

## مروری بر شناسایی ریسک در پل با استفاده از هوش مصنوعی

نام و نام خانوادگی دانشجویان: شهرزاد عمرانی<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### چکیده:

ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی ( $AI^1$ ) در صنعت ساخت، به‌ویژه در حوزه ساخت پل، انقلابی در مدیریت ریسک ایجاد کرده است. ابزارهای پیشرفته AI با تحلیل داده‌های پیچیده نظیر تاریخچه پروژه‌ها، شرایط محیطی، و عملکرد تأمین‌کنندگان، امکان شناسایی دقیق و پیش‌بینی ریسک‌ها را فراهم می‌کنند. از مواد مجهز به حسگرهای هوشمند گرفته تا الگوریتم‌های یادگیری ماشین و پهنادهای پیشرفته، این فناوری‌ها به بهبود ایمنی، کارایی، و دقت در پروژه‌های ساخت کمک کرده‌اند. این مرور با بررسی ابزارها و کاربردهای مختلف هوش مصنوعی، شامل بینایی کامپیوتری، فناوری اینترنت اشیا ( $IoT^2$ )، و روش‌های یادگیری عمیق، مزایا و محدودیت‌های این فناوری‌ها را در شناسایی ریسک ساخت پل تحلیل می‌کند. همچنین، چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، مقاومت در برابر تغییرات فناوری، و محدودیت داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی کرده و با شناسایی شکاف‌های موجود در پژوهش‌های پیشین، پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که هوش مصنوعی، علی‌رغم چالش‌های موجود، پتانسیل چشمگیری برای ارتقای ایمنی و بهره‌وری پروژه‌های ساخت پل دارد.

واژگان کلیدی: هوش مصنوعی، ساخت پل، پیش‌بینی ریسک .

<sup>1</sup> Artificial Intelligence

<sup>2</sup> Internet of Things

## ۱-مقدمه:

صنعت ساخت در حال تجربه یک تحول چشمگیر با ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی (AI) است. رشد صنعت ساخت به شدت محدود به چالش‌های پیچیده‌ای از جمله افزایش هزینه‌ها و تأخیرات زمانی، مسائل سلامت و ایمنی، بهره‌وری و کمبود نیروی کار که با آن‌ها مواجه است. این مقاله با هدف مرور جامع پژوهش‌های پیشین در این حوزه، به تحلیل مزایا و محدودیت‌های کاربرد AI در مدیریت ریسک ساخت پل می‌پردازد. صنعت ساخت‌وساز یکی از کم‌دیجیتالی‌ترین صنایع جهان است، که این امر موجب شده است که این صنعت نتواند به خوبی با مشکلات فعلی خود مقابله کند. یکی از فناوری‌های پیشرفته دیجیتال، هوش مصنوعی است که در حال حاضر در صنایع مختلفی انقلاب ایجاد کرده است. زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی همچون یادگیری ماشین، سیستم‌های مبتنی بر دانش، بینایی کامپیوتری، رباتیک و بهینه‌سازی در سایر صنایع با موفقیت به کار گرفته شده‌اند تا به سودآوری بیشتر، کارایی، ایمنی و امنیت دست یابند [1]. در حوزه ساخت پل نیز، ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی نقش بسیار ارزشمندی در بهبود کارایی، ایمنی و دقت ایفا می‌کنند. خرابی یا مشکلات ساختاری پل‌ها می‌تواند تأثیرات جدی بر ایمنی عمومی و عملکرد سیستم حمل‌ونقل داشته باشد. یکی از مهم‌ترین مشارکت‌های هوش مصنوعی در این زمینه، شناسایی ریسک است. تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر هوش مصنوعی، مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی را با تحلیل حجم وسیعی از داده‌ها از جمله تاریخچه پروژه، شرایط آب‌وهوایی و عملکرد تأمین‌کنندگان متحول کرده است. این ابزارها می‌توانند ریسک‌های بالقوه را شناسایی کرده و اطلاعات کاربردی ارائه دهند به طوری که مدیران پروژه بتوانند ریسک‌ها را پیش از تشدید کاهش دهند و پروژه‌های مقاوم‌تر و موفق‌تری ایجاد کنند. این پژوهش به بررسی نقش هوش مصنوعی در شناسایی و ریسک در ساخت پل‌ها می‌پردازد. در این راستا، ابزارها و فناوری‌های متعددی نظیر بینایی کامپیوتری، یادگیری ماشین، پهپادهای مجهز به AI، و حسگرهای هوشمند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این تحولات نه تنها به کاهش ریسک‌ها و ارتقای ایمنی کمک می‌کنند، بلکه باعث بهینه‌سازی زمان و هزینه در پروژه‌های ساخت و بهره‌برداری پل نیز می‌شوند. از طریق استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و تحلیل داده‌های بلادرنگ، هوش مصنوعی می‌تواند از بروز مشکلات ساختاری قبل از وقوع جلوگیری کند و به تیم‌های مهندسی در تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر یاری رساند. در نتیجه، این فناوری‌ها نه تنها به بهبود کیفیت پروژه‌ها کمک می‌کنند بلکه امکان ایجاد پل‌های مقاوم‌تر و پایدارتر را فراهم می‌آورند. هدف این مقاله ارائه تصویری جامع از پیشرفت‌ها و محدودیت‌های هوش مصنوعی در شناسایی ریسک در پل و پیشنهاد راهکارهایی برای بهبود و توسعه این فناوری‌ها است.

## ۲- روش شناسی

این مقاله بر اساس بررسی سیستماتیک پژوهش‌های منتشر شده بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ تهیه شده است. مقالات از پایگاه‌های علمی معتبر نظیر Scopus، IEEE، و Google Scholar انتخاب شده و با استفاده از کلیدواژه‌هایی نظیر "هوش مصنوعی در ساخت پل" و "شناسایی ریسک" جستجو شده‌اند. معیارهای انتخاب شامل تمرکز بر کاربرد AI، پوشش مطالعات موردی، و مقالات دارای ارجاعات قوی بوده است.

## ۳- نتایج و دسته بندی

### ۳-۱- هوش مصنوعی در صنعت ساخت

در مقاله ای مروری با عنوان هوش مصنوعی در صنعت ساخت و ساز که در سال ۲۰۲۱ توسط سوفیات و همکاران چاپ شده است به بررسی وضعیت فعلی، فرصت‌ها و چالش‌های آینده به بررسی نقش هوش مصنوعی در مدیریت ساخت پرداخته و به تحلیل روش‌ها و کاربردهای مختلف AI در بهبود فرآیندهای ساخت می‌پردازد. روش‌های مورد استفاده شامل سیستم‌های خبره، مدل‌های هیبریدی، شبکه‌های عصبی و کلونی زنبورهای مصنوعی هستند. همچنین، کاربردهای AI در زمینه‌هایی مانند مدیریت ساخت، پیش‌بینی، بهینه‌سازی و طبقه‌بندی تأثیرات مثبتی در کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی و بهبود تصمیم‌گیری در پروژه‌های ساخت دارند. ادغام AI با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و بینایی کامپیوتری می‌تواند به تحول دیجیتال و بهبود عملکرد پروژه‌ها کمک کند [1]. در مقاله دیگری که توسط ابر و ولف گنگ در ۲۰۲۰ نوشته شده است به پتانسیل‌های هوش مصنوعی در مدیریت ساخت می‌پردازد و توانایی آن در مدیریت پروژه‌های پیچیده با شرکت‌کنندگان متعدد و محدودیت‌های زمانی را مورد تأکید قرار می‌دهد. نویسندگان از مطالعات موردی و داده‌های تجربی برای شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های موجود استفاده کرده و به بررسی الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی می‌پردازند. نویسندگان به بررسی کاربردهای مختلف هوش مصنوعی، از جمله پیش‌بینی هزینه‌ها، بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌ها و مدیریت ریسک می‌پردازند. در نتیجه به ارزیابی تأثیر هوش مصنوعی بر بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت در پروژه‌های ساخت می‌پردازند. همچنین بیان می‌کند که هوش مصنوعی می‌تواند در تصمیم‌گیری و وظایف سازمانی کمک کند، آن‌ها همچنین به نقش داده‌های بزرگ و یادگیری ماشین در بهبود فرآیندهای ساخت و ساز اشاره می‌کنند و تأکید می‌کنند که برای بهره‌برداری مؤثر از هوش مصنوعی، نیاز به داده‌های دقیق و قابل اعتماد وجود دارد. در نهایت، مقاله به این نکته می‌پردازد که هوش مصنوعی می‌تواند به عنوان یک ابزار مکمل برای انسان‌ها عمل کند اما نمی‌تواند به‌طور کامل جایگزین هوش انسانی شود [2]. در مقاله ای با عنوان هوش مصنوعی در مدیریت دارایی‌های ساخت در سال ۲۰۲۲ بیان شده است که ساخت و ساز حدود ۴۰٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی

