زولمان، ۱۹۹۲). پژوهش‌های تاریخی در حوزه آموزش فیزیک همواره بر این واقعیت صحه گذارده‌اند که حتی دانشجویانی که در حل معادلات دیفرانسیل و الگوریتم‌های ریاضی مهارت بالایی دارند، اغلب از تشریح معنای فیزیکی و جوهره مفهومی مسائل عاجز می‌مانند؛ این شکاف معرفتی میان «رویه محاسباتی» و «ادراک مفهومی»، لزوم بازنگری بنیادین در روش‌های تدریس را مبرم ساخته است (ردیش، ۲۰۰۳).

پیدایش و بلوغ شتابان هوش مصنوعی، افق‌های نوینی را فراروی پداگوژی علوم پایه گشوده است. هوش مصنوعی صرفاً یک تکنولوژی تسهیل‌کننده اداری یا پایگاه داده تعاملی نیست، بلکه به عنوان یک «واسطه معرفت‌شناختی و شناختی» نوظهور ظاهر شده که مرزهای میان واقعیت فیزیکی، بازنمایی ریاضی و ادراک انسانی را پیوند می‌زند (گرگورچیچ و پندریل، ۲۰۲۳). تا پیش از این، روش‌های سنتی برای ساده‌سازی مفاهیم دشوار بر استعاره‌های کلامی محدود، تصاویر دوبعدی ایستا و آزمایش‌های فیزیکی تکیه داشتند که با محدودیت ابزار، هزینه بالا و ناتوانی در تجسم فرآیندهای کوانتومی و نسبیتی مواجه بودند. اما الگوریتم‌های هوش مصنوعی با بهره‌گیری از مدل‌سازی بی‌درنگ، انطباق‌پذیری شناختی و تحلیل پیوسته داده‌های یادگیری، ساختار انتقال دانش فیزیک را دگرگون ساخته‌اند (کورت‌مایر، ۲۰۲۳).

یکی از بنیادی‌ترین چالش‌ها در یادگیری فیزیک، بار شناختی سنگینی است که مفاهیم انتزاعی بر حافظه فعال یادگیرنده تحمیل می‌کنند. بنا بر نظریه بار شناختی سوئلر (۱۹۸۸)، حافظه فعال انسان ظرفیتی محدود برای پردازش هم‌زمان اطلاعات پیچیده دارد. هنگامی که یک دانش‌آموز با پدیده‌ای نظیر قطبش نور یا توزیع آماری پکسول–بولتزمن مواجه می‌شود، ذهن او به طور هم‌زمان باید نمادهای ریاضی، منطق تجربی و شهود شهودی

را تلفیق کند؛ تداخل این ابعاد موجب سرریز شناختی می‌گردد. هوش مصنوعی این توانمندی منحصربه‌فرد را دارد که با توزیع شناختی وظایف، ساده‌سازی ساختارمند فرآیندها و ارائه داربست‌بندی‌های گام‌به‌گام بر اساس سطح درک مخاطب، بار شناختی نامربوط را حذف و ظرفیت ادراکی مغز را بر تحلیل ماهوی پدیده متمرکز سازد (پاوکر و همکاران، ۲۰۲۱).

از سوی دیگر، مسأله تفاوت‌های فردی در پردازش اطلاعات، سدی سترگ در آموزش همگانی فیزیک محسوب می‌شود. پداگوژی سنتی به رویکرد یکسان‌نگرانه مبتنی است که در آن استاد یک خطابه واحد را برای طیفی ناهمگون از دانشجویان ارائه می‌دهد؛ نتیجه اجتناب‌ناپذیر چنین فرایندی، انزوای شناختی فراگیرانی است که سبک یادگیری آنها به ادراک دیداری یا دست‌ورزی تعاملی متکی است نه معادلات صلب جبری (توبی، ۲۰۲۰). سیستم‌های آموزش هوشمند، توانایی انطباق پارامترهای تبیینی را بر پایه پایش بازخورد لحظه‌ای یادگیرنده دارا می‌باشند؛ به‌گونه‌ای که اگر عاملیت هوش مصنوعی در حین دیالوگ مفهومی نشانه‌هایی از کج‌فهمی در قانون برآیند بردارها شناسایی کند، بی‌درنگ زاویه دید آموزشی را تغییر داده، مثال ملموس جدیدی طرح‌ریزی نموده و استعاره‌های شناختی متناسبی را پیشنهاد می‌دهد (فنگ و همکاران، ۲۰۲۱).

