نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال سیزدهم/ ویژه‌نامه فناوری‌های نوین در باستان‌شناسی سدها/ پاییز ۱۴۰۵

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
13th Year/ Special Issue on Modern Technologies Applied in Rescue Archaeology for Dam Projects/ October 2026

کاربرد هوش مصنوعی در باستان‌شناسی نجات‌بخش پروژه‌های سدسازی ایران: ارائه‌ی مدل سامانه هوشمند یکپارچه

علی علی‌جماعت [۱*]

چکیده

پروژه‌های بزرگ عمرانی، به‌ویژه سدسازی، در سرزمین وسیعی مانند ایران، با پیشینه تمدنی غنی، همواره چالش‌هایی برای حفاظت از میراث فرهنگی ایجاد کرده‌اند. سرعت اجرای پروژه‌ها و گستردگی جغرافیایی تحت پوشش آن‌ها، کارایی روش‌های سنتی باستان‌شناسی در مطالعات میدانی را با مشکلات جدی مواجه می‌کند. اگرچه باستان‌شناسی نجات‌بخش، به‌عنوان راهکاری برای مدیریت این بحران مطرح‌شده، اما همچنان در اکثر پروژه‌ها، محدودیت زمان، هزینه‌های بالا و دقت وجود دارد. این پژوهش با رویکردی توصیفی و تحلیلی، ظرفیت‌های نوین هوش مصنوعی را در تحلیل انواع داده‌های مورد استفاده در این مطالعات، مانند داده‌های مکان محور، تصاویر ماهواره‌ای و فتوگرامتری پهپادی را بررسی می‌کند. تحقیقات و پروژه‌های انجام شده، نشان داده که گذار از سامانه‌های سنتی به مدل‌های یادگیری ماشین، مدل های زبانی بزرگ و عامل‌های هوشمند، می‌توانند فرآیند شناسایی محوطه‌های باستانی، بررسی آثار و مستندسازی را سرعت بخشیده و با تحلیل‌های پیش‌بینانه، خطر تخریب آثار را پیش از آغاز عملیات اجرایی، کاهش می‌دهد. با این‌حال، روش و ابزار مناسب هوش مصنوعی قابل‌استفاده در پروژه‌های سدسازی، نیازمند دسترسی به داده‌های باکیفیت و بومی‌سازی شده و شناخت مخاطرات آن است. در این پژوهش، ضمن بررسی چالش‌ها و توانایی‌های هوش مصنوعی در باستان‌شناسی نجات‌بخش پروژه‌های سدسازی ایران، یک مدل با عنوان سامانه هوش مصنوعی یکپارچه پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی

باستان‌شناسی نجات‌بخش، سد سازی، هوش مصنوعی مولد، یادگیری عمیق، عامل‌های هوشمند.

[۱*] استادیار ، گروه کامپیوتر ، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر، ابهر، ایران ، jamaat@kiau.ac.ir.

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

مقدمه

توسعه زیرساخت‌های بزرگ عمرانی و ضرورت حفاظت از میراث‌های فرهنگی، به‌ویژه در پهنه‌های وسیعی چون حوضه‌ی آبریز سدها، یکی از مشکلات اصلی مدیریت میراث است. در ایران با پیشینه‌ای تاریخی که هزاران منطقه شناسایی‌نشده وجود دارد، این مشکل حادتر بوده و مناطق، همواره در معرض خطر هستند و هر نوع مداخله مهندسی، به تخریبِ ناخواسته‌ی بخشی از تاریخ و تمدن منجر خواهد شد. در چنین شرایطی، «باستان‌شناسی نجات‌بخش[1]» به‌عنوان راهکاری عملیاتی ارائه‌شده است تا میان نیازهای زیستی و اقتصادی (همچون مهار آب و تولید انرژی) و رسالتِ حفاظت از آثار باستانی، نوعی توازن ایجاد کند. با این‌حال، واقعیتِ موجود در پروژه‌های جاری، نشان می‌دهد که ، روش‌های مورداستفاده در این حوزه در ایران، همچنان سنتی بوده و هنوز فناوری‌های نوین هوش مصنوعی، جایگاه خاصی ندارد.

ظرفیت‌های هوش مصنوعی در تحلیل کلان داده‌ها، از داده‌های عددی و متون تاریخی گرفته تا تصاویر و ویدیوهای پهپادی، افق‌های تازه‌ای را گشوده است. این فناوری، براساس شناسایی الگوهای پیچیده و توانِ یادگیری از نمونه‌های آماریِ محدود، به ابزاری در دسترس، دقیق و کم‌هزینه تبدیل‌شده که می‌تواند مشکلات و موانع باستان‌شناسی نجات‌بخش را تا حد مناسبی برطرف نماید. با استفاده از این مدل‌های هوشمند، اکنون می‌توان محوطه‌های مدفون در اراضیِ صعب‌العبور را از میان پوشش‌های گیاهی گوناگون ردیابی کرد، اشیاء را گونه‌شناسی نموده و حتی دشوارترین کتیبه‌های فرسوده را با سرعتی بالا بازخوانی نمود.

تبیین مسئله: در پروژه‌های عمرانی، «زمان» ارزشی حیاتی و غیرقابل‌جایگزین دارد. جینجیان[2]، ۲۰۰۴ به‌درستی بر این نکته تأکید دارد که باستان‌شناسیِ نجات‌بخش، همواره تحت‌فشار خردکننده‌ی «تقویم‌های اجرایی» قرار دارد و باید در کوتاه‌ترین زمان، میانِ دقتِ علمی و نظارتِ کارآمد، موازنه‌ای سخت ایجاد نمود. در فضای پروژه‌های سدسازی ایران، فاصله‌ی میان تصویب طرح تا مرحله باز شدن دریچه‌های آبگیری، فرصت بسیار اندکی را برای پیمایش‌های میدانی و حفاری‌های اضطراری باقی می‌گذارد. شیوه‌های سنتی که بر پیاده‌روی‌های فرساینده و گمانه‌زنی‌های نقطه‌ای استوارند، در برابر مخازنی که وسعتشان گاه بیش از ۲۰ هکتار است، عملاً ناکارآمد هستند. این گسست روش‌شناختی نه‌تنها موجب اتلاف منابع شده، بلکه خطرِ نادیده گرفتن استقرارگاه‌های مهم و را به شکلی بحرانی، تشدید می‌کند.