را به خود اختصاص می‌دهد، که این امر اهمیت استفاده از روش‌های پایدار در ساخت را نشان می‌دهد. سایر بخش‌ها مانند تولید، به‌طور مؤثر از هوش مصنوعی برای مقابله با ناکارآمدی‌ها استفاده کرده‌اند. اکنون بخش ساخت در حال بررسی استفاده از AI برای مدیریت دارایی‌ها است. این مطالعه با هدف یک مرور جامع از کاربردهای AI در AM<sup>3</sup> هست که شکاف‌های تحقیقاتی را شناسایی کند و فرصت‌های آینده را برجسته سازد. مقاله به بررسی ارتباط بین مدیریت دارایی و هوش مصنوعی (AI) می‌پردازد هدف اصلی مقاله شناسایی موضوعات و روندهای تحقیقاتی مرتبط با هوش مصنوعی در مدیریت دارایی است و به بررسی تکنیک‌های مختلف مانند یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و پردازش زبان طبیعی پرداخته شده است [3]. مقاله دیگری تحت عنوان کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی عمران که نصیبیان و همکاران نوشته‌اند به بررسی جامعی از کاربردهای هوش مصنوعی AI، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در صنعت ساخت و ساز نسل ۴.۰ در زمینه‌های مختلف است. این کاربردها شامل طراحی و تجسم معماری، بهینه‌سازی و طراحی مواد، تجزیه و تحلیل سازه‌ها، ساخت برون‌سایتی و اتوماسیون، مدیریت ساخت، نظارت بر پیشرفت و ایمنی، عملکرد هوشمند، مدیریت نظارت بر ساختمان و نیز نظارت بر سلامتی، دوام و تجزیه و تحلیل چرخه عمر و چرخه بهره‌برداری اقتصادی است. این مقاله دیدگاه منحصر به فردی از کاربردهای AIDL<sup>4</sup> و ML<sup>5</sup> در این حوزه‌ها برای تمام طول عمر ساختمان، از مرحله مفهومی، طراحی، ساخت، عملیات و نگهداری تا انتهای عمر می‌باشد. همچنین، راهبردهای جمع‌آوری داده با استفاده از بینش هوشمند و حسگرها، روشهای غربال داده و پس‌پردازش، ذخیره‌سازی داده برای توسعه این مدل‌ها و مسائل موجود در توسعه مدل به تفصیل بررسی شده است [4]. سکر و رافل و مارک در مقاله‌ای به بررسی کاربرد و اعتبار راه‌حل‌های پیشنهادی در زمینه فناوری‌های BIM<sup>6</sup> (مدل‌سازی اطلاعات ساختمان) و واقعیت افزوده پرداخته شده است. نویسندگان، بر اهمیت تعامل و همکاری در بازیابی اطلاعات تأکید می‌کنند و به این نکته اشاره دارند که این تعامل می‌تواند به بهبود کارایی و دقت در پروژه‌های ساختمانی منجر شود. آنها همچنین به نیاز به تحقیقات آینده در مقیاس‌های بزرگتر و جمعیت‌های متنوع‌تر اشاره می‌کنند تا نتایج به‌دست‌آمده قابل تعمیم باشند. مقاله به بررسی چالش‌ها و فرصت‌های موجود در ادغام این فناوری‌ها می‌پردازد و پیشنهاداتی برای بهبود روش‌های فعلی ارائه می‌دهد. در نهایت، تأکید می‌شود که تکرار یافته‌ها از نمونه‌های کوچک به جمعیت‌های بزرگتر ضروری است تا اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج افزایش یابد [5]. در مطالعه مروری توسط میثم بیات بر کاربردهای هوش مصنوعی منطبق با هر یک از حوزه‌های ۹ گانه مدیریت پروژه مبتنی بر استاندارد PMBOK شده است هدف از این تحقیق بررسی هوش مصنوعی و کاربرد آن در مدیریت پروژه و شناخت حوزه‌های نه گانه مدیریت پروژه مبتنی بر استاندارد PMBOK Bradley Project Management Body of Knowledge و روش تحقیق به لحاظ هدف کاربردی بوده و

<sup>3</sup> Asset management<sup>4</sup> Android Interface Definition Language<sup>5</sup> Machine Learning<sup>6</sup> Building Information Modeling

روش انجام آن به صورت توصیفی بوده که به روش کتابخانه‌ای اطلاعات آن جمع آوری شده است. در این مطالعه بیان شده است که؛ با استفاده از هوش مصنوعی، محدوده و قلمرو پروژه های ساختمانی نا محدود شده و ابزار مناسبی برای کنترل محدوده پروژه ارائه شده است [6]. مقاله ای تحت عنوان مدل پذیرش تکنولوژی های مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) در سال ۲۰۲۲ چاپ شده که به بررسی مدل پذیرش فناوری (TAM<sup>۷</sup>) و چارچوب فناوری-سازمان-محیط (TOE) در پذیرش فناوری های مبتنی بر هوش مصنوعی در شرکت های ساختمانی می پردازد. نویسندگان به تحلیل عوامل مؤثر بر پذیرش این فناوری ها و ارائه راهنمایی های عملی برای سازمان ها می پردازند. نتایج نشان می دهد که درک این عوامل می تواند به بهبود پذیرش و استفاده از فناوری های هوش مصنوعی کمک کند. این تحقیق با استفاده از مدل معادلات ساختاری، نیت و پذیرش کاربران را بررسی کرده و به شناسایی ویژگی های فناوری و عوامل محیطی پرداخته است. هوش مصنوعی به کار رفته شامل تحلیل داده های بزرگ برای پیش بینی ریسک ها و بهبود بهره وری است و پیاده سازی آن نیاز به رابط های کاربر پسند و استراتژی های مناسب برای تطابق با فرهنگ سازمانی دارد [7]. ونگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی نقش فناوری های هوش مصنوعی در صنعت ساخت پرداخته و با استفاده از ابزارهای MCDM و تحلیل های مختلف، ۱۳ پارامتر کلیدی را شناسایی کرده اند که بر تأثیر فناوری های هوش مصنوعی در این صنعت تأثیرگذار هستند. این تحقیق با استفاده از داده های منتشر شده از ناشران معتبر و فیلتر کردن مقالات مرتبط انجام شده است. روش Delphi-ANP در این تحقیق به منظور شناسایی و تحلیل پارامترهای کلیدی استفاده شده است. ابتدا با استفاده از روش دلفی، نظرات کارشناسان جمع آوری و سپس با استفاده از ANP (تحلیل شبکه ای) وزن های نسبی معیارها تعیین شده است. این فرآیند به تصمیم گیرندگان کمک می کند تا درک بهتری از تأثیرات فناوری های هوش مصنوعی در صنعت ساخت داشته باشند [8]. در مقاله ای که توسط دبراه و همکاران نوشته شده به تحلیل بیلیومتریک و سیستماتیک ۳۸۳ مقاله مرتبط با هوش مصنوعی در طراحی ساختمان های سبز پرداخته و ۷۶ مقاله کلیدی را برای بررسی عمیق تر انتخاب کرده است. این تحقیق از چهار مرحله اصلی شامل جستجوی مقالات، اعمال معیارهای حذف، تحلیل بیلیومتریک و تحلیل سیستماتیک استفاده کرده است. تحلیل بیلیومتریک با ابزارهایی مانند VOSviewer و CiteSpace، روندهای تحقیقاتی، نشریات کلیدی و ویژگی های ساختاری این حوزه را شناسایی کرده است. خوشه های تحقیقاتی به شش گروه اصلی تقسیم می شوند که بر موضوعاتی مانند منطق فازی و تصمیم گیری چندمعیاره تمرکز دارند. نتایج نشان می دهند که تحقیقات بیشتر درون نگر هستند و نیاز به همکاری بین رشته ای بیشتری احساس می شود. این مقاله به نیاز به گسترش دانش و تجربه در زمینه هوش مصنوعی در صنعت ساختمان اشاره دارد [9]. ذوالفقاری و همکاران به بررسی اثرات هم افزایی هوش مصنوعی (AI) و مدل سازی اطلاعات ساختمان بر اجرای مدیریت ارزش (VM<sup>۸</sup>) در پروژه های ساخت پایدار پرداخته اند و از یک روش چندمعیاره برای تحلیل داده ها و نظرات کارشناسان