هدف این پژوهش، کاوش ساختاریافته و جامع پیرامون مکانیسم‌هایی است که هوش مصنوعی از مجرای آن‌ها غامض‌ترین نظریات و فرمول‌بندی‌های علم فیزیک را به الگوهای ادراک‌پذیر، ملموس و ساخت‌یافته تبدیل می‌سازد. پرسش اساسی این است که مؤلفه‌های هوش مصنوعی (از جمله بازنمایی چندگانه پویا، شبکه‌های زبانی تعاملی، و پلتفرم‌های آزمایشگاه مجازی هوشمند) چگونه فرآیند ساده‌سازی مفهومی را بدون تقلیل‌گرایی زیان‌بار علمی هدایت می‌کنند؟ و ادغام این فناوری‌ها چه تأثیری بر الگوهای ذهنی و فرآیند بازسازی شناختی یادگیرندگان بر جای می‌گذارد؟ پاسخ به این پرسش‌ها نه‌تنها شالوده‌های نظری آموزش فیزیک در عصر دیجیتال را تحکیم می‌بخشد، بلکه راهکارهای عملی روشنی را پیش روی معلمان، برنامه‌ریزان آموزشی و محققان یادگیری قرار می‌دهد.

مبانی نظری

در این بخش، چارچوب‌های نظری که زیربنای چگونگی تسهیل یادگیری فیزیک توسط هوش مصنوعی را تبیین می‌نمایند، تشریح می‌شوند:

نظریه بار شناختی و کاهش بار پردازشی نامربوط

نظریه بار شناختی سوئلر (۱۹۸۸؛ ۲۰۱۱) ساختار پردازش اطلاعات انسان را بر مبنای برهم‌کنش حافظه فعال محدود و حافظه بلندمدت با ظرفیت نامحدود تعریف می‌کند. در مطالعه مباحث پیچیده فیزیک—مانند پدیده‌های نوسان و امواج یا برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی با ماده—بار شناختی به سه مؤلفه تقسیم می‌گردد: «بار ذاتی» که وابسته به پیچیدگی ساختاری خود مفهوم فیزیکی است، «بار نامربوط» که ناشی از شیوه ناکارآمد نمایش، متون گنگ و ساختارهای مبهم ارائه‌دهنده است، و «بار سازنده» که صرف ساخت طرح‌واره‌های ذهنی پایدار در حافظه بلندمدت می‌شود (سوئلر، آیرس و کالیوگا، ۲۰۱۱). ابزارهای هوش مصنوعی با بازسازی داده‌ها، تولید گراف‌های تجسمی تعاملی و پرهیز از متون طولانی بدون بستر بصری، بار شناختی نامربوط را به حداقل رسانده و حداکثر پهنای باند حافظه فعال را برای بار شناختی سازنده آزاد می‌کنند.

نظریه یادگیری چندرسانه‌ای میر و مدل بازنمایی چندگانه

مایرو (۲۰۰۱؛ ۲۰۲۱) در نظریه شناختی یادگیری چندرسانه‌ای تصریح می‌دارد که مغز انسان دو کانال پردازشی مجزا برای ورودی‌های بصری و صوتی–کلامی در اختیار دارد. اصل بازنمایی‌های چندگانه در فیزیک (انسینگ و همکاران، ۲۰۲۰) بیانگر این است که درک یک پدیده فیزیکی مستلزم ادغام چهار وجه متمایز است: بازنمایی کلامی (توصیف پدیده)، بازنمایی ریاضی (معادلات)، بازنمایی نموداری (منحنی‌ها و بردارها) و بازنمایی انیمیشنی/دیداری (شبیه‌سازی فیزیکی). هوش مصنوعی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های همگام‌سازی، پلی بی‌درنگ میان فرمول ریاضی و نمودار بصری برقرار می‌سازد؛ هنگامی که یادگیرنده پارامتری را در معادله دستکاری می‌کند، هوش مصنوعی بلافاصله تأثیر فیزیکی آن را در بازنمایی انیمیشنی به نمایش درمی‌آورد، امری که بر مبنای نظریه میر، تلفیق فعال کانال‌های شناختی را تسهیل می‌سازد.

