فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی شماره ۱- دوره ۲ بهار ۱۴۰۵- صفحات۲۸۶-۲۶۷
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

کاربرد سیستم‌های هوشمند و اینترنت اشیاء (IoT) در مدیریت ایمنی حریق: مروری بر چالش‌های فنی و فرصت‌های پیشگیرانه در محیط‌های صنعتی

حامد کاظمی اسفنجانی [1*]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی HSE (مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست)، دانشکده فنی مهندسی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران.

چکیده

حریق یکی از مهم‌ترین مخاطرات صنعتی در عصر حاضر است که می‌تواند پیامدهای گسترده انسانی، اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد کند. در سال‌های اخیر رشد صنایع و پیچیدگی فرآیندهای تولیدی موجب افزایش احتمال وقوع حریق و ضرورت استفاده از رویکردهای نوین در مدیریت ایمنی شده است که بر پایه فناوری‌های دیجیتال شکل گرفته‌اند. هدف این مطالعه بررسی کاربرد سیستم‌های هوشمند و اینترنت اشیاء در ارتقای ایمنی حریق و کاهش ریسک حوادث در محیط‌های صنعتی است. این تحقیق به دنبال تبیین نقش فناوری‌های نوظهور در بهبود سامانه‌های پیشگیری، تشخیص و کنترل حریق و همچنین ارائه تصویری جامع از روندهای پژوهشی و چالش‌های اجرایی در این حوزه است. روش پژوهش حاضر مروری-تحلیلی بوده و مبتنی بر بررسی مطالعات و منابع علمی معتبر در حوزه اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و مدیریت ایمنی حریق انجام شده است. همچنین در این مطالعه، چارچوب‌های نظری مرتبط با اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و کلان‌داده مورد تحلیل قرار گرفته و نقش آن‌ها در افزایش کارایی سیستم‌های ایمنی مورد ارزیابی قرار گرفته است. یافته‌ها نشان داد که استفاده از اینترنت اشیاء و فناوری‌های هوشمند موجب کاهش زمان تشخیص حریق، افزایش دقت هشدارها و بهبود واکنش اضطراری می‌شود. همچنین ترکیب هوش مصنوعی و کلان‌داده امکان پیش‌بینی شرایط بحرانی و شناسایی الگوهای خطر را فراهم می‌سازد. نتایج نشان داد که یکپارچگی فناوری‌های هوشمند موجب ایجاد سیستم‌های پیش‌بینانه شده که قادر به کاهش قابل توجه خطاهای انسانی و افزایش سرعت تصمیم‌گیری در شرایط اضطراری هستند. همچنین استفاده از داده‌های بلادرنگ و تحلیل هوشمند موجب ارتقای دقت پیش‌بینی و کاهش ریسک‌های عملیاتی در محیط‌های صنعتی شده است. نتیجه‌گیری نشان می‌دهد که پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند مبتنی بر IoT نقش مهمی در ارتقای ایمنی حریق دارد، اما موفقیت آن نیازمند توسعه زیرساخت، امنیت سایبری و آموزش نیروی انسانی است. یافته‌ها همچنین بیانگر آن است که علی‌رغم مزایای گسترده، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالا، کمبود زیرساخت مناسب و مسائل امنیت سایبری می‌تواند مانع پیاده‌سازی کامل این فناوری‌ها شود و نیازمند سیاست‌گذاری دقیق و برنامه‌ریزی راهبردی است .

کلمات کلیدی: اینترنت اشیاء، ایمنی حریق، سیستم‌های هوشمند، هوش مصنوعی، کلان‌داده

فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی شماره ۱- دوره ۲بهار ۱۴۰۵- صفحات۲۸۶-۲۶۷
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

مقدمه :