<sup>7</sup> Technology Acceptance Model<sup>8</sup> Value management

استفاده شده تا پتانسیل این فناوری‌ها در ارتقای پایداری در صنعت ساخت مشخص شود. یافته‌ها نشان می‌دهند که ترکیب AI و BIM به شیوه‌های ساخت پایدار کمک می‌کند و می‌تواند به بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در پروژه‌های ساخت پایدار منجر شود. این تحقیق به شناسایی معیارهای کلیدی مانند تجزیه و تحلیل هزینه چرخه عمر، بهره‌وری انرژی و بهینه‌سازی منابع می‌پردازد. همچنین، از روش‌های MCDM<sup>9</sup> مانند AHP و WLSC برای ارزیابی اثربخشی این فناوری‌ها استفاده شده است [10]. در سال ۲۰۲۴ مقاله ای تحت عنوان کاربردهای هوش مصنوعی برای بهره‌وری انرژی در طول چرخه عمر ساختمان که توسط یوسف و همکاران نوشته شده به این موضوع پی برده شده که استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی (AI) در ساختمان‌ها می‌تواند به کاهش مصرف انرژی از طریق کنترل پیشرفته، اتوماسیون و افزایش قابلیت اطمینان کمک کند. این بررسی به کاربرد هوش مصنوعی برای افزایش بهره‌وری انرژی در مراحل مختلف چرخه عمر ساختمان، شامل طراحی، ساخت، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و مقاوم‌سازی می‌پردازد. مطالعات مختلف بین سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳، با استفاده از جستجوهای کلمات کلیدی، شناسایی و تجزیه و تحلیل شدند. این مقاله فرصت‌های آینده برای استفاده از AI در بهره‌وری انرژی و کاربردهای آن در طراحی، تصمیم‌گیری، کنترل پیش‌بینی‌کننده و تشخیص خطا را بررسی می‌کند [11]. مقاله ای که در سال ۲۰۲۳ تحت عنوان ادغام فناوری‌های پیشرفته هوش مصنوعی (AI)، اینترنت اشیا (IoT) و داده‌های کلان برای صنعت معماری، مهندسی و ساخت (AEC)<sup>10</sup> هوشمند و پایدار چاپ شده است به بررسی معیارهای انتخاب سیستم قالب‌گیری برای ساختمان‌های بتن مسلح (RCC) پرداخته و از روش‌های تحلیلی مانند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای شناسایی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر انتخاب استفاده می‌کند. هوش مصنوعی، اینترنت اشیا (IoT) و داده‌های کلان در این تحقیق به بهینه‌سازی فرآیند انتخاب و پیش‌بینی عملکرد سیستم‌ها کمک می‌کنند. این تکنولوژی‌ها باعث بهبود تصمیم‌گیری، کاهش خطاهای انسانی و افزایش کارایی در صنعت ساخت می‌شوند. چالش‌های اصلی شامل ادغام داده‌ها، امنیت و همکاری بین‌رشته‌ای است که با راهکارهایی مانند استانداردسازی داده‌ها و ایجاد پلتفرم‌های یکپارچه برطرف می‌شوند. این رویکردها به بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌ها و پایداری در پروژه‌های ساخت کمک می‌کنند [12]. در ۲۰۲۳ ران و نیتین در مقاله ای به بررسی نقش هوش مصنوعی تولیدی، به‌ویژه ChatGPT، در صنعت ساخت می‌پردازد و نشان می‌دهد که این فناوری‌ها می‌توانند در بهبود طراحی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، ساخت انرژی‌کارآمد و پایدار، و بهینه‌سازی مدیریت پروژه‌ها کمک کنند. مقاله همچنین چالش‌های پیاده‌سازی این تکنولوژی‌ها، از جمله مسائل اخلاقی و نیاز به آموزش تخصصی، را تحلیل می‌کند. از طریق داده‌های تجربی و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، تأثیر این مدل‌ها بر بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت در پروژه‌ها ارزیابی شده است. همچنین، این تحقیق به شبیه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی انتخاب‌های طراحی و انتخاب مصالح با کمک هوش مصنوعی پرداخته است. نتایج نشان‌دهنده بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها به واسطه استفاده از

<sup>9</sup> Multi-Criteria Decision-Making<sup>10</sup> Architecture, Engineering, and Construction

هوش مصنوعی در پروژه‌های ساخت هستند [13]. ایوانوا و همکاران در ۲۰۲۳ به کاربردهای هوش مصنوعی در صنعت ساخت پرداخته و به تحلیل ویژگی‌ها و مکانیزم‌های استفاده از آن می‌پردازد. با استفاده از روش‌هایی مانند یادگیری ماشین، بینایی کامپیوتری و رباتیک، این تحقیق به بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت، مدل‌سازی سه‌بعدی و نظارت بر پیشرفت ساخت کمک می‌کند. روش‌شناسی مقاله شامل مرور ادبیات، جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل تأثیر تکنیک‌های مختلف هوش مصنوعی بر فرآیندهای ساخت است. نتایج نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند به بهبود برنامه‌ریزی پروژه، افزایش خودکارسازی، و صرفه‌جویی در هزینه‌ها کمک کند. مقاله همچنین فرصت‌ها و چالش‌های تحقیقاتی آینده در این حوزه را شناسایی می‌کند [14]. در مقاله دیگری به اهمیت استفاده از هوش مصنوعی در پروژه‌های ساختمانی پرداخته و نشان می‌دهد که AI می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری، افزایش دقت برنامه‌ریزی و کاهش هزینه‌ها و خطاها کمک کند. هوش مصنوعی در مراحل مختلف پروژه، از طراحی و برنامه‌ریزی تا نگهداری و تخریب، با تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیندها نقش دارد. روش‌های AI مانند یادگیری ماشین و نظارت هوشمند برای پیش‌بینی نتایج و شناسایی مشکلات استفاده می‌شوند. پژوهش‌های تجربی نشان می‌دهند که استفاده از AI به کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی در پروژه‌ها منجر شده است. نتایج تحلیل‌های آماری تأکید دارند که هوش مصنوعی در مراحل طراحی و برنامه‌ریزی اهمیت بیشتری دارد [15]. بنگ و سوفی و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی چگونگی استفاده از هوش مصنوعی (AI) برای کاهش زباله در سایت‌های ساختمانی می‌پردازد و شامل طراحی تحقیق مختلط با مصاحبه‌های کیفی و تحلیل داده‌های کمی است. ۱۸ اقدام پیشنهادی برای کاهش زباله شناسایی شده که بر اهمیت تعیین اهداف، بهینه‌سازی منابع و پیگیری مداوم تأکید دارد. نتایج نشان می‌دهد که پیاده‌سازی هوش مصنوعی می‌تواند به افزایش پایداری، کاهش اثر کربنی و بهبود عملکرد پروژه منجر شود [16]. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین (ML) به طور فزاینده‌ای در صنعت ساخت برای افزایش بهره‌وری و بهینه‌سازی فرآیندها به کار می‌روند. این فناوری‌ها در پیش‌بینی مدت زمان پروژه، برآورد هزینه، ارزیابی ریسک و پیش‌بینی مصرف انرژی استفاده می‌شوند که به بهبود تصمیم‌گیری و کارایی کمک می‌کند. با وجود پتانسیل‌های زیاد، پذیرش این تکنولوژی‌ها در ساخت هنوز کند است و تکنیک‌های یادگیری عمیق به طور کامل مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. روش کار هوش مصنوعی شامل جمع‌آوری داده‌ها، پیش‌پردازش، انتخاب مدل مناسب، آموزش مدل با استفاده از داده‌های تاریخی و ارزیابی عملکرد آن است. اعتبارسنجی معمولاً با استفاده از تکنیک‌هایی مانند تقسیم داده‌ها به مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی و استفاده از معیارهای ارزیابی مانند دقت، یادآوری و F1-Score انجام می‌شود. نتایج پیاده‌سازی هوش مصنوعی در صنعت ساخت شامل بهبود در پیش‌بینی‌ها، کاهش هزینه‌ها و زمان پروژه و افزایش ایمنی و کارایی در فرآیندها است. و در این پژوهش، هوش مصنوعی (AI) به عنوان ابزاری برای بهبود فرآیندهای مختلف در صنعت ساخت معرفی شده است. AI در پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی بتن، بهینه‌سازی طراحی، مدیریت پروژه و افزایش ایمنی در محل کار به کار رفته است. همچنین، مقاله به بررسی چالش‌ها و فرصت‌های موجود در پیاده‌سازی AI در مراحل مختلف چرخه عمر پروژه‌های ساخت پرداخته است [17]. در مقاله تن و کنگ چارچوبی را معرفی شده که هوش مصنوعی را با

چاپ سه بعدی در صنعت ساخت ترکیب می کند. این چارچوب شامل پنج جنبه کلیدی است: انتخاب و بهینه سازی مواد چاپ سه بعدی، طراحی اتوماسیون، استفاده از فناوری های دیجیتال در ساخت (مانند BIM و شبیه سازی)، ربات ها برای چاپ سه بعدی، و ادغام BIM با چاپ سه بعدی برای بهبود کارایی و کاهش هزینه ها. مقاله نتیجه گیری می کند که ترکیب BIM، AI و چاپ سه بعدی می تواند فرآیندهای ساخت و ساز را خودکار و مؤثرتر کند و به حل چالش های صنعت کمک نماید [18]. در ادامه طی بررسی که در این تحقیق انجام شده تکنیک های هوش مصنوعی به کار رفته در مقالات و کاربرد آن ها و میزان به کارگیری آنها بررسی و آورده شده است.

جدول ۱) تکنیک های هوش مصنوعی به کار رفته در مقالات مرور شده و کاربرد و میزان به کارگیری آنها

تکنیک های هوش مصنوعی	کاربرد و موارد استفاده در مقالات این حوزه
یادگیری ماشین (Machine Learning)	در اکثر مقالات به ویژه در زمینه پیش بینی ها، بهینه سازی ها، و تجزیه و تحلیل های مختلف، یادگیری ماشین به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته است.
شبکه های عصبی (Neural Networks)	این تکنیک در بسیاری از مقالات برای پیش بینی و بهینه سازی زمان بندی، هزینه ها و مدیریت پروژه ها استفاده شده است.
مدل های هیبریدی (Hybrid Models)	این تکنیک به ویژه در مقالاتی که به بهبود فرآیندهای ساخت و کاهش هزینه ها می پردازند، تکرار شده است.
بینایی کامپیوتری (Computer Vision)	برای نظارت بر پیشرفت پروژه ها و تحلیل تصاویر، این تکنیک به طور مکرر در مقالات مختلف ذکر شده است.
یادگیری عمیق (Deep Learning)	در مواردی که نیاز به تحلیل داده های پیچیده و مدل سازی دقیق تر است، این تکنیک در مقالات مختلف استفاده شده است.
اینترنت اشیا (IoT)	برای جمع آوری داده ها و نظارت بر وضعیت پروژه ها، این تکنیک در مقالات مختلف مشاهده شده است.
یادگیری ماشین	در تحلیل داده های حجیم در زمینه های مختلف پروژه های ساخت و ساز، این تکنیک تکرار شده است.

