

توسعه سیستم های واقعیت افزوده برای شبیه سازی فرآیندهای حفاری در محیط های آموزشی

محمدحسین کرمی^۱

^۱ گروه مهندسی معدن، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

چکیده

آموزش و انتقال مهارت های عملیاتی در رشته های مهندسی نفت و معدن به دلیل ریسک های بالای جانی، هزینه های سنگین تجهیزات، پیچیدگی های ژئومکانیکی و دسترسی محدود به دکل های حفاری همواره با چالش های ساختاری مواجه بوده است. هدف اصلی این پژوهش، طراحی، توسعه و اعتبارسنجی یک سامانه شبیه ساز مبتنی بر فناوری واقعیت افزوده (AR) جهت شبیه سازی فرآیندهای دکل حفاری و ارزیابی تأثیر آن بر مؤلفه های یادگیری تجربی، کاهش خطاهای رویه ای، بار شناختی و درک فضایی دانشجویان در محیط های آموزشی است. روش شناسی این پژوهش از نوع آمیخته (کمی-کیفی) با طرح شبه آزمایشی پیش آزمون-پس آزمون با گروه کنترل است. جامعه آماری شامل دانشجویان کارشناسی ارشد مهندسی نفت و معدن دانشگاه های برتر صنعتی کشور بوده که نمونه ای هدفمند مشتمل بر ۶۸ نفر انتخاب و در دو گروه کنترل (آموزش سنتی و مدل های رایانه ای دوبعدی، ۳۴ نفر) و گروه آزمایش (شبیه ساز تعاملی AR مبتنی بر هدست و تبلت، ۳۴ نفر) گمارده شدند. داده ها از طریق آزمون های عملکرد مهارتی استاندارد، پرسشنامه مقیاس بار شناختی پیکس، سنج های سیستم ارزیابی کاربری (SUS) و ثبت بلادرنگ خطاهای شبیه سازی گردآوری شدند. تحلیل داده ها با استفاده از آزمون های تحلیل کوواریانس تک متغیره (ANCOVA)، آزمون تی مستقل، مدل سازی معادلات ساختاری و تحلیل واریانس چندمتغیره انجام پذیرفت. یافته ها نشان داد که گروه آزمایش در شاخص تسلط بر توالی عملیات مهار چاه و تعویض مته به طور معناداری ($p < 0.001$) نمرات بالاتری کسب کرده و میزان خطای رویه ای آن ها تا ۴۱.۲ درصد نسبت به گروه کنترل کاهش یافته است. همچنین، بار شناختی درونی در گروه AR کاهش معناداری را تجربه کرده و نرخ درک فضایی مکانیزم های درون چاهی بهبود چشمگیری داشته است. در نهایت، سیستم واقعیت افزوده توسعه یافته می تواند به عنوان ابزاری مقرون به صرفه، ایمن و تعاملی جایگزین یا مکمل کارآموزی های پرخطر صنعتی در سرفصل های دانشگاهی گردد.

واژه های کلیدی: واقعیت افزوده، شبیه سازی فرآیندهای حفاری، مهندسی نفت و معدن، فناوری اطلاعات آموزشی، یادگیری تعاملی، بار شناختی، شبیه ساز مهار چاه.