موانع پیش رو: در صنعت برق‌آبی، شکاف زمانیِ میان مطالعات فاز اول تا آغاز آبگیری، مخاطره‌آمیزترین، دوره برای میراث فرهنگی است. باستان‌شناسی نجات‌بخش در این مسیر، با سه چالش بنیادی مواجه است:

– **مقیاس و زمان:** در ابرپروژه‌هایی نظیر سد کارون یا سیمره، وسعتِ پهنه و توپوگرافیِ خشنِ ارتفاعات، عملاً امکانِ پیمایشِ وجب‌به‌وجب زمین را سلب می‌نماید. اکتفا به قدرت تشخیصِ چشمیِ کارشناس، در چنین ابعادی، علاوه بر زمان‌بر بودن، به دلیل خطای انسانی ناشی از خستگی و محدودیت‌های بصری، ریسک بالایی به همراه دارد (تنسر[3] و همکاران، ۲۰۲۴).

– **حجم بالای داده‌های دیجیتال:** ورود پهپادها، سامانه‌های سنجش‌ازدور و فنّاوری فتوگرامتری به کارگاه‌های سدسازی، باستان‌شناسان را با حجم زیادی از تصاویر باکیفیت و ابرهای نقاط لیدار[4] مواجه کرده است. تحلیل دستی این حجمِ انبوه از داده برای یافتن تپه‌ها یا سازه‌های کهن مدیریت آب، ماه‌ها زمان نیاز دارد؛ زمانی که در منطقِ پروژه‌های اضطراری اساساً تعریف‌نشده است (گاتیگلیا[5]، ۲۰۲۵).

– **گسست میان اسناد و شواهد تصویری:** بخش بزرگی از گزارش‌های کاوش در بایگانی‌های راکد وجود دارند و پیوند نظام‌مندی میان آن‌ها و داده‌های تصویری جدید وجود ندارد. مدل‌های زبانی بزرگ[6] می‌توانند با برقراریِ پیوندی استدلالی میان تصویر ماهواره‌ای و گزارش‌های تاریخی،

[1] Rescue Archaeology
[2] Djindjian
[3] Tencer
[4] LiDAR
[5] Gattiglia
[6] LLMs

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

نگرش‌ها و مطالب ارزشمندی ارائه نمایند (هوانگ[1] و همکاران، ۲۰۲۴).

هوش مصنوعی؛ فراتر از یک ابزار فنی: در مواجهه با موانع و مشکلات بیان‌شده، هوش مصنوعی، صرفاً یک ماشینِ خودکارسازی نبوده و این فناوری در حقیقت در نقش یک «همکار شناختی[2]» یا «دستیار دیجیتال» است که قادر به پردازش و تحلیل‌های موازی بر روی انواع داده‌ها است. (لی[3]، ۲۰۲۵). مدل‌های یادگیری عمیق و مدل‌های زبانی بزرگ، توانمندی‌هایی در پردازش هم‌زمان داده‌ها دارند که فراتر از ظرفیت‌های بیولوژیکی انسان هستند. بر اساس یافته‌های چی و ون[4]، ۲۰۲۵، هوش مصنوعی می‌تواند وظایف فرسایشی نظیر طبقه‌بندی قطعات سفال، ردیابی ناهنجاری‌های سطحی و حتی بازخوانی متون کهن را با سرعتی بالا انجام دهد.

ضرورت و اهداف پژوهش: باوجود تحولات جهانی، سدسازی در ایران، هنوز وابستگی شدیدی به نیروی انسانی و شیوه‌های سنتی دارد. مقاله‌ی حاضر تلاش دارد یک «نقشه‌ی‌راه بومی» ارائه نماید. در این پژوهش، ابتدا به واکاوی ریشه‌ای چالش‌های ساختاری باستان‌شناسی نجات‌بخش پرداخته و سپس سیر تحول هوش مصنوعی از یادگیری ماشین کلاسیک تا مدل‌های چندوجهی[5]را بررسی می‌کند. در پایان، با ارائه‌ی مدل راهکاری بومی برای مدیریت هوشمند آثار باستانی در حوضه سدها معرفی می‌شود تا بتوان تهدیدِ داده‌های زیاد دیجیتال را به فرصتی برای حفاظت پیش‌دستانه، از هویت تمدنی ایران تبدیل نمود. در این پژوهش، تمرکز بر فناوری‌هایی قرار داده شد که امکان پیاده‌سازی عملی در پروژه‌های سدسازی ایران را دارند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش، از نوع کاربردی و به روش مرور نظام‌مند و تحلیل تطبیقی انجام شده است. داده‌های پژوهش از مقالات نمایه‌شده در پایگاه‌های اسکوپوس[6]، وب برای علم[7] و گوگل اسکولار[8] و طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ استخراج و تحلیل شدند.

این مطالعه براساس رویکردی توسعه‌ای-تحلیلی، چارچوبی عملیاتی برای باستان‌شناسی ارائه می‌کند. روش پیشنهادی طی سه‌گام پیوسته سازمان‌یافته است:

- **تجمیع و بهسازی کلان داده‌ها:** در گام نخست، مجموعه‌ای از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، نقشه‌های لیدار باقدرت تفکیک بالا (به‌ویژه در حوضه‌های مرتفع زاگرس) و متون آرشیوی مربوط به کاوش‌های اضطراریِ دهه‌های گذشته، دیجیتالی می‌بایست شده و برای پردازش هوشمند، آماده‌سازی شوند.
- **معماری مدل پیشنهادی:** هسته‌ی اصلی این تحقیق، بر طراحی یک ساختارِ دووجهی استوار است؛ سامانه‌ای که بتواند میان «بینایی ماشین» (برای درک عوارض اراضی) و «مدل‌های زبانی» (برای تحلیل گزارش‌های مکتوب) پیوندی استدلالی برقرار کند.
- **سنجش و اعتباربخشی:** در پایان، کارایی این مدل بر اساس شاخص‌های آماری، نظیر دقت[9] و فراخوانی[10]، در مواجهه با شناسایی محوطه‌های احتمالی در یک محدوده‌ی نمونه، به صورت مفهومی و بر اساس مطالعات تطبیقی ارزیابی می‌شود.

چالش‌های ساختاری و بحران سدسازی

پروژه‌های نجات‌بخش، برخلاف کاوش‌های پژوهشیِ مرسوم، پیرو منطق «مدیریت پروژه عمرانی» هستند. در فضای کنونی ایران، تقابل میان «وسواسِ علمی» باستان‌شناس و «شتابِ اجرایی» مهندسان سد، همواره شکافی عمیق ایجاد کرده است.