در نتیجه تکنیک‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی بیشتر از دیگر تکنیک‌ها در مقالات مختلف تکرار شده‌اند. مدل‌های هیبریدی، ادغام با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و بینایی کامپیوتری نیز به‌طور مکرر ذکر شده‌اند. یادگیری عمیق، پردازش زبان طبیعی، اینترنت اشیا، داده‌های کلان و رباتیک در برخی مقالات خاص مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

### ۳-۲- فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای شناسایی ریسک در ساخت پل

با تحلیل داده‌های تاریخی، الگوهای آب‌وهوایی، شرایط ترافیکی، و سایر عوامل مرتبط، این ابزارها جداول زمانی دقیقی برای ساخت ارائه می‌دهند. این امر باعث پیش‌بینی تأخیرهای احتمالی و بهینه‌سازی تخصیص منابع می‌شود که در نهایت زمان‌بندی پروژه را بهبود می‌بخشد و هزینه‌های اضافی را کاهش می‌دهد علاوه بر این، پهنادهای مجهز به فناوری هوش مصنوعی به ابزارهایی ضروری برای نظارت بر سایت‌های ساخت تبدیل شده‌اند. این پهنادهای تصاویر هوایی زنده ارائه می‌دهند که به مدیران پروژه کمک می‌کند پیشرفت کار را ارزیابی کرده، مشکلات بالقوه را شناسایی کرده و تصمیمات آگاهانه بگیرند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی داده‌های به‌دست‌آمده از پهنادهای را تحلیل کرده تا ناهنجاری‌ها را شناسایی، حجم انبارها را اندازه‌گیری و ایمنی کارگران را پایش کنند، و به این ترتیب مدیریت پروژه را بهینه کنند. هوش مصنوعی همچنین در ساخت مواد هوشمندی که دارای حسگر و الگوریتم‌های هوش مصنوعی هستند، به کار گرفته شده است. این مواد می‌توانند علائم فرسایش، آسیب یا تنش را شناسایی کنند. نظارت در لحظه بر این مواد، امکان تعمیرات پیشگیرانه را فراهم کرده و از وقوع خرابی‌های احتمالی جلوگیری می‌کند و عمر پل‌ها را تضمین می‌نماید. مقاله ای توسط چون و همکاران در ۲۰۲۰ نوشته شده است که در آن به بررسی استفاده از فناوری‌های پهناد (UAV<sup>11</sup>)، هوش مصنوعی (AI) و تکنولوژی اندازه‌گیری از راه دور برای بازرسی پل‌ها می‌پردازد. با توجه به نگرانی‌های فزاینده در مورد ایمنی پل‌های قدیمی، این تحقیق بر اهمیت بازرسی‌های دقیق برای جلوگیری از حوادث و فروپاشی پل‌ها تأکید می‌کند. نویسندگان مقاله به بررسی روش‌های نوین بازرسی و ارزیابی وضعیت پل‌ها با استفاده از این فناوری‌ها پرداخته و مزایای آن‌ها را در بهبود دقت و کارایی بازرسی‌ها مورد بحث قرار می‌دهند. این مقاله همچنین به چالش‌ها و فرصت‌های موجود در به‌کارگیری این تکنولوژی‌ها در صنعت ساخت و ساز و نگهداری زیرساخت‌ها اشاره می‌کند [19]. فناوری‌هایی مانند بینایی کامپیوتری<sup>12</sup> نیز برای کنترل کیفیت در لحظه در سایت‌های ساختمانی استفاده می‌شوند. دوربین‌های با وضوح بالا و الگوریتم‌های هوش مصنوعی عناصر ساخت را تحلیل می‌کنند تا اطمینان حاصل شود که مطابق با استانداردهای مشخص ساخته می‌شوند. این فرآیند نه تنها کیفیت کلی زیرساخت‌ها را بهبود می‌بخشد، بلکه نیاز به بازرسی‌های دستی را

<sup>11</sup> Unmanned Aerial Vehicle

<sup>12</sup> Computer Vision

کاهش می‌دهد و در زمان و منابع صرفه‌جویی می‌کند. یکی از کاربردهای کلیدی بینایی کامپیوتری در ساخت پل، شناسایی نقص‌های سطحی است. این سیستم‌ها با استفاده از الگوریتم‌های تفکیک تصویر مانند روش آستانه‌گذاری، به‌طور مؤثر هدف و پس‌زمینه را تفکیک کرده و نقص‌ها را شناسایی می‌کنند [20]. در مقاله‌ای تحت عنوان شناسایی جابجایی مبتنی بر بینایی کامپیوتری و کاربرد آن در ارزیابی وضعیت پل تحت شرایط عملیاتی که در ۲۰۲۴ چاپ شده بیان شده است، علاوه بر شناسایی نقص‌های سطحی، بینایی کامپیوتری در پایش جابجایی پل‌ها و تشخیص آسیب‌های ساختاری نیز کاربرد دارد. روش‌های سنتی برای تشخیص آسیب، که اغلب به بازرسی‌های دستی یا اندازه‌گیری‌های مبتنی بر حسگر متکی هستند، زمان‌بر و پرهزینه‌اند. با این حال، تکنیک‌های بینایی کامپیوتری رویکردی کارآمدتر ارائه می‌دهند که از الگوریتم‌های طراحی‌شده برای اندازه‌گیری جابجایی پل و شناسایی تغییرات وضعیت سازه استفاده می‌کند. این روش‌ها قادرند تغییرات جزئی در وضعیت پل‌ها را که ممکن است توسط چشم انسان نادیده گرفته شوند، شناسایی کرده و به تیم‌های مهندسی هشدار دهند. علاوه بر این، با استفاده از تصاویر بلادرنگ و تحلیل‌های دقیق، سیستم‌های بینایی کامپیوتری می‌توانند به‌طور مداوم وضعیت سازه را در شرایط عملیاتی نظارت کرده و از وقوع آسیب‌های جدی جلوگیری کنند. در نتیجه، این فناوری به‌طور چشمگیری می‌تواند هزینه‌های نگهداری و زمان‌های تشخیص خرابی‌ها را کاهش دهد و فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت پروژه‌های پل را بهبود بخشد [21]. آموزش الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی ریسک در ساخت پل شامل استفاده از داده‌های تاریخی برای پیش‌بینی دقیق ریسک‌های بالقوه است. این فرآیند معمولاً شامل جمع‌آوری و تحلیل داده‌های کلیدی مانند شرایط آب‌وهوایی، داده‌های پایش سلامت سازه، و سوابق حوادث پیشین می‌شود یکی از رویکردهای نوآورانه که در پژوهش‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، استفاده از مدل‌های ترکیبی است که شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM) را با مدل‌های ترکیب گوسی (EM-GMM) تلفیق می‌کند که ونگ و همکاران یک مدل ترکیبی نوین برای هشدار زودهنگام دینامیکی پل با استفاده از LSTM-EM-GMM<sup>۱۳</sup> در ۲۰۲۴ سال طراحی کرده‌اند. این مدل ترکیبی برای سیستم‌های هشدار اولیه در ساخت پل‌ها مؤثر بوده و پتانسیل بالایی برای پیش‌بینی دقیق ریسک‌های ساختاری با استفاده از داده‌های تاریخی و تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین نشان داده است به‌کارگیری این مدل‌ها می‌تواند موجب کاهش خرابی‌های ناشی از ریسک‌های غیرمنتظره شده و تصمیم‌گیری‌های به‌موقع و کارآمدتری را در مدیریت پروژه‌های ساخت پل ایجاد کند [22].