حریق یکی از مهم‌ترین مخاطرات صنعتی در جهان معاصر محسوب می‌شود که می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای در ابعاد انسانی، اقتصادی، زیست‌محیطی و عملیاتی به همراه داشته باشد. توسعه روزافزون صنایع، افزایش پیچیدگی فرایندهای تولید، استفاده از مواد شیمیایی خطرناک، گسترش تأسیسات انرژی و تراکم تجهیزات صنعتی سبب شده است که مدیریت ایمنی حریق به یکی از ارکان اساسی نظام‌های HSE تبدیل شود. در بسیاری از صنایع نظیر نفت، گاز، پتروشیمی، نیروگاه‌ها، صنایع شیمیایی و مراکز ذخیره‌سازی مواد خطرناک، وقوع یک حادثه آتش‌سوزی می‌تواند علاوه بر خسارات مالی سنگین، منجر به توقف تولید، آسیب‌های جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی و تلفات انسانی گسترده شود. از این‌رو، سازمان‌ها و صنایع مختلف همواره در جستجوی راهکارهایی برای ارتقای سطح پیشگیری، شناسایی سریع مخاطرات و افزایش اثربخشی سامانه‌های ایمنی حریق بوده‌اند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که موفقیت برنامه‌های مدیریت حریق بیش از هر چیز به توانایی سازمان در شناسایی زودهنگام شرایط خطرناک، ارزیابی مستمر ریسک‌ها و واکنش سریع در شرایط اضطراری وابسته است. در همین راستا، پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه تحلیل ریسک حریق و برنامه‌ریزی اطفای حریق نشان می‌دهند که بهره‌گیری از فناوری‌های نوین می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش احتمال وقوع حوادث و محدودسازی پیامدهای آن‌ها ایفا کند (عسگری و همکاران، ۱۴۰۲؛ سید حسن راضی و همکاران، ۱۴۰۱).

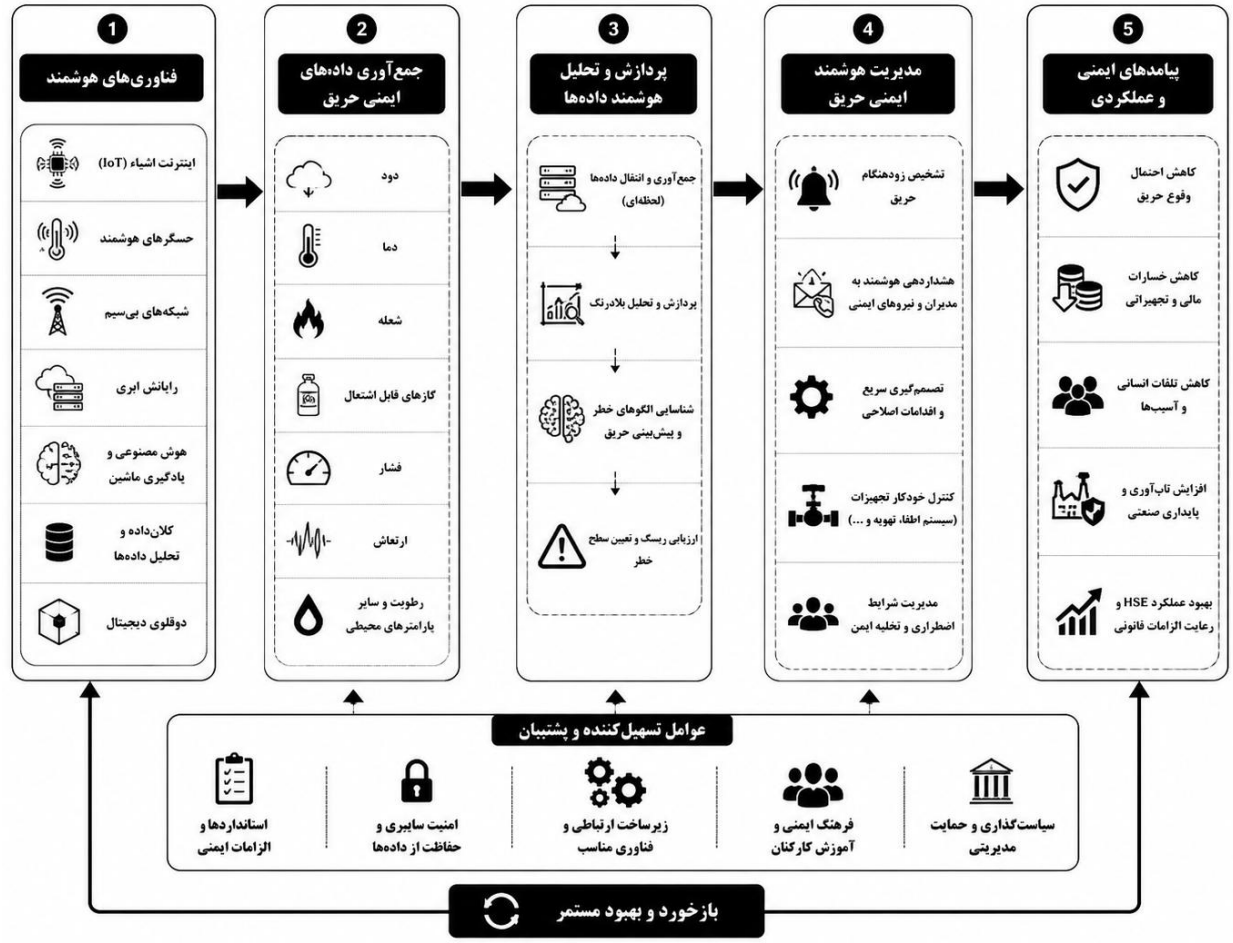
در دهه‌های اخیر، ظهور فناوری‌های تحول‌آفرین مبتنی بر دیجیتالی‌سازی، مفهوم ایمنی صنعتی را با تغییرات بنیادینی مواجه ساخته است. اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، کلان‌داده، رایانش ابری، دوقلوهای دیجیتال و سامانه‌های هوشمند پایش از جمله فناوری‌هایی هستند که به تدریج در ساختار مدیریت ریسک و ایمنی صنایع نفوذ کرده‌اند. اینترنت اشیاء به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای انقلاب صنعتی چهارم، امکان اتصال تجهیزات، حسگرها، ماشین‌آلات و سامانه‌های ایمنی را در قالب یک شبکه هوشمند فراهم می‌سازد و از این طریق امکان جمع‌آوری، انتقال و تحلیل بلادرنگ داده‌ها را ایجاد می‌کند. این ویژگی موجب شده است که مدیریت ایمنی از رویکردهای سنتی مبتنی بر واکنش پس از حادثه فاصله گرفته و به سمت رویکردهای پیش‌بینانه و پیشگیرانه حرکت کند. مطالعات انجام‌شده در زمینه شهرهای هوشمند و سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء نشان داده‌اند که یکپارچه‌سازی تجهیزات و داده‌ها می‌تواند توانایی سیستم‌ها را در شناسایی مخاطرات، تصمیم‌گیری سریع و واکنش مؤثر به شرایط بحرانی به شکل چشمگیری افزایش دهد (کرکه آبادی، ۱۳۹۹؛ Anabestani et al., ۲۰۲٤؛ Mahdnejad, ۲۰۲۵).