- **بررسی فازهای چهارگانه و نقاط آسیب‌پذیر:** اگر چرخه‌ی حیات یک پروژه‌ی نجات‌بخش بر پایه متدولوژی جینجیان بررسی شود، در بستر سدسازی ایران، چهار گلوگاه بحرانی روبرو وجود دارد:

---

[1] Hoang
[2] Cognitive Collaborator
[3] Li
[4] Qi, & Wen
[5] Multimodal Models
[6] Scopus
[7] Web of Science
[8] Google Scholar
[9] Precision
[10] Recall

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

- **مرحله‌ی اول، تشخیص:** این فاز، نخستین نقطه‌ی تلاقی میراث و مهندسی است. در حوضه‌های وسیع و اغلب صعب‌العبور، پیمایش‌های میدانی، معمولاً با نواقص جدی همراه است. شیوه‌های سنتی در ردیابی سایت‌های کوچک یا محوطه‌هایی که زیر لایه‌های ضخیم رسوبی پنهان شده‌اند، ناتوان بوده و همین ضعف، خطر «تخریب نادانسته» آثار را به شدت بالا می‌برد.
- **مرحله‌ی دوم، ارزیابی:** در این مرحله که بودجه و زمان‌بندیِ نجات‌بخشی تدوین می‌شود، باستان‌شناسان، معمولاً بر مبنای حدس‌های تجربی به تخمین حجم کار می‌پردازند. نبود ابزار دقیق، برای سنجشِ لایه‌های زیرسطحی، باعث می‌شود که در میانه‌ی عملیات، واقعیت‌های غیرمنتظره‌ای نمایان شود که نتیجه‌ای جز توقف طولانی‌مدت پروژه‌ی عمرانی و خسارات مالی سنگین ندارد.
- **مرحله‌ی سوم، عملیات:** فشار زمانی در فاز حفاری و مستندسازی به حداکثر خود می‌رسد. در اینجا، باستان‌شناس با پدیده‌ی «انفجار داده‌ها» (از قطعات سفال گرفته تا شواهد استخوانی) روبرو می‌شود. کندیِ ذاتیِ مستندسازی دستی باعث می‌شود که تحلیل نهایی داده‌ها، عملاً به زمانی موکول شود که محوطه زیر تراز آب رفته است.
- **مرحله‌ی چهارم، انتشار و آرشیو:** متأسفانه دانشِ حاصل از کاوش‌های سدسازی در ایران، اغلب در راهروهای اداری و قفسه‌های بایگانی گم می‌شود و فرصتی برای تجزیه و تحلیلِ دانش و استخراج یک تاریخچه‌ی یکپارچه از حوضه رودخانه‌ها فراهم نمی‌آید.

- **ضرورتِ چرخش به سمت پیمایش‌های غیرمخرب:** یافته‌های تنسر و همکاران، ۲۰۲۴ گویای آن است که استفاده از فنّاوری‌های غیرمخرب، مانند مغناطیس‌سنجی موتوریزه، می‌تواند تا ۸۰ درصد از ابهامات زیرسطحی را پیش از برخورد اولین کلنگ حفاری مرتفع کند. بااین‌حال، در پهنه‌های وسیع سدسازی، پردازش دستیِ این حجم از داده‌های ژئوفیزیکی، ناممکن است. هوش مصنوعی، مناسب‌ترین راهکار عملیاتی برای ترسیمِ «نقشه ریسک» پیش از آبگیری است.

- **«نجات دیجیتال» در برابر نابودی فیزیکی:** در مواردی که نابودی فیزیکی یک محوطه زیر فشار آب سد اجتناب‌ناپذیر است، باید به سمت رویکرد «نجات دیجیتال» حرکت کرد؛ یعنی مستندسازی با چنان دقتی انجام شود که بازسازی مجازی محوطه، برای نسل‌های آینده ممکن باشد. بدون تکیه بر هوش مصنوعی، برای پردازش سریعِ ابرهای نقطه[1] و مدل‌های سه‌بعدی سنگین، این هدف برآورده نخواهد شد (گاتیگلیا، ۲۰۲۵).

تکامل نسل‌های هوش مصنوعی: از یادگیری ماشین تا مدل‌های زبانی

تحول هوش مصنوعی در قلمرو باستان‌شناسی، فراتر از یک پیشرفت ابزاری ساده، درواقع یک «تغییر نگرش» بنیادین از سامانه‌های توصیفی به سمت مدل‌های استنتاجی است. این مسیر تکاملی را می‌توان در سه مرحله بررسی نمود:

-یادگیری ماشین کلاسیک و محدودیت‌های مهندسی ویژگی

در گام‌های نخست، تلاش‌ها بر پایه‌ی «یادگیری ماشین کلاسیک» استوار بود. در این نسل، پژوهشگرانی، چون ارنگو[2] و همکاران، ۲۰۲۰ از الگوریتم‌هایی نظیر «بردار ماشین پشتیبان[3]»، برای ردیابی تپه‌های باستانی در تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرده‌اند.

بزرگ‌ترین چالش، در این نوع هوش مصنوعی وابستگی شدیدِ ماشین به «تعریفِ انسانیِ ویژگی‌ها» بود؛ به این معنا که باستان‌شناس باید مختصاتِ دقیق هندسی یا طیفی یک تپه را برای ماشین، فرمول‌بندی کند. در

[1] Point Clouds
[2] Orengo
[3] SVM

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

حوضه‌های سدسازی ایران که عوارض طبیعی (تپه‌های زمین‌شناختی) شباهت گمراه‌کننده‌ای به محوطه‌های باستانی دارند، این مدل‌ها اغلب با خطای «مثبت کاذب» روبرو می‌شدند.

- یادگیری عمیق و شناسایی خودکار

با ارائه شبکه‌های عصبی پیچشی[1]، محدودیت‌های نسل قبلی کاهش یافت. مدل‌هایی مانند Mask R-CNN، خود به استخراج الگوهای پیچیده از میان میلیون‌ها پیکسل تصویر می‌پردازد.

تجربیات پروژه‌ی «وودان[2]» نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند محوطه‌های پنهان زیرپوشش‌های گیاهی متراکم یا لایه‌های رسوبی را با دقت زیاد ردیابی کند (ورشوف-ون در وارت[3] و همکاران، ۲۰۲۰). برای جغرافیای ایران، این فناوری روشی مناسب برای شناساییِ ناهنجاری‌های سطحی است که نشان از وجود ابنیه زیرزمینی یا گورستان‌های کهن در بستر مخزن سدها دارد.

