Sharif Civil Engineering Journal (2025), **41**(3), 89-103

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Review Article

A Review of Unmanned Aerial Systems (UAS) Applications in Safety Monitoring of Construction Projects

Fatemeh Soleymani and Yaghoub Alipouri*

Innovative Technologies Center for Construction Management, Construction Engineering and Management Department, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* corresponding author:(y.alipouri@kntu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 8 May 2024

Revised: 16 August 2024

Accepted: 18 September 2024

Keywords:

Safety monitoring,
safety inspection,
unmanned aircraft system,
drone.

Abstract

Safety is a fundamental issue in all societies. The construction industry, due to its inherent complexities and dynamic work environment, is one of the most hazardous industries in the world, witnessing serious and recurring fatalities and injuries. Despite significant advancements in safety equipment, technology, and training, the statistics of fatal and non-fatal accidents in this industry remain high. Identifying and managing risks is a key element in preventing construction accidents. Therefore, precise implementation of safety inspections on construction sites is a vital step in accident prevention. Increasing the quantity and quality of inspections can lead to better identification of hazards and consequently improve safety. However, factors can hinder safety managers from increasing the number of safety inspections on-site. On the one hand, the number of safety managers in each construction company is limited. These managers may also be geographically dispersed, resulting in a lack of immediate and daily access to all construction areas. On the other hand, visual safety inspections are limited in hard-to-reach areas. Therefore, finding ways to increase the frequency of safety inspections on construction sites and inspecting hard-to-reach areas can bring significant improvements in hazard management and prevention. In this regard, the technology of unmanned aerial systems (UASs) serves as an innovative tool with exceptional capabilities in enhancing the inspection and safety monitoring process. This technology enables access to difficult and hazardous areas, facilitating faster and more accurate inspections. The aim of this article is to review previous research on the application of UASs in the safety supervision of construction. Using literature review methods and content analysis, this article evaluates the current research status in this field. The results show that UASs are useful in the design and construction phases and provide the possibility of effective monitoring of the implementation of safety rules through more detailed and comprehensive inspections. By increasing the accuracy and breadth of inspections, this technology helps reduce risks such as falls, struck-by accidents, and falling debris, and generally improves the level of safety on the site. Additionally, the results, limitations, and challenges associated with this emerging technology are presented, along with suggestions for future research.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

To Cite this article:
Soleymani, F. and Alipouri, Y. 2025. A review of unmanned aerial systems (UAS) applications in safety monitoring of construction projects, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(3), 89-103. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64444.33249

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی مروری

مروری بر کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در نظارت بر ایمنی پروژه‌های عمرانی

فاطمه سلیمانی و یعقوب علیپوری *

گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (y.alipouri@kntu.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۵/۲۶

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

واژگان کلیدی:

نظارت بر ایمنی،

بازرسی ایمنی،

سیستم هوایی بدون سرنشین،

پهپاد.

چکیده

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از پرخطرترین صنایع برای کارگران، نیازمند بازرسی‌های ایمنی مناسب جهت پیشگیری از حوادث است. افزایش تعداد بازرسی‌ها می‌تواند به شناسایی و رفع خطرها کمک کند. فناوری سیستم‌های هوایی بدون سرنشین، ابزاری کارآمد برای بهبود بازرسی و نظارت ایمنی در پروژه‌های عمرانی است. در نوشتار حاضر، به بررسی پژوهش‌های پیشین درخصوص کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در نظارت بر ایمنی پروژه‌های عمرانی با روش‌های کتاب‌سنجی و تحلیل محتوا پرداخته شده است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در مراحل طراحی و ساخت مفید هستند و از طریق بازرسی‌های دقیق‌تر و جامع‌تر، امکان نظارت مؤثر در اجرای قوانین ایمنی را فراهم می‌آورند. فناوری مذکور با افزایش دقت و گستردگی بازرسی‌ها، به کاهش خطرهایی، نظیر: سقوط، تصادف‌های ضربه‌ای، و ریزش آوار کمک می‌کند و به‌طورکلی سطح ایمنی در محیط کار را ارتقاء می‌بخشد. درنهایت، در نوشتار حاضر، به بررسی نتایج، محدودیت‌ها، چالش‌ها، و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده پرداخته شده است.

۱. مقدمه

ایمنی، یک موضوع اساسی و حیاتی در هر جامعه و سازمان است. برای پیشگیری و کنترل حوادث شغلی، به‌خصوص در مشاغل با ریسک بالا، برنامه‌ریزی و کنترل امری ضروری است. برای جلوگیری از حوادث، خطرها باید شناسایی و کنترل شوند. بازرسی ایمنی، یک جزء اساسی از سیستم‌های مدیریت ایمنی برای کنترل خطرها از طریق تشخیص و اصلاح به‌موقع است.

تمام حوادث به‌دلیل شرایط یا اعمال ناایمن رخ می‌دهند.[۱] نظارت مداوم بر رفتارها و شرایط ناایمن، به‌عنوان ابزاری مؤثر برای حذف خطرهای بالقوه‌ی ایمنی و سلامتی شناخته شده است. یک محیط کاری ناایمن نه فقط در ایمنی محل کار تأثیر می‌گذارد، بلکه از نظر زمان و هزینه نیز پیامدهای قابل‌توجهی دارد.[۲] حوادث و آسیب‌ها، رنج‌های انسانی مختلفی را منجر می‌شوند و در رضایت کارکنان و رفاه عمومی تأثیر می‌گذارند. همچنین، از نظر مالی نیز هزینه‌های جبران خسارت کارگران، زمان ازدست‌رفته، کاهش بهره‌وری، جابجایی بیشتر کارکنان، و آموزش مجدد کارکنان را به همراه دارند.[۳] برنامه‌های ایمنی مؤثر سه مزیت اصلی دارند: حفاظت از جان انسان‌ها، کاهش هزینه‌ها، و تقویت روحیه‌ی کارکنان.[۴] نظارت مداوم بر رفتارها و شرایط ناایمن کارگران، یک روش فعال و پیشگیرانه برای کاهش و یا حذف خطرهای ایمنی و بهداشتی و جلوگیری از حوادث است.[۵] مدیریت ایمنی در محل کار، وظیفه‌ی اصلی مدیران ایمنی در پروژه‌هاست. معمولاً، مدیران ایمنی برای کاهش موقعیت‌ها و عملکردهای ناایمن، محل کار خود را به‌صورت حضوری مشاهده می‌کنند.[۶] براساس مشاهده‌های ذکرشده، اقدام‌های پیشگیرانه و اصلاحی برای جلوگیری از صدمه‌ها و حتی مرگ کارگران انجام می‌شود.[۷] روش‌های سنتی نظارت و تجزیه‌وتحلیل فعالیت‌ها، گران، کُند، و مستعد انتقال اطلاعات نادرست به‌دلیل خطای انسانی هستند.[۸] ویژگی پویا و پیچیده‌ی محیط‌های کاری، در کنار کمبود تعداد مدیران ایمنی در هر سایت، ممکن است در عملکرد کلی مدیران در شناسایی کامل موقعیت‌های ناایمن تأثیر منفی بگذارد و به‌طوربالقوه منجر به صدمات و تلفات کارگران شود.[۹] در نتیجه، پژوهشگران به‌دنبال ارزیابی سایر برنامه‌ها و فناوری‌های مدیریت ایمنی هستند، که می‌توانند بازرسی و نظارت ایمنی در محل‌های کار را افزایش دهند. برای اثربخشی بازرسی‌های ایمنی، باید بر مواردی مانند تکرار بازرسی‌ها، مشاهده‌ی مستقیم شرایط، و روش‌ها و ایجاد تعامل مستقیم بین بازرس و کارگران متمرکز شد.[۱۰]

یکی از فناوری‌های نوظهوری، که پتانسیل تأثیرگذاری در بازرسی‌های ایمنی سنتی را دارد، سیستم‌های هواپیمای بدون سرنشین[1] است. وسائط نقلیه‌ی هوایی بدون سرنشین[2]، که به‌عنوان پهپاد[3] نیز شناخته می‌شوند، سیستم‌های

[1] Unmanned aircraft system
[2] Unmanned aerial vehicle
[3] Drone

استناد به این مقاله:

سلیمانی، فاطمه و علیپوری، یعقوب، ۱۴۰۴. مروری بر کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در نظارت بر ایمنی پروژه‌های عمرانی. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۳)، صص.۸۹-۱۰۳.

https://doi.org/10.24200/j30.2024.64444.33249

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

هواپیمایی هستند که خلبان‌ها از روی زمین آن‌ها را کنترل می‌کنند.[۱۱] به سیستمی که شامل وسیله‌ی پرنده و فرد کنترل‌کننده‌ی آن از روی زمین است، معمولاً سیستم هوایی بدون سرنشین گفته می‌شود. سیستم‌های هوایی بدون سرنشین می‌توانند ابزاری ایده‌آل برای بازرسی ایمنی باشند. آن‌ها موجب می‌شوند که مسئولان ایمنی از زاویه‌ی جدیدی به محیط کار نگاه کنند، که موجب آسان‌سازی سازوکارهای بازرسی و پایش ایمنی آن‌ها می‌شود.[۱۲] پهپادها قادرند اطلاعات تصویری را با چابکی و به دفعه‌های موردنیاز، گردآوری و داده‌های حاصل را بلادرنگ به مرکز کنترل زمینی ارسال کنند. بدین ترتیب شرایطی را پدید می‌آورند که امکان پاسخگویی آنی در موقعیت‌های ضروری برقرار می‌شود.[۱۰] مدیران این امکان را خواهند داشت تا به‌طورپیوسته و بدون نیاز به‌حضور فیزیکی در محیط، فعالیت‌های پرمخاطره را مجسم کنند. اگرچه سیستم‌های هوایی بدون سرنشین مستقیماً در عملیات اجرایی دخیل نیستند، ولی در افزایش سرعت نظارت بر پروژه‌ها نقش قابل‌توجهی دارند، که این امر به تسریع فرآیند تصمیم‌گیری و کمک به کاهش تأخیر در زمان‌بندی پروژه‌ها منتهی می‌شود.[۱۳]

از آنجایی که ایمنی می‌تواند پیامدهای عمیقی بر زندگی افراد و جوامع داشته باشد، پژوهش‌ها و نوشتارهای علمی در این حوزه قادرند نقش بسزایی در ارتقاء شرایط ایمنی در سطح جامعه و سازمان‌ها ایفا کنند. بر این اساس، تدوین نوشتارها و ارائه‌ی راهبردهایی در راستای بهینه‌سازی و تحکیم ایمنی در عرصه‌های گوناگون، اهمیت ویژه‌ای دارد. مروری بر ادبیات پیشین نشان می‌دهد که کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در صنعت ساخت و تأثیر فناوری‌های نوین در ارتقاء ایمنی در آن بررسی شده است. با وجود این، هیچ‌یک از پژوهش‌های ذکرشده به‌طورخاص بر مطالعاتی که از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای پایش و بهبود ایمنی بهره گرفته‌اند، متمرکز نبوده‌اند. به‌منظور پرداختن به خلأ پژوهشی اخیر، پژوهش حاضر با استفاده از روش‌های آماری و کیفی، به شکلی فراگیر به واکاوی نقش سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در نظارت و ارتقاء ایمنی در پروژه‌های عمرانی پرداخته است. هدف نوشتار حاضر، مرتفع‌ساختن شکاف‌ها و محدودیت‌های موجود در مطالعات حاضر و هدایت پژوهش‌های آتی به سمت حوزه‌هایی است که بیشترین ارزش افزوده را به همراه خواهند داشت.