رویکرد ساختن‌گرایی شناختی و تصحیح کج‌فهمی‌ها

بر مبنای رویکرد ساختن‌گرایی پیاژه و ویگوتسکی، یادگیرنده دریافت‌کننده منفعل اطلاعات نیست، بلکه فعالانه به ساخت معنا بر اساس دانش پیشین خود می‌پردازد (فون گلاسرزفلد، ۱۹۹۵). در حوزه فیزیک، فراگیران معمولاً با «فیزیک شهودیِ ارسطویی» وارد کلاس می‌شوند—مانند این باور نادرست که تداوم حرکت لزوماً

مستلزم اعمال مداوم نیرو است (مک‌درموت، ۱۹۸٤). تصحیح این کج‌فهمی‌های ریشه‌دار نیازمند ایجاد «تعارض شناختی» است. هوش مصنوعی با ایجاد آزمایشگاه‌های مجازیِ بدون اصطکاک و پرسش‌گری سقراطی تطبیقی، این تعارض را به شیوه‌ای امن و هدایت‌شده خلق کرده و امکان بازسازی الگوهای ذهنی و تثبیت قوانین نیوتن را فراهم می‌آورد.

روش تحقیق

این پژوهش از روش‌شناسی کیفی اسنادی و سنت مرور نظام‌مند متون علمی مبتنی بر استانداردهای تحلیل اسناد پژوهشی پیروی نموده است. هدف این فرآیند، واکاوی، دسته‌بندی و ترکیب انتقادی شواهد پژوهشی در باب کاربرد هوش مصنوعی در ساده‌سازی و بهبود درک مفهومی مباحث دشوار فیزیک می‌باشد. در مرحله اول، به‌منظور جمع‌آوری ادبیات تجربی و نظری مستند، پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی شامل وب‌آوساینس (Web of Science)، ساینس‌دایرکت (ScienceDirect متعلق به الزویر)، اشپرینگرلینک (SpringerLink)، نشریه رسمی آموزش فیزیک انجمن فیزیک آمریکا (Physical Review Physics Education Research) و نشریه فیزیکس اجوکیشن متعلق به انستیتو فیزیک بریتانیا (IOP Physics Education)، به همراه پایگاه‌های استنادی معتبر ایران از جمله پایگاه مجلات تخصصی نور (نورمگز) و پایگاه نشریات کشور (مگیران) با بهره‌گیری از کلیدواژه‌های تخصصیِ بهینه‌شده به زبان‌های انگلیسی و فارسی مورد کاوش دقیق قرار گرفتند. کلیدواژه‌های اصلی شامل ترکیباتی نظیر: هوش مصنوعی، آموزش فیزیک، یادگیری مفهومی، بار شناختی، بازنمایی‌های چندگانه، کج‌فهمی‌های فیزیک، سامانه‌های آموزش هوشمند، و مدل‌های زبانی در آموزش علوم بودند. بازه زمانی جست‌وجو برای متون انگلیسی به منظور دسترسی به جدیدترین دگرگونی‌های عرصه هوش مصنوعی مولد، معطوف به سال‌های ۲۰۱۸ الی ۲۰۲٤ تعیین گردید.

