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

فاطمه سلیمانی[۱]، یعقوب علیپوری[۲،*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استادیار، آزمایشگاه فناوری‌های نوین در مدیریت ساخت، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- f.soleymani@email.kntu.ac.ir

۲- y.alipouri@kntu.ac.ir

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 خطرات کمک کند. فناوری سیستم‌های هوایی بدون سرنشین ابزاری کارآمد برای بهبود بازرسی و نظارت ایمنی در پروژه‌های عمرانی است. این مقاله به بررسی پژوهش‌های پیشین در خصوص کاربرد این سیستم‌ها در نظارت بر ایمنی پروژه‌های عمرانی با روش‌های کتاب‌سنجی و تحلیل محتوا پرداخته است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در مراحل طراحی و ساخت مفید بوده و از طریق بازرسی‌های دقیق‌تر و جامع‌تر، امکان نظارت مؤثر بر اجرای قوانین ایمنی را فراهم می‌آورد. این فناوری با افزایش دقت و گستردگی بازرسی‌ها، به کاهش خطراتی نظیر سقوط، تصادفات ضربه‌ای و ریزش آوار کمک می‌کند و به‌طور کلی سطح ایمنی در محیط کار را ارتقا می‌بخشد. در نهایت، مقاله به بررسی نتایج، محدودیت‌ها، چالش‌ها و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده می‌پردازد.

واژگان کلیدی:

نظارت بر ایمنی، بازرسی ایمنی، سیستم هوایی بدون سرنشین، پهپاد

ویراستاری نشده

* یعقوب علیپوری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پست الکترونیکی: y.alipouri@kntu.ac.ir (نویسنده مسئول)

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

F. Soleymani[۱], Y. Alipouri[۲,*]

۱- M.Sc. student of Construction Engineering and Management, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

۲- Assistant Professor, Innovative Technologies Center for Construction Management, Construction Engineering and Management Department, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

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 one hand, the number of safety managers in each construction company is limited. These managers may also be geographically dispersed, resulting in 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 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 in the site. Additionally, the results, limitations, and challenges associated with this emerging technology are presented, along with suggestions for future research.

Keywords: Safety Monitoring, Safety inspection, Unmanned aircraft system, Drone

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، خطرات باید شناسایی و کنترل شوند. بازرسی ایمنی یک جزء اساسی از سیستم‌های مدیریت ایمنی برای کنترل خطرات از طریق تشخیص و اصلاح به‌موقع است.

تمام حوادث به دلیل شرایط یا اعمال ناایمن رخ می‌دهند [۱]. نظارت مداوم بر رفتارها و شرایط ناایمن به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای حذف خطرات بالقوه ایمنی و سلامتی شناخته شده است. یک محیط کاری ناایمن نه‌تنها بر ایمنی محل کار تأثیر می‌گذارد، بلکه ازنظر زمان و هزینه نیز پیامدهای قابل‌توجهی دارد [۲]. حوادث و آسیب‌ها رنج‌های انسانی مختلفی را منجر می‌شوند و بر رضایت کارکنان و رفاه عمومی تأثیر می‌گذارند. همچنین، ازنظر 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 دارای سه مزیت اصلی هستند: حفاظت از جان انسان‌ها، کاهش هزینه‌ها و تقویت روحیه کارکنان [۴]. نظارت مداوم بر رفتارها و شرایط ناایمن کارگران یک روش فعال و پیشگیرانه برای کاهش و یا حذف خطرات ایمنی و بهداشتی و جلوگیری از حوادث می‌باشد [۵]. مدیریت ایمنی در محل کار وظیفه اصلی مدیران ایمنی در پروژه‌ها است. به‌طورمعمول، مدیران ایمنی برای کاهش موقعیت‌ها و عملکردهای ناایمن، محل کار خود را به‌صورت حضوری مشاهده می‌کنند [۶]. بر اساس این مشاهدات، اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی برای جلوگیری از صدمات و حتی مرگ کارگران انجام می‌شود [۷]. روش‌های سنتی نظارت و تجزیه‌وتحلیل فعالیت‌ها، گران، کند و مستعد انتقال اطلاعات نادرست به دلیل خطای انسانی هستند [۸]. ویژگی پویا و پیچیده محیط‌های کاری، در کنار کمبود تعداد مدیران ایمنی در هر سایت، ممکن است بر عملکرد کلی مدیران در شناسایی کامل موقعیت‌های ناایمن تأثیر منفی بگذارد و به‌طور بالقوه منجر به صدمات و تلفات کارگران شود [۹]. درنتیجه، محققان به دنبال 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، مشاهده مستقیم شرایط و روش‌ها و ایجاد تعامل مستقیم بین بازرس و کارگران متمرکز شد [۱۰].

یکی از فناوری‌های نوظهوری که پتانسیل تأثیرگذاری بر بازرسی‌های ایمنی سنتی را دارد، سیستم‌های هواپیمای بدون سرنشین[۱] است. وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین[۲]، که به‌عنوان پهپاد[۳] نیز شناخته می‌شوند، سیستم‌های هواپیمایی هستند که خلبانان از روی زمین آن‌ها را کنترل می‌کنند [۱۱]. به سیستمی که شامل وسیله پرنده و فرد کنترل‌کننده آن از روی زمین است، معمولاً سیستم هوایی بدون سرنشین گفته می‌شود. سیستم‌های هوایی بدون سرنشین می‌توانند ابزاری ایده‌آل برای بازرسی ایمنی باشند. موجب می‌شوند که مسئولین ایمنی از زاویه جدیدی به محیط کار نگاه کنند که این موجب آسان‌سازی سازوکارهای بازرسی و پایش ایمنی آن‌ها می‌شود [۱۲]. پهپادها قادرند اطلاعات تصویری را با چابکی و به دفعات موردنیاز گردآوری نموده و داده‌های حاصله 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 به‌طور پیوسته و بدون نیاز به حضور فیزیکی در محیط، فعالیت‌های پرمخاطره را مجسم نمایند. اگرچه سیستم‌های هوایی بدون سرنشین به‌طور مستقیم 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].

ازآنجایی‌که ایمنی می‌تواند پیامدهای عمیقی بر زندگی افراد و جوامع داشته باشد، پژوهش‌ها و مقالات علمی در این حوزه قادرند نقش بسزایی در ارتقای شرایط ایمنی در سطح جامعه و سازمان‌ها ایفا نمایند. بر این اساس، تدوین مقالات و ارائه راهبردهایی در راستای بهینه‌سازی و تحکیم ایمنی در عرصه‌های گوناگون، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مروری بر ادبیات پیشین نشان می‌دهد که کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در صنعت ساخت و تأثیر فناوری‌های نوین بر ارتقای ایمنی در این صنعت، موردبررسی قرار گرفته است. بااین‌وجود، هیچ یک از این پژوهش‌ها به‌طور خاص بر مطالعاتی که از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای پایش و بهبود ایمنی بهره گرفته‌اند، متمرکز نبوده‌اند. به‌منظور پرداختن به این خلأ پژوهشی، تحقیق حاضر با بهره‌گیری از روش‌های آماری و کیفی، به شکلی فراگیر به واکاوی نقش سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در نظارت و ارتقای ایمنی در پروژه‌های عمرانی پرداخته است. هدف این مقاله، مرتفع ساختن شکاف‌ها و محدودیت‌های موجود در تحقیقات

---

[۱] Unmanned aircraft system

[۲] Unmanned aerial vehicle

[۳] Drone

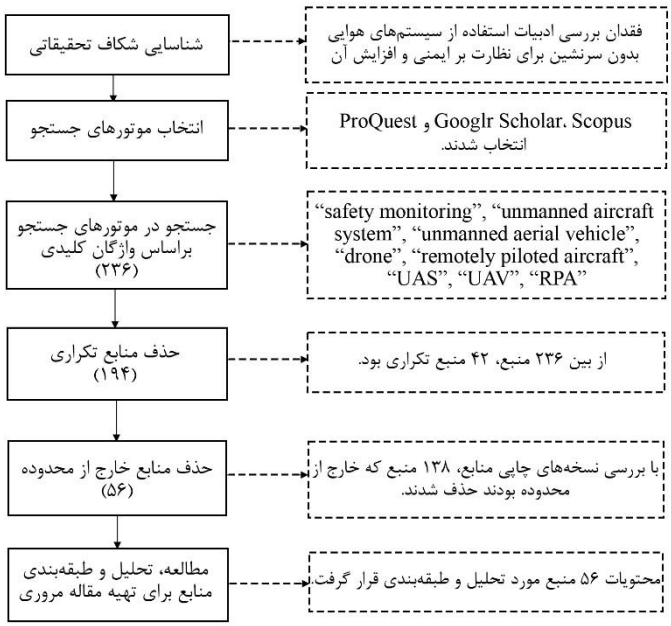
کنونی و هدایت پژوهش‌های آتی به سمت حوزه‌هایی است که بیشترین ارزش افزوده را به همراه خواهند داشت.

در راستای دستیابی به اهداف تعیین‌شده، ساختار مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش بعد، روش تحقیق مورداستفاده به‌تفصیل شرح داده می‌شود. در بخش سوم مقاله با استفاده از روش‌های علم‌سنجی، تحلیلی کلی از موضوع مدنظر به عمل می‌آید. در بخش بعدی، مروری کلی بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در زمینه نظارت بر ایمنی ارائه می‌شود. بخش پایانی به ارائه نتایج و تبیین اهمیت این مطالعه اختصاص یافته و در ادامه، چالش‌های فراروی تحقیقات کنونی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و جهت‌گیری‌های پژوهشی آتی پیشنهاد شده است.