در راستای دستیابی به اهداف تعیین‌شده، ساختار نوشتار حاضر به این شرح سازمان‌دهی شده است:

- بخش دوم، تشریح مفصل روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر؛

- بخش سوم، تحلیل کلی موضوع مدنظر با استفاده از روش‌های علم‌سنجی؛

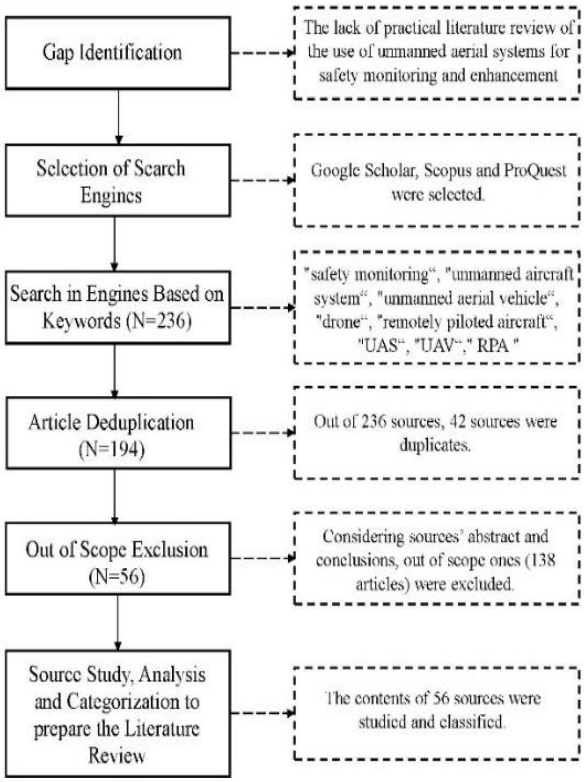
- بخش چهارم، مرور کلی بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در زمینه‌ی نظارت بر ایمنی؛

- بخش پایانی، ارائه‌ی نتایج و تبیین اهمیت مطالعه‌ی حاضر، بحث و بررسی چالش‌های فراروی مطالعات کنونی، و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی.

۲. روش پژوهش

در نوشتار حاضر از دو نوع روش مرور بر ادبیات، به نام‌های کتاب‌سنجی[1] و روایتی[2]، به‌عنوان رویکرد پژوهش استفاده شده است. همچنین، روش کتاب‌سنجی به‌عنوان ابزاری کارآمد و مؤثر برای بررسی کمّی ادبیات موجود در حوزه‌ی موردنظر به‌کار برده شده است. کتاب‌سنجی با بهره‌گیری از فنون ریاضی و آماری، امکان تعیین اندازه و گستره‌ی مطالعات در یک زمینه‌ی علمی خاص را فراهم می‌سازد و تصویری جامع و کلی از وضعیت آن رشته ارائه می‌کند. بدین ترتیب، نتایج حاصل از تحلیل کتاب‌سنجی در مقایسه با بررسی‌های دستی، عینیت و علمیت بالاتری دارد. نرم‌افزار VOSviewer به‌دلیل دسترسی رایگان، سهولت استفاده، ارائه‌ی کلیه‌ی عملکردهای اساسی موردنیاز برای تجسم شبکه‌های علم‌سنجی، و قابلیت درک آسان نتایج حتی با کمینه‌ی مهارت‌های فنی، که منجر به افزایش نرخ پذیرش آن در میان پژوهشگران حوزه‌ی ساخت‌وساز می‌شود، به‌عنوان ابزاری مناسب برای پژوهش حاضر برگزیده شده است.

جستجو و بررسی دقیق ادبیات مرتبط با موضوع پژوهش از طریق موتورهای جستجوی علمی، مانند: Google Scholar، Scopus، و ProQuest، به‌دلیل پوشش وسیع و کارایی برجسته‌شان در دسترسی به منابع علمی صورت گرفته و در آن‌ها، واژگان کلیدی نظیر: "safety monitoring"، "unmanned aircraft system"، "unmanned aerial vehicle"، "drone"، "remotely piloted aircraft"، "UAS"، "UAV"، و "RPA" جستجو شده‌اند. برای افزایش دقت نتایج، محدودیت‌هایی از جمله زبان انگلیسی و انتشار نوشتارها پس از سال ۲۰۰۰ اعمال شده است. ارزیابی‌های اولیه، شامل بررسی عناوین و خلاصه‌های منابع بوده است، که منجر به حذف آن دسته از مطالعه‌هایی شده است که واژگان کلیدی مذکور را در بر نمی‌گرفتند. این رویکرد منجر به شناسایی اولیه‌ی ۲۳۶ منبع شده است، که با حذف موارد تکرارشده به ۱۹۴ مورد کاهش یافته است. در مرحله‌ی بعد، با بررسی دقیق‌تر نسخه‌های چاپی، تعداد نهایی منابع مرتبط به ۵۶ پژوهش تقلیل یافته است. در شکل ۱، چارچوب کلی پژوهش حاضر مشاهده می‌شود.



شکل ۱. چارچوب کلی پژوهش.

[1] Bibliometric

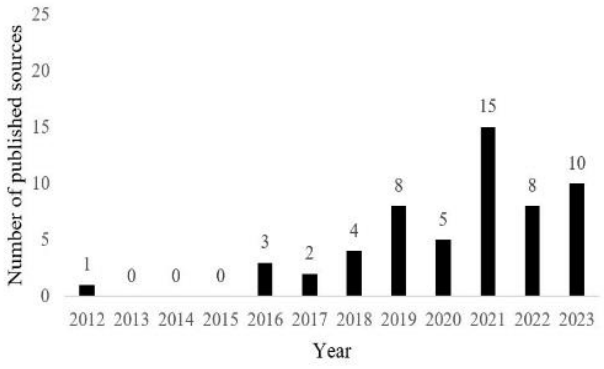
[2] Narrative

۳. مروری بر ادبیات پژوهش براساس ابزارهای آماری و کتاب‌سنجی

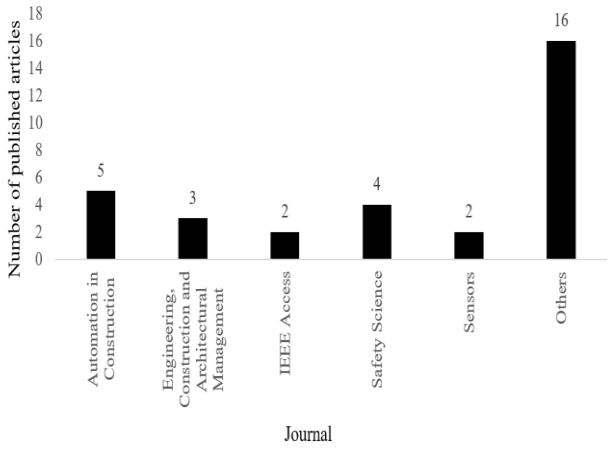
روند انتشار پژوهش‌های مرتبط با کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در زمینه‌ی نظارت بر ایمنی، طی سال‌های اخیر در شکل ۲ مشاهده می‌شود. نقطه‌ی آغازین این مسیر پژوهشی را می‌توان به مطالعه‌ای نسبت داد که توسط ایریزاری[۳] و همکارانش (۲۰۱۲)،[۱۰] انجام شده است. از سال ۲۰۱۹ به بعد، توجه ویژه‌ای از سوی جامعه‌ی علمی به حوزه‌ی پژوهشی اخیر معطوف و افزایش در تعداد مطالعات و نتایج حاصل از آن مشاهده شده است. براساس داده‌ها، بیشترین تعداد منابع منتشرشده در حوزه‌ی مذکور مربوط به سال ۲۰۲۱ است، که تعداد آن‌ها به ۱۵ منبع می‌رسد.

از میان ۵۶ منبعی که بررسی شده است، ۳۲ منبع به‌صورت نوشتار در مجلات، ۱۸ منبع به‌عنوان نوشتارهای کنفرانسی، و ۶ منبع به‌صورت پایان‌نامه منتشر شده بودند. در شکل ۳، توزیع ۳۲ نوشتار منتشرشده در مجلات مختلف مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بخش "Others" مجلاتی را نشان می‌دهد که فقط یک نوشتار چاپ کرده‌اند.

به‌منظور تحلیل دقیق‌تر داده‌های استخراج‌شده، از نرم‌افزار VOSviewer استفاده شده است، تا یک بررسی عمیق بر نام‌های نویسندگان و واژگان کلیدی به‌دست‌آمده از نوشتارها انجام شود. این اقدام با هدف فراهم‌آوردن یک دیدگاه



شکل ۲. تعداد نوشتارهای منتشرشده در هر سال.

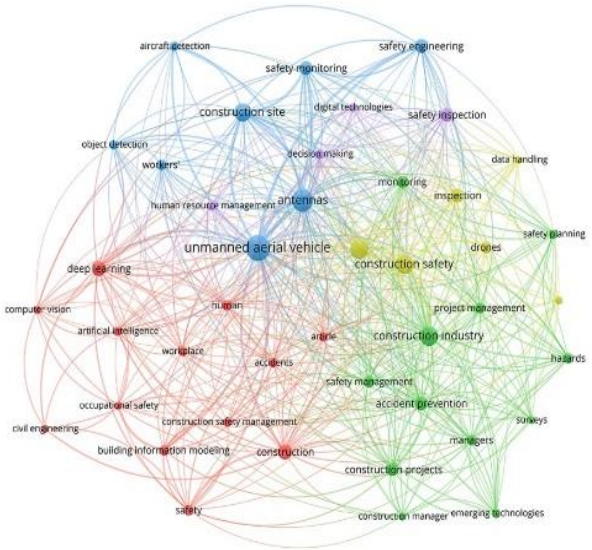


شکل ۳. تعداد نوشتارهای منتشرشده در هر مجله.

کلی نسبت به چگونگی توزیع فراوانی نویسندگان و واژگان کلیدی صورت گرفته است.