- مدل‌های زبانی بزرگ و مدل‌های چندوجهی

از سال ۲۰۲۳، با معرفی مدل‌های زبانی بزرگ مانند GPT-۴ و مدل‌های چندوجهی، باستان‌شناسی نجات‌بخش وارد دوره‌ای شد که در آن ابزارها علاوه بر «بینایی» از «منطق استدلال» برخوردار هستند. تکنیک‌های بکار رفته در این نسل عبارت‌اند از:

- **پردازش زبان طبیعی[4]:** در پروژه‌های سدسازی، حجم انبوهی از گزارش‌های کاوشِ قدیمی وجود دارد. مدل‌های زبانی قادرند این حجم از داده‌های متنی را در چند ثانیه تحلیل کرده و خلاصه‌های تحلیلی ارائه دهند.
- **معماری تولید تقویت‌شده با بازیابی[5]:** این فناوری به باستان‌شناس اجازه می‌دهد در حین عملیات میدانی، پرسش‌های تخصصی خود را از «آرشیو دیجیتال میراث فرهنگی» پرسیده و سیستم با جست‌وجو در هزاران گزارش، پاسخ را با ذکر منبع دقیق ارائه دهد (هوانگ[6] و همکاران، ۲۰۲۴).
- **عامل‌های هوشمند چندوجهی:** این مدل‌ها توانایی خاصی در تطبیقِ هم‌زمانِ یک تصویرِ میدانی با متونِ تاریخی دارند. این قدرتِ تطبیق در کاوش‌های اضطراری که باید سریعاً میان یک یافته جدید و فرضیات علمی پیوند برقرار شود، یک تحول محسوب می‌شود (چی و ون، ۲۰۲۵).

- از شناسایی به استدلال باستان‌شناختی

تفاوتِ اصلی نسل جدید هوش مصنوعی در این است که دیگر تنها به دنبال «شکل» (مثلاً یک عارضه‌ی دایره‌ای در تصویر) نیست، بلکه «بافت[7]» را درک می‌کند. برای مثال، اگر در نزدیکی محور یک سد، مجموعه‌ای از سنگ‌های پراکنده، شناسایی شود، مدل‌های نوین با تحلیلِ مجاورت به منابع آب و الگوهای استقراری، احتمال تعلق آن به یک «استقرار کوچ‌نشینی» را تخمین می‌زنند. این سطح از تحلیل، هوش مصنوعی را به یک «همکار شناختی» تبدیل می‌کند که در شرایط پرفشار سدسازی، از خطاهای انسانی ناشی از خستگی یا محدودیت دانش فردی جلوگیری می‌نماید (گاتیگلیا، ۲۰۲۲).

جدول (۱): مقایسه کارایی روش‌های سنتی و هوشمند در فرآیند نجات‌بخشی (یافته‌های پژوهش حاضر)

گام عملیاتی	روش سنتی (دستی)	روش هوشمند[8]	پیامد کاربردی
تشخیص اولیه	پیمایش میدانی پای پیاده	تحلیل خودکار تصاویر ماهواره‌ای و لیدار	کاهش چشمگیر زمان شناسایی
ارزیابی محوطه	گمانه‌زنی‌های تصادفی	حفاری هدایت‌شده با پیش‌بینی هوش مصنوعی	بهینه‌سازی بودجه و حفاری
مستندنگاری	نقشه‌برداری دستی	فتوگرامتری خودکار و	دقت میلی‌متری

[1] CNN
[2] WODAN Project
[3] Verschoof-van der Vaart
[4] NLP
[5] RAG
[6] Hoang
[7] Context
[8] AI-Driven

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

گام عملیاتی	روش سنتی (دستی)	روش هوشمند[8]	پیامد کاربردی
		مدل‌های چندوجهی	و سرعت آنی
تحلیل نهایی	تدوین گزارش (ماه‌ها زمان)	تولید پیش‌نویس تحلیلی توسط مدل‌های زبانی	انتشار سریع و دقیق نتایج

یافته‌های کاربردی و بررسی‌های موردی

بررسی پروژه‌های اجراشده، نشان می‌دهد که مدل‌های هوشمند چگونه می‌توانند در شرایط بحرانیِ سدسازی، نقشِ مؤثری ایفا کنند. در ادامه، هشت مطالعه‌ی موردی مهم در دو لایه‌ی «پایش پهنه‌ای» و «تحلیل یافته‌های خرد» بررسی می‌شوند.

- شناسایی خودکار و پیمایش در مقیاس کلان

- **پروژه وودان (WODAN)-هلند:** ورشوف-ون در وارت، ۲۰۲۰، با به‌کارگیری یادگیری عمیق برای تحلیل داده‌های لیدار، موفق به ردیابی بیش از ۱۰۰۰ گورپشته و سامانه‌های کهنِ زراعی در دلِ جنگل‌های متراکم شد. این تجربه نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند بینایی باستان‌شناس را در مناطق پرپوشش تقویت نماید؛ مزیتی که برای سدهای واقع در جنگل‌های شمال یا ارتفاعات غرب ایران، حیاتی است.
- **پایگاه داده‌ی بین‌النهرین:** ارنگو[1] (۲۰۲۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی، ناهنجاری‌های ناشی از «خاکِ دست‌خوردهٔ باستانی[2]» را شناسایی کرد. این فناوری برای سدسازی در دشت‌های خوزستان و ایلام که محوطه‌های خشتی آن شباهت طیفی زیادی به زمین‌های اطراف دارند، یک ابزارِ تشخیصِ مهم و کاربردی است.
- **بازخوانی تصاویر (برنامه‌ی کورونا):** پیستولا[3]، ۲۰۲۵ با تحلیل تصاویر دهه‌ی ۱۹۶۰، موفق به بازیابی نقشه‌ی محوطه‌هایی شد که امروزه به دلیل گسترش کشاورزی یا طرح‌های عمرانی کاملاً تسطیح شده‌اند. هوش مصنوعی چهره پیشینِ حوضه آبریز سدها را پیش از تخریب‌های نوین، بازسازی می‌کند.
- **پایش سامانه‌های آبرسانی کردستان:** پژوهش سروش[4]، ۲۰۲۰ در شناسایی خودکار قنوات با دقت ۸۲٪، دلیلی بر توانایی درکِ مهندسیِ کهن کردستان عراق است. ردیابی این سامانه‌های زیرزمینی پیش از آبگیری سد، از منظر درکِ تاریخِ مدیریت آب در ایران، اهمیتی زیادی دارد.