<sup>13</sup> Long Short-Term Memory - Expectation-Maximization - Gaussian Mixture Model

جدول ۲ (خلاصه فناوری های ادغام شده با هوش مصنوعی در مقالات بررسی شده)

شماره ارجاع	کاربرد	فناوری ادغام شده با AI
[19] [20]	نظارت بر سایت های ساخت، ارزیابی پیشرفت پروژه، شناسایی مشکلات، تحلیل داده ها برای ایمنی و ناهنجاری ها.	پهپادها (UAV)
[19]	شناسایی علائم فرسایش، آسیب یا تنش با حسگرها و الگوریتم های AI، جلوگیری از خرابی های احتمالی.	مواد هوشمند
[20] [21]	کنترل کیفیت در سایت های ساختمانی، شناسایی نقص های سطحی، پایش جابجایی پل ها، تشخیص آسیب های ساختاری.	بینایی کامپیوتری
[22]	شناسایی ریسک های احتمالی، پیش بینی ریسک های ساختاری، استفاده از مدل های ترکیبی (LSTM-EM-GMM).	یادگیری ماشین

### ۳-۳- شناسایی ریسک ها در ساخت پل با استفاده از هوش مصنوعی:

طی دو دهه گذشته، صنعت ساخت و ساز با هدف خودکارسازی و بهینه سازی فرآیندها، بهبود ایمنی و امنیت سایت ها، و استخراج بینش از داده های پیچیده، به طور گسترده ای از فناوری های هوش مصنوعی استفاده کرده است. این روند در ساخت پل نیز ادامه دارد، جایی که کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت ریسک به امری حیاتی تبدیل شده است. ادغام مواد مجهز به هوش مصنوعی و حسگرها، نظارت و نگهداری زیرساخت های پل را متحول کرده است. این فناوری های پیشرفته امکان نظارت در لحظه بر سلامت سازه را فراهم کرده و بینش های حیاتی درباره علائم اولیه فرسایش و آسیب ارائه می دهند. مواد مجهز به هوش مصنوعی از الگوریتم های یادگیری عمیق و ابزارهای تحلیل داده برای پردازش اطلاعات جمع آوری شده توسط شبکه ای از حسگرها بهره می برند [23]. در مطالعه ای در سال ۲۰۲۴

تحت عنوان ریسک آسیب پل ناشی از بارندگی شدید با در نظر گرفتن خطر رانش زمین و پتانسیل تولید چوب‌های شناور با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنی و روش‌های مرسوم یادگیری ماشین، از شبکه‌های عصبی پیچشی ( $CNN^{14}$ ) و روش‌های سنتی یادگیری ماشین مانند رگرسیون لجستیک، درخت‌های تصمیم‌گیری، جنگل‌های تصادفی، K-نزدیک‌ترین همسایه‌ها ( $KNN^{15}$ )، و پرسپترون چندلایه ( $MLP^{16}$ ) برای ارزیابی ریسک آسیب پل‌ها در اثر بارش شدید، زمین‌لغزش و تجمع چوب‌های شناور استفاده شد. این رویکرد جامع شامل مراحل مختلفی از جمله ارزیابی ریسک زمین‌لغزش، پتانسیل تولید چوب شناور، و ارزیابی ریسک پل بود. تحلیل اهمیت ویژگی‌ها و استفاده از معیارهای  $AUC^{17}$  و  $ROC^{18}$  نقش کلیدی در بهینه‌سازی مدل‌ها و افزایش دقت پیش‌بینی داشتند [24].

سیستم‌های پایش بتن در لحظه، مانند سیستم‌هایی که توسط Converge توسعه یافته‌اند، عوامل حیاتی مانند دما، رطوبت و توسعه مقاومت بتن را ردیابی می‌کنند تا از یکپارچگی ساختاری و ایمنی بتن استفاده‌شده در پل‌ها اطمینان حاصل شود [25]. این رویکرد جامع تضمین می‌کند که پل‌ها استانداردهای کنترل کیفیت را برآورده کرده و دستورالعمل‌های ساخت را رعایت می‌کنند. پیشرفت‌های اخیر در هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به‌طور قابل‌توجهی دقت و قابلیت اعتماد مدل‌های پیش‌بینی ریسک در ساخت پل‌ها را بهبود بخشیده است. مطالعات مختلف اثربخشی تکنیک‌های مختلف یادگیری ماشین را در این زمینه نشان داده‌اند. یکی از بهبودهای قابل توجه استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی ( $CNN$ ) برای ارزیابی ریسک زمین‌لغزش و پتانسیل تولید چوب‌های شناور است که می‌تواند تهدیدهای جدی برای پل‌های عبوری از رودخانه‌ها در هنگام بارش شدید ایجاد کند. ترکیب  $CNN$  ها با روش‌های یادگیری ماشین سنتی مانند رگرسیون لجستیک، درخت‌های تصمیم‌گیری، جنگل‌های تصادفی، K-نزدیک‌ترین همسایه‌ها ( $KNN$ )، و پرسپترون‌های چندلایه ( $MLP$ ) ارزیابی‌های ریسک جامع‌تری را فراهم کرده است که عوامل مختلفی مانند احتمال زمین‌لغزش و مقدار چوب شناور را در نظر می‌گیرد [26]. در مطالعه‌ای دیگر که بر روی خرابی دهک پل‌ها متمرکز بود، محققان مدلی با استفاده از روش‌های انتخاب ویژگی پیشرفته و الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسعه دادند. به‌طور خاص، مدل‌هایی مانند  $XGBoost$  و جنگل تصادفی ( $RF$ ) برای شناسایی ویژگی‌های بحرانی مؤثر بر خرابی پل‌ها به‌کار گرفته شدند. این مطالعه نشان داد که هر دو مدل  $XGBoost$  و  $RF$  به‌طور مؤثر ویژگی‌های بهینه را انتخاب کردند، با این حال،  $XGBoost$  به‌طور کلی عملکرد بهتری نشان داد. این بهینه‌سازی انتخاب ویژگی‌ها دقت پیش‌بینی مدل‌ها را بهبود بخشیده و آن‌ها را برای کاربردهای عملی در نگهداری و مدیریت پل‌ها قابل‌اعتمادتر کرده است [27].

مقاله‌ای که توسط تنگ جی، جی-وی لیو و کینگ-فو لی به چالش‌های فزاینده در ارزیابی ریسک‌های ایمنی در ساخت پل‌های بزرگ و پیچیده در چین در سال ۲۰۲۲ می‌پردازد. یک روش بهبودیافته Delphi-FAHP برای ارزیابی ریسک ایمنی در ساخت پل‌های بزرگ

<sup>14</sup> Convolutional Neural Networks<sup>15</sup> K-Nearest Neighbors<sup>16</sup> Multilayer Perceptron<sup>17</sup> Area Under the Curve<sup>18</sup> Receiver Operating Characteristic

ارائه می‌دهد. این روش شامل نظرسنجی دلفی، ایجاد سیستم ارزیابی مبتنی بر WBS-RBS، و محاسبه وزن عوامل ریسک با FAHP<sup>۱۹</sup> است. تحلیل عوامل، همبستگی بین ریسک‌ها را بررسی می‌کند و روش از طریق مطالعه موردی اعتبارسنجی شده است. عوامل ریسک شامل محیطی (شرایط جوی، دریایی)، جغرافیایی (زمین‌شناسی، ناپایداری خاک)، ساختاری (طراحی پیچیده، مصالح)، انسانی (مدیریت ضعیف، آموزش ناکافی)، و عملیاتی (هماهنگی و تأمین) شناسایی شدند. هدف این تحقیق، کاهش حوادث و ارتقای ایمنی ساخت پل‌ها است. این روش چارچوبی ساختاریافته برای بهبود ایمنی پل‌ها، به‌ویژه در چین، ارائه می‌کند [28]. مقاله ای دیگر در ۲۰۲۲ به بررسی ریسک‌های ایمنی ساخت پل‌ها در چین، با تأکید بر اهمیت زیرساخت‌های بزرگراهی و خطرات ذاتی این پروژه‌ها می‌پردازد. عوامل ریسک شامل محیطی (شرایط آب‌وهوایی، حوادث طبیعی)، فنی (پیچیدگی طراحی، تجهیزات ناکافی)، انسانی (خطاهای اجرایی، آموزش کم)، مدیریتی (ضعف برنامه‌ریزی، عدم رعایت استانداردها)، و مالی (کمبود بودجه، تأخیر مصالح) شناسایی شده‌اند. یک سیستم ارزیابی ریسک با استفاده از روش وزن‌دهی انتروپی ابر برای تحلیل عینی و بصری شاخص‌های ریسک پیشنهاد شده که نتایج مشابه روش‌های سنتی دارد. این تحقیق با ارائه رویکردی سیستماتیک، به توسعه پایدار و تصمیم‌گیری بهتر در صنعت ساخت پل‌ها کمک می‌کند [29]. عسگری و همکاران به بررسی عوامل کلیدی موفقیت (CSFs) در پروژه‌های ساخت‌وساز ایران، با تمرکز بر نقش مالک، پیمانکار و مشاور پرداخته‌اند. داده‌ها از طریق پرسشنامه جمع‌آوری و ۴۱ شاخص به پنج دسته: مالی، فرآیندهای تعاملی، منابع انسانی، ترتیبات قراردادی، و ویژگی‌های پروژه طبقه‌بندی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد منابع انسانی برای مالکین و پیمانکاران و شاخص‌های مالی برای مشاوران اهمیت بیشتری دارند. این تحقیق راهنمایی‌هایی برای مدیران پروژه فراهم می‌کند تا از عوامل کلیدی موفقیت در بهبود عملکرد پروژه‌های ساخت استفاده کنند [30]. راجل و محمد در تحقیقی تحت عنوان رفتار لرزه‌ای و ارزیابی ریسک یک پل موجود با در نظر گرفتن تعامل خاک و سازه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای ارزیابی ریسک زلزله یک پل استفاده کرده و به بررسی ریسک‌های مرتبط با زلزله، از جمله شدت زلزله، تعامل خاک-سازه و نوع خاک پرداخته‌اند. این ریسک‌ها شامل احتمال آسیب به سازه، تغییرات در رفتار سازه‌ای و تأثیرات ناشی از شرایط زمین‌شناسی مختلف هستند. هدف ارزیابی این ریسک‌ها، بهبود ایمنی و عملکرد پل‌ها در برابر زلزله است. این شبکه‌ها با استفاده از داده‌های تصادفی شامل سطوح شدت زلزله، تعامل خاک-سازه و کلاس‌های مختلف خاک آموزش داده شده‌اند تا پاسخ سازه‌ای پل را پیش‌بینی کنند. عملکرد شبکه با استفاده از موارد نادیده‌گرفته شده ارزیابی شده و قابلیت تعمیم آن مورد بررسی قرار گرفته است. ساز و کار این شبکه‌های عصبی مصنوعی ANN شامل آموزش شبکه با داده‌های تصادفی است که شامل ویژگی‌های مختلف زلزله و پاسخ سازه‌ای پل می‌باشد، به طوری که شبکه قادر به یادگیری الگوهای پیچیده و پیش‌بینی نتایج بر اساس ورودی‌های جدید می‌شود. این روش به تحلیل دقیق‌تر و سریع‌تر ریسک‌های زلزله کمک می‌کند [31]. مقاله ای دیگر توسط ایهان و همکاران به بررسی ارزیابی ایمنی در پروژه‌های کلان با استفاده از