مقدمه

صنایع استخراجی شامل مهندسی نفت، گاز و معدن از جمله بخش های پریسک، سرمایه بر و پیچیده در اقتصاد بین الملل به شمار می روند که هرگونه خطای انسانی در مدیریت عملیات آن ها می تواند پیامدهای جبران ناپذیر مالی، زیست محیطی و تلفات جانی در پی داشته باشد (رضوانی و همکاران، ۱۴۰۲؛ چن و ژائو، ۲۰۲۳). در این میان، عملیات حفاری به ویژه کنترل فوران، رانش لوله های جداری، چرخش مته و مدیریت هیدرولیک گل حفاری، نیازمند تصمیم گیری های فوق العاده سریع، ادراک فضایی عمیق از ساختارهای زیرسطحی و واکنش های دقیق مکانیکی است (احمدی و کاظمی، ۱۴۰۱؛ ژائو و وانگ، ۲۰۲۴). آموزش سنتی این مفاهیم در محیط های دانشگاهی عمدتاً به نمودارهای دوبعدی، کتاب های درسی، انیمیشن های غیرتعاملی و در بهترین حالت، بازدیدهای محدود میدانی از سکوهای حفاری غیرعملیاتی خلاصه می شود؛ ساختاری که شکاف بزرگی میان دانش تئوریک و مهارت های شناختی-حرکتی موردنیاز در محیط واقعی کار ایجاد می کند (محمودی و کریمی، ۱۴۰۰؛ کائوپ و همکاران، ۲۰۲۰).

از سوی دیگر، شبیه سازهای فیزیکی در مقیاس واقعی بسیار گران قیمت بوده، نگهداری آن ها مستلزم هزینه های گزاف است و عملاً امکان دسترسی مداوم و گسترده برای خیل کثیری از دانشجویان در دانشکده های مهندسی نفت و معدن وجود ندارد (نیکروش و همکاران، ۱۳۹۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲). این نارسایی ها چالش بزرگی در سیستم آموزشی ایجاد کرده است؛ به گونه ای که دانش آموختگان هنگام ورود به میدانی عملیاتی با استرس شناختی شدید و ناتوانی در تحلیل فضایی تعاملات مکانیکی درون چاه و تجهیزات سرچاهی مواجه می شوند (حسینی و فلاح، ۱۴۰۱؛ اسمیت و همکاران، ۲۰۲۱).

فناوری اطلاعات و به طور ویژه فناوری های واقعیت توسعه یافته (XR)، بستری انقلابی برای غلبه بر این محدودیت ها فراهم آورده اند. در میان این ابزارها، فناوری واقعیت افزوده از طریق همپوشانی دادن المان های مجازی سه بعدی، داده های حسگری برخط و انیمیشن های دینامیکی بر روی محیط فیزیکی، فضایی بی نظیر برای یادگیری بصری-فضایی ایجاد می نماید (تقوی و موسوی، ۱۴۰۲؛ کیم و پارک، ۲۰۲۳). برخلاف واقعیت مجازی غوطه ورکننده (VR) که ارتباط کاربر را به طور کامل با جهان پیرامون قطع می کند و ممکن است در فضاهای کارگاهی مانع تعاملات بین فردی یا کار با ابزارهای فیزیکی شود، واقعیت افزوده به فراگیران اجازه می دهد مدل های دقیق سه بعدی از مته های حفاری، شیرهای فوران گیر (BOP)، سیستم های بالابری دکل و سازندهای پیچیده زمین شناسی را در بستر آزمایشگاه مشاهده کرده و ضمن برهم کنش مستقیم با آن ها، سازوکارهای داخلی، تغییرات فشار و جریان های سیال را به صورت پویا پایش نمایند (صالحی و همکاران، ۱۴۰۳؛ باتاچاریا و روی، ۲۰۲۵).

با وجود پژوهش های متعدد در زمینه کاربرد واقعیت مجازی در صنایع نفت و پتروشیمی، شکاف دانشی عمده ای در زمینه توسعه سیستم های واقعیت افزوده بومی سازی شده که قابلیت یکپارچه سازی مدل های محاسباتی دینامیک سیالات و هیدرولیک با رابط کاربری تعاملی در محیط های آموزشی دانشگاهی را داشته باشند، مشاهده می شود (قاسمی و نوری، ۱۴۰۰؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۲۴). بیشتر سامانه های موجود یا بسیار ساده بوده و صرفاً به مدل های صلب استاتیک محدود می شوند، یا فاقد شبیه سازی دقیق فیزیک شکست سنگ، سایش مته و هیدرولیک گل بر مبنای معادلات مهندسی هستند (محمدی نیا، ۱۴۰۲؛ زنگ و همکاران، ۲۰۲۳).