- تحلیل یافته‌های خرد و مدیریت هوشمند دانش

- **پروژه دیپ‌تایم (Deep Time)- انگلستان:** این مطالعه، نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان یک «فیلترِ اولیه»، سایت‌های با اهمیتِ پایین را حذف کرده و تمرکز گروه‌های متخصص را بر نقاطِ بحرانی معطوف کند؛ رویکردی که زمانِ بررسی‌های میدانی را تا ۷۰٪ کاهش داده است (دیپ‌تایم، ۲۰۲۲).
- **بازسازی متونِ مخدوش (مدل آینیاس):** مدل توسعه‌یافته توسط گوگل دیپ‌مایند[5] ۲۰۲۵، با دقت ۷۳٪ قادر به پیشنهاد افتادگی واژگان در کتیبه‌های فرسوده است. در کاوش‌های اضطراری سدها که یافته‌ها اغلب در وضعیتِ حفاظتی نامطلوبی هستند، این ابزار می‌تواند بسیار کاربرد داشته باشد.

[1] Orengo
[2] Antrosols
[3] Pistoia
[4] Soroush
[5] Google DeepMind

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

- **گونه‌شناسی آنیِ سفال (پروژه پانگ):** پانگ[1]، ۲۰۲۴ با استفاده از مدل‌های بینایی-زبانی، فرآیند طبقه‌بندی و ثبت یافته‌های سفالی را به‌صورت خودکار انجام داده است. این فنّاوری، گسستِ زمانیِ میان «کشف اثر» و «ثبت در گزارش نهایی» را به حداقل می‌رساند.
- **ردیابی استقرارهای بیابانی (KAUST):** شناسایی هزاران ساختار سنگی پیش از تاریخ در عربستان توسط دانشگاه ملک عبدالله[2]، ۲۰۲۲، نشان داد که در اراضی وسیع و فاقد عارضه، دقتِ ماشین در شناسایی الگوهای پراکنده، به‌مراتب بیشتر از پیمایش‌های انسانی است.

- تحلیل تطبیقی و برآورد کارایی

مقایسه‌ی عملکرد این پروژه‌ها در جدول (۲) نشان می‌دهد که هوش مصنوعی یک جهشِ واقعی در نرخ دقت به وجود آورده است.

جدول (۲): تحلیل عملکرد هوش مصنوعی در مطالعات موردی منتخب (یافته‌های پژوهش حاضر)

نام پروژه	کانون تمرکز	نرخ موفقیت / دقت	پیامد اصلی
وودان (هلند)	**شناسایی در اراضی جنگلی**	**۹۴٪**	**غلبه بر پوشش گیاهی**
سروش (کردستان)	**سامانه‌های آب‌رسانی (قنات)**	**۸۲٪**	**ردیابی سازه‌های زیرزمینی**
آینیاس (گوگل)	**بازخوانی کتیبه‌ها**	**۷۳٪**	**بازسازی حافظه مکتوب**
پیستویا (بین‌النهرین)	**بازسازی مناظر تخریب‌شده**	**۹۰٪**	**احیای نقشه‌های باستانی**

-چارچوب عملیاتی پیشنهادی: «هوش مصنوعی یکپارچه برای باستان‌شناسی نجات‌بخش» برای مدیریت میراث در حوضه آبریز سدها

بر اساس تحلیلِ خلأهای موجود در پروژه‌های نجات‌بخش ایران، این پژوهش مدل «هوش مصنوعی یکپارچه برای باستان‌شناسی نجات‌بخش[3]» را پیشنهاد می‌دهد (شکل ۱). این مدل، به‌عنوان یک «مغز متفکر واسط»، وظیفه دارد داده‌های خامِ مهندسی را به تصمیمات دقیقِ باستان‌شناختی تبدیل کند.

- لایه‌بندی عملکردی سیستم پیشنهادی

ساختار پیشنهادی از سه لایه‌ی عملیاتی تشکیل‌شده که توسط یک «هسته‌ی مرکزیِ استنتاج‌گر» هماهنگ می‌شوند:

- **لایه اول؛ پایش طیفی و رادار (لایه بصری):** هدف این لایه، پایشِ مستمر و خودکارِ تمام سطح مخزن سد است. در این بخش، الگوریتم‌های پیشرفته (مانند Mask R-CNN) روی داده‌های لیدار و تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بسیار بالا[4] متمرکز می‌شوند. برخلاف روش‌های سنتی که تنها عوارضِ برجسته را می‌بینند، این لایه با تحلیلِ «بخش‌بندی معنایی»، حتی نوساناتِ ظریفِ پوشش گیاهی یا تغییرات حرارتی خاک را که نشان‌دهنده‌ی ابنیه مدفون[5] هستند، ردیابی می‌کند. طبق پژوهش ژو[6]، ۲۰۱۹، این لایه خطای نادیده انگاری سایت‌های زیرسطحی را به حداقل می‌رساند.
- **لایه‌ی دوم؛ استنتاج محتوایی و بازیابی پیشینه (لایه‌ی دانش):** این لایه، یافته‌های لایه اول را به «هویت تاریخی» پیوند می‌زند. با بهره‌گیری از معماری تولید تقویت‌شده با بازیابی، سامانه تمام گزارش‌های کاوش‌های

[1] Pang
[2] King Abdullah University of Science and Technology
[3] Integrated Rescue Archaeology AI
[4] VHR
[5] Crop Marks
[6] Zhu

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

دهه‌های اخیر در حوضه رودخانه مربوطه را در حافظه فعال خود دارد. به‌محض شناسایی یک تپه یا سازه، لایه‌ی دوم گزارش‌های مشابه را فراخوانی کرده و تخمین می‌زند که محوطه متعلق به کدام دوره (مثلاً ایلامی یا ساسانی) است. این «تفسیرِ اولیه»، سرعت ارزیابی‌های فاز دوم را تا ۸۰ درصد ارتقا می‌دهد (هوانگ[1]، ۲۰۲۴).

- **لایه‌ی سوم؛ ماتریس خطر و اولویت‌بندی هیدرولیکی (لایه‌ی تصمیم):** این لایه، وجه تمایزِ مدل پیشنهادی برای صنعت برق‌آبی است. این سامانه، محوطه‌ها را در یک ماتریس سه‌بعدی (ارزشِ تاریخی، عمقِ تدفین و زمانِ غرق‌شدگی) قرار می‌دهد. سایت‌هایی که در پایین‌ترین ترازِ مخزن (نزدیک به بدنه‌ی سد) قرار دارند و زودتر غرق می‌شوند، در وضعیت «هشدار قرمز» قرار می‌گیرند تا تیم‌های کاوش، منابعِ محدودِ خود را دقیقاً در نقاط بحرانی هزینه کنند.