۲ - روش تحقیق

این مقاله از دو نوع روش مرور بر ادبیات، به نام‌های کتاب‌سنجی[۱] و روایتی[۲]، به‌عنوان رویکرد خود استفاده می‌کند. در این مطالعه، از روش کتاب‌سنجی به‌عنوان ابزاری کارآمد و مؤثر برای بررسی کمی ادبیات موجود در حوزه موردنظر استفاده می‌شود. کتاب‌سنجی با بهره‌گیری از فنون ریاضی و آماری، امکان تعیین اندازه و گستره مطالعات در یک زمینه علمی خاص را فراهم می‌آورد و تصویری جامع و کلی از وضعیت آن رشته ارائه می‌دهد. بدین ترتیب، نتایج حاصل از تحلیل کتاب‌سنجی در مقایسه با بررسی‌های دستی، از عینیت و علمیت بالاتری برخوردار است. نرم‌افزار VOSviewer به دلیل دسترسی رایگان، سهولت استفاده، ارائه کلیه عملکردهای اساسی موردنیاز برای تجسم شبکه‌های علم‌سنجی و قابلیت درک آسان نتایج حتی با حداقل مهارت‌های فنی که منجر به افزایش نرخ پذیرش آن در میان محققان حوزه ساخت‌وساز می‌گردد، به‌عنوان ابزار مناسب برای این پژوهش برگزیده شد.

جستجو و بررسی دقیق ادبیات مرتبط با موضوع تحقیق از طریق موتورهای جستجوی علمی مانند Google Scholar، Scopus و ProQuest، به دلیل پوشش وسیع و کارایی برجسته‌شان در دسترسی به منابع علمی، صورت گرفت. واژگان کلیدی نظیر "safety monitoring"، "unmanned aircraft system"، "unmanned aerial vehicle"، "drone"، "remotely piloted aircraft"، "UAS"، "UAV" و "RPA" جستجو شدند. برای افزایش دقت نتایج، محدودیت‌هایی ازجمله زبان انگلیسی و انتشار مقالات پس از سال ۲۰۰۰ اعمال شد. اولیه‌ترین ارزیابی‌ها شامل بررسی عناوین و خلاصه‌های منابع بود، که منجر به حذف آن دسته از تحقیقاتی گردید که واژگان کلیدی مذکور را دربر نمی‌گرفتند. این رویکرد منجر به شناسایی اولیه ۲۳۶ منبع شد که با حذف موارد تکرار شده به ۱۹۴ مورد کاهش یافت. در مرحله بعد، با بررسی دقیق‌تر نسخه‌های چاپی، تعداد نهایی منابع مرتبط به ۵۶ تحقیق تقلیل یافت. شکل (۱) چارچوب کلی این تحقیق را نشان می‌دهد.



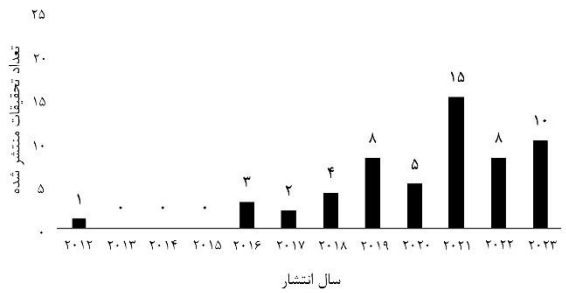
شکل ۱: چارچوب کلی تحقیق

[۱] Bibliometric

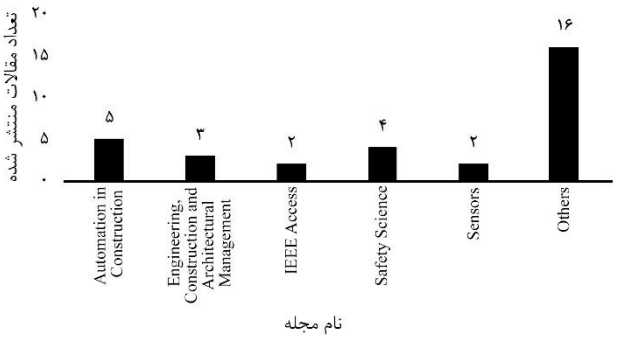
[۲] Narrative

۳ - مرور بر ادبیات بر اساس ابزارهای آماری و کتاب‌سنجی

روند انتشار تحقیقات مرتبط با کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در زمینه نظارت بر ایمنی، طی سال‌های اخیر، در شکل (۲) به تصویر کشیده شده است. نقطه آغازین این مسیر تحقیقاتی را می‌توان به مطالعه‌ای نسبت داد که توسط ایریزاری[۱] و همکارانش [۱۰]، در سال ۲۰۱۲ به انجام رسید. از سال ۲۰۱۹ به بعد، توجه ویژه‌ای از سوی جامعه علمی به این حوزه تحقیقاتی معطوف شده است و افزایش در تعداد مطالعات و نتایج حاصل از آن مشاهده شده است. بر اساس داده‌ها، بیشترین تعداد منابع منتشرشده در این حوزه مربوط به سال ۲۰۲۱ می‌باشد که تعداد آن‌ها به ۱۵ منبع می‌رسد.



شکل ۲: تعداد تحقیقات منتشرشده در هر سال



شکل ۳: تعداد مقالات منتشرشده در هر مجله

از میان ۵۶ منبعی که موردبررسی قرار گرفت، ۳۲ منبع به‌صورت مقاله در مجلات منتشر شده بودند، ۱۸ منبع به‌عنوان مقالات کنفرانسی منتشر شده بودند و ۶ منبع به‌صورت پایان‌نامه آورده شده بودند. شکل (۳) توزیع ۳۲ مقاله منتشرشده در مجلات مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل، بخش "Others" مجلاتی را نشان می‌دهد که تنها یک مقاله چاپ کرده‌اند.

به‌منظور تحلیل دقیق‌تر داده‌های استخراج‌شده، از نرم‌افزار VOSviewer استفاده شد تا یک بررسی عمیق بر نام‌های نویسندگان و واژگان کلیدی به‌دست‌آمده از مقالات انجام شود. این اقدام با هدف فراهم آوردن یک دیدگاه کلی نسبت به چگونگی توزیع فراوانی نویسندگان و واژگان کلیدی صورت گرفت.

انتظار می‌رود که مقالاتی که در حوزه‌های مشابه تحقیق کرده‌اند، تعاملات قوی داشته باشند. واژگان کلیدی محتوای اصلی مقالات علمی را نشان می‌دهند. تحلیل هم‌زمانی واژگان کلیدی ، ارتباط بین آن‌ها را بر اساس تعداد دفعات ظاهر شدن مشترک در اسناد مختلف نشان می‌دهد. در نمایش این داده‌ها، ابعاد گره‌ها میزان وقوع واژگان کلیدی را نشان داده و با افزایش تکرار واژگان کلیدی، اندازه برچسب و دایره نیز به‌تناسب افزایش می‌یابد. هرچه فاصله بین آن‌ها کمتر باشد، ارتباط بین آن‌ها قوی‌تر است [۱۴].

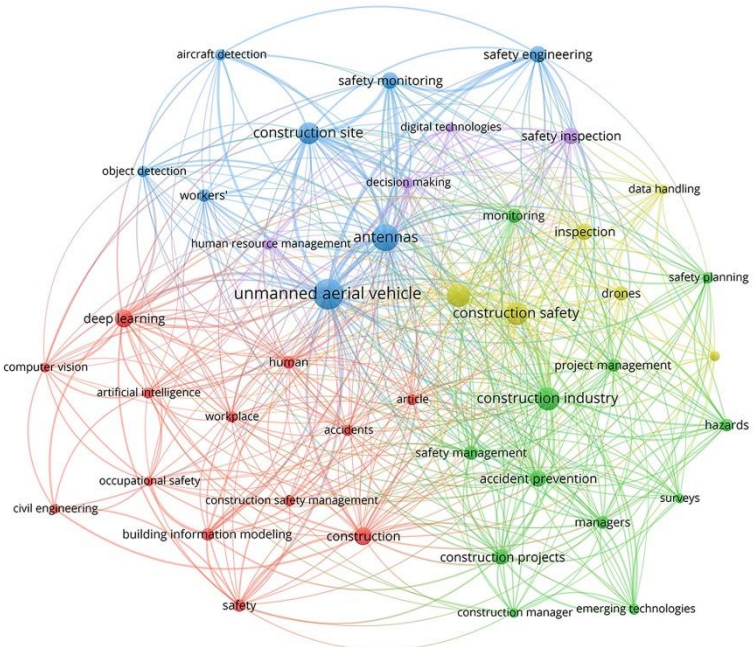
در این راستا، یک شبکه هم‌زمانی واژگان کلیدی با استفاده از VOSviewer تهیه و نوع تحلیل بر روی "هم‌زمانی[۲]" تنظیم شد و "شمارش کسری[۳]" به‌عنوان روش شمارش به کار رفت. درنهایت، ۴۰۸ واژگان کلیدی شناسایی شده و برای بهبود وضوح بصری، واژگان کلیدی که دست‌کم سه بار ظاهر شده‌اند، انتخاب گردیدند که ۴۳ واژه کلیدی این آستانه را رعایت کردند. در شکل (۴)، نقشه هم‌زمانی واژگان کلیدی با استفاده از VOSviewer به نمایش درآمده است، 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 شدند.