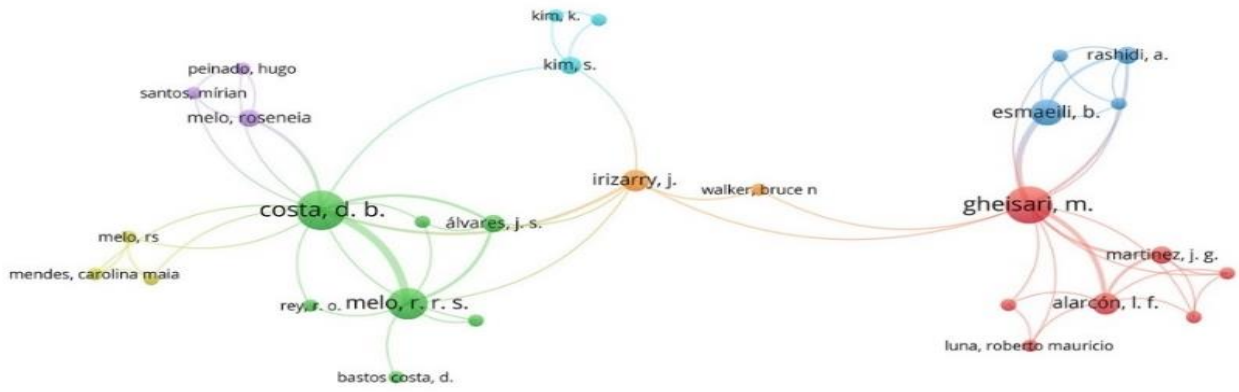
انتظار می‌رود نوشتارهایی که در حوزه‌های مشابه مطالعه کرده‌اند، تعاملات قوی داشته باشند. واژگان کلیدی، محتوای اصلی نوشتارهای علمی را نشان می‌دهند. تحلیل هم‌زمانی واژگان کلیدی، ارتباط بین آن‌ها را براساس تعداد دفعات ظاهرشدن مشترک در اسناد مختلف نشان می‌دهد. در نمایش داده‌های مذکور، ابعاد گره‌ها، میزان وقوع واژگان کلیدی را نشان می‌دهد و با افزایش تکرار واژگان کلیدی، اندازه‌ی برچسب و دایره نیز به‌تناسب افزایش می‌یابد. هر چه فاصله‌ی بین آن‌ها کمتر باشد، ارتباط بین آن‌ها قوی‌تر است.[۱۴] در این راستا، یک شبکه‌ی هم‌زمانی واژگان کلیدی با استفاده از VOSviewer تهیه و نوع تحلیل بر روی "هم‌زمانی[۴]" تنظیم شده و "شمارش کسری[۵]" به‌عنوان روش شمارش به‌کار رفته است. درنهایت، ۴۰۸ واژه‌ی کلیدی شناسایی و برای بهبود وضوح بصری، واژگان کلیدی که دست‌کم ۳ بار ظاهر شده‌اند، انتخاب شده‌اند، که ۴۳ واژه‌ی کلیدی، آستانه‌ی مذکور را رعایت کرده‌اند. در شکل ۴، نقشه‌ی هم‌زمانی واژگان کلیدی با استفاده از VOSviewer مشاهده می‌شود، که در آن، "Unmanned aerial vehicle" با ۲۴ مورد، "Antennas" با ۱۹ مورد، "Construction Safety"، "Unmanned aircraft system" و "Construction industry" با ۱۴ مورد، به‌عنوان متداول‌ترین واژگان کلیدی شناسایی شده‌اند.

شبکه‌ای از هم‌نویسندگان با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer ایجاد و تجزیه‌وتحلیل آن براساس "هم‌نویسندگی"[۶] انجام و "شمارش کامل"[۷] به‌عنوان روش شمارش استفاده شده است. در تحلیل اخیر، ۱۴۰ نویسنده شناسایی شده‌اند، که ۲۹ نفر از آن‌ها با یکدیگر همکاری داشته‌اند. در نمایش اخیر، اندازه‌ی گره‌ها، تعداد نوشتارهای منتشرشده توسط هر نویسنده و پیوندها، تعداد هم‌نویسی‌های یک پژوهشگر با دیگران مشاهده می‌شود. نقشه‌ی هم‌نویسندگی نویسندگان در شکل ۵ با استفاده از VOSviewer مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کاستا[۸] با ۹ نوشتار، قیصری[۹] با ۸ نوشتار، ملو[۱۰] با ۶



شکل ۴. نقشه‌ی هم‌زمانی واژگان کلیدی.

[3] Irizarry
[4] Co-occurrence
[5] Fractional counting
[6] Co-authership
[7] Full counting
[8] Costa
[9] Gheisari
[10] Melo



شکل ۵. نقشه‌ی هم‌نویسندگی نویسندگان.

نوشتار، و اسماعیلی[11] با ۴ نوشتار، نویسندگان فعال‌تر در حوزه‌ی هم‌نویسندگی بوده‌اند. همچنین، بیشترین همکاری بین کاستا و ملو با ۵ نوشتار مشترک ملاحظه شده است.

۴. هواپیمای بدون سرنشین در نظارت بر ایمنی در صنعت ساخت

در صنعت ساخت، سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای اهداف متنوعی استفاده می‌شوند. می‌توان از آن‌ها در مرحله‌ی طراحی به‌منظور انتخاب سایت مناسب و نقشه‌برداری زمین، در مرحله‌ی ساخت به‌منظور کار زمینی و نظارت بر درجه‌بندی، کنترل کیفیت، نظارت بر پیشرفت، نظارت بر ایمنی، ردیابی و تحویل مواد، در مرحله‌ی تعمیر و نگهداری، و در مرحله‌ی تخریب استفاده کرد.[۱۵] از آنجایی‌که استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای نظارت بر ایمنی در شرکت‌هایی که از آن‌ها بهره می‌برند، محدود است، در نوشتار حاضر سعی شده است با بررسی مطالعات انجام‌شده در این زمینه، به اهمیت و کارایی پهپادها در نظارت بر ایمنی پرداخته شود.

فراوانی بالای حوادث در پروژه‌های ساخت‌وساز، نیاز به بهره‌گیری از فناوری‌های نوین جهت پشتیبانی از مدیریت سایت را ایجاب می‌کند.[۱۶] در این راستا، پهپادها به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور و کارآمد در کاهش ریسک‌های ایمنی در صنعت ساخت مطرح شده‌اند.[۱۷-۲۰] سیستم‌های هوایی بدون سرنشین قادرند خطرهای ایمنی را در محیط کار شناسایی کنند و تصاویر و ویدئوهای با کیفیت بالا را به‌صورت زنده برای مقاصد بازرسی و ارزیابی در اختیار مدیران ایمنی قرار دهند.[۲۱ و ۲۲] این قابلیت، پهپادها را به ابزاری ارزشمند در ارتقاء ایمنی پروژه‌های عمرانی تبدیل کرده است.

به‌کارگیری سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در کارگاه‌های ساخت‌وساز، مزایای قابل‌توجهی را در مقایسه با روش‌های سنتی به همراه دارد. این فناوری نوین قادر است ضمن کاهش زمان و هزینه‌های عملیاتی، ایمنی محیط کار را به شکل چشمگیری ارتقاء دهد.[۲۳] پهپادها با سرعتی بیش از انسان، توانایی دسترسی به نقاط دورافتاده و صعب‌العبور کارگاه‌ها را دارند و می‌توانند به تجهیزاتی، نظیر دوربین‌های ویدئویی، حسگرها، رادار، و سخت‌افزارهای ارتباطی مجهز شوند تا داده‌های بلادرنگ را به مدیران ایمنی منتقل کنند. قابلیت منحصربه‌فرد این پلتفرم‌ها در شناسایی کارآمد مخاطرات ایمنی، پتانسیل کاهش ریسک آسیب‌دیدگی، و مرگ‌ومیر در میان کارگران را به همراه دارد. این امر به‌نوبه‌ی خود، کاهش هزینه‌های حقوقی، مسئولیتی، و پزشکی را در پی خواهد داشت. بدین ترتیب، سیستم‌های هوایی بدون سرنشین، نقش بسزایی در بهبود شرایط کاری و ارتقاء استانداردهای ایمنی در پروژه‌های عمرانی ایفا می‌کنند.

در یکی از اولین پژوهش‌ها در زمینه‌ی کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در حوزه‌ی ایمنی، ایریزاری[12] و همکاران (۲۰۱۲)،[۱۰] به بررسی قابلیت استفاده از پهپادهای مجهز به دوربین به‌عنوان ابزاری برای بازرسی ایمنی در کارگاه‌های ساختمانی پرداخته‌اند؛ که با هدف ارزیابی پتانسیل بهره‌گیری از فناوری پهپاد در نظارت بر ایمنی محیط‌های کاری صورت گرفته است. نتایج حاصل از پژوهش اخیر نشان داده است که سیستم‌های هوایی بدون سرنشین می‌توانند به‌عنوان دستیاری ایده‌آل برای بازرسان ایمنی عمل کنند. فناوری ذکرشده، امکان برقراری ارتباط صوتی میان مدیر ایمنی و کارگران ساختمانی را فراهم می‌آورد و دسترسی بلادرنگ به تصاویر و ویدئوهای گرفته‌شده از طیف گسترده‌ای از مسیرها و مکان‌های از پیش تعیین‌شده در سراسر کارگاه را میسر می‌سازد. بدین ترتیب، پهپادها با ایجاد یک دید جامع و لحظه‌ای از وضعیت ایمنی کارگاه، نقش مؤثری در شناسایی به‌موقع مخاطره‌ها و پیشگیری از بروز حوادث ایفا می‌کنند. سیستم‌های هوایی بدون سرنشین، قابلیت بهبود ایمنی در طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های پرخطر در صنعت ساخت را دارند. طبق نظرسنجی انجام‌شده توسط قیصری و اسماعیلی (۲۰۱۶)،[۱۲] سه نوع عملیات کلیدی که می‌توانند از به‌کارگیری سیستم هوایی بدون سرنشین در پروژه‌های ساختمانی بهره‌مند شوند، عبارت‌اند از: کار در مجاورت وسائط نقلیه‌ی بوم‌دار یا جرثقیل‌ها، کار در نزدیکی لبه‌ها یا دهانه‌های فاقد حفاظ، و کار در نقاط کور تجهیزات سنگین. بدین ترتیب، پهپادها با فراهم‌آوردن امکان نظارت مؤثر بر فعالیت‌های پرخطر اخیر، نقش مهمی در ارتقاء ایمنی کارگاه‌های ساختمانی ایفا می‌کنند.

فناوری‌های ایمنی، کاربردهای متنوعی در مدیریت ایمنی پروژه‌های ساخت‌وساز دارند؛ که در بهبود شناسایی خطر، تقویت برنامه‌ریزی ایمنی، و ارتقاء بازرسی‌های ایمنی، اهمیت ویژه‌ای دارند.[۲۴] سه عامل کلیدی ذکرشده، نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی ابزارها و راهبردهای استفاده‌شده برای ارتقاء ایمنی و کاهش ریسک‌ها در پروژه‌های ساختمانی ایفا می‌کنند. به‌عبارت دیگر، توانایی شناسایی به‌موقع و دقیق مخاطره‌ها، وجود برنامه‌ریزی جامع ایمنی و انجام بازرسی‌های منظم و مؤثر، زمینه را برای پیاده‌سازی موفق راهکارهای

[11] Esmaeili

[12] Irizarry

ایمنی فراهم می‌آورند. بدین ترتیب، بهره‌گیری از فناوری‌های ایمنی با تمرکز بر سه حوزه‌ی ذکرشده‌ی کلیدی، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در بهبود عملکرد ایمنی پروژه‌های ساخت‌وساز داشته باشد.