در حوزه ایمنی حریق، سیستم‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء توانسته‌اند افق‌های جدیدی را در زمینه تشخیص زودهنگام، پایش مستمر و مدیریت یکپارچه حوادث ایجاد کنند. برخلاف سامانه‌های سنتی که عمدتاً متکی بر تجهیزات مستقل و هشداردهنده‌های موضعی هستند، سامانه‌های مبتنی بر IoT از شبکه‌ای از حسگرهای متصل به یکدیگر تشکیل شده‌اند که قادرند اطلاعات مربوط به دما، دود، گازهای قابل اشتعال، فشار، ارتعاش و سایر شاخص‌های خطر را به صورت پیوسته پایش کنند. این داده‌ها پس از انتقال به مراکز پردازش، با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند تحلیل شده و امکان پیش‌بینی شرایط بحرانی پیش از وقوع حادثه را فراهم می‌کنند. پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه سامانه‌های هشدار حریق مبتنی بر اینترنت اشیاء نشان داده‌اند که استفاده از این فناوری می‌تواند زمان تشخیص حریق را به میزان قابل توجهی کاهش داده و دقت هشدارها را افزایش دهد. همچنین امکان ارسال هشدارهای فوری به مدیران، نیروهای ایمنی و مراکز امدادی از طریق بسترهای ارتباطی هوشمند فراهم می‌شود که این امر نقش

فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی شماره ۱- دوره ۲ بهار ۱۴۰۵- صفحات۲۸۶-۲۶۷
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

مهمی در کاهش خسارات ناشی از حریق ایفا می‌کند (Al Hasani et al., ۲۰۲۲؛ Palamar & Palamar, ۲۰۲۳؛ Morchid et al., ۲۰۲٤).