شبکه‌ای از هم‌نویسندگان با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer ایجاد شد، و تجزیه‌وتحلیل بر اساس "هم‌نویسندگی[۴]" انجام شد و "شمارش کامل[۵]" به‌عنوان روش شمارش به کار گرفته شد. در این تحلیل، ۱۴۰ نویسنده شناسایی شدند، که از این تعداد، ۲۹ نفر با یکدیگر همکاری داشتند. در این نمایش، اندازه گره‌ها تعداد مقالات

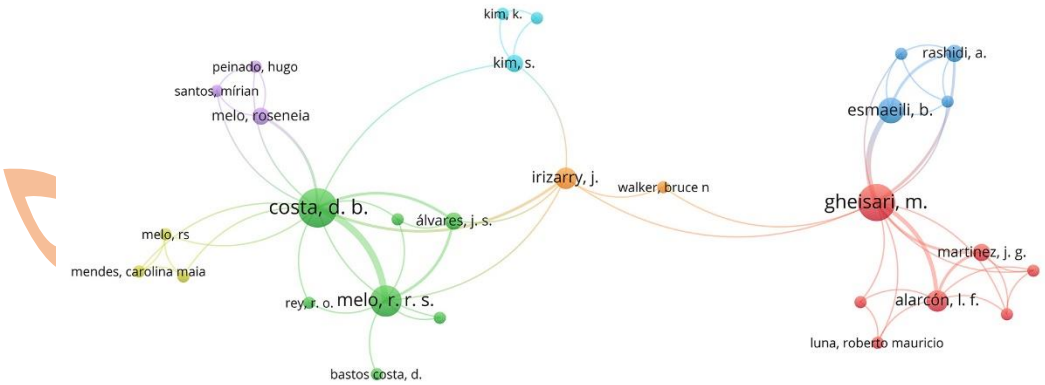
---

۱ Irizarry
۲ Co-occurrence
۳ Fractional counting
۴ Co-authership
۵ Full counting

منتشرشده توسط هر نویسنده و پیوندها تعداد هم‌نویسی‌های یک محقق با دیگران را نشان می‌دهد. نقشه هم‌نویسندگی نویسندگان در شکل (۵) با استفاده از VOSviewer نمایش داده شده است. مطابق با شکل (۵)، کاستا[۱] با ۹ مقاله، قیصری[۲] با ۸ مقاله، ملو[۳] با ۶ مقاله و اسماعیلی[۴] با ۴ مقاله، نویسندگان فعال‌تر در این حوزه بوده‌اند. همچنین، بیشترین همکاری بین کاستا و ملو با ۵ مقاله مشترک دیده شده است.



شکل ۴: نقشه هم‌زمانی واژگان کلیدی



۱ Costa
۲ Gheisari
۳ Melo
۴ Esmaeili

شکل ۵: نقشه هم‌نویسندگی نویسندگان

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

در صنعت ساخت، سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای اهداف متنوعی مورداستفاده قرار می‌گیرند. می‌توان از آن‌ها در مرحله طراحی به‌منظور انتخاب سایت مناسب و نقشه‌برداری زمین، در مرحله ساخت به‌منظور کار زمینی و نظارت بر درجه‌بندی، کنترل کیفیت، نظارت بر پیشرفت، نظارت بر ایمنی، ردیابی و تحویل مواد، در مرحله تعمیر و نگهداری و در مرحله تخریب استفاده کرد [۱۵]. ازآنجایی‌که استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای نظارت بر ایمنی در شرکت‌هایی که از آن‌ها بهره می‌برند، محدود است، این مقاله قصد دارد با بررسی مطالعات انجام‌شده در این زمینه، به اهمیت و کارایی پهپادها در نظارت بر ایمنی بپردازد.

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 خطرات ایمنی را در محیط کار شناسایی نموده و تصاویر و ویدئوهای با کیفیت بالا را به‌صورت زنده برای مقاصد بازرسی و ارزیابی در اختیار مدیران ایمنی قرار دهند [۲۱, ۲۲]. این قابلیت، پهپادها را به ابزاری ارزشمند در ارتقای 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 ارتقا 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 نمایند. قابلیت منحصربه‌فرد این پلتفرم‌ها در شناسایی کارآمد مخاطرات ایمنی، پتانسیل کاهش ریسک آسیب‌دیدگی و مرگ‌ومیر در میان کارگران را به همراه دارد. این امر به‌نوبه خود، کاهش هزینه‌های حقوقی، مسئولیتی و پزشکی را در پی خواهد داشت. بدین‌ترتیب، سیستم‌های هوایی بدون سرنشین نقش بسزایی در بهبود شرایط کاری و ارتقای استانداردهای ایمنی در پروژه‌های عمرانی ایفا می‌کند.

در یکی از اولین پژوهش‌ها در زمینه کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در حوزه ایمنی، ایریزاری و همکارانش [۱۰] به بررسی قابلیت استفاده از پهپادهای مجهز به دوربین به‌عنوان ابزاری برای بازرسی ایمنی در کارگاه‌های ساختمانی پرداختند. این مطالعه اکتشافی، با هدف ارزیابی پتانسیل بهره‌گیری از فناوری پهپاد در نظارت بر ایمنی محیط‌های کاری صورت گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که سیستم‌های هوایی بدون سرنشین می‌توانند به‌عنوان دستیاری ایده‌آل برای بازرسان ایمنی عمل نمایند. این فناوری، 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 مخاطرات 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 [۱۲]، سه عملیات کلیدی که می‌توانند از به‌کارگیری سیستم هوایی بدون سرنشین در پروژه‌های ساختمانی بهره‌مند شوند عبارتند از: کار در مجاورت وسایل نقلیه بوم‌دار یا جرثقیل‌ها، کار در نزدیکی لبه‌ها یا دهانه‌های فاقد حفاظ، و کار در نقاط کور تجهیزات سنگین. بدین ترتیب، پهپادها با فراهم آوردن امکان نظارت مؤثر بر این فعالیت‌های پرخطر، نقش مهمی در ارتقای ایمنی کارگاه‌های ساختمانی ایفا می‌کنند.

فناوری‌های ایمنی کاربردهای متنوعی در مدیریت ایمنی پروژه‌های ساخت‌وساز دارند. این فناوری‌ها در بهبود شناسایی خطر، تقویت برنامه‌ریزی ایمنی و ارتقای بازرسی‌های ایمنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۲۴]. این سه فاکتور کلیدی، نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی ابزارها و استراتژی‌های بکار گرفته‌شده برای ارتقای ایمنی و کاهش ریسک‌ها در پروژه‌های ساختمانی ایفا می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر، توانایی شناسایی به‌موقع و دقیق مخاطرات، وجود برنامه‌ریزی جامع ایمنی، و انجام بازرسی‌های منظم و مؤثر، زمینه را برای پیاده‌سازی موفق راهکارهای ایمنی فراهم می‌آورند. بدین ترتیب، بهره‌گیری از فناوری‌های ایمنی با تمرکز بر این سه حوزه کلیدی، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود عملکرد ایمنی پروژه‌های ساخت‌وساز داشته باشد.

۴ – ۱ – سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در مرحله طراحی

در حوزه مدیریت ایمنی ساخت‌وساز، پذیرش سیستم‌های هوایی بدون سرنشین به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی و نظارت، امکان شناسایی و ارزیابی بهتر خطرات را در مقایسه با روش‌های سنتی فراهم می‌آورد [۲۵]. این سیستم‌ها به‌واسطه 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. مطالعه انجام‌شده توسط مارتینز و همکاران [۲۵]، نشان داد که استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین می‌تواند تا ۱۹ درصد خطرات بیشتری را در مرحله برنامه‌ریزی ایمنی شناسایی کند. این افزایش در شناسایی خطرات به دلیل توانایی این سیستم‌ها در دسترسی به نقاط دشوار و انجام بازرسی‌های دقیق‌تر است. بااین‌حال، ایمنی اغلب در طراحی پروژه‌های ساختمانی اولویت قرار نمی‌گیرد و از مهندسان کنترل و ایمنی به‌ندرت خواسته می‌شود تا در مرحله طراحی به ایمنی کارگران توجه کنند [۲۶, ۲۷]. این نگرش باعث می‌شود که بسیاری از خطرات بالقوه در مراحل اولیه شناسایی نشوند و تنها در مرحله ساخت، که اصلاحات هزینه‌بر و پیچیده‌تر است، موردتوجه قرار گیرند. لحاظ کردن ایمنی در طراحی می‌تواند بهترین راهکار برای کاهش تصادفات و آسیب‌ها در بخش ساختمان باشد. طراحان با در نظر گرفتن ایمنی کارگران به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در تصمیم‌گیری‌های طراحی، قادر خواهند بود خطرات ایمنی را در پروژه کاهش دهند [۲۸]. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و پهپاد پتانسیل بهبود عملکرد ایمنی ساخت‌وساز را نشان داده‌اند. چن[۱] و همکارانش [۲۹]، نشان دادند که می‌توان با استفاده از پهپادها، اطلاعات محل سایت و ساختمان‌های اطراف را در مرحله پیش از ساخت جمع‌آوری و در تولید یک مدل سه‌بعدی قابل‌استفاده در برنامه‌ریزی ایمنی قبل از ساخت مورداستفاده قرار داد. این مدل سه‌بعدی می‌تواند به شناسایی بهتر خطرات کمک کند و امکان بررسی دقیق‌تر شرایط محیطی و پیش‌بینی خطرات احتمالی را فراهم آورد. پیش‌بینی خطرات احتمالی و امکان وقوع حوادث، گام مهمی در مرحله طراحی طی برنامه‌ریزی ایمنی است. شناسایی و اتخاذ تدابیر برای پیشگیری از خطرات در مرحله طراحی، مؤثرتر از جستجوی خطرات در مرحله ساخت است.

فناوری‌های نوین مانند پهپادها و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌توانند نقش مهمی در بهبود فرهنگ ایمنی در صنعت ساخت‌وساز داشته باشند. این فناوری‌ها می‌توانند آگاهی کارگران و مدیران پروژه را نسبت به اهمیت ایمنی افزایش دهند و آن‌ها را به اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه ترغیب کنند. به‌طورکلی، 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.