۱.۴. سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در مرحله‌ی طراحی

در حوزه‌ی مدیریت ایمنی ساخت‌وساز، پذیرش سیستم‌های هوایی بدون سرنشین به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی و نظارت، امکان شناسایی و ارزیابی بهتر خطرها را در مقایسه با روش‌های سنتی فراهم می‌آورد.[۲۵] سیستم‌های مذکور به‌واسطه‌ی قابلیت‌های پیشرفته‌ای که در تصویربرداری و تحلیل داده‌ها دارند، می‌توانند تصاویر دقیقی از محل پروژه و محیط اطراف آن تهیه کنند، که در روش‌های سنتی به‌راحتی قابل‌دستیابی نیستند. مطالعه‌ی انجام‌شده توسط مارتینز[۱۳] و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۵] نشان داده است که استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین می‌تواند تا ۱۹٪ خطرهای بیشتری را در مرحله‌ی برنامه‌ریزی ایمنی شناسایی کند؛ که به‌دلیل توانایی سیستم‌های مذکور در دسترسی به نقاط دشوار و انجام بازرسی‌های دقیق‌تر است. با این حال، ایمنی اغلب در طراحی پروژه‌های ساختمانی در اولویت قرار نمی‌گیرد و از مهندسان کنترل و ایمنی به‌ندرت خواسته می‌شود تا در مرحله‌ی طراحی به ایمنی کارگران توجه کنند.[۲۶ و ۲۷] این نگرش باعث می‌شود که بسیاری از خطرهای بالقوه در مراحل اولیه شناسایی نشوند و فقط در مرحله‌ی ساخت، که اصلاحات هزینه‌بر و پیچیده‌تر هستند، موردتوجه قرار گیرند. لحاظ‌کردن ایمنی در طراحی می‌تواند بهترین راهکار برای کاهش تصادف‌ها و آسیب‌ها در بخش ساختمان باشد. طراحان با درنظرگرفتن ایمنی کارگران به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در تصمیم‌گیری‌های طراحی قادر خواهند بود خطرهای ایمنی را در پروژه کاهش دهند.[۲۸] مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و پهپاد، پتانسیل بهبود عملکرد ایمنی ساخت‌وساز را نشان داده‌اند. چن[۱۴] و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۹] نشان داده‌اند که می‌توان با استفاده از پهپادها، اطلاعات محل سایت و ساختمان‌های اطراف را در مرحله‌ی پیش از ساخت جمع‌آوری و از آن‌ها در تولید یک مدل سه‌بُعدی قابل‌استفاده در برنامه‌ریزی ایمنی قبل از ساخت استفاده کرد؛ تا بتوان به شناسایی بهتر خطرها کمک کرد و امکان بررسی دقیق‌تر شرایط محیطی و پیش‌بینی خطرهای احتمالی را فراهم آورد. پیش‌بینی خطرهای احتمالی و امکان وقوع حوادث، گام مهمی در مرحله‌ی طراحی طی برنامه‌ریزی ایمنی است. شناسایی و اتخاذ تدابیر برای پیشگیری از خطرها در مرحله‌ی طراحی، مؤثرتر از جستجوی خطرها در مرحله‌ی ساخت است.

فناوری‌های نوین، مانند پهپادها و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، می‌توانند نقش مهمی در بهبود فرهنگ ایمنی در صنعت ساخت‌وساز داشته باشند و می‌توانند آگاهی کارگران و مدیران پروژه را نسبت به اهمیت ایمنی افزایش دهند و آن‌ها را به اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه ترغیب کنند. به‌طور کلی، ادغام فناوری‌های نوین در فرآیندهای برنامه‌ریزی و نظارت می‌تواند به ایجاد محیط‌های کاری ایمن‌تر و کاهش قابل‌توجه حوادث و آسیب‌ها در صنعت ساخت‌وساز منجر شود.

۲.۴. سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در مرحله‌ی ساخت

در مرحله‌ی ساخت پروژه‌های عمرانی، از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین به‌منظور نظارت بر رعایت قوانین و مقررات ایمنی استفاده می‌شود. پهپادها قادرند مکان‌های بالقوه‌ی خطرناک را در محدوده‌ی کارگاه شناسایی کنند. پهپادها در پرواز بالا بر روی کارگاه‌ها، اطلاعات مربوط به کارکنان، تجهیزات، مواد خطرناک، و ماشین‌آلات را جمع‌آوری می‌کنند و شرایط ناامن را قبل از وقوع حادثه شناسایی و بهبود می‌بخشند. تصاویر با وضوح بالا، که توسط پهپادها تهیه می‌شوند، می‌توانند مسائل بحرانی ایمنی را در نقاطی که بازرسی مرتب آن‌ها برای کارکنان دشوار است، آشکار کنند؛ تا اقدام‌های پیشگیرانه‌ی لازم در سریع‌ترین زمان ممکن انجام شود. آنتار[۱۵] و همکاران (۲۰۲۳)،[۳۰] با طراحی یک ابزار شبیه‌ساز برای بررسی و تحلیل بهبود ایمنی در کارگاه‌های ساختمانی و همچنین استفاده از یک سیستم پهپادی برای انجام بازرسی‌های ایمنی، نشان داده‌اند که چنین سیستم‌هایی می‌توانند به‌طورمؤثر، عملکرد ایمنی در پروژه‌ها را ارتقاء بخشند. آن‌ها با به‌کارگیری ابزارهای شبیه‌ساز و با درنظرگرفتن پارامترهای مختلف ایمنی در محیط کار، توانسته‌اند شواهدی را درخصوص کارایی روش‌های مذکور در افزایش سطح ایمنی کارگاه‌های ساختمانی ارائه دهند. در مطالعه‌ای که توسط کمینگ و یوناتان[۱۶] (۲۰۱۹)،[۳۱] انجام شده است، مقایسه‌ای میان ۱۰ پروژه صورت گرفته است، که در آن نصف پروژه‌ها به‌صورت دستی و سنتی و نصف دیگر، با دیدگاه نوین و استفاده از پهپادها، بررسی و نظارت شده بودند. نتایج نشان داده است پروژه‌هایی که از سیستم هوایی بدون سرنشین بهره برده‌اند، با تعداد کارکنان بسیار کمتری نسبت به پروژه‌هایی که فقط از نظارت سنتی استفاده کرده‌اند، قادر به انجام فعالیت‌ها بوده‌اند. همچنین پیمانکاران توانسته‌اند با استفاده از پهپاد، زمان بازگشت سرمایه‌ی خود را در پروژه‌ها کاهش دهند. بنابراین به‌نظر می‌رسد کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در نظارت بر پروژه‌ها، علاوه‌بر افزایش بهره‌وری، از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه‌تر از روش‌های سنتی نظارت است.

۱.۲.۴. بازرسی و کنترل قوانین ایمنی

ملو و کاستا[۱۷] (۲۰۱۹ و ۲۰۱۸)،[۳۲ و ۳۳] با ارزیابی میزان انطباق شرایط ایمنی با استانداردهای مرتبط از طریق استفاده از چک‌لیست‌هایی مبتنی بر داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط پهپادها در محل کار نشان داده‌اند که دارایی‌های بصری به‌دست‌آمده با فناوری مذکور به کنترل بهتر شرایط کاری کمک می‌کنند و اطلاعاتی در مورد وضعیت فعلی فرآیندها ارائه می‌دهند، که در شناسایی تناقض‌های میان ایمنی و تولید و پیش‌بینی شرایط خطرآفرینی که کارگران با آن مواجه هستند، مفید واقع می‌شود. فالوورکا و لانزینها[۱۸] (۲۰۲۱)،[۳۴] از پهپادها به‌عنوان جایگزینی برجسته برای تجهیزات سنتی گران‌قیمت و سنگین، نظیر: داربست، جرثقیل، سکوهای هیدرولیکی، و مانند آن، برای بازرسی بصری نمای ساختمان‌ها استفاده کرده‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سه ساختمان مختلف، حاکی از مزایای قابل‌توجه به‌کارگیری سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای این منظور بوده است، که عبارت‌اند از: قابلیت مانور و دسترسی آسان به مناطق دشوار، نظیر: نمای ساختمان‌های بلند، سرعت بالای انجام بازرسی‌ها، کاهش خطرهای عملیاتی، و امکان به اشتراک‌گذاری سریع تصاویر و یا ویدئوها میان تمامی ذی‌نفعان. در مطالعاتی که توسط ملو و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۱۶)،[۳۵ و ۳۶] انجام شده است، کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای بازرسی ایمنی در کارگاه‌های ساختمانی، با تمرکز بر شناسایی الزام‌های قابل‌بازرسی و موارد عدم انطباق با استانداردهای ایمنی

[13] Martinez
[14] Chen
[15] Antar
[16] Kaming & Yonathan
[17] Melo & Costa
[18] Falorca & Lanzinha

ارزیابی شده است. پژوهش اخیر مبتنی بر دو مطالعه‌ی موردی بوده است، که در آن از پروتکلی برای جمع‌آوری و پردازش داده‌های بصری حاصل از پروازهای پهپادی در محل‌های کار استفاده شده و نتایج نشان داده است که داده‌های بصری جمع‌آوری‌شده توسط پهپادها، بهبود قابل‌توجهی در فرآیند بازرسی ایمنی به همراه داشته است. یافته‌ها مشخص کرده‌اند که پهپادها می‌توانند تصویر خوبی از شرایط کاری ایجاد کنند و اطلاعات مفیدی درباره‌ی رعایت استانداردهای ایمنی در محل کار فراهم آورند.