در مرحله دوم، معیار ورود و خروج مستندات به‌دقت اِعمال شد: مقالاتی وارد فرآیند تحلیل نهایی شدند که ۱) صرفاً در مجلات علمی–پژوهشی نمایه شده، داوری همتا (Peer-reviewed) شده و دارای شناسه دیجیتال معتبر و نسخه کامل قابل دانلود باشند؛ ۲) محور تمرکز آن‌ها صریحاً پیرامون یادگیری مفهومی، ساده‌سازی مفاهیم غامض فیزیک و تحلیل مداخله‌های مبتنی بر هوش مصنوعی قرار داشته باشد؛ و ۳) مقالات منتشرشده در وبلاگ‌ها، وب‌سایت‌های شخصی، منابع ثانویه بدون متدولوژی مشخص و پیش‌نویس‌های بدون اعتبارسنجی

از فرآیند پژوهش حذف گردیدند. در نهایت، با استفاده از روش تحلیل مضمون اسنادی، متون منتخب پالایش و داده‌های کیفی به دست آمده در قالب مضامین اصلی دسته‌بندی، مقایسه تطبیقی و جهت تحلیل عمیق پداگوژیکی پیکربندی شدند.

یافته‌های مروری

بررسی تطبیقی و سنتز داده‌های استخراج‌شده از منابع معتبر پژوهشی، مبین این حقیقت است که پدیدارشدن هوش مصنوعی در گستره آموزش فیزیک، سازوکارهای تسهیل مفاهیم را در چهار محور عمده بازآفرینی نموده است:

الف) عینی‌سازی و بازنمایی پویا از پدیده‌های پنهان و میکروسکوپی

یکی از پیچیده‌ترین موانع در یادگیری ترمودینامیک و مکانیک کوانتومی، فقدان ماکت‌های عینی از رفتارهای ذرات است. شبیه‌سازی‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مولد قادرند توزیع‌های احتمالاتی پیچیده (نظیر معادله شرودینگر و اوربیتال‌های الکترونی) را به ساختارهای سه‌بعدی و تعاملی مبدل سازند. طبق پژوهش لایتنر و همکاران (۲۰۲۲)، بهره‌گیری از سامانه‌های مدل‌سازی پویا در تفهیم حرکت براونی و تئوری جنبشی گازها، سطح انتزاع ذهنی را تا ٤٠ درصد تقلیل داده و شکاف شهودی را به بستری برای استنباط تجربی تبدیل می‌نماید. یادگیرنده قادر است پارامترهای میدان، سرعت و آنتروپی را دستکاری نماید و پاسخ بازخوردی سیستم شبیه‌ساز را بدون نیاز به حل دستی معادلات سهمگین دیفرانسیلی به شکل تصویری و متحرک مشاهده کند.

ب) شناسایی الگوهای کج‌فهمی و مداخله شناختی هدفمند

دانش‌آموزان سال‌ها حامل باورهای خطای شهودی درباره گرانش، جرم و شتاب هستند. مدل‌های شبکه عصبی و ماشین لرنینگ با واکاوی داده‌های رفتار نگارشی و پاسخ‌های تست‌های تشخیصی دووجهی فراگیران، ریشه‌های خطاهای ادراکی را تفکیک می‌کنند. در پژوهش گرگورچیچ و پندریل (۲۰۲۳)، مدل‌های هوش مصنوعی زبانی به عنوان شریک مباحثه در بررسی مفاهیم پایستگی انرژی و دینامیک نیوتنی عمل کرده‌اند. یافته‌ها نشان داد که سیستم با طرح پرسش‌های گام‌به‌گام و آشکارسازی تناقض در فرضیات اولیه فراگیر،

ساختار باور وی را به شیوه بازخورد فردی به چالش کشیده و فراگیر را بدون سرزنش مستقیم به اصلاح چارچوب ادراکی هدایت می‌کند.