۴ – ۲ – سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در مرحله ساخت

در مرحله ساخت پروژه‌های عمرانی، از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین به‌منظور نظارت بر رعایت قوانین و مقررات ایمنی استفاده می‌شود. پهپادها قادرند مکان‌های بالقوه خطرناک را در محدوده کارگاه شناسایی کنند. پهپادها در پرواز بالا بر کارگاه‌ها، اطلاعات مربوط به کارکنان، تجهیزات، مواد خطرناک و ماشین‌آلات جمع‌آوری کرده و شرایط ناامن را قبل از وقوع حادثه شناسایی و بهبود می‌بخشند. تصاویر با وضوح بالا که توسط پهپادها تهیه می‌شوند، می‌تواند مسائل بحرانی ایمنی را در نقاطی که بازرسی مرتب آن‌ها برای کارکنان دشوار است، آشکار کنند تا اقدامات پیشگیرانه لازم در سریع‌ترین زمان ممکن انجام شود. آنتار[۲] و همکارانش [۳۰]، با طراحی ابزاری 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 به‌طور مؤثر عملکرد ایمنی در پروژه‌ها را ارتقا بخشند. آن‌ها با به‌کارگیری این ابزارها و با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف ایمنی در محیط کار، توانستند شواهدی را در خصوص کارایی این روش‌ها در افزایش سطح ایمنی کارگاه‌های ساختمانی ارائه دهند. در مطالعه‌ای که توسط کمینگ[۳] و یوناتان[۴] [۳۱] انجام شد، مقایسه‌ای میان ده پروژه صورت گرفت که در آن نصف پروژه‌ها تحت نظارت دستی و سنتی قرار گرفته بودند و نصف دیگر از دیدگاه نوین و با بهره‌گیری از پهپادها موردبررسی و نظارت قرار گرفتند. نتایج نشان داد پروژه‌هایی که از سیستم هوایی بدون سرنشین بهره می‌بردند، با تعداد کارکنان بسیار کمتری نسبت به پروژه‌هایی که صرفاً از نظارت سنتی استفاده می‌کردند، قادر به انجام فعالیت‌ها بوده‌اند. همچنین پیمانکاران می‌توانستند با استفاده از پهپاد، زمان بازگشت سرمایه خود را در پروژه‌ها کاهش دهند. بنابراین به نظر می‌رسد کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در نظارت بر پروژه‌ها، علاوه بر افزایش بهره‌وری، ازنظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر بوده و مقرون‌به‌صرفه‌تر از روش‌های سنتی نظارت است.

---

[۱] Chen
[۲] Antar
[۳] Kaming
[۴] Yonathan

۴ - ۲ - ۱ - بازرسی و کنترل قوانین ایمنی

مطالعات ملو و کاستا [۳۲, ۳۳]، با ارزیابی میزان انطباق شرایط ایمنی با استانداردهای مربوطه از طریق استفاده از چک لیست‌هایی مبتنی بر داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط پهپادها در محل کار، نشان دادند که دارایی‌های بصری به‌دست‌آمده با این فناوری به کنترل بهتر شرایط کاری کمک می‌کنند و اطلاعاتی در مورد وضعیت فعلی فرآیندها ارائه می‌دهند. این اطلاعات در شناسایی تناقضات میان ایمنی و تولید و پیش‌بینی شرایط خطرآفرینی که کارگران با آن مواجه هستند، مفید واقع می‌شود. فالوورکا[۱] و لانزینها[۲] [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 کردند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سه ساختمان مختلف، حاکی از مزایای قابل‌توجه به‌کارگیری سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای این منظور بود که عبارتند از: قابلیت مانور و دسترسی آسان به مناطق دشوار نظیر نمای ساختمان‌های بلند، سرعت بالای انجام بازرسی‌ها، کاهش خطرات عملیاتی و امکان به اشتراک‌گذاری سریع تصاویر و یا ویدئوها میان تمامی ذینفعان. در مطالعاتی که توسط ملو و همکارانش [۳۵, ۳۶] انجام شد، کاربرد سیستم‌های هوایی بدون سرنشین برای بازرسی ایمنی در کارگاه‌های ساختمانی، با تمرکز بر شناسایی الزامات قابل بازرسی و موارد عدم انطباق با استانداردهای ایمنی، مورد ارزیابی قرار گرفت. این پژوهش مبتنی بر دو مطالعه موردی بود که در آن از پروتکلی برای جمع‌آوری و پردازش داده‌های بصری حاصل از پروازهای پهپادی در محل‌های کار استفاده شد. نتایج نشان داد که داده‌های بصری جمع‌آوری‌شده توسط پهپادها، بهبود قابل‌توجهی در فرآیند بازرسی ایمنی به همراه دارد. یافته‌ها مشخص کرد که پهپادها می‌توانند تصویر خوبی از شرایط کاری ایجاد کنند و اطلاعات مفیدی درباره 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 تسهیل‌کننده استخراج خودکار اطلاعات بازرسی و بررسی‌های انطباق، فرآیند کلی بازرسی را ساده‌تر می‌کنند و امکان شناسایی سریع‌تر مسائل عدم انطباق و تصمیم‌گیری به‌موقع در خصوص اقدامات اصلاحی را فراهم می‌آورند [۳۷]. علاوه‌براین، 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 کرده و امکان نظارت مکرر و اندازه‌گیری چالش‌های ایمنی را فراهم می‌کند [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 اقدامات پیشگیرانه سریع‌تری را برای جلوگیری از وقوع حوادث در آینده انجام دهند [۳۹, ۴۰]. محققانی همچون لیما[۳] و همکارانش [۴۱] و ری[۴] و همکارانش [۴۲] برای رفع مشکل تأخیر در تصمیم‌گیری مدیران ایمنی ساختمان به دلیل حجم بالای داده‌های دستی، سیستم بازرسی هوشمند[۵] را معرفی کردند. این سیستم، اطلاعات جمع‌آوری‌شده توسط پهپادها را پردازش، تحلیل و ذخیره می‌کند. با استفاده از این روش، زمان بازرسی ایمنی در محل تا ۷۳ درصد نسبت به روش‌های غیر رایانه‌ای کاهش یافت. پروتکل ایمنی گوه[۶] و الزرایی[۷] [۴۳]، برای کاهش تلفات در بزرگراه‌ها از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین و فناوری پوشیدنی برای ایجاد یک نقشه دیجیتالی جامع استفاده می‌کند. این سیستم به‌روزرسانی مداوم در طول ساخت را امکان می‌دهد 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 است. آکین سمویین[۸] و همکارانش [۴۴, ۴۵] یک چارچوب یکپارچه توسعه داده‌اند که از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین و یادگیری عمیق برای نظارت بر فعالیت‌های ایمنی کارگران در کارگاه‌های ساختمانی استفاده می‌کند. این چارچوب برای خودکارسازی جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از پهپادها و تجزیه‌وتحلیل با استفاده از فنون یادگیری عمیق ازجمله Faster R-CNN[۹] و

---

۱ Falorca
۲ Lanzinha
۳ Lima
۴ Rey
۵ Smart Inspects System
۶ Goh
۷ Alzaraiee
۸ Akinsemoyin
۹ Faster Region-based Convolutional Neural Network

YOLO V۳[۱] برای شناسایی رفتارهای ناایمن کارگران و شرایط نامناسب در محل کار طراحی شده است تا با ارائه بازخورد بلادرنگ، از وقوع حوادث در کارگاه‌های ساختمانی جلوگیری شود. لیچ[۲] و همکارانش [۴۶]، چارچوبی جدید را برای توسعه الگوریتم‌هایی جهت خودکارسازی بازرسی‌های ساختمانی از طریق استفاده از تصاویر هوایی پهپادها، تقویت داده‌ها و مدل‌های تشخیص اشیاء با تکنیک Mask R-CNN[۳] یادگیری عمیق پیشنهاد کرده‌اند. یانگ[۴] و همکارانش [۴۷] یک سیستم را برای نظارت بر ایمنی در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از تصاویر پهپادی طراحی کردند. در این سیستم، تصاویر گرفته‌شده توسط پهپاد اصلاح می‌شوند و پس از پیش‌پردازش، ویژگی‌های تصویر به کمک الگوریتم SVM[۵] استخراج می‌گردند. محققان 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, ۴۸]. این سیستم شامل دو مرحله پیش از ساخت و مرحله ساخت است. در مرحله پیش از ساخت، از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به همراه استانداردهای ایمنی برای شناسایی خطرات احتمالی و حذف آن‌ها با بهره‌گیری از سیستم بررسی قوانین ایمنی استفاده می‌شود. در مرحله ساخت‌وساز نیز پهپادها منابع خطر بالقوه را بازرسی و قوانین ایمنی را کنترل می‌کنند [۲۱, ۲۲, ۲۹, ۴۸].