به‌کارگیری خودکارسازی در عملیات، کارایی را افزایش می‌دهد و با کاهش نیاز به بازدیدهای گسترده در محل و جمع‌آوری دستی داده‌ها، منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌شود.[۳۷] فناوری‌های تسهیل‌کننده‌ی استخراج خودکار اطلاعات بازرسی و بررسی‌های انطباق، فرآیند کلی بازرسی را ساده‌تر می‌کنند و امکان شناسایی سریع‌تر مسائل عدم انطباق و تصمیم‌گیری به‌موقع درخصوص اقدام‌های اصلاحی را فراهم می‌سازند.[۳۷] علاوه‌بر این، استفاده از فناوری‌های بازرسی خودکار می‌تواند دقت و سازگاری داده‌ها را بهبود بخشد و از خطاهایی که ممکن است منجر به بازسازی پرهزینه یا تأخیر در پروژه‌های ساختمانی شود، جلوگیری کند.[۳۷] سیستم‌های هوایی بدون سرنشین پتانسیل قابل‌توجهی را برای خودکارسازی وظایف بازرسی مکرر در ساختمان‌ها و ارزیابی آسیب‌ها فراهم می‌آورند.[۳۸] استفاده از پهپادها در نظارت بر ایمنی محیط‌های کاری ساختمانی، فرآیند جمع‌آوری اطلاعات مناسب در مورد شرایط موجود را خودکارسازی می‌کند و امکان نظارت مکرر و اندازه‌گیری چالش‌های ایمنی را فراهم می‌سازد.[۲۵] به‌کارگیری پهپادها و هوش مصنوعی برای نظارت بر فعالیت‌های ایمنی و سلامت کارگران می‌تواند تصمیم‌گیری در مدیریت ایمنی را بهبود بخشد، زیرا جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل سریع داده‌های ایمنی و بهداشتی، کارکنان ایمنی را قادر می‌سازد تا اقدام‌های پیشگیرانه‌ی سریع‌تری را برای جلوگیری از وقوع حوادث در آینده انجام دهند.[۳۹ و ۴۰] همچنین لیما[19] و همکاران (۲۰۲۱)،[۴۱] و ری[20] و همکاران (۲۰۲۱)،[۴۲] برای رفع مشکل تأخیر در تصمیم‌گیری مدیران ایمنی ساختمان به‌دلیل حجم بالای داده‌های دستی، سیستم بازرسی هوشمند[21] را معرفی کرده‌اند؛ که اطلاعات جمع‌آوری‌شده توسط پهپادها را پردازش، تحلیل، و ذخیره می‌کند. با استفاده از روش مذکور، زمان بازرسی ایمنی در محل تا ۷۳٪ نسبت به روش‌های غیررایانه‌ای کاهش یافته است. گوه و الزرایی[22] (۲۰۲۲)،[۴۳] از یک پروتکل ایمنی با استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین و فناوری پوشیدنی برای ایجاد یک نقشه‌ی دیجیتالی جامع برای کاهش تلفات در بزرگراه‌ها استفاده کرده‌اند؛ که به‌روزرسانی مداوم در طول ساخت را ممکن ساخته و شامل مراحل: تجزیه‌وتحلیل محل ساخت‌وساز، جمع‌آوری داده‌های دیجیتالی قبل و در حین ساخت، تجزیه‌وتحلیل ایمنی پیش از ساخت بر مبنای داده‌های فتوگرامتری، طراحی طرح ایمنی دیجیتالی محل، و درنهایت اجرا و نظارت بوده است. آکین سمویین[23] و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۲۲)،[۴۴ و ۴۵] برای نظارت بر فعالیت‌های ایمنی کارگران در کارگاه‌های ساختمانی با استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین و یادگیری عمیق برای نظارت بر فعالیت‌های ایمنی کارگران در کارگاه‌های ساختمانی، یک چارچوب یکپارچه را توسعه داده‌اند، که برای خودکارسازی جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از پهپادها و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها با استفاده از فنون یادگیری عمیق، از جمله Faster R-CNN[24] و YOLO V3[25] برای شناسایی رفتارهای ناایمن کارگران و شرایط نامناسب در محل کار طراحی شده است، تا با ارائه‌ی بازخورد بلادرنگ، از وقوع حوادث در کارگاه‌های ساختمانی جلوگیری شود. لیچ[26] و همکاران (۲۰۲۱)،[۴۶] چارچوب جدیدی را برای توسعه‌ی الگوریتم‌هایی جهت خودکارسازی بازرسی‌های ساختمانی از طریق استفاده از تصاویر هوایی پهپادها، تقویت داده‌ها، و مدل‌های تشخیص اشیاء با روش Mask R-CNN[27] یادگیری عمیق پیشنهاد کرده‌اند. یانگ[28] و همکاران (۲۰۲۳)،[۴۷] نیز یک سیستم برای نظارت بر ایمنی در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از تصاویر پهپادی طراحی کرده‌اند؛ که توسط آن، تصاویر گرفته‌شده توسط پهپاد اصلاح و پس از پیش‌پردازش، ویژگی‌های تصویر به کمک الگوریتم SVM[29] استخراج می‌شوند. برخی دیگر از پژوهشگران نیز روشی مبتنی بر فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و پهپادها را برای شناسایی مناطق خطرناک و پیشگیری از آن‌ها در پروژه‌های ساختمانی ارائه کرده‌اند؛[۲۱، ۲۲، ۲۹، و ۴۸] که شامل دو مرحله‌ی پیش از ساخت و ساخت‌وساز بوده است:

در مرحله‌ی پیش از ساخت، از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به همراه استانداردهای ایمنی برای شناسایی خطرهای احتمالی و حذف آن‌ها با بهره‌گیری از سیستم بررسی قوانین ایمنی و در مرحله‌ی ساخت‌وساز نیز از پهپادها برای بازرسی منابع خطر بالقوه و کنترل قوانین ایمنی استفاده شده است.

۲.۲.۴. جلوگیری از سقوط

در صنعت ساختمان، سقوط از ارتفاع به‌عنوان یکی از علل اصلی وقوع فجایع با پیامدهای مرگبار شناخته شده است. اهمیت نظارت دقیق و مستمر توسط مدیریت ایمنی بر محیط کار برای شناسایی چنین موقعیت‌های خطرناک احتمالی برجسته است. اما دشواری‌های مربوط به نظارت کارآمد بر محیط کار، بارها منجر به وقوع آسیب‌ها و تلفات در میان کارگران شده است. خطاهای انسانی همچنین در تشدید حوادث اخیر نقش دارند، از جمله تصمیم‌گیری نادرست در قضاوت خطر و استفاده‌ی ناصحیح از تجهیزات حفاظت فردی مختص جلوگیری از سقوط. تحلیل پیشرفته‌ی داده‌های بصری جمع‌آوری‌شده توسط دوربین‌ها، امکان تشخیص خطرها در فرآیندهای ساخت‌وساز را فراهم آورده‌اند؛ خواه این تشخیص مربوط به شناسایی اجسام خاص باشد،[۴۹] یا رصد حرکت تجهیزات و کارکنان.[۵۰] سیستم‌های هوایی بدون سرنشین با استفاده از دوربین‌ها و حسگرهای پیچیده، پتانسیل شناسایی خطرهای بالقوه‌ی مرتبط با سقوط و کارگران را دارند، به‌خصوص در موقعیت‌های پنهان و کمتر قابل‌مشاهده. فناوری‌های مذکور می‌توانند هشدارهای زودهنگامی را برای کارگران فراهم سازند و درنتیجه، ایمنی و کاهش مواجهه با خطرها را ارتقاء دهند. شانتی[30] و همکاران (۲۰۲۲)،[۵۱] یک ساختار نظارتی به کمک فنون

19 Lima
20 Rey
21 Smart Inspects System
22 Goh & Alzaraiee
23 Akinsemoyin
24 Faster Region-based Convolutional Neural Network
25 You Only Look Once Version 3
26 Leach
27 Mask Region-based Convolutional Neural Network
28 Yang
29 Support Vector Machine
30 Shanti

CNN[31] و YOLO V4[32]، یادگیری عمیق و پهپادها را توسعه داده‌اند، که هدف آن شناسایی کارهای متخلفانه در ارتفاع بوده است. سیستم اخیر به متخصصان ایمنی اجازه می‌دهد تا نقض‌های ایمنی مربوط به سیستم‌های جلوگیری از سقوط فردی را به‌سرعت تشخیص دهند. قیصری و همکاران (۲۰۱۸)،[۵۲] یک گردش کار کلی برای شناسایی خودکار خطرهای سقوط با استفاده از الگوریتم‌های: PMVS[33] برای بازسازی دقیق صحنه؛ k-nearest برای شناسایی بازشوها، و SVM برای شناسایی حفاظ‌های محافظ ارائه داده و درنهایت استانداردهای مربوط به ایمنی مقررات اداره‌ی ایمنی و بهداشت شغلی (OSHA)[34] را بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین یک مطالعه‌ی تجربی برای ارزیابی فرآیند اخیر شناسایی خودکار انجام داده‌اند. مدس[35] و همکاران (۲۰۱۸)،[۵۳] در بررسی پتانسیل تشخیص خودکار الزام‌های استاندارد برای حفاظ‌ها، فناوری استفاده از تصاویر به‌دست‌آمده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین و سامانه‌ی تشخیص الگو[36] را در محیط‌های آزمایشی به آزمون گذاشته‌اند. لی[37] و همکاران (۲۰۲۲)،[۵۴] نیز چارچوبی برای بهره‌گیری از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین به‌منظور نظارت بر سیستم‌های پیشگیری از خطر سقوط در مجاورت لبه‌ها و دهانه‌های فاقد حفاظ کافی در پروژه‌های ساختمانی بلندمرتبه ارائه کرده و با استفاده از الگوریتم‌های: Cascade classifiers و Linear SVM برای تشخیص حفاظ‌ها و الگوریتم Expectation-Maximization برای ارزیابی فضای بین نرده‌های حفاظ در یک پروژه‌ی ساختمانی واقعی با ارتفاع زیاد، فناوری مذکور را آزمایش کرده‌اند. همچنین، پینادو[38] و همکاران (۲۰۲۳)،[۵۵] مجموعه‌ای از معیارهایی برای گردآوری و پردازش داده‌ها با استفاده از فناوری‌های سیستم هوایی بدون سرنشین، یادگیری ماشین، و یادگیری عمیق جهت بازرسی ایمنی حفاظ‌های موقت در حین تولید سیستم‌های دیوار بتنی در محل پروژه پیشنهاد و از فنون مختلفی برای مسائل طبقه‌بندی و تشخیص در حوزه‌ی یادگیری ماشین و یادگیری عمیق از جمله: Faster R-CNN، SSD[39]، R-FCN[40]، CNN، VGG16[41]، Inception، Densenet و YOLO استفاده کرده‌اند؛ که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را داشته‌اند. ملو و کاستا (۲۰۱۹)،[۵۶] نیز با استفاده از چک‌لیست‌های ایمنی متکی بر داده‌های گردآوری‌شده از طریق سیستم‌های هوایی بدون سرنشین، فرآیندهای ساخت دیوارهای بتنی را تحت نظارت قرار داده‌اند؛ که هدف آن، کاهش خطرهای مربوط به سقوط در فضای کاری و تقویت امنیت مدیران ایمنی در هنگام بازرسی و نظارت بر پروسه‌ی ساخت دیوارهای بتنی بوده است.

۳.۲.۴. جلوگیری از تصادف‌های ضربه‌ای

تصادف‌های ضربه‌ای، که غالباً هنگام برخورد کارگران با تجهیزات، وسائط نقلیه، اشیاء در حال سقوط، و ریزش‌های گودبرداری به وقوع می‌پیوندند، از جمله مخاطره‌های شناخته‌شده در صنعت ساخت هستند.[۵۷] بهره‌گیری از تصاویر هوایی، که توسط پهپادها ارائه می‌شوند، به مدیران ایمنی توانایی بیشتری برای مشاهده و تحلیل حرکت اجسام متحرک (مانند جرثقیل‌ها و دیگر ماشین‌آلات) و شناسایی اجسامی که احتمال سقوط دارند را می‌دهد، و این امر می‌تواند به پیش‌بینی و پرهیز از خطرهای بالقوه کمک کند.[۵۸] کیم و همکاران (۲۰۲۱)،[۵۹] یک چارچوب ایمنی دیجیتال بر پایه‌ی تصاویر پهپاد برای شناسایی و طبقه‌بندی اشیاء توسعه داده و با استفاده از الگوریتم YOLO V4[42] و شناسایی خودکار کارگران، جرثقیل‌ها، و بالابرها و تعیین مناطق امن و غیرامن، کارگران را در معرض خطرهای احتمالی محافظت کرده‌اند. لو[43] و همکاران (۲۰۲۳)،[۶۰] نیز روشی برای شناسایی مناطق کاری خطرناک در سایت‌های ساخت با بهره‌گیری از تصاویر پهپاد ارائه و در آن از مدل Mask-RCNN[44] جهت تشخیص و تفکیک سه نوع منطقه‌ی خطرناک در تصاویر استفاده کرده‌اند. نتایج مطالعه‌ی اخیر منجر به ایجاد نقشه‌ای ایمن برای رانندگان جرثقیل خزنده شده است، تا از خطرهای احتمالی مطلع شوند و اقدام‌های لازم را به‌عمل آورند. در صنعت ساخت، تشخیص خطرهای رباتیک مهم است. اقدام‌های مذکور به‌نوبه‌ی خود به ارتقاء ایمنی و هماهنگی بین انسان و ربات‌ها کمک می‌کنند. روش توسعه داده‌شده‌ی کیم (۲۰۲۱)،[۶۱] نیز براساس نظارت بصری و شناسایی خطرها با استفاده از تصاویر پهپاد، فاصله‌ی بین کارگر و تجهیزات یا ربات را با استفاده از الگوریتم YOLO V3 اندازه‌گیری، خطرهای برخورد را با استفاده از یک شبکه‌ی GAN[45] پیش‌بینی، و ایمنی را ارزیابی می‌کرده و در صورت خطر، با صدور هشدار و در صورت برخورد اجتناب‌ناپذیر، با تنظیم شتاب ربات از صدمه‌رسیدن به کارگر جلوگیری می‌کرده است. ژو[46] و همکاران (۲۰۲۲)،[۶۲] نیز با توسعه‌ی پلتفرمی برای نظارت بر ایمنی در پروژه‌های راه‌سازی با استفاده از سیستم هوایی بدون سرنشین، استانداردهای ایمنی را ارتقاء داده‌اند. پلتفرم اخیر با استفاده از الگوریتم‌های YOLO V4 و DeepSORT[47]، عناصری مانند کارگران و ماشین‌آلات را شناسایی می‌کرده و رفتارهای خطرآفرین را تشخیص و هشدار می‌داده است. همچنین، با استفاده از فناوری‌های مراقبت از حریم کاری، از ورود خودروها به مناطق حساس جلوگیری می‌شده است. اقدام‌های ذکرشده به کارگران و رانندگان کمک می‌کرده‌اند تا در محیطی ایمن‌تر فعالیت و از بروز حوادث احتمالی پیشگیری کنند.[۶۳]