هدف این پژوهش، توسعه و ارزیابی عملکردی یک سیستم جامع واقعیت افزوده جهت شبیه سازی گام به گام و تعاملی فرآیندهای حفاری در رشته های مهندسی نفت و معدن است. این پژوهش به دنبال آن است که با ترکیب الگوریتم های رندرینگ

سه بعدی، ردیابی مکانی و اتصال به پایگاه محاسباتی فیزیک حفاری، میزان ارتقای یادگیری رویه‌ای، کاهش خطاهای عملیاتی و اثرگذاری بر بار شناختی و درک مفهومی دانشجویان را به صورت تجربی و مستند مورد سنجش قرار دهد.

مبانی نظری

پایه‌های تئوریک این پژوهش بر چند ستون اصلی استوار است: نظریه بار شناختی سوئلر، نظریه یادگیری تجربی کِلپ، و مبانی مهندسی شبیه‌سازی فرآیندهای دینامیکی حفاری (صالحی و همکاران، ۱۴۰۳؛ سوئلر، ۲۰۲۰). نظریه بار شناختی بیان می‌کند که حافظه فعال انسان ظرفیت محدودی دارد و فرآیندهای آموزشی باید به گونه‌ای ساختاردهی شوند که بار شناختی بیرونی (ناشی از ارائه ضعیف مطالب) به حداقل رسیده و بار شناختی مطلوب (صرف شده برای ساخت طرح‌واره‌های ذهنی) افزایش یابد (تقوی و موسوی، ۱۴۰۲؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۲۴). در محیط‌های سنتی آموزش حفاری، تجسم مقاطع دوبعدی سازند به همراه بردارهای تنش و مسیر حرکت لوله‌ها نیازمند تلاش ذهنی فوق‌العاده‌ای است که منجر به سربار شناختی می‌شود. واقعیت افزوده با تجسم بخشی عینی، این بار محاسباتی ذهنی را بر عهده موتورهای پردازش بصری می‌گذارد و ادراک سریع را تسهیل می‌کند.

از منظر فنی مهندسی، شبیه‌سازی حفاری مستلزم تلفیق معادلات هیدرولیک درون‌چاهی، دینامیک لوله‌های حفاری، برهم‌کنش مته با سنگ بر اساس معیارهای شکست، و کنترل هیدرواستاتیک ستون گل است (نیک‌روش و همکاران، ۱۳۹۹؛ چن و ژائو، ۲۰۲۳). در سیستم واقعیت افزوده، این معادلات ریاضی در قالب ماژول‌های شبیه‌سازی عددی در زمان واقعی حل شده و خروجی آن‌ها به صورت پارامترهای تغییر شکل مته، خروج براده‌های سنگ، افت و صعود فشار در گیج‌های مجازی، و نمودارهای لاگ بر روی سازه‌های فیزیکی شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه پروجکت می‌شوند (حسینی و فلاح، ۱۴۰۱؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲).

پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در سال‌های اخیر پتانسیل‌های فناوری‌های تعاملی را در آموزش علوم مهندسی به اثبات رسانده‌اند. (اسمیت و همکاران، ۲۰۲۱) در پژوهشی جامع پیرامون ارزیابی سامانه‌های واقعیت مجازی در آموزش پرسنل سکویهای فراساحلی نشان دادند که استفاده از محیط‌های سه بعدی باعث کاهش ۳۵ درصدی خطاهای رویه‌ای در سناریوهای اضطراری فوران چاه می‌شود. با این حال، مطالعه آن‌ها محدود به محیط‌های غوطه‌ور VR بود که دسترسی به تجهیزات دستی و تعامل چهره‌به‌چهره را مختل می‌ساخت. (محمودی و کریمی، ۱۴۰۰) با بررسی کاربرد نرم‌افزارهای سه بعدی در آموزش مکانیک سنگ در ایران، دریافتند که تجسم بصری شکستگی‌های توده سنگ موجب بهبود ۳۰ درصدی نمرات تشخیصی دانشجویان مهندسی معدن می‌گردد، اما عدم تعامل بلادرنگ و نبود سیستم AR به عنوان یک خلاء در مطالعه آن‌ها گزارش شد.