– پروتکل «انسان در حلقه[2]»

در این مدل، هوش مصنوعی جایگزین باستان‌شناس نشده، بلکه قدرتِ او را افزایش می‌دهد. سیستم برای هر تشخیص خود، یک «شاخص اطمینان[3]» صادر می‌کند:

- **اطمینان بالای ۸۵٪:** محوطه مستقیماً در نقشه GIS ثبت و دستورِ مستندسازیِ فوری صادر می‌شود.
- **اطمینان ۵۰ تا ۸۵٪:** مورد به‌عنوان یک «فرضیه‌ی مشکوک» به باستان‌شناسِ مقیم اعلام می‌شود تا در بازدید میدانی، آن را تائید یا رد کند.
- **اطمینان زیر ۵۰٪:** داده‌ها بایگانی‌شده و تنها در صورت کشف شواهدِ جانبی مجدداً بازخوانی می‌شوند (کاسینی[4]، ۲۰۲۳).

– بستر بومی: مدل زبانی

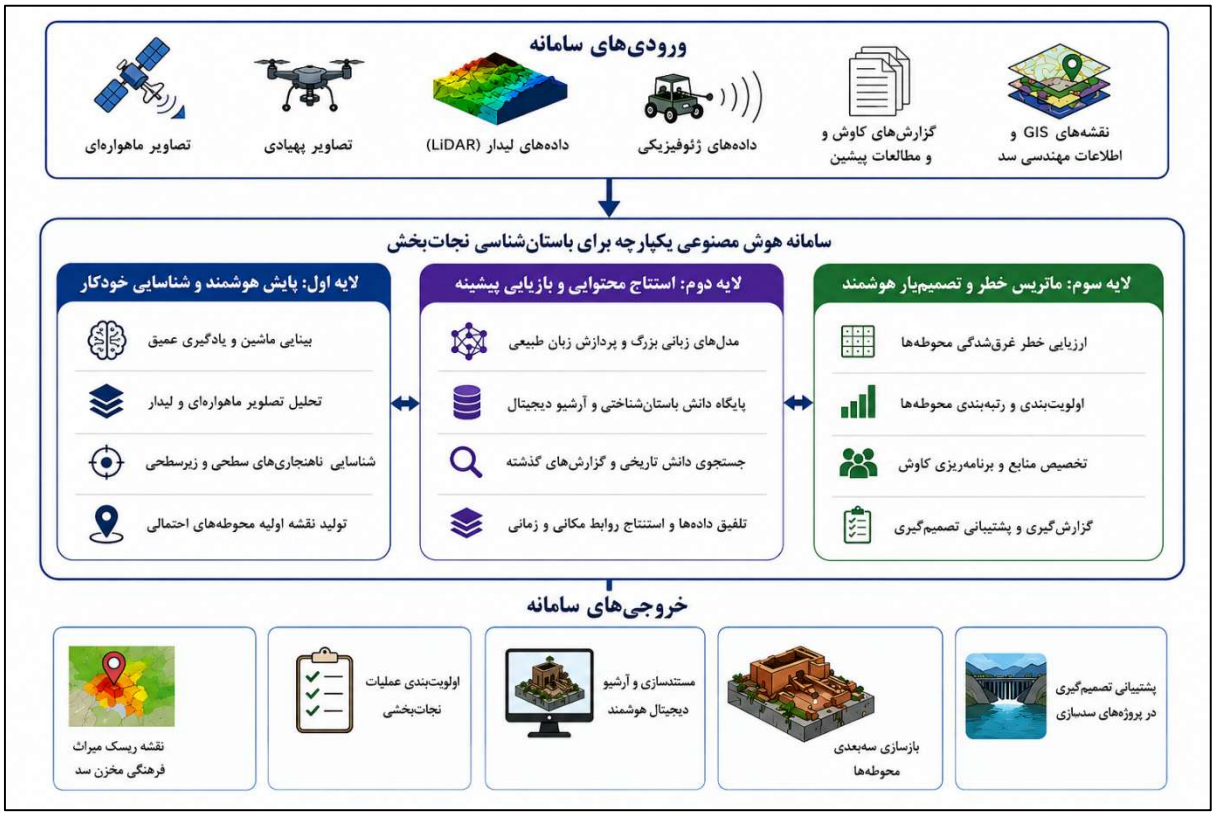
برای موفقیت این مدل، در مختصات جغرافیایی ایران، توسعه‌ی یک مدل زبانی تخصصی ضرورت دارد. این مدل، باید بر روی ادبیاتِ باستان‌شناسیِ ایران (از متون لایه‌نگاری شوش تا کتیبه‌های پارس) آموزش ببیند. بدون این بومی‌سازی، هوش مصنوعی ممکن است در تشخیص تفاوت‌های ساختاری میان معماری خشتی دشت‌های خوزستان و قلعه‌های سنگی زاگرس دچار لغزش شود (اردلان[5]، ۲۰۲۵).

جدول (۳): ارزیابی تطبیقی مدل پیشنهادی با نیازهای سدسازی(یافته‌های پژوهش حاضر)

قابلیت کلیدی	زیرساخت فنی	دستاورد برای پروژه عمرانی	سطح اطمینان
پایش یکپارچه‌ی مخزن	بینایی ماشین	حذف غافلگیری‌های حینِ اجرای سد	بالا (۹۰٪+)
تفسیر خودکار آثار	مدل‌های زبانی	کاهش زمانِ مطالعاتِ فاز اول و دوم	متوسط (۸۰٪)
مدیریت اولویت‌ها	تحلیل ماتریس ریسک	بهینه‌سازی بودجه و نیروی انسانی	بسیار بالا
بازسازی پس از غرق‌شدگی	مدل‌های مولد	صیانت از دانش تاریخی (نجات دیجیتال)	بالا (۷۵٪)

[1] Hoang
[2] HITL
[3] Confidence Score
[4] Casini
[5] Ardalan

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]



شکل (۱): معماری سامانه هوشمند یکپارچه‌ی پیشنهادی

نتایج و بحث

استفاده از هوش مصنوعی در ساختار باستان‌شناسی نجات‌بخش ایران، نه‌تنها یک ابزار کمکی، بلکه مواجهه‌ای است با پیچیدگی‌های ساختاری و ملاحظاتِ امنیتِ ملی. تلاقی این فناوری با واقعیت‌های پروژه‌های سدسازی را می‌توان در چهار محورِ کلیدی مورد بررسی قرارداد:

- سوگیری الگوریتمی و تهدیدِ یکسان‌سازی فرهنگی:

یکی از مخاطراتِ جدی در به‌کارگیری مدل‌های زبانی بزرگ و سامانه‌های بینایی ماشین، مسئله «سوگیری الگوریتمی[1]» است. اکثر مدل‌های کنونی، بر پایه‌ی داده‌های باستان‌شناسیِ غربی و الگوهای معماری سنگی آموزش‌دیده‌اند.