<sup>19</sup> Fuzzy Analytic Hierarchy Process

هوش مصنوعی می‌پردازد. هدف آن ارائه یک روش نوآورانه برای پیش‌بینی سناریوهای ممکن و تعیین اقدامات پیشگیرانه است. در این مطالعه، ۵۲۲۴ مورد حادثه از پروژه‌های مختلف جمع‌آوری و تحت نه دسته بررسی شده است تا عملکرد ایمنی بهبود یابد. نه دسته‌ای که در این مطالعه بررسی شده‌اند شامل: حوادث ناشی از سقوط، حوادث ناشی از برخورد، حوادث ناشی از الکتریسیته، حوادث ناشی از ماشین‌آلات، حوادث ناشی از مواد شیمیایی، حوادث ناشی از آتش‌سوزی، حوادث ناشی از سقوط اجسام، حوادث ناشی از کار در ارتفاع و حوادث ناشی از شرایط محیطی هستند. پیاده‌سازی هوش مصنوعی با استفاده از تکنیک‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و استدلال مبتنی بر مورد (CBR) انجام شده است. هوش مصنوعی در ارزیابی ریسک‌ها با تحلیل داده‌های تاریخی و شناسایی الگوهای پنهان کمک می‌کند. تکنیک‌هایی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و استدلال مبتنی بر مورد (CBR)<sup>۲۰</sup> می‌توانند به پیش‌بینی حوادث و شناسایی عوامل خطر کمک کنند. این روش‌ها به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهند تا اقدامات پیشگیرانه مؤثرتری را برای کاهش ریسک‌ها اتخاذ کنند. این روش‌ها به تحلیل داده‌های بزرگ و استخراج الگوهای مفید برای پیش‌بینی حوادث و بهبود ایمنی کمک می‌کنند [32]. تحقیق ارزیابی ریسک ساخت پل با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است حاوی اطلاعاتی درباره ارزیابی خطر ساخت پل‌ها با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی است. این الگوریتم به خوبی در ارزیابی خطر استفاده شده و نتایج موفقیت‌آمیزی را به دست آورده است. تاکنون تحقیقات کمی در زمینه ارزیابی خطر ساخت پل‌ها انجام شده است. عوامل خطر ساخت پل‌ها معمولاً دارای ابعاد داده بزرگ و همبستگی قوی بین شاخص‌ها هستند. در مراحل موجود ارزیابی خطر، مدل ارزیابی در مرحله تخمین نیاز به یک روش پردازش داده با کاربرد قوی دارد. الگوریتم جنگل تصادفی<sup>۲۱</sup> یک الگوریتم یکپارچه بر اساس درخت تصمیم است. این الگوریتم دارای مزایایی مانند پردازش نمونه‌های ورودی با ویژگی‌های بعد بالا بدون کاهش بعد، ارزیابی اهمیت هر ویژگی در طبقه‌بندی و به دست آوردن یک تخمین بی‌طرف از خطاهای تولید شده در فرآیند تولید دارد [33]. در مقاله‌ای دیگر، ریچ و یورام تحت هوش مصنوعی در مهندسی، یورام ریچ از دانشگاه تل آویو یک مدل جریان چرخه حیات برای کاربردهای هوش مصنوعی در مهندسی پل پیشنهاد می‌کنند. الگوهای مشترک از مطالعات قبلی خلاصه شده‌اند تا روندها و نقاط ضعف شناسایی شوند و وضعیت زیرساخت پل‌ها در سطح جهانی تحلیل شده است. این مقاله تأکید می‌کند که اگرچه هوش مصنوعی پتانسیل بالایی در مهندسی پل دارد، اما برای استفاده مؤثر، نیاز به انتقال از وظایف جداگانه به یکپارچگی کامل وجود دارد تا اطمینان حاصل شود که تکنیک‌های هوش مصنوعی با نیازهای مهندسی همخوانی دارند. برای سازماندهی و تحلیل کاربردهای هوش مصنوعی، یک مدل چرخه حیات اطلاعاتی پیشنهاد شده است. استفاده از تکنیک‌های محاسباتی نمادین مانند جستجوی هورستیک، یادگیری استقرایی و پخش محدودیت به کار گرفته شده و ریسک‌های بررسی‌شده شامل ریسک‌های عملیاتی و مالی و امنیتی هستند. پیشرفت‌های این حوزه پتانسیل بالای هوش

<sup>20</sup> Case-Based Reasoning<sup>21</sup> forest algorithm

مصنوعی و یادگیری ماشین در تحول پیش‌بینی و مدیریت ریسک در ساخت پل‌ها را نشان می‌دهند و بینش‌های دقیق‌تر و قابل‌اجرتری را به مهندسان و تصمیم‌گیرندگان ارائه می‌دهند. این مدل چرخه حیات اطلاعاتی، فرآیندهای مختلف در مهندسی پل را با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی به هم پیوند می‌دهد و به مهندسان این امکان را می‌دهد که تصمیمات بهتری در طراحی، ساخت و نگهداری پل‌ها بگیرند. به‌ویژه، استفاده از یادگیری ماشین می‌تواند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری در زمینه آسیب‌ها و نیازهای تعمیرات ارائه دهد. همچنین، ترکیب داده‌های بزرگ و تحلیل‌های پیشرفته می‌تواند به شناسایی الگوهای مخفی در زیرساخت‌های پل‌ها کمک کند و آسیب‌های پنهان را پیش از بروز مشکلات جدی تشخیص دهد. علاوه بر این، مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند به طور مداوم به‌روز شوند تا با تغییرات شرایط محیطی و فنی هماهنگ باشند و از تصمیم‌گیری‌های غیردقیق جلوگیری کنند. در نتیجه، این روش‌ها نه‌تنها در بهبود عملکرد زیرساخت‌ها مؤثرند، بلکه به کاهش هزینه‌ها و افزایش ایمنی نیز کمک می‌کنند [34].

جدول ۳ (هوش مصنوعی به کار رفته در انواع ریسک‌های پل)

شماره ارجاع	نوع ریسک	هوش مصنوعی به کار رفته
[24]	ریسک‌های بارندگی شدید و رانش زمین	شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN)، روش‌های یادگیری ماشین سنتی (رگرسیون لجستیک، درخت‌های تصمیم‌گیری، جنگل‌های تصادفی)
[25]	ریسک‌های خرابی بتن و ایمنی سازه	الگوریتم‌های یادگیری ماشین
[31]	ریسک‌های زلزله و تعامل خاک-سازه	شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)
[32]	ریسک‌های ایمنی در پروژه‌های بزرگ	شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، استدلال مبتنی بر مورد (CBR)

[27]	ریسک‌های خرابی و انتخاب ویژگی‌ها	مدل‌های XGBoost و جنگل تصادفی (RF)
[۳۴]	ریسک‌های عملیاتی، مالی و امنیتی	مدل چرخه حیات اطلاعاتی