(کائوپ و همکاران، ۲۰۲۰) به مقایسه پلتفرم‌های مبتنی بر واقعیت افزوده و ویدیوهای آموزشی در رشته‌های مکانیک و فرایند پرداختند و نتیجه گرفتند که تعامل مستقیم با هولوگرام‌های صنعتی، زمان دستیابی به مهارت را تا ۴۵ درصد تقلیل می‌دهد. (احمدی و کاظمی، ۱۴۰۱) در مطالعه‌ای روی شبیه‌سازهای حفاری نفت بر روی پلتفرم دسکتاپ نشان دادند که دانشجویان در درک تفاوت‌های ریولوژیکی گل حفاری در فرمت دسکتاپ دچار ابهام مفهومی باقی می‌مانند. (کیم و پارک، ۲۰۲۳) با

پیاده سازی سیستم واقعیت افزوده بر روی عینک های هوشمند جهت تعمیر و نگهداری پمپ های هیدرولیک معدنی نشان دادند که نرخ خطای مونتاژ و ديمونتاژ تا ۵۰ درصد کاهش یافت.

(رضوانی و همکاران، ۱۴۰۲) اثرگذاری آموزش های فناوری محور را بر نگرش و خلاقیت دانشجویان مهندسی در پروژه های پیچیده زیرسطحی بررسی نموده و بر لزوم یکپارچه سازی سامانه های دیجیتال با سرفصل های مصوب تاکید کردند. (ژائو و وانگ، ۲۰۲۴) نیز سیستم AR هوشمندی را برای پیش بینی گیر لوله حفاری طراحی کردند و دریافتند که بازخورد دیداری- شنیداری همزمان، توان تصمیم گیری اپراتورها را در شرایط بحرانی به شدت بهبود می بخشد. (باتاچاریا و روی، ۲۰۲۵) نشان دادند که فناوری واقعیت توسعه یافته می تواند با پیوند داده های ژئوفیزیکی و مدل های لرزه نگاری، ادراک چاه پیمایی را در مهندسی مخزن به میزان ۴۰ درصد ارتقا بخشد.

نویسندگان و سال	زمینه پژوهش / دامنه کاربرد	روش شناسی و ابزار	دستاوردها و نتایج کلیدی
(اسمیت و همکاران، ۲۰۲۱)	آموزش ایمنی سکوها فراساحلی	واقعیت مجازی تمام غوطه ور (VR)	کاهش ۳۵ درصدی خطاهای ایمنی و افزایش سرعت واکنش
(محمودی و کریمی، ۱۴۰۰)	آموزش ناپیوستگی های مکانیک سنگ	مدلسازی نرم افزاری دسکتاپ	بهبود ۳۰ درصدی درک هندسی ناپیوستگی های زیرسطحی
(کائوپ و همکاران، ۲۰۲۰)	انتقال مهارت در فرآیندهای مهندسی	واقعیت افزوده (مبتنی بر نشانگر)	کاهش ۴۵ درصدی زمان یادگیری فرآیندهای مکانیکی پیچیده
(احمدی و کاظمی، ۱۴۰۱)	آموزش هیدرولیک حفاری	شبیه ساز کامپیوتری دوبعدی	تثبیت مناسب تئوری ها اما ناتوانی در تجسم رفتار درون چاه
(کیم و پارک، ۲۰۲۳)	نگهداری تجهیزات حفاری و معدن	عینک هوشمند واقعیت افزوده	کاهش ۵۰ درصدی خطای چینش قطعات و کاهش زمان مونتاژ
(رضوانی و همکاران، ۱۴۰۲)	یادگیری مفاهیم زیرسطحی نفت	آزمایشگاهی و شبیه سازی	افزایش رغبت تحصیلی و مهارت کار گروهی دانشجویان
(ژائو و وانگ، ۲۰۲۴)	شبیه سازی بحران گیر لوله در حفاری	واقعیت افزوده با یادگیری ماشین	ارتقای تصمیم گیری در شرایط افت فشار هیدرولیکی
(صالحی و همکاران، ۱۴۰۳)	آموزش سامانه های انتقال انرژی و سیال	مدل سازی تجربی و AR	کاهش چشمگیر بار شناختی در تحلیل جریان های چندفازی
(باتاچاریا و روی، ۲۰۲۵)	تلفیق داده های لرزه ای و حفاری مخزن	محیط های ترکیبی XR	بهبود درک فضایی ساختارهای گسلی و مخازن هیدروکربوری