۴.۲.۴. کنترل استفاده از تجهیزهای حفاظتی

در صنعت ساخت، تجهیزهای حفاظت فردی، از جمله ملزومات حیاتی به شمار می‌روند، که برای حراست از کارگران در برابر خطرهای شغلی ضروری هستند. با وجود اینکه حضور تجهیزات حفاظتی در محیط کاری به‌منظور پیشگیری از آسیب‌دیدگی‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است، گاهی اوقات وسایل مذکور می‌توانند باعث ایجاد حس نارضایتی و ناراحتی در میان کارگران شوند. یافته‌های مطالعاتی نشان داده‌اند که مقاومت در برابر رعایت کامل دستورالعمل‌های استفاده از تجهیزهای حفاظت فردی در بین کارگران ساختمانی متداول است، که این امر می‌تواند به خطرناک‌شدن شرایط کاری منتهی شود.[۶۴] به‌کارگیری

[31] Convolutional Neural Network
[32] You Only Look Once (Version 4)
[33] Patch-based Multi-View Stereo
[34] Occupational Safety and Health Administration
[35] Mendes
[36] Pattern Recognition System
[37] Li
[38] Peinado
[39] Single Shot Multibox Detector
[40] Region-based Fully Convolutional Network
[41] Visual Geometry Group 16-layer network
[42] You Only Look Once (Version 4)
[43] Lu
[44] Mask Region-Based Convolutional Neural Network
[45] Generative Adversarial Network
[46] Zhu
[47] Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric

وسائط نقلیه‌ی هوایی بدون سرنشین به‌منظور سنجش از دور و بازرسی‌های بصری، روشی نوآورانه است که امکان نظارت و کنترل دقیق‌تر رعایت استانداردهای ایمنی در محیط‌های کاری را فراهم می‌آورد. با استفاده از تصاویر و ویدئوهای گرفته‌شده توسط پهپادها، مدیران ایمنی قادر خواهند بود تا موارد تخلف از قوانین مربوط به استفاده‌ی نامناسب یا عدم استفاده از تجهیزات حفاظتی، مانند کلاه یا عینک ایمنی را در سایت کار شناسایی کنند.[۵۸] ناث[۴۸] (۲۰۲۱)،[۶۵] با طراحی یک سامانه‌ی نظارتی خودکار برای حفظ ایمنی کارگران به‌منظور تأیید انطباق آن‌ها با استانداردهای مربوط به تجهیزهای حفاظت شخصی و ارتقاء کیفیت تصاویر، از الگوریتم GAN و برای شناسایی کارگران، کلاه ایمنی، و جلیقه از الگوریتم YOLO V3 استفاده کرده است. گوپتا و نیر[۴۹] (۲۰۲۳)، نیز یک چارچوب پیشنهاد داده‌اند که در آن از فنون پیشرفته‌ی پردازش تصویر برای تشخیص استفاده از کلاه ایمنی در محیط‌های کارگاهی ساخت‌وساز استفاده شده است.[۶۶] در رویکرد اخیر، هر تصویر تحلیل و کلاه‌های ایمنی و کارگران در آن مکان‌یابی و هویت‌سازی شده‌اند. اگر سیستم پردازش تصویر نشان دهد کارگری بدون کلاه ایمنی است، مسئول سایت تصویر را بررسی می‌کند و اقدام‌های فوری توسط مدیریت اتخاذ می‌شود، تا اطمینان حاصل شود که اقدام‌های اصلاحی به‌سرعت انجام می‌گیرد. گوا[۵۰] و همکاران (۲۰۱۸)،[۶۷] چارچوبی را معرفی کرده‌اند که استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین و الگوریتم SSD را برای شناسایی کارگرانی که از کلاه ایمنی استفاده نمی‌کنند، در بر می‌گیرد. آکین سمویین[۵۱] و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۲۲)،[۴۴ و ۴۵] چارچوبی برای تجزیه‌وتحلیل و نظارت بر فعالیت‌های ایمنی و سلامت در پروژه‌ها با استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین و فنون یادگیری عمیق (Faster R-CNN و YOLO V3) ایجاد کرده و یک مطالعه‌ی موردی آزمایشی برای تشخیص استفاده یا عدم استفاده از کلاه ایمنی توسط کارگران انجام داده‌اند. ژو و همکاران (۲۰۲۲)،[۶۲] به توسعه‌ی یک پلتفرم نظارتی برای ایمنی در پروژه‌های راه‌سازی مبتنی بر استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین پرداخته‌اند، که قادر بوده است استفاده یا عدم استفاده‌ی کارگران از کلاه‌های ایمنی را توسط الگوریتم‌های YOLO V4 و DeepSORT، به‌صورت موثق شناسایی کند.

۵.۲.۴. نظارت بر ایمنی گودبرداری فونداسیون

نظارت بر رعایت اصول ایمنی در گودبرداری‌های فونداسیون پروژه‌های ساختمانی معمولاً از طریق اندازه‌گیری‌های دستی در محل با استفاده از تجهیزات پیچیده انجام می‌شود، که آن‌ها علاوه‌بر زمان‌بر و دشوار بودن، ممکن است خطرهای ناشی از تغییرشکل‌های موضعی را نادیده بگیرند. با توجه به اینکه فعالیت‌های حفاری گودبرداری‌های فونداسیون، به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین کارهای ساختمانی شناخته شده‌اند، یک تهدید جدی برای ایمنی کارگران نیز محسوب می‌شوند.[۶۸] وو[۵۲] و همکاران (۲۰۲۱)،[۶۹] روشی برای نظارت و تجزیه‌وتحلیل سریع ایمنی گودهای فونداسیون بر پایه‌ی توزیع تغییرشکل‌های محلی پیشنهاد داده‌اند؛ که در آن، ابتدا تصاویری از گود مربوط به فونداسیون توسط پهپادها گرفته می‌شود. سپس با درنظرگرفتن زاویه‌ی تمایل ایمنی شیب گود به‌عنوان شاخص نظارت ایمنی، وضعیت ایمنی محلی گود از طریق شناسایی مناطق دارای تغییرشکل محلی پیوسته و بزرگ و محاسبه‌ی مقدار توزیع تغییرشکل محلی ارزیابی می‌شود. در جدول ۱، خلاصه‌ی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی کاربرد پهپاد در صنعت ساخت ارائه شده است.

جدول ۱. کاربرد پهپاد در نظارت بر ایمنی در صنعت ساخت.

Objectives	Assessment of the Level of Risk Response Implementation Based on Regulations			Hazard Identification and Risk Assessment			References	Authors
	Falling Debris	Struck-by Accidents	Fall	Falling Debris	Struck-by Accidents	Fall		
Hazardous Area Identification				•	•	•	[29]	Chen, Y., Zhang, J., Min, B.
Safety Compliance with Standards	•	•	•				[32, 33]	Melo, R., Costa, D.
Safer and Easier Access to Hard-to-Reach Areas for Inspection	•	•	•				[34]	Falorca, J., Lanzinha, J.
Identification of Non-Compliance with Safety Standards	•	•	•				[35, 36]	Melo, R., Costa, D., Alvares, J., Irizarry, J., Bello, A.
Automation of Safety Inspections for Faster Decision-Making and Increased Accuracy	•	•	•				[37]	Einizinab, S., Khoshelham, K., Winter, S., Christopher, P., Fang, Y., Windholz, E., Radanovic, M., Hu, S.
Improvement in the Speed of Safety Managers' Decision-Making during Safety Inspections	•	•	•				[41, 42]	Lima, M., Melo, R. and Costa, D., Rey, R., Melo, R., Costa, D.
Enhancement of Safety Measures in Highway Projects				•	•	•	[43]	Goh, T. and Alzraiee, H.

[48] Nath
[49] Gupta & Nair
[50] Guo
[51] Akinsemoyin
[52] Wu

ادامه‌ی جدول ۱. کاربرد پهپاد در نظارت بر ایمنی در صنعت ساخت.

Identification of Unsafe Worker Behaviors and Hazardous Construction Site Conditions				●	●	●	[44, 45]	Akinsemoyin, A., Awolusi, I.
Automation of Safety Inspections	●	●	●				[46]	Leach, S., Xue, Y., Sridhar, R., Paal, S., Wang, Z., Murphy, R.
Enhancing the Accuracy of Construction Monitoring	●	●	●				[47]	Yang, E., Yang, J., Zeng, K., Zheng, Y.
Improvement of Safety Inspection	●	●	●				[21, 22, 29, 48]	Alizadehsalehi, S., Yitmen, I., Celik, T., Arditi, D., Asnafi, M., Yitmen, I., Celik, T., Chen, Y., Zhang, J., Min, B., Asnafi, M.
Detection of Safety Violations Related to Working at Heights			●				[51]	Shanti, M., Cho, C., De Soto, B., Byon, Y., Yeun, C., Kim, T.
Identification of Unsafe Openings and Guardrails			●				[52]	Gheisari, M., Rashidi, A., Esmaeili, B.
Automated Verification of Guardrail Standard Requirements			●				[53]	Mendes, C., Silveira, B., Costa, D., Melo, R.
Identification of Unprotected Openings and Edges			●				[54]	Li, Y., Esmaeili, B., Gheisari, M., Kosecka, J., Rashidi, A.
Automated Inspection of Temporary Guardrails			●				[55]	Peinado, H., Melo, R., Santos, M., Costa, D.
Improving the Monitoring of Concrete Wall Construction Processes			●				[56]	Melo, R., Costa, D.
Automated Identification of Workers, Cranes, and Elevators for Determining Safe and Unsafe Zones					●	●	[59]	Kim, K., Kim, S., Shchur, D.
Identification of Hazardous Work Areas				●	●	●	[60]	Lu, Y., Qin, W., Zhou, C., Liu, Z.
Calculation of the Distance between Worker and Equipment or Robot		●					[61]	Kim, D.
Identification of Workers and Machinery and Detection of Hazardous Behaviors		●					[62]	Zhu, C., Zhu, J., Bu, T., Gao, X.
Automated Detection of Workers' Use or Non-Use of Safety Helmets and Vests	●	●					[65]	Nath, N.
Automated Detection of Workers' Use or Non-Use of Safety Helmets	●	●					[66]	Gupta, S., Nair, S.
Automated Detection of Workers' Use or Non-Use of Safety Helmets	●	●					[67]	Guo, Y., Niu, H. and Li, S.
Automated Detection of Workers' Use or Non-Use of Safety Helmets	●	●					[44, 45]	Akinsemoyin, A., Awolusi, I., Chakraborty, D., Al-Bayati, A., Akanmu, A.
Automated Detection of Workers' Use or Non-Use of Safety Helmets	●	●					[62]	Zhu, C., Zhu, J., Bu, T. and Gao, X.
Measurement and Analysis of Local Deformation Distribution				●			[69]	Wu, J., Peng, L., Li, J., Zhou, X., Zhong, J., Wang, C., Sun, J.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