#### ۴- چالش‌ها و موانع:

ادغام ابزارهای هوش مصنوعی در ساخت پل‌ها چالش‌هایی ایجاد می‌کند که باید برای اجرای موفقیت‌آمیز آن‌ها برطرف شوند. یکی از چالش‌های اصلی، دشواری ادغام هوش مصنوعی در گردش کار مدیریت ساخت موجود است. بسیاری از حرفه‌ای‌های صنعت ساخت‌وساز در برابر تغییر مقاومت می‌کنند، زیرا روش‌های سنتی به شدت در این صنعت نهادینه شده‌اند. علاوه بر این، سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجه در فناوری و آموزش، مانعی بزرگ برای بسیاری از شرکت‌ها محسوب می‌شود. یکی دیگر از چالش‌های بزرگ، پیچیدگی داده‌های مورد نیاز برای عملکرد مؤثر سیستم‌های هوش مصنوعی است. هوش مصنوعی به شدت به در دسترس بودن و کیفیت داده‌ها وابسته است، در حالی که در بخش ساخت‌وساز، داده‌ها ممکن است پراکنده و ناسازگار باشند. این امر نیازمند مدیریت داده‌ای قوی و اغلب دیجیتال‌سازی بسیاری از فرآیندهایی است که در گذشته به صورت دستی انجام می‌شدند. علاوه بر این، نگرانی‌هایی در مورد دقت و قابلیت اعتماد پیش‌بینی‌ها و بینش‌های هوش مصنوعی وجود دارد. در ساخت پل، ریسک‌ها بسیار بالا هستند و هرگونه اشتباه می‌تواند منجر به خطرات جدی ایمنی شود. بنابراین، اطمینان از دقت و قابلیت اعتماد بینش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی ضروری است، که نیازمند فرایندهای تست و اعتبارسنجی دقیق است. ادغام ابزارهای هوش مصنوعی در گردش کار مدیریت ساخت‌وساز چالش‌هایی را به همراه دارد که باید برای اجرای موفقیت‌آمیز آن‌ها برطرف شوند. یکی از چالش‌های اصلی هزینه بالای نرم‌افزار و سخت‌افزار مورد نیاز برای سیستم‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) است که با هوش مصنوعی ادغام شده‌اند. این بار مالی به هزینه‌های آموزش و بازسازی فرایندها برای استفاده مؤثر از این فناوری‌ها در پروژه‌های ساخت‌وساز نیز گسترش می‌یابد. یکی دیگر از موانع مهم، مقاومت در برابر ادغام هوش مصنوعی در اهداف استراتژیک شرکت‌های ساختمانی است. این مقاومت اغلب ناشی از عدم تمایل به تغییر گردش‌های کاری تثبیت‌شده و شک و تردید در مورد مزایای فناوری‌های جدید است. علاوه بر این، کمبود متخصصانی که مهارت‌های لازم برای مدیریت و ادغام سیستم‌های-BIM هوش مصنوعی را داشته باشند، پیچیدگی‌های بیشتری را در فرایند ادغام ایجاد می‌کند. علاوه بر

مشکلات فنی و مالی، مسائل قانونی و اخلاقی نیز باید در نظر گرفته شوند، حفظ حریم خصوصی و امنیت داده‌های جمع‌آوری شده و تحلیل شده توسط این سیستم‌ها یکی دیگر از چالش‌های مهم است که باید به آن پرداخته شود با این حال، غلبه بر این چالش‌ها با همکاری بین صنعت، دانشگاه‌ها، و مراجع دولتی امکان‌پذیر است. فراهم آوردن زیرساخت‌های مناسب، آموزش نیروی کار و ایجاد چارچوب‌های قانونی برای نظارت و ارزیابی فناوری‌های هوش مصنوعی می‌تواند به تسهیل این فرآیند کمک کند و در نهایت منجر به بهبود ایمنی و کارایی در پروژه‌های ساخت پل شود [35].

## ۵- شکاف‌های تحقیقاتی:

طی بررسی انجام شده در این مقاله تحقیقاتی که در این حوزه انجام شده اند و خلا‌های موجود در مقالات ریسک در ساخت پل‌ها با استفاده از هوش مصنوعی در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۴) خلا‌های موجود در حوزه ریسک پل با استفاده از هوش مصنوعی (

خلا‌های موجود	کارهای انجام شده
نیاز به استفاده گسترده‌تر از داده‌های بلادرنگ برای پیش‌بینی ریسک‌ها در پروژه‌های پیچیده‌تر.	تحلیل حجم زیادی از داده‌های تاریخی پروژه‌ها، شرایط آب‌وهوایی و عملکرد تأمین‌کنندگان برای شناسایی ریسک‌ها.
نیاز به الگوریتم‌های پیشرفته‌تر برای تحلیل دقیق‌تر داده‌های جمع‌آوری شده توسط پهپادها و بهبود سرعت پردازش داده.	بهره‌گیری از پهپادها برای نظارت زنده بر سایت‌های ساخت و شناسایی ناهنجاری‌ها، اندازه‌گیری حجم انبارها، و پایش ایمنی کارگران.
نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد عملکرد این مواد در شرایط آب‌وهوایی و محیطی مختلف و کاهش هزینه‌ها تولید و اجرا.	توسعه مواد هوشمند با حسگرهای داخلی برای پایش سلامت سازه و شناسایی فرسایش یا خرابی در لحظه.
توسعه روش‌های بهتر برای شناسایی دقیق‌تر نقص‌ها در شرایط محیط مختلف و ادغام داده‌های بصری با سایر	استفاده از الگوریتم‌های بینایی کامپیوتری برای شناسایی نقص‌های سطحی،

پایش جابجایی پل‌ها، و ارزیابی تغییرات وضعیت سازه.	داده‌های سازه‌ای.
استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین مانند LSTM، CNN، و EM-GMM - برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی ریسک‌های ناشی از خرابی‌ها و تغییرات محیطی.	نیاز به مدل‌های ترکیبی که بتوانند ریسک‌های متقابل بین شرایط آب‌وهوایی، فرسایش و عملکرد سازه را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند.
ترکیب اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی برای پایش لحظه‌ای سلامت سازه و اجرای نگهداری پیشگیرانه.	نیاز به بهینه‌سازی سیستم‌های ترکیبی IoT و AI برای تحلیل بلادرنگ در مقیاس وسیع و کاهش هزینه‌های اجرایی.
استفاده از دوربین‌ها، پهپادها و دستگاه‌های پوشیدنی برای نظارت بر ایمنی کارگران و کاهش حوادث در سایت‌های ساخت.	نیاز به توسعه الگوریتم‌هایی برای پیش‌بینی دقیق‌تر حوادث و رفتارهای مخاطره‌آمیز پیش از وقوع.

## ۶- بحث و نتیجه گیری:

در این مقاله، به بررسی کاربردهای هوش مصنوعی در شناسایی ریسک در پروژه‌های ساخت پل پرداخته شد. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های هوش مصنوعی، به ویژه در زمینه یادگیری ماشین و تحلیل داده‌ها، این ابزارها می‌توانند به طور قابل توجهی دقت و قابلیت اعتماد در پیش‌بینی ریسک‌ها را افزایش دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های تاریخی و شرایط محیطی می‌تواند به شناسایی الگوهای خطرناک و پیش‌بینی مشکلات احتمالی کمک کند. همچنین، ادغام هوش مصنوعی در فرآیندهای ساخت و مدیریت پروژه، نیازمند توجه به دقت و اعتبارسنجی داده‌ها است تا از بروز خطرات جدی ایمنی جلوگیری شود. با وجود چالش‌های موجود، از جمله هزینه‌های بالای پیاده‌سازی و نیاز به آموزش و اعتبارسنجی دقیق، پتانسیل هوش مصنوعی در بهبود کارایی و ایمنی پروژه‌های ساخت پل غیرقابل انکار است. در نهایت، این مقاله بر ضرورت تحقیقات بیشتر در این حوزه تأکید می‌کند تا بتوان به بهینه‌سازی فرآیندها و کاهش ریسک‌ها در پروژه‌های عمرانی دست یافت. به طور کلی، هوش مصنوعی می‌تواند به عنوان یک ابزار کلیدی در مدیریت ریسک و بهبود عملکرد پروژه‌های ساخت پل عمل کند و به مهندسان و مدیران پروژه کمک کند تا تصمیمات بهتری اتخاذ کنند و ایمنی و کارایی پروژه‌ها را افزایش دهند.

با توجه به وجود خلاهای موجود در تحقیقاتی که تا کنون در این حوزه انجام شده است پیشنهاد می شود که تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه سازی فرآیندهای ساخت پل با استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی انجام شود. این تحقیقات می توانند به شناسایی و کاهش هزینه ها و زمان های اضافی در پروژه ها کمک کنند همچنین توسعه ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی برای پیش بینی و مدیریت ریسک در پروژه های ساخت پل امری ضروری است تا با کمک این ابزارها و با تحلیل داده های تاریخی و شرایط فعلی، به مدیران پروژه در اتخاذ تصمیمات آگاهانه کمک شود و همچنین میتوان برنامه های آموزشی برای نیروی کار در صنعت ساخت و ساز طراحی و اجرا شود تا آنها با فناوری های هوش مصنوعی و کاربردهای آن در پروژه های ساخت و ساز آشنا شوند و با استفاده از داده های بزرگ و تحلیل آنها برای شناسایی الگوهای مؤثر در پروژه های ساخت و ساز می تواند به بهبود دقت و کارایی پروژه ها کمک کند. این امر نیازمند توسعه مدل های پیشرفته یادگیری ماشین است.