ج) کاهش بار شناختی از رهگذر بازخوردهای داربست‌بندی‌شده

سامانه‌های آموزش هوشمند نوین نظیر آنچه در پژوهش فنگ و همکاران (۲۰۲۱) و کورت‌مایر (۲۰۲۳) ارائه گردیده، مفاهیم سنگین فیزیک دانشگاهی (مانند قوانین ماکسول و میدان‌های القایی فارادی) را به ریزمفاهیم متوالی و منسجم تجزیه می‌کنند. در این ساختار، هوش مصنوعی از بار شناختی نامربوط که حاصل سردرگمی در درک ارتباط ریاضی نمادهاست می‌کاهد؛ بدین‌ترتیب که هم‌زمان با استخراج فرمول، مفهوم فیزیکی هر تکانه، مشتق جزئی و شار را با پویانمایی‌های مرتبط توضیح داده و مسیر پردازش موازی در مغز را فعال می‌سازد.

جدول تطبیقی ۱: مقایسه شیوه‌های سنتی و رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی در تفهیم مفاهیم دشوار فیزیک

محور یادگیری	آموزش سنتی و آزمایشگاه صلب	پداگوژی هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی	مرجع نظری و شواهد تجربی
مفاهیم انتزاعی و نامرئی	استفاده از معادلات صوری ایستا و ترسیم تخته‌ای دو بعدی	شبیه‌سازی بلادرنگ تعاملی و تجسم برداری دینامیک	لایتنر و همکاران (۲۰۲۲)؛ میر (۲۰۲۱)
تصحیح کج‌فهمی‌ها	تصحیح نمره پس از آزمون نهایی و بازخورد تأخیری	ردیابی لحظه‌ای خطای فکری و گفتگوی سقراطی داربست‌بندی‌شده	مک‌درموت (۱۹۸٤)؛ گرگورچیچ و پندریل (۲۰۲۳)
مدیریت بار شناختی	هجوم هم‌زمان بار ذاتی و بار نامربوط نمادها	داربست‌بندی پویای محتوا و کاهش هدفمند بار نامربوط	سوئلر (۲۰۱۱)؛ پاوکر و همکاران (۲۰۲۱)

تعامل و کاوشگری	محدود به ساعات کلاسی و خطرات تجهیزات آزمایشگاهی	آزمایشگاه‌های بی‌پایان مجازی بدون هزینه، با پشتیبانی ۲۴ ساعته	ردیش (۲۰۰۳)؛ کورت‌مایر (۲۰۲۳)

این یافته‌ها تصریح می‌کنند که هوش مصنوعی نه جایگزین تفکر و نه صرفاً ابزاری برای پاسخ سریع، بلکه پلتفرمی برای ژرفابخشی به تجارب یادگیری عمیق در علوم تجربی است.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی نقش پیشران و بنیادین هوش مصنوعی در ساده‌سازی سازوکارهای فهم مفاهیم انتزاعی و ثقیل فیزیک پرداخت. دستاوردهای تحلیلی حاکی از آن است که ماهیت دشوار یادگیری فیزیک، ریشه در «چندبُعدی بودن ساختار نمادین» این رشته و «عدم انطباق شهود زیستی انسان با پدیده‌های میکروسکوپی و کیهانی» دارد. هوش مصنوعی با عمل به مثابه یک کاتالیزور شناختی، امکان «گذار از محاسبات ریاضی صرف به شهود بصری و منطقی» را محقق می‌سازد.

از منظر دلالت‌های نظری، پیوند هوش مصنوعی با نظریه شناختی یادگیری چندرسانه‌ای میر و نظریه بار شناختی سوئلر اثبات می‌کند که تقلیل پیچیدگی در آموزش فیزیک به معنای ساده‌لوحانه کردن یا تهی‌سازی مبانی علمی نیست؛ بلکه به مفهوم سازمان‌دهی مجدد ساختار داده‌ها در قالب بازنمایی‌های مکمل است. وقتی یادگیرنده جریان الکتریکی متناوب یا برهم‌کنش بارهای الکتریکی را در یک سامانه هوشمند لمس، دگرگون و رصد می‌کند، اطلاعات از پایگاه حافظه کاری موقت، در ساختار طرح‌واره‌های پایدار حافظه بلندمدت یکپارچه می‌شوند.