تقویت ایمنی و بهبود استانداردهای کیفیت از اصول اساسی در تحول صنعت ساخت به یک بخش پیشرفته و قوی است. در این زمینه، اجرای یک نظارت دائمی و دقیق بر رفتارها و شرایط ناایمن به‌عنوان یک مکانیزم فعال برای خنثی‌سازی خطرهای بالقوه مرتبط با ایمنی مطرح می‌شود. مطالعات اخیر در حوزه‌ی ایمنی به‌منظور شناسایی و توسعه‌ی راهکارهایی متمرکز شده‌اند، که فرآیند بازرسی‌های ایمنی را به شکل کارآمدتر، کم‌خطرتر، و سریع‌تر انجام دهند. یکی از این راهکارهای نوین، استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین است، که امکان دسترسی به مناطق دورافتاده و دشوار را به‌راحتی فراهم می‌آورد. فناوری مذکور باعث می‌شود که بازرسی‌ها با سرعت بالاتر و به دفعات بیشتر انجام شوند، که نتیجه‌ی آن بهبود کیفیت نظارت و کاهش زمان موردنیاز برای اجرای بازرسی‌هاست. پهپادها با فراهم‌آوردن تصاویر و داده‌های دقیق‌تر و جامع‌تر از پروژه‌ها، نقش بسزایی در افزایش دقت عملیات بازرسی ایفا می‌کنند. با تکنولوژی اخیر، شرایط و رفتارهای ناایمن، که در روش‌های سنتی بازرسی، کمتر شناسایی و یا حتی نادیده گرفته می‌شدند، با سهولت بیشتری قابل تشخیص خواهند بود. لذا، استفاده از پهپادها به‌طورمؤثری می‌تواند خطرها و حوادث جدی، از جمله سقوط از ارتفاع، تصادف‌های ضربه‌ای، و ریزش آوار را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد و بهبود چشمگیری در ایمنی محیط کار به‌وجود آورد. همچنین، پژوهشگران در تلاش هستند تا فناوری‌هایی را توسعه دهند که قادر باشند فرآیند تشخیص خطرها و ارزیابی میزان اجرای اقدام‌های واکنشی به ریسک‌ها را به‌صورت خودکار انجام دهند. این امر می‌تواند به کاهش چشمگیر زمان صرف‌شده برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و در نتیجه، تسریع تصمیم‌گیری‌های مرتبط با ایمنی منجر شود. به‌عبارت دیگر، با خودکارشدن فرآیندهای ذکرشده، کارآیی عملیات بازرسی افزایش می‌یابد و امکان پاسخگویی سریع‌تر به ریسک‌ها فراهم می‌شود. درنهایت، پهپادها به‌عنوان ابزاری پیشرو و نوآورانه در صنعت ساخت‌وساز، پتانسیل قابل‌توجهی برای بهبود سطح ایمنی و بهره‌وری پروژه‌ها دارند.

مرحله‌ی طراحی، اساسی‌ترین و کلیدی‌ترین بخش در چرخه‌ی حیات و ایجاد یک پروژه است. تصمیم‌های اتخاذشده در این مرحله، تأثیر بسزایی در کل فرآیند و نتیجه‌ی نهایی پروژه دارند. با وجود پیشرفت‌های فناورانه و مطالعات متعدد، همچنان به میزان کافی به ایمنی در طراحی پروژه‌های ساختمانی توجه نمی‌شود. با توجه به مزایای استفاده از پهپادها در مرحله‌ی طراحی و نقش آن‌ها در بهبود ایمنی، مطالعات آینده باید بر استفاده‌ی گسترده‌تر از فناوری مذکور تمرکز کنند. مطالعات بیشتری باید در زمینه‌ی ادغام پهپادها با سایر فناوری‌های مدرن، مانند هوش مصنوعی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان انجام شود، تا بتوان به راه‌حل‌های جامع‌تری برای بهبود ایمنی در صنعت ساخت دست یافت.

مطالعات نشان می‌دهند استفاده از روش دستی در پردازش و تجزیه‌وتحلیل تصاویر پهپادها نسبت به روش خودکار، زمان‌بر و کم‌دقت است. مطالعات آتی باید بر روی خودکارسازی این فرآیند تمرکز کنند تا بازرسی با سرعت و دقت بیشتری انجام شود. با به‌کارگیری پهپادها در خودکارسازی، امکان افزایش کارایی و ایمنی نیروی کار در صنعت ساخت وجود دارد.

در بررسی‌های صورت‌گرفته پیرامون ارزیابی میزان اجرای پاسخ‌های مرتبط با ریسک براساس قوانین ایمنی، تاکنون تمرکز عمدتاً بر شناسایی خودکار استفاده از کلاه ایمنی و جلیقه‌ی ایمنی به وسیله‌ی تصاویر ثبت‌شده توسط پهپادها بوده است. رویکرد اخیر به‌عنوان پاسخی به خطرهای مرتبط با تصادف‌های ضربه‌ای و ریزش آوار طراحی شده است. با این حال، تاکنون اقدام جدی برای ارزیابی و شناسایی خودکار سایر اقدام‌های حفاظتی، به‌ویژه پاسخ به خطرهای ناشی از سقوط یا تکمیل روش‌های موجود برای خطرهای تصادف‌ها و ریزش آوار صورت نگرفته است. به‌عنوان نمونه، می‌توان در مطالعات آتی بر شناسایی خودکار استفاده یا عدم استفاده از کمربند ایمنی تمرکز کرد، که می‌تواند به‌عنوان پاسخی مؤثر به خطرهای ناشی از سقوط عمل کند. این نوع شناسایی خودکار از طریق تصاویر گرفته‌شده توسط پهپادها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی به بهبود ایمنی محیط کار کمک کند. درنهایت، می‌توان رویکردی جامع و یکپارچه طراحی کرد، که در هر پرواز پهپاد، تمامی تجهیزهای حفاظت فردی، نظیر کلاه ایمنی، جلیقه‌ی ایمنی، کمربند ایمنی، و موارد مشابه به‌صورت خودکار شناسایی، بررسی، و تأیید شوند. چنین سیستمی می‌تواند نقش بسزایی در افزایش سطح ایمنی نیروی کار در پروژه‌های عمرانی ایفا کند و با کاهش مخاطره‌ها، به بهبود کارایی و ایمنی کلی پروژه‌ها منجر شود.

علی‌رغم پتانسیل سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در کاهش هزینه‌ها و ارتقاء ایمنی، فناوری اخیر در پروژه‌های واقعی برای بازرسی‌های ایمنی چندان استفاده نمی‌شود. برای افزایش پذیرش فناوری ذکرشده در میان ذینفعان، ضروری است که مزایای اخیر به‌صورت کمّی و مستند ارائه شوند. ارائه‌ی آمار و داده‌های مشخصی از میزان کاهش: هزینه‌های عملیاتی، تعداد حوادث کاری، و دعاوی حقوقی و هزینه‌های پزشکی می‌تواند تأثیرگذاری بیشتری داشته باشد.

References- منابع

1. Abdelhamid, T. and Everett, J., 2000. Identifying root causes of construction accidents. *Journal of Construction Engineering and Management, 126*.1, pp.52-60. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:1(52).
2. Yi, K. and Langford, D., 2006. Scheduling-based risk estimation and safety planning for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management, 132*.6, pp.626-635. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:6(626).
3. Nahmens, I. and Ikuma, L., 2009. An empirical examination of the relationship between lean construction and safety in the industrialized housing industry. *Lean Construction Journal,* pp.1-12. https://doi.org/10.60164/a2g0h2d4b.
4. Henshaw, J., 2004. Safety and health add value to your business, workplace and life. *Proceedings of the 8th*

Biennial Governors Pacification Rim Safety and Health Conference, pp.13-14.

5. Awolusi, I. and Marks, E., 2017. Safety activity analysis framework to evaluate safety performance in construction. *Journal of Construction Engineering and Management, 143*.3. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001265.
6. Woodcock, K., 2014. Model of safety inspection. *Safety Science, 62*, pp.145-156. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.08.021.
7. Perlman, A., Sacks, R. and Barak, R., 2014. Hazard recognition and risk perception in construction. *Safety Science, 64*, pp.22-31. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.11.019.
8. Seo, J., Han, S., Lee, S. and Kim, H., 2015. Computer vision techniques for construction safety and health monitoring. *Advanced Engineering Informatics, 29*.2, pp.239-251. https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.02.001.
9. Park, J., Kim, K. and Cho, Y., 2017. Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors. *Journal of Construction Engineering and Management, 143*.2. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001223.
10. Irizarry, J., Gheisari, M. and Walker, B., 2012. Usability assessment of drone technology as safety inspection tools. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 17*.12, pp.194-212. http://www.itcon.org/2012/12.
11. Liu, P., Chen, A., Huang, Y., Han, J., Lai, J., Kang, S., Wu, T., Wen, M. and Tsai, M., 2014. A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *Smart Struct. Syst, 13*.6, pp.1065-1094. https://doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065.
12. Gheisari, M. and Esmaeili, B., 2016. Unmanned aerial systems (UAS) for construction safety applications. *Construction Research Congress 2016,* pp.2642-2650. https://doi.org/10.1061/9780784479827.263.
13. Mahajan, G., 2021. Applications of drone Technology in Construction Industry: A study 2012-2021. *International Journal of Engineering and Advanced Technology, 11*.1, pp.224-239. https://doi.org/10.35940/ijeat.a3165.1011121.
14. Van Eck, N. and Waltman, L., 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics, 84*.2, pp.523-538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3.
15. Choi, H., Kim, H., Kim, S. and Na, W., 2023. An Overview of Drone Applications in the Construction Industry. *Drones,* 7.8, pp.515. https://doi.org/10.3390/drones7080515.
16. Asanka, W. and Malik, R., 2015. Study on the impact of accidents on construction projects. *6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management. 4*, pp.58-67.
17. Okpala, I., Nnaji, C. and Karakhan, A., 2020. Utilizing emerging technologies for construction safety risk mitigation. *Practice Periodical on Structural Design and Construction, 25*.2. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000468.
18. Dobrucali, E., Sadikoglu, E., Demirkesen, S., Zhang, C., Tezel, A. and Kiral, I., 2023. A bibliometric analysis of digital technologies use in construction health and safety. *Engineering, Construction and Architectural Management, 31*.8, pp.3249-3282. https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2022-0798.
19. Yap, J., Lee, K. and Wang, C., 2021. Safety enablers using emerging technologies in construction projects: empirical study in Malaysia. *Journal of Engineering, Design and Technology, 21*.5, pp.1414-1440. https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2021-0379.
20. Manzoor, B., Othman, I., Pomares, J. and Chong, H. Y., 2021. A research framework of mitigating construction accidents in high-rise building projects via integrating building information modeling with emerging digital technologies. *Applied Sciences (Switzerland), 11*.18. https://doi.org/10.3390/app11188359.
21. Alizadehsalehi, S., Yitmen, I., Celik, T. and Arditi, D., 2020. The effectiveness of an integrated BIM/UAV model in managing safety on construction sites. *International journal of occupational safety and ergonomics, 26*.4, pp.829-844. https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1504487.
22. Alizadehsalehi, S., Asnafi, M., Yitmen, I. and Celik, T., 2017. UAS-BIM based real-time hazard identification and safety monitoring of construction projects. *9th Nordic Conference on Construction Economics and Organization At: Chalmers Univ Technol, Goteborg, SWEDEN, 13*, pp.22.
23. Albeaino, G., Gheisari, M. and Franz, B., 2019. A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain. *Journal of Information Technology in Construction, 24*, pp.381-405. https://www.itcon.org/2019/20.
24. Lee, K., 2021. Investigating influential factors of technology adoption in construction safety management.
25. Martinez, J., Gheisari, M., Alarcon, L. and Luna, R., 2019. Using UAV-generated visual contents to assess the risk perception of safety managers on a construction site. *Advances in ICT in Design, Construction and Management in Architecture,*