## ۷- منابع و مراجع:

- نصیبان، مهدی و مرادی، مهدی، ۱۴۰۳، کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی عمران و معماری و صنایع ساختمان، یازدهمین کنفرانس ملی [4]  
مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری پایدار
- «PMBOK میثم بیات. ۱۳۹۸. «مروری بر هوش مصنوعی و کاربردهای آن در مهندسی عمران و مدیریت پروژه» [6]
- نصیبان، مهدی و مرادی، مهدی، ۱۴۰۳، کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی عمران و معماری و صنایع ساختمان، یازدهمین کنفرانس ملی [4]  
مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری پایدار
- «PMBOK میثم بیات. ۱۳۹۸. «مروری بر هوش مصنوعی و کاربردهای آن در مهندسی عمران و مدیریت پروژه» [6]
- یازدهمین BIM ذوالفقاری، دینا و جوانشیر، حسن، ۱۴۰۳، اجرای مدیریت ارزش در پایداری پروژه های ساخت و ساز: تاثیر هوش مصنوعی و کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری پایدار
- ذوالفقاری، دینا و جوانشیر، حسن، ۱۴۰۳، اجرای مدیریت ارزش در پایداری پروژه های ساخت و ساز: تاثیر هوش مصنوعی [10]  
یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری پایدار BIM و
- [1] Abioye, Sofiat O., Lukumon O. Oyedele, Lukman Akanbi, Anuoluwapo Ajayi, Juan Manuel Davila Delgado, Muhammad Bilal, Olugbenga O. Akinade, and Ashraf Ahmed. "Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges." *Journal of Building Engineering* 44 (2021): 103299.
- [2] Eber, Wolfgang. "Potentials of artificial intelligence in construction management." *Organization, technology & management in construction: an international journal* 12, no. 1 (2020): 2053-2063.
- [3] Rampini, Luca, and Fulvio Re Cecconi. "Artificial intelligence in construction asset management: A review of present status, challenges and future opportunities." *Journal of Information Technology in Construction* 27 (2022): 884-913.
- [5] Sacks, Rafael, Mark Girolami, and Ioannis Brilakis. "Building information modelling, artificial intelligence and construction tech." *Developments in the Built Environment* 4 (2020): 100011
- [7] Na, Seunguk, Seokjae Heo, Sehee Han, Yoonsoo Shin, and Youngsook Roh. "Acceptance model of artificial intelligence (AI)-based technologies in construction firms: Applying the Technology Acceptance Model (TAM) in combination with the Technology-Organisation-Environment (TOE) framework." *Buildings* 12, no. 2 (2022): 90.
- [8] Wang, Ke, Ziyi Ying, Shankha Shubhra Goswami, Yongsheng Yin, and Yafei Zhao. "Investigating the role of artificial intelligence technologies in the construction industry using a Delphi-ANP-TOPSIS hybrid MCDM concept under a fuzzy environment." *Sustainability* 15, no. 15 (2023): 11848.
- [9] Debrah, Caleb, Albert PC Chan, and Amos Darko. "Artificial intelligence in green building." *Automation in Construction* 137 (2022): 104192.
- [[11] Yussuf, Raheemat O., and Omar S. Asfour. "Applications of artificial intelligence for energy efficiency throughout the building lifecycle: An overview." *Energy and Buildings* (2024): 113903
- [12] Rane, Nitin. "Integrating leading-edge artificial intelligence (AI), internet of things (IOT), and big data technologies for smart and sustainable architecture, engineering and construction (AEC) industry: Challenges

and future directions." Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions (September 24, 2023). (۲۰۲۳)

[13] Rane, Nitin. "Role of ChatGPT and similar generative artificial intelligence (AI) in construction industry." Available at SSRN 4598258. (۲۰۲۳)

[14] Ivanova, Svetlana, Aleksandr Kuznetsov, Roman Zverev, and Artem Rada. "Artificial Intelligence Methods for the Construction and Management of Buildings." Sensors 23, no. 21 (2023): 8740.

[15] Al-Asadi, Laith SM, Hussein AMS Al-Juboori, and Mukhammet A. Fakhratov. "Importance of Using Artificial Intelligence into Iraqi Construction Projects." In E3S Web of Conferences, vol. 457, p. 02012. EDP Sciences, 2023.

[16] Bang, Sofie, and Bjørn Sørskot Andersen. "Utilising artificial intelligence in construction site waste reduction. (۲۰۲۲) "

[17] Datta, Shuvo Dip, Mobasshira Islam, Md Habibur Rahman Sobuz, Shakil Ahmed, and Moumita Kar. "Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review." Heliyon. (۲۰۲۴)

[18] Tan, Kang. "The framework of combining artificial intelligence and construction 3D printing in civil engineering." In MATEC web of conferences, vol. 206, p. 01008. EDP Sciences, 2018.

[19] Chun, Pang-jo, Ji Dang, Shunsuke Hamasaki, Ryosuke Yajima, Toshihiro Kameda, Hideki Wada, Tatsuro Yamane, Shota Izumi, and Keiji Nagatani. "Utilization of unmanned aerial vehicle, artificial intelligence, and remote measurement technology for bridge inspections." *Journal of Robotics and Mechatronics* 32, no. 6 (2020): 1244-1258.

[20] Luo, Kui, Xuan Kong, Jie Zhang, Jiexuan Hu, Jinzhao Li, and Hao Tang. 2023. "Computer Vision-Based Bridge Inspection and Monitoring: A Review" Sensors 23, no. 18: 7863. <https://doi.org/10.3390/s23187863>

[21] PENG, Zhen; LI, Jun; HAO, Hong. Computer vision-based displacement identification and its application to bridge condition assessment under operational conditions. Smart Construction, 2024, 1.1

[22] Li, S., Xin, J., Jiang, Y., Yang, C., Wang, X., & Ran, B. (2024). A novel hybrid model for bridge dynamic early warning using LSTM-EM-GMM. Advances in Bridge Engineering, 5(1), 8

[23] Altabey, Wael A., and Mohammad Noori. 2022. "Artificial-Intelligence-Based Methods for Structural Health Monitoring" Applied Sciences 12, no. 24: 12726. <https://doi.org/10.3390/app122412726>

[24] Ren, Fudong, Koichi Isobe, and Miku Ando. 2024. "Risk Assessment of Bridge Damage Due to Heavy Rainfall Considering Landslide Risk and Driftwood Generation Potential Using Convolutional Neural Networks and Conventional Machine Learning" Water 16, no. 23: 3471. <https://doi.org/10.3390/w16233471>

[25] Luo, Kui, Xuan Kong, Jie Zhang, Jiexuan Hu, Jinzhao Li, and Hao Tang. 2023. "Computer Vision-Based Bridge Inspection and Monitoring: A Review" Sensors 23, no. 18: 7863. <https://doi.org/10.3390/s23187863>.

[26] Ren, Fudong, Koichi Isobe, and Miku Ando. 2024. "Risk Assessment of Bridge Damage Due to Heavy Rainfall Considering Landslide Risk and Driftwood Generation Potential Using Convolutional Neural Networks and Conventional Machine Learning" Water 16, no. 23: 3471. <https://doi.org/10.3390/w16233471>.

- [27] Rashidi Nasab, Armin, and Hazem Elzarka. 2023. "Optimizing Machine Learning Algorithms for Improving Prediction of Bridge Deck Deterioration: A Case Study of Ohio Bridges" *Buildings* 13, no. 6: 1517. <https://doi.org/10.3390/buildings13061517>
- [28] Ji, Teng, Ji-Wei Liu, and Qing-Fu Li. "Safety Risk Evaluation of Large and Complex Bridges during Construction Based on the Delphi-Improved FAHP-Factor Analysis Method." *Advances in Civil Engineering* 2022, no. 1 (2022): 5397032.
- [29] Li, Qingfu, Jianpeng Zhou, and Jinghe Feng. "Safety risk assessment of highway bridge construction based on cloud entropy power method." *Applied Sciences* 12, no. 17 (2022): 8692.
- [30] Asgari, M., A. Kheyroddin, and H. Naderpour. "Evaluation of project critical success factors for key construction players and objectives." *International Journal of Engineering* 31, no. 2 (2018): 228-240.
- [31] Rachedi, Mohammed, Mohammed Matallah, and Panagiotis Kotronis. "Seismic behavior & risk assessment of an existing bridge considering soil-structure interaction using artificial neural networks." *Engineering structures* 232 (2021): 111800.
- [32] Ayhan, Bilal Umut, and Onur Behzat Tokdemir. "Safety assessment in megaprojects using artificial intelligence." *Safety Science* 118 (2019): 273-287.
- [33] Wu, Ying, Yigang Wang, Hongbing Liu, Liping Xie, Lili Jiao, and Pengzhen Lu. "Risk assessment of bridge construction investigated using random forest algorithm." *Scientific Reports* 14, no. 1 (2024): 20964.
- [34] Reich, Yoram. "Artificial intelligence in bridge engineering." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 11, no. 6 (1996): 433-445
- [35] Khan, Ayaz Ahmad, Abdulkabir Opeyemi Bello, Mohammad Arqam, and Fahim Ullah. 2024. "Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in Construction Projects: A Review of Challenges and Mitigation Strategies" *Technologies* 12, no. 10: 185. <https://doi.org/10.3390/technologies12100185>

### Abstract:

The integration of artificial intelligence (AI) technologies into the construction industry, particularly in bridge construction, has revolutionized risk management. Advanced AI tools, by analyzing complex data such as project history, environmental conditions, and supplier performance, enable precise identification and prediction of risks. From materials equipped with smart sensors to machine learning algorithms and advanced drones, these technologies have enhanced safety, efficiency, and accuracy in construction projects. This paper examines various AI tools and applications, including computer vision, Internet of Things (IoT) technology, and deep learning methods, analyzing the benefits and limitations of these technologies in bridge construction risk identification. Additionally, challenges such as high implementation costs, resistance to technological changes, and data limitations are addressed. The findings of this study demonstrate that, despite existing challenges, AI holds significant potential to improve the safety and productivity of bridge construction projects.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Bridge Construction, Risk Prediction.