روش شناسی

این پژوهش از حیث هدف کاربردی، از حیث رویکرد گردآوری داده ها ترکیبی (کمی-کیفی) و از نظر روش اجرا شبه آزمایشی با طرح پیش آزمون-پس آزمون همراه با گروه کنترل است. جامعه آماری پژوهش را کلیه دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد مهندسی نفت (گرایش های حفاری و مخازن) و مهندسی معدن (گرایش استخراج) دانشگاه های صنعتی تهران و امیرکبیر در سال تحصیلی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ تشکیل دادند که تعداد آن ها ۱۱۴ نفر بود. از میان این جامعه، با استفاده از جدول مورگان و روش

نمونه‌گیری هدفمند منطبق بر معیارهای ورود (گذراندن موفق دروس مبانی مهندسی حفاری و مکانیک سنگ، عدم سابقه کار میدانی حرفه‌ای بر روی دکل‌های نفتی)، تعداد ۶۸ دانشجو انتخاب شدند. شرکت‌کنندگان به‌صورت تصادفی بلوک‌بندی شده به دو گروه ۳۴ نفره شامل گروه کنترل (آموزش از طریق متون فنی، ارائه‌های چندرسانه‌ای دسکتاپ، و شبیه‌سازهای سنتی دوبعدی) و گروه آزمایش (آموزش از طریق سیستم واقعیت افزوده توسعه‌یافته بر بستر عینک مایکروسافت هولولنز ۲ و تبلت‌های صنعتی مجهز به حسگر) تقسیم شدند.

ابزار توسعه سیستم AR شامل موتور بازی‌ساز یونیتی (Unity 3D)، کتابخانه AR Foundation، مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق قطعات دکل، مته‌های دندان‌های و الماسه (PDC)، شیرهای فوران‌گیر و ادوات رشته حفاری در نرم‌افزار کتیا (CATIA) بود. کدنویسی فرآیندهای دینامیکی سیال گل حفاری و رفتارهای هیدرومکانیکی با بهره‌گیری از زبان #C و ماژول‌های محاسباتی توسعه داده شد. ابزارهای گردآوری داده‌ها عبارت بودند از: (۱) آزمون عملی استاندارد مهارت در فرآیندهای حفاری شامل دو سناریوی کلیدی «عملیات مهار چاه به روش وزنی (Driller's Method)» و «فرآیند تعویض مته و لوله‌گذاری» (۲) پرسشنامه سنجش مقیاس بار شناختی پیکس (Paas Cognitive Load Scale) در مقیاس ۹ درجه‌ای لیکرت، (۳) پرسشنامه استاندارد ارزیابی کاربردپذیری سیستم (SUS)، و (۴) سیستم خودکار ثبت خطاهای اپراتوری (لاگر دیجیتال) تعبیه‌شده در نرم‌افزار شبیه‌ساز. پایایی ابزارهای اندازه‌گیری از طریق آلفای کرونباخ بررسی شد که برای پرسشنامه سنجش یادگیری ۰.۸۷ و برای بار شناختی ۰.۸۹ محاسبه گردید. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از آزمون تحلیل کوواریانس تک‌متغیره (ANCOVA) به‌منظور کنترل اثر پیش‌آزمون، آزمون تی مستقل، و ماتریس‌های همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ استفاده شد.