Engineering, Construction and Operations (AECO) Proceedings of the 36th CIB W78 2019 Conference, pp.564-571.

26. Toh, Y., Goh, Y. and Guo, B., 2017. Knowledge, attitude, and practice of design for safety: multiple stakeholders in the Singapore construction industry. *Journal of Construction Engineering and Management, 143*.5. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001279.
27. Goh, Y. and Chua, S., 2016. Knowledge, attitude and practices for design for safety: A study on civil and structural engineers. *Accident Analysis and Prevention, 93*, pp.260-266. https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.09.023.
28. Huang, X. and Hinze, J., 2006. Owner's role in construction safety. *Journal of construction engineering and management, 132*.2, pp.164-173. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:2(164).
29. Chen, Y., Zhang, J. and Min, B., 2019. Applications of BIM and UAV to construction safety. *CSCE Annual Conference,* pp.1-7.
30. Antar, S., Khoury, H. and Haro, F., 2023. Unmanned aerial systems for safety monitoring in construction: effect on safety performance. *Creative Construction e-Conference 2023,* pp.87-96. https://doi.org/10.3311/CCC2023-011.
31. Kaming, P. and Yonathan, G., 2019. Comparison of the supervisory cost of using an unmanned aerial system and conventional methods in construction projects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 615. 10.1088/1757-899X/615/1/012024.
32. De Melo, R. and Costa, D., 2019. Integrating resilience engineering and UAS technology into construction safety planning and control. *Engineering, Construction and Architectural Management, 26*.11, pp.2705-2722. https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2018-0541.
33. Melo, R. and Costa, D., 2018. Contributions of resilience engineering and visual technology to safety planning and control process. *Proceedings of the Joint CIB W099 and TG59 International Safety, Health, and People in Construction Conference, Salvador, Brazil,* pp.13-22.
34. Falorca, J. and Lanzinha, J., 2021. Facade inspections with drones–theoretical analysis and exploratory tests. *International Journal of Building Pathology and Adaptation, 39*.2, pp.235-258. https://doi.org/10.1108/IJBPA-07-2019-0063.
35. Melo, R., Costa, D., Alvares, J. and Irizarry, J., 2017. Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites. *Safety Science, 98*, pp.174-185. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.06.008.
36. Costa, D., De Melo, R., Alvares, J. and Bello, A., 2016. Evaluating the performance of unmanned aerial vehicles for safety inspection. *24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction,* pp.23-32.
37. Einizinab, S., Khoshelham, K., Winter, S., Christopher, P., Fang, Y., Windholz, E., Radanovic, M. and Hu, S., 2023. Enabling technologies for remote and virtual inspection of building work. *Automation in Construction, 156*. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105096.
38. Rao, A., Radanovic, M., Liu, Y., Hu, S., Fang, Y., Khoshelham, K., Palaniswami, M. and Ngo, T., 2022. Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. *Automation in Construction, 136*. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104099.
39. Awolusi, I., Akinsemoyin, A., Chakraborty, D. and Al-Bayati, A., 2022. Worker safety and health activity monitoring in construction using unmanned aerial vehicles and deep learning. *Construction Research Congress 2022,* pp.463-473. https://doi.org/10.1061/9780784483961.049.
40. Lnc Prakash, K., Ravva, S., Rathnamma, M. and Suryanarayana, G., 2023. AI applications of drones. *Drone Technology: Future Trends and Practical Applications,* pp.153-182. https://doi.org/10.1002/9781394168002.ch7.
41. Lima, M., Melo, R. and Costa, D., 2021. Contribution of UAS monitoring to safety planning and control. *IGLC 2021 - 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction - Lean Construction in Crisis Times: Responding to the Post-Pandemic AEC Industry Challenges,* pp.883-892. https://doi.org/10.24928/2021/0138.
42. Rey, R., De Melo, R. and Costa, D., 2021. Design and implementation of a computerized safety inspection system for construction sites using UAS and digital checklists–Smart Inspecs. *Safety Science, 143*. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105430.
43. Goh, T. and Alzraiee, H., 2022. Digital safety planning and monitoring in highway construction projects. *Construction Research Congress 2022: Computer Applications, Automation, and Data Analytics - Selected Papers from Construction Research Congress 2022,* pp.307-313. https://doi.org/10.1061/9780784483961.033.
44. Akinsemoyin, A., Awolusi, I., Chakraborty, D., Al-Bayati, A. and Akanmu, A., 2023. Unmanned aerial systems and deep learning for safety and health activity monitoring on construction sites. *Sensors, 23*.15, pp.6690. https://doi.org/10.3390/s23156690.
45. Akinsemoyin, A., 2022. Construction safety and health monitoring using unmanned aerial vehicles and deep learning.

46. Leach, S., Xue, Y., Sridhar, R., Paal, S., Wang, Z. and Murphy, R., 2021. Data augmentation for improving deep learning models in building inspections or postdisaster evaluation. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 35*.4, pp.04021029. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001594.

47. Yang, E., Yang, J., Zeng, K. and Zheng, Y., 2023. Construction safety monitoring system based on UAV image. *International Conference on Advanced Hybrid Information Processing,* pp.546-556.

48. Asnafi, M., 2016. 3D/4D BIM-based hazard identification, safety regulations and safety monitoring of construction projects in pre-construction and construction phases.

49. Weerasinghe, I. and Ruwanpura, J., 2009. Automated data acquisition system to assess construction worker performance. *Construction Research Congress 2009: Building a Sustainable Future,* pp.61-70. https://doi.org/10.1061/41020(339)7.

50. Teizer, J., Allread, B. and Mantripragada, U., 2010. Automating the blind spot measurement of construction equipment. *Automation in Construction, 19*.4, pp.491-501. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.12.012.

51. Shanti, M., Cho, C., De Soto, B., Byon, Y., Yeun, C. and Kim, T., 2022. Real-time monitoring of work-at-height safety hazards in construction sites using drones and deep learning. *Journal of Safety Research, 83*, pp.364-370. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.09.011.

52. Gheisari, M., Rashidi, A. and Esmaeili, B., 2018. Using unmanned aerial systems for automated fall hazard monitoring. *Construction Research Congress 2018,* pp.62-72. ASCE.

53. Mendes, C., Silveira, B., Costa, D. and Melo, R., 2018. Evaluating USA-image pattern recognition system application for safety guardrails inspection. *Proceedings of the Joint CIB W099 and TG59 Conference Coping with the Complexity of Safety, Health, and Wellbeing in Construction. Salvador, Brazil,* pp.23-32.

54. Li, Y., Esmaeili, B., Gheisari, M., Kosecka, J. and Rashidi, A., 2022. Using unmanned aerial systems (UAS) for assessing and monitoring fall hazard prevention systems in high-rise building projects. *arXiv preprint arXiv:2209.13137.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.13137.

55. Peinado, H., Melo, R., Santos, M. and Costa, D., 2023. Potential application of deep learning and UAS for guardrail safety inspection. *31st Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC31)*. https://doi.org/10.24928/2023/0148.

56. Melo, R. and Costa, D., 2019. Reducing the gap between work as done and work as imagined on construction safety supported by UAS. *REA Symposium on Resilience Engineering Embracing Resilience.* https://doi.org/10.15626/rea8.02.

57. Hinze, J., Huang, X. and Terry, L., 2005. The nature of struck-by accidents. *Journal of construction engineering and management, 131*.2, pp.262-268. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:2(262).

58. Martinez, J., Gheisari, M. and Alarcon, L., 2020. UAV integration in current construction safety planning and monitoring processes: Case study of a high-rise building construction project in Chile. *Journal of Management in Engineering, 36*.3, pp.05020005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000761.

59. Kim, K., Kim, S. and Shchur, D., 2021. A UAS-based work zone safety monitoring system by integrating internal traffic control plan (ITCP) and automated object detection in game engine environment. *Automation in Construction, 128*. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103736.

60. Lu, Y., Qin, W., Zhou, C. and Liu, Z., 2023. Automated detection of dangerous work zone for crawler crane guided by UAV images via Swin Transformer. *Automation in Construction, 147*, pp.104744. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104744.

61. Kim, D., 2021. Toward Co-Robotic Construction: Visual Site Monitoring and Hazard Detection to Ensure Worker Safety.

62. Zhu, C., Zhu, J., Bu, T. and Gao, X., 2022. Monitoring and identification of road construction safety factors via UAV. *Sensors, 22*.22. https://doi.org/10.3390/s22228797.

63. Kadalli, M., 2021. Perceived effectiveness of highway work zone intrusion mitigation technologies: A State DOT Perspective.

64. Gupta, S. and Nair, S., 2020. Challenges in capturing and processing UAV based photographic data from construction sites. *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 37*, pp.911-918. https://doi.org/10.22260/ISARC2020/0126.

65. Nath, N., 2021. Human-Centered Computing and Visual Analytics for Future of Work in Construction.

66. Gupta, S. and Nair, S., 2023. A review of the emerging role of UAVs in construction site safety monitoring. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.135.

67. Guo, Y., Niu, H. and Li, S., 2018. Safety monitoring in construction site based on unmanned aerial vehicle platform with computer vision using transfer learning techniques. *Proceedings of the 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, APWSHM 2018,* pp.1052-1060.

68. Wang, J., Zhang, S. and Teizer, J., 2015. Geotechnical and safety protective equipment planning using range point cloud data and rule checking in building information modeling. *Automation in Construction, 49*, pp.250-261. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.09.002.

69. Wu, J., Peng, L., Li, J., Zhou, X., Zhong, J., Wang, C. and Sun, J., 2021. Rapid safety monitoring and analysis of foundation pit construction using unmanned aerial vehicle images. *Automation in Construction, 128*. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103706.