۴ - ۲ - ۲ - 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 این حوادث نقش دارند، ازجمله تصمیم‌گیری نادرست در قضاوت خطر و استفاده ناصحیح از تجهیزات حفاظت فردی مختص جلوگیری از سقوط. تحلیل پیشرفته داده‌های بصری جمع‌آوری‌شده توسط دوربین‌ها، امکان تشخیص خطرات 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 خطرات بالقوه مرتبط با سقوط و کارگران را دارند، به‌خصوص در موقعیت‌های پنهان و کمتر قابل‌مشاهده. این فناوری‌ها می‌توانند هشدارهای زودهنگامی را برای کارگران فراهم کنند و درنتیجه ایمنی و کاهش مواجهه با خطرات را ارتقا دهند. در مطالعه شانتی[۶] و همکارانش [۵۱]، یک ساختار نظارتی به کمک فنون CNN[۷] و YOLO V۴[۸] یادگیری عمیق و پهپادها توسعه یافته است که هدف آن شناسایی کارهای متخلفانه در ارتفاع است. این سیستم به متخصصان ایمنی اجازه می‌دهد تا نقض‌های ایمنی مربوط به سیستم‌های جلوگیری از سقوط فردی را به‌سرعت تشخیص دهند. قیصری و همکارانش [۵۲]، یک گردش کار کلی برای شناسایی خودکار خطرات سقوط ارائه داده‌اند که از الگوریتم PMVS[۹] برای بازسازی دقیق صحنه، الگوریتم k-nearest برای شناسایی بازشوها و الگوریتم SVM برای شناسایی حفاظ‌های محافظ استفاده می‌کنند و درنهایت استانداردهای مربوط به ایمنی مقررات اداره ایمنی و بهداشت شغلی[۱۰] بررسی می‌شود. آن‌ها همچنین یک مطالعه تجربی را برای ارزیابی این فرآیند شناسایی خودکار انجام داده‌اند. مدس[۱۱] و همکارانش [۵۳]، به بررسی پتانسیل تشخیص خودکار الزامات استاندارد برای حفاظ‌ها از طریق استفاده از تصاویر به‌دست‌آمده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین و سامانه تشخیص الگو[۱۲] پرداختند و این فناوری را در محیط‌های آزمایشی به آزمون گذاشتند. در مطالعه‌ای که توسط لی[۱۳] و همکارانش [۵۴] انجام شد، 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 گردید. این محققان، از الگوریتم‌های Cascade classifiers و Linear SVM برای تشخیص حفاظ‌ها و الگوریتم Expectation-Maximization برای ارزیابی فضای بین نرده‌های حفاظ در یک پروژه ساختمانی واقعی با ارتفاع زیاد استفاده کرده و آن را مورد آزمایش قرار دادند. پینادو[۱۴] و همکارانش [۵۵] در پژوهشی، مجموعه‌ای از معیارهایی را برای گردآوری و پردازش داده‌ها با

---

۱ You Only Look Once Version ۳
۲ Leach
۳ Mask Region-based Convolutional Neural Network
۴ Yang
۵ Support Vector Machine
۶ Shanti
۷ Convolutional Neural Network
۸ You Only Look Once Version ۳
۹ Patch-based Multi-View Stereo
۱۰ Occupational Safety and Health Administration (OSHA)
۱۱ Mendes
۱۲ Pattern Recognition System
۱۳ Li
۱۴ Peinado

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 نمودند. آنان در این پژوهش از فنون مختلفی برای مسائل طبقه‌بندی و تشخیص در حوزه یادگیری ماشین و یادگیری عمیق ازجمله Faster R-CNN، SSD[1]، R-FCN[2]، CNN، VGG16[3]، Inception، Densenet و YOLO استفاده می‌کنند و هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. ملو و کاستا [۵۶]، مطالعه‌ای را انجام داده‌اند که در آن، با استفاده از چک‌لیست‌های ایمنی متکی بر داده‌های گردآوری‌شده از طریق سیستم‌های هوایی بدون سرنشین، فرآیندهای ساخت دیوارهای بتنی تحت نظارت قرار گرفته‌اند. هدف از این رویکرد کاهش خطرات مربوط به سقوط در فضای کاری و تقویت امنیت مدیران ایمنی در هنگام بازرسی و نظارت بر پروسه ساخت دیوارهای بتنی بوده است.

۴ - ۲ - ۳ - جلوگیری از تصادفات ضربه‌ای

تصادفات ضربه‌ای، که غالباً هنگام برخورد کارگران با تجهیزات، وسایل نقلیه، اشیاء در حال سقوط و ریزش‌های گودبرداری به وقوع می‌پیوندند، ازجمله مخاطرات 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 خطرات بالقوه کمک کند [۵۸]. در تحقیقی توسط کیم و همکارانش [۵۹]، یک چارچوب ایمنی دیجیتال بر پایه تصاویر پهپاد توسعه داده شده است که اشیاء را شناسایی و طبقه‌بندی می‌کند. این سیستم با استفاده از الگوریتم YOLO V4[4]، با شناسایی خودکار کارگران، جرثقیل‌ها و بالابرها مناطق امن و غیر امن را معین می‌کند و کارگران را در معرض خطرات احتمالی محافظت کند. لو[5] و همکارانش [۶۰]، یک روش برای شناسایی مناطق کاری خطرناک در سایت‌های ساخت با بهره‌گیری از تصاویر پهپاد ارائه کردند. در این پژوهش، از مدل Mask-RCNN[6] جهت تشخیص و تفکیک سه نوع منطقه خطرناک در تصاویر استفاده شده است. نتایج این شناسایی منجر به ایجاد نقشه‌ای ایمنی برای رانندگان جرثقیل خزنده گردید تا از خطرات احتمالی مطلع شوند و اقدامات لازم را به عمل آورند. در صنعت ساخت، تشخیص خطرات رباتیک مهم است. این اقدامات به‌نوبه خود به ارتقای ایمنی و هماهنگی بین انسان و ربات‌ها کمک می‌کنند. روش توسعه داده‌شده توسط کیم [۶۱]، بر اساس نظارت بصری و شناسایی خطرات از تصاویر پهپاد استفاده می‌کند. این سیستم فاصله بین کارگر و تجهیزات یا ربات را با استفاده از الگوریتم YOLO V3[3] اندازه‌گیری، خطرات برخورد را با استفاده از یک شبکه GAN[7] پیش‌بینی و ایمنی را ارزیابی می‌کند. همچنین در صورت خطر، هشدار صادر می‌شود و در صورت برخورد اجتناب‌ناپذیر، شتاب ربات تنظیم می‌شود تا به کارگر صدمه نرسد. در تحقیق زو[8] و همکارانش [۶۲]، با توسعه پلتفرم برای نظارت بر ایمنی در پروژه‌های راه‌سازی با استفاده از سیستم هوایی بدون سرنشین، استانداردهای ایمنی را ارتقاء داده‌اند. این پلتفرم با استفاده از الگوریتم‌های YOLO V4 و DeepSORT[9]، عناصری مانند کارگران و ماشین‌آلات را شناسایی می‌کند و رفتارهای خطرآفرین را تشخیص داده و هشدار می‌دهد. همچنین، با استفاده از فناوری‌های مراقبت از حریم کاری، ورود خودروها به مناطق حساس جلوگیری می‌شود. این اقدامات به کارگران و رانندگان کمک می‌کند تا در محیطی ایمن‌تر فعالیت کنند و از بروز حوادث احتمالی پیشگیری نمایند [۶۳].

۴ - ۲ - ۴ - کنترل استفاده از تجهیزات حفاظتی

در صنعت ساخت، تجهیزات حفاظت فردی ازجمله ملزومات حیاتی به شمار می‌روند که برای حراست از کارگران در برابر خطرات شغلی ضرورت دارند. باوجوداینکه حضور این تجهیزات در محیط کاری به‌منظور پیشگیری از آسیب‌دیدگی‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است، گاهی اوقات این وسایل می‌توانند باعث ایجاد حس نارضایتی و ناراحتی در میان کارگران شوند. یافته‌های مطالعاتی نشان داده‌اند که مقاومت در برابر رعایت کامل دستورالعمل‌های استفاده از تجهیزات حفاظت فردی در بین کارگران ساختمانی متداول است، که این امر می‌تواند به خطرناک شدن شرایط کاری منتهی شود [۶۴]. به‌کارگیری وسایل نقلیه 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 گرفته شده توسط

---

[1] Single Shot Multibox Detector
[2] Region-based Fully Convolutional Network
[3] Visual Geometry Group ۱۶-layer network
[4] You Only Look Once Version ۴
[5] Lu
[6] Mask Region-Based Convolutional Neural Network
[7] Generative Adversarial Network
[8] Zhu
[9] Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric

پهپادها، مدیران ایمنی قادر خواهند بود تا موارد تخلف از قوانین مربوط به استفاده نامناسب یا عدم استفاده از تجهیزات حفاظتی مانند کلاه یا عینک ایمنی را در سایت کار شناسایی نمایند [۵۸]. در مطالعه‌ای که توسط ناث[۱] [۶۵] انجام شد، یک سامانه نظارتی خودکار برای ایمنی به‌منظور تأیید انطباق کارگران با استانداردهای مربوط به تجهیزات حفاظت شخصی طراحی گردید. در این تحقیق، به‌منظور ارتقای کیفیت تصاویر از الگوریتم GAN استفاده گردید و برای شناسایی کارگران، کلاه ایمنی و جلیقه از الگوریتم YOLO V۳ بهره‌برداری شد. گوپتا[۲] و نیر[۳] یک چارچوب پیشنهاد داده‌اند که از فنون پیشرفته پردازش تصویر برای تشخیص استفاده از کلاه ایمنی در محیط‌های کارگاهی ساخت‌وساز استفاده می‌کند.[۶۶]. در این رویکرد، هر تصویر تحلیل شده و کلاه‌های ایمنی و کارگران در آن مکان‌یابی و هویت‌سازی می‌شوند. اگر سیستم پردازش تصویر نشان دهد کارگری بدون کلاه ایمنی است، مسئول سایت تصویر را بررسی کرده و اقدامات فوری توسط مدیریت اتخاذ می‌شود تا اطمینان حاصل شود که اقدامات اصلاحی به‌سرعت انجام می‌گیرد. گوا[۴] و همکارانش [۶۷]، چارچوبی را معرفی کردند 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 و همکارانش [۴۴, ۴۵]، چارچوبی را 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 V۳) ایجاد کردند و یک مطالعه موردی آزمایشی را برای تشخیص استفاده یا عدم استفاده از کلاه ایمنی توسط کارگران انجام دادند. زو و همکارانش [۶۲]، به توسعه یک پلتفرم نظارتی برای ایمنی در پروژه‌های راه‌سازی مبتنی بر استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین پرداخته‌اند، که این سیستم قادر است تا استفاده یا عدم استفاده کارگران از کلاه‌های ایمنی را با استفاده الگوریتم‌های YOLO V۴ و DeepSORT، به‌صورت موثق شناسایی نماید.