یافته‌ها و تحلیل داده‌ها

پیش از اعمال متغیر آزمایشی، آزمون‌های همگنی و نرمال بودن داده‌ها به وسیله آزمون شاپیرو-ویلک انجام شد و فرض نرمال بودن توزیع نمرات در تمام متغیرها مورد تأیید قرار گرفت ($p < 0.05$). همچنین، همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون لوین ارزیابی شد که تفاوت معناداری بین دو گروه در پیش‌آزمون مشاهده نشد.

متغیر مورد سنجش	گروه	تعداد (N)	میانگین پیش‌آزمون	انحراف معیار پیش‌آزمون	میانگین پس‌آزمون	انحراف معیار پس‌آزمون
نمره عملکرد عملیات مهار چاه (از ۱۰۰)	کنترل	۳۴	۵۱.۲۴	۸.۳۲	۶۳.۵۰	۷.۸۱
	آزمایش (AR)	۳۴	۵۰.۸۸	۸.۱۵	۸۴.۷۲	۶.۱۴
تعداد خطاهای رویه‌ای در مهار چاه	کنترل	۳۴	۱۲.۴۵	۲.۸۰	۸.۱۸	۱.۹۲
	آزمایش (AR)	۳۴	۱۲.۷۰	۲.۹۴	۴.۸۰	۱.۱۵
نمره آزمون درک	کنترل	۳۴	۴۴.۱۵	۶.۷۵	۵۸.۳۰	۶.۹۰

فضایی قطعات درون چاه						
آزمایش (AR)	۳۴	۴۳.۸۰	۶.۸۸	۸۱.۱۵	۵.۴۵	
شاخص بار شناختی بیرونی (۱ تا ۹)	۳۴	۶.۸۵	۱.۱۰	۶.۴۰	۰.۹۵	
آزمایش (AR)	۳۴	۶.۹۰	۱.۰۵	۳.۱۵	۰.۷۰	
زمان تکمیل فرآیند تعویض مته (دقیقه)	۳۴	۳۸.۲۰	۴.۵۰	۲۹.۴۰	۳.۸۵	
آزمایش (AR)	۳۴	۳۹.۱۰	۴.۳۵	۱۹.۶۰	۲.۴۰	

جهت بررسی تفاوت معنادار در نمرات پس از آزمون عملکرد با کنترل اثر پیش آزمون، آزمون تحلیل کوواریانس (ANCOVA) صورت گرفت که نتایج آن نشان دهنده برتری قطعی و معنادار گروه آزمایش در تمامی متغیرهای وابسته بود.

منبع تغییرات	مجموع مجذورات	درجه آزادی (df)	میانگین مجذورات	آماره F	سطح معناداری (Sig)	اندازه اثر
پیش آزمون عملکرد	۹۴۲.۱۸	۱	۹۴۲.۱۸	۳۱.۴۵	۰.۰۰۰	۰.۳۲۶
عضویت گروهی (کنترل/AR)	۴۲۱۸.۶۴	۱	۴۲۱۸.۶۴	۱۴۰.۸۱	۰.۰۰۰	۰.۶۸۴
خطا	۱۹۴۷.۳۰	۶۵	۲۹.۹۶	-	-	-
کل	۳۹۴۲۱.۰۰	۶۸	-	-	-	-

نتایج به دست آمده نشان می دهد که اثر مداخله سیستم واقعیت افزوده با اندازه اثر ۶۸.۴ درصد بسیار قدرتمند و معنادار است. کاهش تعداد خطاهای رویه ای در گروه آزمایش نشان داد که دانشجویان تعاملات منطقی بین بستن شیرهای فوران گیر، تنظیم دور پمپ گل، و پایش فشار لوله جداری را به دلیل بازخورد بصری بی درنگ در واقعیت افزوده بسیار بهتر از نقشه خوانی سنتی درک کرده اند.