- **چالش بومی:** معماری باستانی ایران، به‌ویژه در حوضه‌های رودخانه‌ای نظیر کارون، کرخه و زهره، عمدتاً بر پایه‌ی «خشت و گل» استوار است. ناهنجاری‌های بصری و حرارتیِ تپه‌های خشتی در تصاویر ماهواره‌ای، با بقایای سنگی کلاسیک تفاوت ماهوی دارد. تکیه بر الگوریتم‌های جهانیِ بازبینی نشده، خطرِ «نادیده‌انگاریِ» محوطه‌های ایلامی یا مفرغ ایران را به همراه دارد؛ چراکه ماشین ممکن است آن‌ها را به‌عنوان عوارض طبیعی زمین طبقه‌بندی کند. این «سوگیری دیجیتال» می‌تواند منجر به صدور مجوزهای اشتباه برای آبگیری سدها و نابودی جبران‌ناپذیرِ شناسنامه تمدنی منطقه شود (اردلان، ۲۰۲۵).

- صیانت از داده‌ها و امنیت میراث ملی

در پروژه‌های عمرانی ایران، نقشه‌های لیدار و تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا، جزو اسناد «حساس» و گاه «محرمانه» محسوب می‌شوند.

چالش بومی: استفاده از هوش‌های مصنوعی مبتنی بر ابر (مانند مدل‌های OpenAI) برای تحلیل داده‌های سدسازی، با چالش‌های امنیتی و حاکمیتی روبروست. ارسال مختصات دقیق محوطه‌های شناسایی‌نشده به سرورهای خارج از کشور، خطر سوءاستفاده از آثار، توسط

[1] Algorithmic Bias

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

باندهای بین‌المللی را افزایش می‌دهد. ازاین‌رو، تأکید بر توسعه‌ی «مدل‌های زبانی کوچک» و استقرار محلی[1] آن‌ها بر روی سرورهای داخلی، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت برای حفظ حاکمیتِ فناورانه بر گذشته است.

– مسئولیت‌پذیری در قبال «جعبه‌ی سیاه» و خلاء قانونی

هوش مصنوعی گاه دچار «توهم[2]» شده یا خروجی‌هایی غیرقابل‌تفسیر ارائه می‌دهد که از آن به‌عنوان مسئله «جعبه‌ی سیاه» یاد می‌شود.

چالش بومی: در نظام حقوقی و اداری ایران، هنوز چارچوبی برای استناد به پیش‌بینی‌های ماشین در مراجع قضایی یا شوراهای فنی وجود ندارد. اگر خطای یک الگوریتم، منجر به تخریب یک سایت باستانی شود، مسئولیت حقوقی، بر عهده پیمانکار است یا توسعه‌دهنده نرم‌افزار؟ برای عبور از این ابهام، رویکرد «انسان در حلقه[3]» باید به عنوان یک پروتکلِ قانونی تثبیت شود تا هوش مصنوعی، تنها در مقام «بازوی مشورتی» باقی بماند و مرجعیتِ نهایی تائید یا رد، همچنان در اختیار باستان‌شناس انسانی باشد (کاسینی، ۲۰۲۳).

– مقاومت سازمانی و اخلاق حرفه‌ای

گذار از باستان‌شناسیِ سنتی به مدل‌های هوشمند، با مقاومت‌هایِ ساختاری در بدنه اداری مواجه خواهد شد. شکاف میان تخصص‌های باستان‌شناسی میدانی و علوم داده، مانعی بر سر راهِ تلفیق این دو حوزه است. علاوه بر این، نباید اجازه داد هوش مصنوعی به ابزاری برای «تقلیل‌گرایی تاریخی» تبدیل شود. این خطر وجود دارد که مدیران پروژه‌های عمرانی تحت‌فشارهای زمانی، تنها به آمارهای کمّی ماشینی بسنده کرده و لایه‌های کیفی و پیچیده تاریخ را فدای شتابِ آبگیری سدها کنند. هوش مصنوعی باید بستری برای «تعمیق دانش» باشد، نه بهانه‌ای برای «توجیهِ تخریب» (گاتیگلیا[4]، ۲۰۲۲).

نتیجه‌گیری و افق‌های پیش رو

پژوهش حاضر بیانگر آن است که تقابلِ فرساینده میان «توسعه زیرساختی» و «حفاظت از میراث باستانی»، با استفاده از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی قابل کاهش است. یافته‌های محوری تحقیق بر موارد زیر تأکید دارند:

- **ارتقای مفهوم نجات:** هوش مصنوعی نگرش «نجات» را از خروجِ شتاب‌زده‌ی اشیاء فیزیکی به سمت «صیانت از دانش تاریخی» از طریق ایجاد آرشیوهای هوشمند و بازسازی‌های دیجیتال هدایت کرده است.
- **بهینه‌سازی عملیاتی:** مدل پیشنهادی «هوش مصنوعی یکپارچه، برای باستان‌شناسی نجات‌بخش» با تلفیقِ بینایی ماشین و مدل‌های زبانی، می‌تواند زمانِ شناسایی و ارزیابی در حوضه‌ی سدها را تا حد زیادی کاهش دهد که این امر رضایت باستان‌شناسان و مجریانِ طرح‌های عمرانی را در پی خواهد داشت.
- **پیش‌نیازهای بومی:** برای گذارِ موفق به این عصر، تدوین پروتکل‌های امنِ تبادل داده، میان وزارت نیرو و وزارت میراث فرهنگی و همچنین توسعه مدل تخصصی از اولویت‌های انکارناپذیر است.

لازم به تأکید است که نتایج این پژوهش، مبتنی بر مطالعات اسنادی و تحلیل تطبیقی بوده و اعتبارسنجی میدانی مدل پیشنهادی، مستلزم اجرای آزمایشی در یک پروژه سدسازی واقعی است.