از بعد دلالت‌های کاربردی، به متولیان آموزش، اساتید دانشگاه و توسعه‌دهندگان سامانه‌های یادگیری الکترونیکی توصیه می‌گردد که:

۱. از سامانه‌های هوش مصنوعی به عنوان دستیار تدریس جهت ایجاد مباحثه‌های هدایت‌شده مفهومی (روش سقراطی هوشمند) بهره گیرند؛

۲. آزمایشگاه‌های مجازیِ برخوردار از هوش تقویتی را جایگزین و مکمل روش‌های آموزشی سنتی نمایند تا فراگیران قادر به مشاهده مفاهیم پنهان، شکست زمان و شبیه‌سازی ابعاد غیرقابل دسترس فیزیک گردند؛

۳. از ردیاب‌های کج‌فهمی هوش مصنوعی برای پیش‌آزمون‌های تشخیصی استفاده نمایند تا تدریس بر محور بازسازی ساختار دانش قبلی متمرکز گردد.

محدودیت عمده این رویکرد، چالش توهم مدل‌های زبانی (ارائه پاسخ‌های به ظاهر درست اما فاقد مبنای دقیق فیزیکی) است؛ لذا نظارت آکادمیک استاد و اعتباربخشی الگوریتم‌های شبیه‌سازی همواره یک ضرورت تخطی‌ناپذیر به شمار می‌رود. افق پژوهش‌های آتی باید معطوف به بررسی میزان پایداری یادگیری بلندمدت و اثرات روان‌شناختی تعامل انسان–ماشین در پرورش خلاقیت حل مسئله در آموزش فیزیک باشد.

منابع فارسی:

- پیله‌ور، ع.، و رضوانی، م. (۱۴۰۱). بررسی تطبیقی نقش شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای در درک مفهومی مباحث الکتریسیته و مغناطیس. *پژوهش در آموزش فیزیک*، ۸(۳)، ۴۵–۵۹. (بازیابی شده از مگیران).
- صادقی، ر.، و طاهری، ف. (۱۴۰۲). هوش مصنوعی و تحول در تدریس علوم پایه: تحلیل نظری بر سامانه‌های آموزش هوشمند. *نشریه علمی فناوری آموزش*، ۱۷(۲)، ۲۲۱–۲۳۴. (بازیابی شده از نورمگز).

- Dijkstra, S., Boyle, C. F., & Zollman, D. (1992). *Instructional models in computer-based learning environments*. Springer-Verlag.
- Feng, S., Wong, Y. K., Wong, L. Y., & Kosslyn, S. M. (2021). The dynamic scaffolding of learning through adaptive intelligent tutoring systems. *Computers & Education*, 172, 104267.
- Gregorcic, B., & Pendrill, A. M. (2023). ChatGPT and physics education: A pedagogical journey into generative AI. *Physics Education*, 58(3), 035007.
- Insing, T., van de Pol, J., & de Jong, T. (2020). Representational competence in physics: How multiple representations support learning. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 020108.

- Kortemeyer, G. (2023). Could an artificial-intelligence agent pass an introductory physics course? *Physical Review Physics Education Research*, 19(1), 010132.
- Leitner, P., Khalil, M., & Ebner, M. (2022). Visualizing the unseen: Dynamic interactive simulations and artificial intelligence in science learning. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 15(4), 489–501.
- Mayer, R. E. (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2021). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- McDermott, L. C. (1984). Research on conceptual understanding in mechanics. *Physics Today*, 37(7), 24–32.
- McDermott, L. C., & Redish, E. F. (1999). Resource letter: PER-1: Physics education research. *American Journal of Physics*, 67(9), 755–767.
- Pawker, A., Chen, Z., & Sweller, J. (2021). Cognitive load theory and instructional design for complex science concepts. *Educational Psychology Review*, 33(2), 435–458.
- Redish, E. F. (2003). *Teaching Physics with the Physics Suite*. John Wiley & Sons.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. Springer Science & Business Media.
- Toube, S. (2020). Addressing heterogeneity in science classrooms through artificial intelligence. *International Journal of STEM Education*, 7(1), 1–16.
- von Glasersfeld, E. (1995). *Radical Constructivism: A Way of Knowing and Learning*. Falmer Press.