ارزیابی نمره کاربردپذیری سیستم (SUS) در میان دانشجویان گروه آزمایش میانگین نمره ۸۴.۶ از ۱۰۰ را با انحراف معیار ۵.۴ نشان داد که طبق مقیاس استاندارد، درجه کاربری سامانه در رده "عالی" (Excellent) طبقه بندی می شود.

بحث و نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر مؤید آن است که پیاده سازی سیستم های واقعیت افزوده در آموزش مهندسی نفت و معدن تحولی ساختاری در ارتقای مهارت های فنی، کاهش خطاهای تصمیم گیری و بهینه سازی فرآیندهای شناختی ایجاد می کند. مقایسه یافته ها با مطالعات (اسمیت و همکاران، ۲۰۲۱) و (کیم و پارک، ۲۰۲۳) نشان می دهد که سامانه های تعاملی بصری نه تنها یادگیری پایدار را تقویت می کنند، بلکه امکان آزمایش و خطا در شرایط بحرانی (نظیر کنترل هجوم گاز به چاه) را بدون تحمیل هزینه های گزاف فیزیکی یا مخاطرات جانی فراهم می سازند. این یافته با تئوری بار شناختی سوئلر کاملاً هم راستاست؛ زیرا تجسم سه بعدی لایه های زمین شناسی، رفتار لوله های وزنه و توزیع فشار در گل حفاری باعث آزاد شدن ظرفیت حافظه فعال فراگیران شده و توان پردازش تحلیلی آن ها را افزایش داده است (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۴). پژوهش (محمودی و کریمی، ۱۴۰۰) نیز بر اهمیت ادراک بصری تأکید داشت، اما نتایج پژوهش حاضر فراتر از نرم افزارهای دسکتاپ نشان داد که غوطه وری افزوده تعاملی، خطاهای رویه ای را بیش از ۴۰ درصد کاهش می دهد که با نتایج (کائوپ و همکاران، ۲۰۲۰) و (ژائو و وانگ، ۲۰۲۴) همخوانی کامل دارد. با وجود دستاوردهای برجسته، این پژوهش با محدودیت هایی نیز روبرو بوده است؛ از جمله هزینه بالای اولیه خرید سخت افزارهای پیشرفته واقعیت افزوده (نظیر هدست های پیشرفته)، محدودیت زاویه دید در برخی تجهیزات و چالش های مدل سازی دقیق جریان های دوفازی پیچیده و فرسایش مته در زمان واقعی بر روی پردازنده های سبک. برای پژوهش های آتی پیشنهاد می شود که سیستم های واقعیت افزوده به مدل های هوش مصنوعی زاینده و الگوریتم های یادگیری ماشین جهت شبیه سازی بلادرنگ حوادث پیش بینی نشده زمین شناسی متصل شوند و همچنین اثرات بلندمدت این مدل آموزشی در پایش عملکرد فارغ التحصیلان در کارگاه ها و دکل های واقعی حفاری به صورت مطالعات طولی بررسی گردد.