۴ – ۲ – ۵ – 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 این روش‌ها علاوه بر زمان‌بر و دشوار بودن، ممکن است خطرات ناشی از تغییر شکل‌های موضعی را نادیده بگیرند. با توجه به اینکه فعالیت‌های حفاری گودبرداری‌های فونداسیون به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین کارهای ساختمانی شناخته شده که تهدیدی جدی برای ایمنی کارگران محسوب می‌شود [۶۸]، محققانی همچون وو[۵] و همکارانش [۶۹]، روشی را برای نظارت و تجزیه‌وتحلیل سریع ایمنی این گودها بر پایه توزیع تغییر شکل‌های محلی پیشنهاد داده‌اند. در این روش، ابتدا تصاویری از گود مربوط به فونداسیون توسط پهپادها گرفته می‌شود. سپس با در نظر گرفتن زاویه تمایل ایمنی شیب گود به‌عنوان شاخص نظارت ایمنی، وضعیت ایمنی محلی گود از طریق شناسایی مناطق دارای تغییر شکل محلی پیوسته و بزرگ و محاسبه مقدار توزیع تغییر شکل محلی ارزیابی می‌گردد.

جدول (۱) خلاصه تحقیقات انجام‌شده در زمینه کاربرد پهپاد در صنعت ساخت را ارائه می‌دهد.

---

۱ Nath
۲ Gupta
۳ Nair
۴ Guo
۵ Wu

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

نویسندگان	مراجع	شناسایی خطر و ارزیابی ریسک			ارزیابی میزان پیاده‌سازی پاسخ به ریسک براساس قوانین			اهداف اصلی
		سقوط	تصادفات ضربه‌ای	ریزش آوار	سقوط	تصادفات ضربه‌ای	ریزش آوار	
چن و همکاران	[۲۹]	●	●	●				شناسایی مناطق خطرناک
ملو و کاستا	[۳۲, ۳۳]				●	●	●	انطباق شرایط ایمنی با استانداردهای مربوطه
فالوورکا و لانزینها	[۳۴]				●	●	●	دسترسی آسان‌تر، سریع‌تر و کم‌خطرتر به مناطق دشوار برای بازرسی ایمنی
ملو و همکاران	[۳۵, ۳۶]				●	●	●	شناسایی موارد عدم انطباق با استانداردهای ایمنی
عینی‌زینب و همکاران	[۳۷]				●	●	●	خودکارسازی بازرسی‌های ایمنی با هدف شناسایی و تصمیم‌گیری سریع‌تر و افزایش دقت
لیما، لی و همکاران	[۴۱, ۴۲]				●	●	●	بهبود در سرعت تصمیم‌گیری مدیران ایمنی در هنگام بازرسی ایمنی
گوه و الزرایی	[۴۳]	●	●	●				افزایش اقدامات ایمنی در پروژه‌های بزرگراه
آکین سمویین و همکاران	[۴۴, ۴۵]	●	●	●				شناسایی رفتارهای ناایمن کارگران و شرایط نامناسب محل کار
لیچ و همکاران	[۴۶]				●	●	●	خودکارسازی بازرسی‌های ایمنی
یانگ و همکاران	[۴۷]				●	●	●	افزایش دقت نظارت بر ساخت‌وساز
علیزاده‌صالحی، چن، اصنافی و همکاران	[۲۱, ۲۲, ۲۹, ۴۸]				●	●	●	بهبود بازرسی ایمنی
شانتی و همکاران	[۵۱]				●			تشخیص نقض‌های ایمنی مربوط به کار در ارتفاع
قیصری و همکاران	[۵۲]				●			شناسایی بازشوها و حفاظ‌های ناایمن
مدس و همکاران	[۵۳]				●			بررسی خودکار الزامات استاندارد حفاظ‌ها
لی و همکاران	[۵۴]				●			شناسایی دهانه‌ها و لبه‌های فاقد حفاظ کافی
پینادو و همکاران	[۵۵]				●			بازرسی خودکار حفاظ‌های موقت
ملو و کاستا	[۵۶]				●			بهبود نظارت بر فرآیندهای ساخت دیوارهای بتنی
کیم و همکاران	[۵۹]	●	●					شناسایی خودکار کارگران، جرثقیل‌ها و بالابرها با هدف تعیین مناطق امن و غیر امن
لو و همکاران	[۶۰]	●	●	●				شناسایی مناطق کاری خطرناک
کیم	[۶۱]					●		محاسبه فاصله بین کارگر و تجهیزات یا ربات
زو و همکاران	[۶۲]					●		شناسایی کارگران و ماشین‌آلات و تشخیص رفتارهای خطرآفرین
ناث	[۶۵]					●	●	تشخیص خودکار استفاده یا عدم استفاده کارگران از کلاه ایمنی و جلیقه ایمنی
گوپتا و نیر	[۶۶]					●	●	تشخیص خودکار استفاده یا عدم استفاده کارگران از کلاه ایمنی
گوا و همکاران	[۶۷]					●	●	تشخیص خودکار استفاده یا عدم استفاده کارگران از کلاه ایمنی
آکین سمویین و همکاران	[۴۴, ۴۵]					●	●	تشخیص خودکار استفاده یا عدم استفاده کارگران از کلاه ایمنی
زو و همکاران	[۶۲]					●	●	تشخیص خودکار استفاده یا عدم استفاده کارگران از کلاه ایمنی
وو و همکاران	[۶۹]			●				اندازه‌گیری و تحلیل توزیع تغییر شکل محلی

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 خطرات بالقوه مرتبط با ایمنی مطرح می‌شود. مطالعات اخیر در حوزه ایمنی به منظور شناسایی و توسعه 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. این فناوری باعث می‌شود که بازرسی‌ها با سرعت بالاتر و به دفعات بیشتر انجام شوند، که نتیجه آن بهبود کیفیت نظارت و کاهش زمان مورد نیاز برای اجرای بازرسی‌ها است. پهپادها با فراهم آوردن تصاویر و داده‌های دقیق‌تر و جامع‌تر از پروژه‌ها، نقش بسزایی در افزایش دقت عملیات بازرسی ایفا می‌کنند. با این تکنولوژی، شرایط و رفتارهای ناایمن که در روش‌های سنتی بازرسی کمتر شناسایی می‌شدند و یا حتی نادیده گرفته می‌شدند، با سهولت بیشتری قابل تشخیص خواهند بود. از این رو، استفاده از پهپادها به طور موثری می‌تواند خطرات و حوادث جدی از جمله سقوط از ارتفاع، تصادفات ضربه‌ای و ریزش آوار را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و بهبود چشمگیری در ایمنی محیط کار به وجود آورد. همچنین، پژوهشگران در تلاش هستند تا فناوری‌هایی توسعه دهند که قادر باشند فرآیند تشخیص خطرات و ارزیابی میزان اجرای اقدامات واکنشی به ریسک‌ها را به صورت خودکار انجام دهند. این امر می‌تواند به کاهش چشمگیر زمان صرف شده برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و در نتیجه تسریع تصمیم‌گیری‌های مرتبط با ایمنی منجر شود. به عبارت دیگر، با خودکار شدن این فرآیندها، کارآیی عملیات بازرسی افزایش یافته و امکان پاسخگویی سریع‌تر به ریسک‌ها فراهم می‌گردد. در نهایت، پهپادها به عنوان ابزاری پیشرو و نوآورانه در صنعت ساخت و ساز، پتانسیل قابل توجهی برای بهبود سطح ایمنی و بهره‌وری پروژه‌ها دارند.

مرحله طراحی، اساسی‌ترین و کلیدی‌ترین بخش در چرخه حیات و ایجاد یک پروژه است. تصمیمات اتخاذشده در این مرحله تأثیر بسزایی بر کل فرآیند و نتیجه‌ی نهایی پروژه دارند. با وجود پیشرفت‌های فنّاورانه و مطالعات متعدد، ایمنی در طراحی پروژه‌های ساختمانی همچنان به میزان کافی موردتوجه قرار نمی‌گیرد. با توجه به مزایای استفاده از پهپادها در مرحله طراحی و نقش آن‌ها در بهبود ایمنی، مطالعات آینده باید بر استفاده گسترده‌تر از این فناوری تمرکز کنند. تحقیقات بیشتری باید در زمینه ادغام پهپادها با سایر فنّاوری‌های 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. تحقیقات 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 بر اساس قوانین ایمنی، تاکنون تمرکز عمدتاً بر شناسایی خودکار استفاده از کلاه ایمنی و جلیقه ایمنی به وسیله تصاویر ثبت‌شده توسط پهپادها بوده است. این رویکرد به‌عنوان پاسخی به خطرات مرتبط با تصادفات ضربه‌ای و ریزش آوار طراحی شده است. با این حال، تاکنون اقدام جدی برای ارزیابی و شناسایی خودکار سایر اقدامات حفاظتی، به‌ویژه پاسخ به خطرات ناشی از سقوط یا تکمیل روش‌های موجود برای خطرات تصادفات و ریزش آوار، صورت نگرفته است. به عنوان نمونه، می‌توان در مطالعات آتی بر شناسایی خودکار استفاده یا عدم استفاده از کمربند ایمنی تمرکز کرد که می‌تواند به عنوان پاسخی مؤثر به خطرات 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. در نهایت، می‌توان رویکردی جامع و یکپارچه طراحی کرد که در هر پرواز پهپاد، تمامی تجهیزات حفاظت فردی نظیر کلاه ایمنی، جلیقه 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 مخاطرات، به بهبود کارایی و ایمنی کلی پروژه‌ها منجر شود.