چشم‌انداز آینده این حوزه، به سمت «باستان‌شناسی خودمختار[5]» حرکت می‌کند؛ جایی که عامل‌های هوشمند به‌طور مستمر، اراضی را پایش کرده و باستان‌شناس، به‌جای وظایف تکراری، بتواند در نقشِ یک «تفسیرگر و ناظرِ سطح عالی»، هویتِ تاریخی و باستانی ایران را در فشار زمانی سدسازی، محافظت نماید. محدودیت اصلی پژوهش حاضر، نبود داده‌های میدانی

[1] On-premise
[2] Hallucination
[3] Human-in-the-loop
[4] Gattiglia
[5] Autonomous Archaeology

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

حاصل از پروژه‌های سدسازی ایران برای ارزیابی عملی مدل پیشنهادی است.

مراجع

1-Ardalan, D. (2025). A benchmark for Cross-cultural AI. Medium .https://idavar.medium.com/a-benchmark-for-cross-cultural-ai-5eb25154323b

2- Assael, Y., Sommerschield, T., Cooley, A. &et al. (2025),"Contextualizing ancient texts with generative neural networks". Nature 645, 141–147. https://doi.org/10.1038/s41586-025-09292-5

۳- Casini, L., Marchetti, N, , Montanucci, A, , Orrù, V, & Roccetti, M. (2023). "A human-AI collaboration workflow for archaeological sites detection". Scientific Reports. 13. 1-11. 10.1038/s41598-023-36015-5.

۴- Djindjian, F. (2004). "Information systems and computerized methods for rescue archaeology". University of Paris I Panthéon-Sorbonne.Pantheon-Sorbonne. academia.edu/7526719/INFORMATION_

۵- Gattiglia, G., (2025), "Managing Artificial Intelligence in Archeology. An Overview", Journal of Cultural Heritage, 71, 225–233. https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.11.020

۶- Highways England & MOLA, (2022), "Deep Time: Artificial Intelligence and Big Data in Infrastructure Archaeology", Technical Report on Heritage Management. https://digventures.com/wp-content/uploads/2022/02/DeepTime_FinalReport_V2.1.pdf

۷- Hoang, T. A., Nguyen, D., & Tran, H. (2024). "A proposed large language model-based smart search for archaeological archive systems". arXiv. https://arxiv.org/html/2501.07024

۸- KAUST Research, (2022), "Deep Learning for the Discovery of Ancient Stone Structures in Arabia", King Abdullah University of Science and Technology News. https://www.kaust.edu.sa/en/news/global-ai-summit

۹- Orengo, H. A., Conesa, F. C., Garcia-Molsosa, A., Lobo, A., Green, A. S., Madella, M., & Petrie, C. A. (۲۰۲۰). "Automated detection of archaeological mounds using machine-learning classification of multisensor and multitemporal satellite data". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 117(31), 18240–18250. https://doi.org/10.1073/pnas.2005583117

۱۰- Pang, H., Zhang, J., & Lee, S., (2024), "An Archaeological Catalog Collection Method Based on Large Vision-Language Models", arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.20088

۱۱- Pistola, A., Orrù, V., Marchetti, N., & Roccetti, M. (2025). "AI-ming backwards: Vanishing archaeological landscapes in Mesopotamia and automatic detection of sites on CORONA imagery". PloS one, 20(8), e0330419. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330419

۱۲- Qi, X., & Wen, R. (2025). "Large Language and Multimodal Models in *Archaeological Science: A Review".* Electronics, *14*(22), 4507. https://doi.org/10.3390/electronics14224507

۱۳- Li, X., Lin, J., & Zhang, X. (2025). "Dynamic Transmission and Innovative Transformation of Cultural Heritage: Generative Artificial Intelligence Practices Based on Cultural Cognitive Models". Applied Sciences, 15(23), 12651. https://doi.org/10.3390/app152312651

۱۴- Soroush, M., Mehrtash, A., Khazraee, E., & Ur, J. A. (2020). "Deep Learning in Archaeological Remote Sensing: Automated Qanat Detection in the Kurdistan Region of Iraq". Remote Sensing, 12(3), 500. https://doi.org/10.3390/rs12030500

۱۵- Tencer, T., & Thompson, R., (2024), "Non-destructive Surveys and AI in Large-scale Infrastructure Projects", Heritage Science Journal. https://heritagesciencejournal.springeropen.com/articles/2024/ai-infrastructure

۱۶- Verschoof-van der Vaart, W. B., Lambers, K., Kowalczyk, W., & Bourgeois, Q. P. J. (2020). "Combining Deep Learning and Location-Based Ranking for Large-Scale Archaeological Prospection of LiDAR Data from The Netherlands". ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(5), 293. https://doi.org/10.3390/ijgi9050293

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال سیزدهم/ ویژه‌نامه فناوری‌های نوین در باستان‌شناسی سدها/ پاییز ۱۴۰۵

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
13th Year/ Special Issue on Modern Technologies Applied in Rescue Archaeology for Dam Projects/ October 2026

Application of Artificial Intelligence in Rescue Archaeology for Iranian Dam Construction Projects: Proposing an Integrated Intelligent System Model

Ali Alijamaat *[1]

Abstract

Large-scale infrastructure projects, particularly dam construction in a vast territory like Iran with a rich civilizational history, have always posed challenges for the protection of cultural heritage. The rapid execution rate of these projects and their extensive geographical coverage seriously hinder the efficiency of traditional archaeological methods in field surveys. Although rescue archaeology has been introduced as a solution to manage this crisis, constraints regarding time, high costs, and accuracy still persist in most projects. Adopting a descriptive-analytical approach, this study examines the modern capabilities of artificial intelligence (AI) in analyzing various data types utilized in these studies, including geospatial data, satellite imagery, and drone photogrammetry. Conducted research and projects demonstrate that shifting from traditional systems to machine learning models, large language models (LLMs), and intelligent agents can accelerate the process of archaeological site identification, artifact survey, and documentation. Furthermore, through predictive analysis, it can mitigate the risk of heritage destruction before the commencement of construction operations. Nevertheless, employing appropriate AI methods and tools in dam construction projects requires access to high-quality, localized datasets, as well as an understanding of their associated risks. While reviewing the challenges and potentials of AI in the rescue archaeology of Iranian dam construction projects, this study proposes a model entitled "Integrated Artificial Intelligence System."

Keywords

Rescue Archaeology; Dam Construction; Generative AI; Deep Learning; Intelligent Agents.

[1] * Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Ab. C., Islamic Azad University, Abhar, Iran.
.jamaat@kiau.ac.ir

Received: 2025/12/31 Accepted: 2026/06/06

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-10-26]