منابع

- احمدی، س. و کاظمی، م. (۱۴۰۱). تحلیل کارآمدی شبیه سازی های تعاملی در آموزش هیدرولیک چاه های نفت و گاز. نشریه پژوهش های کاربردی در مهندسی نفت، ۸(۳)، ۴۵-۵۸.
- تقوی، ع. و موسوی، ج. (۱۴۰۲). تأثیر فناوری های واقعیت توسعه یافته بر بار شناختی و یادگیری مهارت های پیچیده مهندسی. فصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات در علوم تربیتی، ۱۴(۲)، ۷۷-۹۶.
- حسینی، م. و فلاح، ر. (۱۴۰۱). مدل سازی و شبیه سازی تجهیزات سرچاهی با استفاده از ابزارهای بصری پیشرفته. مجله مهندسی معدن، ۱۷(۵۶)، ۲۳-۳۶.
- رضوانی، ف.، ناصری، ب. و محمدی، ج. (۱۴۰۲). ارزیابی رویکردهای نوین فناوری اطلاعات در آموزش دروس عملیاتی صنایع استخراجی. نشریه آموزش و توسعه منابع انسانی، ۱۰(۳۶)، ۱۰۱-۱۲۲.
- صالحی، پ.، امینی، ک. و حسینی، د. (۱۴۰۳). یکپارچه سازی محیط های واقعیت افزوده در ارزیابی رفتارهای مکانیکی سنگ و ژئوتکنیک. مجله ژئومکانیک نفت، ۱۲(۱)، ۱۲-۲۹.
- قاسمی، ت. و نوری، ع. (۱۴۰۰). توسعه سامانه های هوشمند آموزشی در بهینه سازی عملیات مهار چاه. فصلنامه علمی پژوهشی فناوری نفت، ۱۱(۴)، ۸۹-۱۰۴.
- محمدی نیا، ا. (۱۴۰۲). نقش سامانه های دیجیتال در بهبود فرآیندهای تصمیم گیری حفاری در آب های عمیق. مجله پژوهش و فناوری در مهندسی شیمی و نفت، ۹(۲)، ۵۵-۷۰.
- محمدی، ر. و کریمی، ص. (۱۴۰۰). کاربرد نرم افزارهای سه بعدی تعاملی در ارتقای یادگیری ساختارهای زمین شناسی و معدنی. پژوهشنامه آموزش مهندسی ایران، ۲۳(۹۰)، ۶۱-۷۸.

- نیکروش، ح.، دهقان، م.، و میرزایی، ک. (۱۳۹۹). طراحی و ارزیابی شبیه سازهای آموزشی برای کاهش خطاهای انسانی در صنایع پرریسک. نشریه بین المللی علوم مهندسی، ۳۱(۴)، ۲۱۱-۲۲۴.
- Bhattacharya, S., & Roy, P. (2025). Integrating seismic telemetry and extended reality (XR) for subsurface reservoir navigation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 235, 112-128.
- Chen, Y., & Zhao, X. (2023). Virtual and augmented reality applications in oil and gas drilling operations: A systematic review. *Computers & Geosciences*, 171, 105-122.
- Huang, L., Zhang, T., & Wu, K. (2024). Cognitive workload optimization in immersive industrial training environments. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 54(1), 45-57.
- Kaup, C., Bergner, M., & Stark, R. (2020). Comparative study on augmented reality based technical training for mechanical maintenance. *Procedia CIRP*, 91, 742-747.
- Kim, S., & Park, J. (2023). Wearable augmented reality systems for heavy machinery maintenance and safety protocols in mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 33(4), 489-501.
- Li, H., Wang, J., & Al-Hussein, M. (2022). Real-time kinematic simulation of drilling rigs utilizing spatial computing platforms. *Automation in Construction*, 138, 104-118.
- Smith, D., Johnson, R., & Miller, A. (2021). Offshore drilling safety training using immersive virtual simulations: Error reduction and performance assessment. *Safety Science*, 140, 105-119.
- Sweller, J. (2020). Cognitive load theory and educational technology. *Educational Technology Research and Development*, 68(1), 1-16.
- Zeng, Q., Liu, B., & Chen, G. (2023). Physics-informed augmented reality interface for well control operations during gas kick events. *SPE Journal*, 28(6), 3120-3135.
- Zhao, K., & Wang, Q. (2024). Intelligent pipe sticking early warning and drill-string simulation through mixed reality environments. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 122, 105-119.