علی‌رغم پتانسیل سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در کاهش هزینه‌ها و ارتقای ایمنی، این فناوری در پروژه‌های واقعی برای بازرسی‌های ایمنی چندان مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. برای افزایش پذیرش این فناوری در میان ذینفعان، ضروری است که این مزایا به‌صورت کمی و مستند ارائه شوند. ارائه آمار و داده‌های مشخصی از میزان کاهش هزینه‌های عملیاتی، کاهش تعداد حوادث کاری، و کاهش دعاوی حقوقی و هزینه‌های پزشکی می‌تواند تأثیرگذاری بیشتری داشته باشد.

منابع

[۱] Abdelhamid, T. S. & Everett, J. G., ۲۰۰۰. Identifying root causes of construction accidents. *Journal of construction engineering and management,* ۱۲۶(۱), pp.۵۲-۶۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۶۴(۲۰۰۰)۱۲۶:۱(۵۲).

[۲] Yi, K.-J. & Langford, D., ۲۰۰۶. Scheduling-based risk estimation and safety planning for construction projects. *Journal of construction engineering and management,* ۱۳۲(۶), pp.۶۲۶-۶۳۵. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۶۴(۲۰۰۶)۱۳۲:۶(۶۲۶).

[۳] Nahmens, I. & Ikuma, L. H., ۲۰۰۹. An Empirical Examination of the Relationship between Lean Construction and Safety in the Industrialized Housing Industry. *Lean construction journal,*

[۴] Henshaw, J. L. Safety and health add value to your business, workplace and life. *Proceedings of the 8th Biennial Governors Pacification Rim Safety and Health Conference.* pp.۱۳-۱۴. (۲۰۰۴).

[۵] Awolusi, I. G. & Marks, E. D., ۲۰۱۷. Safety activity analysis framework to evaluate safety performance in construction. *Journal of Construction Engineering and Management,* ۱۴۳(۳), pp.۰۵۰۱۶۰۲۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)CO.۱۹۴۳-۷۸۶۲,۰۰۰۱۲۶۵.

[۶] Woodcock, K., ۲۰۱۴. Model of safety inspection. *Safety science,* ۶۲(pp.۱۴۵-۱۵۶. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.ssci.۲۰۱۳,۰۸,۰۲۱.

[۷] Perlman, A., Sacks, R. & Barak, R., ۲۰۱۴. Hazard recognition and risk perception in construction. *Safety science,* ۶۴(pp.۲۲-۳۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.ssci.۲۰۱۳,۱۱,۰۱۹.

[۸] Seo, J., Han, S., Lee, S. & Kim, H., ۲۰۱۵. Computer vision techniques for construction safety and health monitoring. *Advanced Engineering Informatics,* ۲۹(۲), pp.۲۳۹-۲۵۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.aei.۲۰۱۵,۰۲,۰۰۱.

[۹] Park, J., Kim, K. & Cho, Y. K., ۲۰۱۷. Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors. *Journal of Construction Engineering and Management,* ۱۴۳(۲), pp.۰۵۰۱۶۰۱۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)CO.۱۹۴۳-۷۸۶۲,۰۰۰۱۲۲۳.

[۱۰] Irizarry, J., Gheisari, M. & Walker, B. N., ۲۰۱۲. Usability assessment of drone technology as safety inspection tools. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon),* ۱۷(۱۲), pp.۱۹۴-۲۱۲. http://www.itcon.org/۲۰۱۲/۱۲.

[۱۱] Liu, P., Chen, A. Y., Huang, Y.-N., Han, J.-Y., Lai, J.-S., Kang, S.-C., Wu, T.-H., Wen, M.-C. & Tsai, M.-H., ۲۰۱۴. A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *Smart Struct. Syst,* ۱۳(۶), pp.۱۰۶۵-۱۰۹۴. https://doi.org/۱۰,۱۲۹۸۹/sss.۲۰۱۴,۱۳,۶,۱۰۶۵.

[۱۲] Gheisari, M. & Esmaeili, B. Unmanned aerial systems (UAS) for construction safety applications. *Construction Research Congress 2016.* pp.۲۶۴۲-۲۶۵۰. (۲۰۱۶).

[۱۳] Mahajan, G., ۲۰۲۱. Applications of drone Technology in Construction Industry: A study ۲۰۱۲-۲۰۲۱. *International Journal of Engineering and Advanced Technology,* ۱۱(۱), pp.۲۲۴-۲۳۹. https://doi.org/۱۰,۳۵۹۴۰/ijeat.a۳۱۶۵,۱۰۱۱۱۲۱.

[۱۴] Van Eck, N. & Waltman, L., ۲۰۱۰. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics,* ۸۴(۲), pp.۵۲۳-۵۳۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۱۹۲-۰۰۹-۰۱۴۶-۳.

[۱۵] Choi, H.-W., Kim, H.-J., Kim, S.-K. & Na, W. S., ۲۰۲۳. An Overview of Drone Applications in the Construction Industry. *Drones,* ۷(۸), pp.۵۱۵. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/drones۷۰۸۰۵۱۵.

[۱۶] Asanka, W. & Ranasinghe, M. Study on the impact of accidents on construction projects. *6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management.* ۴(pp.۵۸-۶۷. (۲۰۱۵).

[۱۷] Okpala, I., Nnaji, C. & Karakhan, A. A., ۲۰۲۰. Utilizing emerging technologies for construction safety risk mitigation. *Practice Periodical on Structural Design and Construction,* ۲۵(۲), pp.۰۴۰۲۰۰۰۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)SC.۱۹۴۳-۵۵۷۶,۰۰۰۰۴۶۸.

[۱۸] Dobrucali, E., Sadikoglu, E., Demirkesen, S., Zhang, C., Tezel, A. & Kiral, I. A., ۲۰۲۳. A bibliometric analysis of digital technologies use in construction health and safety. *Engineering, Construction and Architectural Management,* https://doi.org/۱۰,۱۱۰۸/ECAM-۰۸-۲۰۲۲-۰۷۹۸.

[۱۹] Yap, J. B. H., Lee, K. P. H. & Wang, C., ۲۰۲۱. Safety enablers using emerging technologies in construction projects: empirical study in Malaysia. *Journal of Engineering, Design and Technology,* https://doi.org/۱۰,۱۱۰۸/JEDT-۰۷-۲۰۲۱-۰۳۷۹.

[۲۰] Manzoor, B., Othman, I., Pomares, J. C. & Chong, H. Y., ۲۰۲۱. A research framework of

۱۷۳. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۶۴(۲۰۰۶)۱۳۲:۲(۱۶۴).

[۲۹] Chen, Y., Zhang, J. & Min, B.-C. Applications of BIM and UAV to construction safety. *CSCE Annual Conference.* pp.۱-۷. (۲۰۱۹).

[۳۰] Antar, S., Khoury, H. & Haro, F. UNMANNED AERIAL SYSTEMS FOR SAFETY MONITORING IN CONSTRUCTION: EFFECT ON SAFETY PERFORMANCE. *Creative Construction e-Conference 2023.* pp.۸۷-۹۶. (۲۰۲۳).

[۳۱] Kaming, P. F. & Yonathan, G. E. Comparison of the supervisory cost of using an unmanned aerial system and conventional methods in construction projects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* ۶۱۵((۲۰۱۹).

[۳۲] De Melo, R. R. S. & Costa, D. B., ۲۰۱۹. Integrating resilience engineering and UAS technology into construction safety planning and control. *Engineering, Construction and Architectural Management,* ۲۶(۱۱), pp.۲۷۰۵-۲۷۲۲. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۸/ECAM-۱۲-۲۰۱۸-۰۵۴۱.

[۳۳] Melo, R. & Costa, D. B. 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.۱۳-۲۲. (۲۰۱۸).

[۳۴] Falorca, J. F. & Lanzinha, J. C. G., ۲۰۲۱. Facade inspections with drones–theoretical analysis and exploratory tests. *International Journal of Building Pathology and Adaptation,* ۳۹(۲), pp.۲۳۵-۲۵۸. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۸/IJBPA-۰۷-۲۰۱۹-۰۰۶۳.

[۳۵] Melo, R. R. S. D., Costa, D. B., Álvares, J. S. & Irizarry, J., ۲۰۱۷. Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites. *Safety Science,* ۹۸(pp.۱۷۴-۱۸۵. ۱۰,۱۰۱۶/j.ssci.۲۰۱۷,۰۶,۰۰۸.

[۳۶] Costa, D. B., De Melo, R. R., Álvares, J. S. & Bello, A. A. Evaluating the performance of unmanned aerial vehicles for safety inspection. *24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction.* pp.۲۳-۳۲. (۲۰۱۶).

[۳۷] Einizinab, S., Khoshelham, K., Winter, S., Christopher, P., Fang, Y., Windholz, E., Radanovic, M. & Hu, S., ۲۰۲۳. Enabling technologies for remote and virtual inspection of building work. *Automation in Construction,* ۱۵۶(pp.۱۰۵۰۹۶.

mitigating construction accidents in high-rise building projects via integrating building information modeling with emerging digital technologies. *Applied Sciences (Switzerland),* ۱۱(۱۸), https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/app۱۱۱۸۸۳۵۹.

[۲۱] Alizadehsalehi, S., Yitmen, I., Celik, T. & Arditi, D., ۲۰۲۰. The effectiveness of an integrated BIM/UAV model in managing safety on construction sites. *International journal of occupational safety and ergonomics,* ۲۶(۴), pp.۸۲۹-۸۴۴. https://doi.org/۱۰,۱۰۸۰/۱۰۸۰۳۵۴۸,۲۰۱۸,۱۵۰۴۴۸۷.

[۲۲] Alizadehsalehi, S., Asnafi, M., Yitmen, I. & Celik, T. UAS-BIM based real-time hazard identification and safety monitoring of construction projects. *9th Nordic Conference on Construction Economics and Organization 13-14 June, 2017 at Chalmers University of Technology, Göteborg, SWEDEN.* ۱۳(pp.۲۲. (۲۰۱۷).

[۲۳] Albeaino, G., Gheisari, M. & Franz, B. W., ۲۰۱۹. A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain. *Journal of information technology in construction,* ۲۴(pp.۳۸۱-۴۰۵.

[۲۴] Lee, K. P. H. ۲۰۲۱. *Investigating influential factors of technology adoption in construction safety management.* UTAR.

[۲۵] Martinez, J. G., Gheisari, M., Alarcón, L. F. & Luna, R. M. 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.۵۶۴-۵۷۱. (۲۰۱۹).

[۲۶] Toh, Y. Z., Goh, Y. M. & Guo, B. H., ۲۰۱۷. Knowledge, attitude, and practice of design for safety: multiple stakeholders in the Singapore construction industry. *Journal of Construction Engineering and Management,* ۱۴۳(۵), pp.۰۴۰۱۶۱۳۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)CO.۱۹۴۳-۷۸۶۲,۰۰۰۱۲۷۹.

[۲۷] Goh, Y. M. & Chua, S., ۲۰۱۶. Knowledge, attitude and practices for design for safety: A study on civil & structural engineers. *Accident Analysis & Prevention,* ۹۳(pp.۲۶۰-۲۶۶. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.aap.۲۰۱۵,۰۹,۰۲۳.

[۲۸] Huang, X. & Hinze, J., ۲۰۰۶. Owner's role in construction safety. *Journal of construction engineering and management,* ۱۳۲(۲), pp.۱۶۴-

improving deep learning models in building inspections or postdisaster evaluation. *Journal of Performance of Constructed Facilities,* ۳۵(۴), pp.۰۴۰۲۱۰۲۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)CF.۱۹۴۳-۵۵۰۹,۰۰۰۱۵۹۴.

[۴۷] Yang, E., Yang, J., Zeng, K. & Zheng, Y. Construction Safety Monitoring System Based on UAV Image. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST.* ۴۶۹ LNICST(pp.۵۴۶-۵۵۶. (۲۰۲۳).

[۴۸] Asnafi, M. ۲۰۱۶. *3D/4D BIM-Based Hazard Identification, Safety Regulations and Safety Monitoring of Construction Projects in Pre-construction and Construction Phases.* Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ).

[۴۹] Weerasinghe, I. T. & Ruwanpura, J. Y. Automated data acquisition system to assess construction worker performance. *Construction Research Congress 2009: Building a Sustainable Future.* pp.۶۱-۷۰. (۲۰۰۹).

[۵۰] Teizer, J., Allread, B. S. & Mantripragada, U., ۲۰۱۰. Automating the blind spot measurement of construction equipment. *Automation in Construction,* ۱۹(۴), pp.۴۹۱-۵۰۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۰۹,۱۲,۰۱۲.

[۵۱] Shanti, M. Z., Cho, C.-S., De Soto, B. G., Byon, Y.-J., Yeun, C. Y. & Kim, T. Y., ۲۰۲۲. Real-time monitoring of work-at-height safety hazards in construction sites using drones and deep learning. *Journal of safety research,* ۸۳(pp.۳۶۴-۳۷۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.jsr.۲۰۲۲,۰۹,۰۱۱.

[۵۲] Gheisari, M., Rashidi, A. & Esmaeili, B. Using unmanned aerial systems for automated fall hazard monitoring. *Construction Research Congress 2018.* pp.۶۲-۷۲. (۲۰۱۸).

[۵۳] Mendes, C. M., Silveira, B. F., Costa, D. B. & Melo, R. 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.۲۳-۳۲. (۲۰۱۸).

[۵۴] Li, Y., Esmaeili, B., Gheisari, M., Kosecka, J. & Rashidi, A., ۲۰۲۲. 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/۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۳,۱۰۵۰۹۶.

[۳۸] Rao, A. S., Radanovic, M., Liu, Y., Hu, S., Fang, Y., Khoshelham, K., Palaniswami, M. & Ngo, T., ۲۰۲۲. Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. *Automation in Construction,* ۱۳۶(pp.۱۰۴۰۹۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۱,۱۰۴۰۹۹.

[۳۹] Awolusi, I., Akinsemoyin, A., Chakraborty, D. & Al-Bayati, A. Worker Safety and Health Activity Monitoring in Construction Using Unmanned Aerial Vehicles and Deep Learning. *Construction Research Congress 2022.* pp.۴۶۳-۴۷۳. (۲۰۲۲).

[۴۰] Lnc Prakash, K., Ravva, S. K., Rathnamma, M. & Suryanarayana, G., ۲۰۲۳. AI Applications of Drones. *Drone Technology: Future Trends and Practical Applications,* pp.۱۵۳-۱۸۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۲/۹۷۸۱۳۹۴۱۶۸۰۰۲.ch۷.

[۴۱] Lima, M. I. S. C., Melo, R. R. S. & Costa, D. B. 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.۸۸۳-۸۹۲. (۲۰۲۱).

[۴۲] Rey, R. O., De Melo, R. R. S. & Costa, D. B., ۲۰۲۱. Design and implementation of a computerized safety inspection system for construction sites using UAS and digital checklists–Smart Inspecs. *Safety science,* ۱۴۳(pp.۱۰۵۴۳۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.ssci.۲۰۲۱,۱۰۵۴۳۰.

[۴۳] Goh, T. H. & Alzraiee, H. S. 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.* ۲-B(pp.۳۰۷-۳۱۳. (۲۰۲۲).

[۴۴] Akinsemoyin, A., Awolusi, I., Chakraborty, D., Al-Bayati, A. J. & Akanmu, A., ۲۰۲۳. Unmanned aerial systems and deep learning for safety and health activity monitoring on construction sites. *Sensors,* ۲۳(۱۵), pp.۶۶۹۰. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/s۲۳۱۵۶۶۹۰.

[۴۵] Akinsemoyin, A. ۲۰۲۲. *Construction Safety and Health Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles and Deep Learning.* M.S., The University of Texas at San Antonio.

[۴۶] Leach, S., Xue, Y., Sridhar, R., Paal, S., Wang, Z. & Murphy, R., ۲۰۲۱. Data augmentation for

Work in Construction. Ph.D., Texas A&M University.

[۶۶] Gupta, S. & Nair, S., ۲۰۲۳. A review of the emerging role of UAVs in construction site safety monitoring. *Materials Today: Proceedings,* ۱۰,۱۰۱۶/j.matpr.۲۰۲۳,۰۳,۱۳۵.

[۶۷] Guo, Y., Niu, H. & Li, S. 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.۱۰۵۲-۱۰۶۰. (۲۰۱۸).

[۶۸] Wang, J., Zhang, S. & Teizer, J., ۲۰۱۵. Geotechnical and safety protective equipment planning using range point cloud data and rule checking in building information modeling. *Automation in Construction,* ۴۹(pp.۲۵۰-۲۶۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۴,۰۹,۰۰۲ .

[۶۹] Wu, J., Peng, L., Li, J., Zhou, X., Zhong, J., Wang, C. & Sun, J., ۲۰۲۱. Rapid safety monitoring and analysis of foundation pit construction using unmanned aerial vehicle images. *Automation in Construction,* ۱۲۸(۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۱,۱۰۳۷۰۶.

[۵۵] Peinado, H., Melo, R., Santos, M. & Costa, D., ۲۰۲۳. Potential Application of Deep Learning and UAS for Guardrail Safety Inspection. ۱۰,۲۴۹۲۸/۲۰۲۳/۰۱۴۸.

[۵۶] Melo, R. & Costa, D. Reducing the gap between work as done and work as imagined on construction safety supported by UAS. *REA Symposium on Resilience Engineering Embracing Resilience.* (۲۰۱۹).

[۵۷] Hinze, J., Huang, X. & Terry, L., ۲۰۰۵. The nature of struck-by accidents. *Journal of construction engineering and management,* ۱۳۱(۲), pp.۲۶۲-۲۶۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۶۴(۲۰۰۵)۱۳۱:۲(۲۶۲).

[۵۸] Martinez, J. G., Gheisari, M. & Alarcón, L. F., ۲۰۲۰. 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,* ۳۶(۳), pp.۰۵۰۲۰۰۰۵. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)ME.۱۹۴۳-۵۴۷۹,۰۰۰۰۷۶۱.

[۵۹] Kim, K., Kim, S. & Shchur, D., ۲۰۲۱. 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,* ۱۲۸(۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۱,۱۰۳۷۳۶.

[۶۰] Lu, Y., Qin, W., Zhou, C. & Liu, Z., ۲۰۲۳. Automated detection of dangerous work zone for crawler crane guided by UAV images via Swin Transformer. *Automation in Construction,* ۱۴۷(pp.۱۰۴۷۴۴. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۳,۱۰۴۷۴۴.

[۶۱] Kim, D. ۲۰۲۱. *Toward Co-Robotic Construction: Visual Site Monitoring & Hazard Detection to Ensure Worker Safety.* Ph.D., University of Michigan.

[۶۲] Zhu, C., Zhu, J., Bu, T. & Gao, X., ۲۰۲۲. Monitoring and Identification of Road Construction Safety Factors via UAV. *Sensors,* ۲۲(۲۲), ۱۰,۳۳۹۰/s۲۲۲۲۸۷۹۷.

[۶۳] Kadalli, M. V., ۲۰۲۱. Perceived Effectiveness of Highway Work Zone Intrusion Mitigation Technologies: A State DOT Perspective.

[۶۴] Gupta, S. & Nair, S. Challenges in Capturing and Processing UAV based Photographic Data From Construction Sites. *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction.* ۳۷(pp.۹۱۱-۹۱۸. (۲۰۲۰).

[۶۵] Nath, N. D. ۲۰۲۱. *Human-Centered Computing and Visual Analytics for Future of*

ترجمه شده