همزمان با توسعه اینترنت اشیاء، کاربرد هوش مصنوعی و تحلیل داده‌های کلان نیز در مدیریت ایمنی حریق گسترش یافته است. حجم عظیم داده‌های تولیدشده توسط حسگرهای هوشمند زمانی ارزش واقعی خود را نشان می‌دهد که بتوان از طریق روش‌های پیشرفته تحلیلی، الگوهای پنهان خطر را شناسایی و پیش‌بینی کرد. امروزه الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند با تحلیل داده‌های تاریخی و داده‌های لحظه‌ای، احتمال وقوع حریق را تخمین زده و حتی محل‌های مستعد حادثه را شناسایی کنند. افزون بر این، فناوری دوقلوی دیجیتال امکان ایجاد مدل مجازی از تأسیسات صنعتی را فراهم می‌سازد و مدیران می‌توانند شرایط مختلف حریق را پیش از وقوع واقعی شبیه‌سازی و ارزیابی کنند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و دوقلوهای دیجیتال می‌تواند نسل جدیدی از سامانه‌های مدیریت ایمنی حریق را ایجاد کند که از قابلیت‌های پیش‌بینی، تصمیم‌گیری هوشمند و کنترل خودکار برخوردار هستند (Jiang et al., ۲۰۲۳؛ Zhang et al., ۲۰۲٤؛ Park et al., ۲۰۲۳).



شکل ۱. مدل مفهومی کاربرد سیستم‌های هوشمند و اینترنت اشیاء (IoT) در مدیریت ایمنی حریق در محیط‌های صنعتی

با وجود مزایای گسترده این فناوری‌ها، پیاده‌سازی آن‌ها در محیط‌های صنعتی با چالش‌های متعددی نیز همراه است. محدودیت‌های زیرساختی، هزینه‌های استقرار و نگهداری، مشکلات امنیت سایبری، قابلیت اطمینان شبکه‌های ارتباطی، پیچیدگی یکپارچه‌سازی سامانه‌ها و کمبود نیروی انسانی متخصص از جمله مهم‌ترین موانعی هستند که می‌توانند موفقیت پروژه‌های هوشمندسازی ایمنی حریق را تحت تأثیر قرار دهند. از سوی دیگر، گسترش اتصال تجهیزات صنعتی به شبکه‌های ارتباطی، سطح جدیدی از آسیب‌پذیری‌های سایبری را ایجاد کرده است که در صورت مدیریت نامناسب می‌تواند خود به یک تهدید ایمنی تبدیل شود. بنابراین، بهره‌برداری موفق از اینترنت اشیاء در مدیریت ایمنی حریق مستلزم شناخت دقیق فرصت‌ها و چالش‌های فنی، مدیریتی و اجرایی این فناوری است. مطالعات مختلف نیز بر ضرورت توسعه زیرساخت‌های هوشمند، استانداردسازی سامانه‌ها و ارتقای قابلیت‌های مدیریتی برای استفاده مؤثر از فناوری‌های نوین در حوزه ایمنی تأکید کرده‌اند (جهانیان و نابغ وطن، ۱۴۰۳؛ Peng & Ke, ۲۰۲۳؛ Damaševičius et al., ۲۰۲۳).

بر این اساس، پژوهش حاضر با رویکردی مروری به بررسی کاربرد سیستم‌های هوشمند و اینترنت اشیاء در مدیریت ایمنی حریق می‌پردازد و ضمن معرفی مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در این حوزه، فرصت‌های پیشگیرانه و مزایای حاصل از به‌کارگیری آن‌ها را تبیین می‌کند. همچنین چالش‌های فنی، اجرایی و مدیریتی استقرار این سامانه‌ها در محیط‌های صنعتی مورد تحلیل قرار گرفته و روندهای نوظهور پژوهشی و مسیرهای آینده توسعه ایمنی حریق هوشمند بررسی می‌شوند. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه بتواند دیدگاهی جامع برای پژوهشگران، مدیران HSE و متخصصان ایمنی صنعتی در زمینه بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند به منظور ارتقای سطح ایمنی حریق و کاهش ریسک‌های صنعتی فراهم آورد.

۲. مبانی نظری و مفاهیم کلیدی

مدیریت ایمنی حریق یکی از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های مدیریت ریسک در نظام‌های HSE محسوب می‌شود که هدف اصلی آن شناسایی، ارزیابی، کنترل و کاهش خطرات مرتبط با آتش‌سوزی در محیط‌های کاری و صنعتی است. در گذشته، رویکردهای سنتی مدیریت حریق عمدتاً بر اقدامات واکنشی و تجهیزات اطفای حریق پس از وقوع حادثه متمرکز بودند، اما افزایش پیچیدگی فرایندهای صنعتی و رشد حجم خسارات ناشی از حریق موجب شد تا مفهوم ایمنی حریق به سمت رویکردهای پیشگیرانه و مبتنی بر مدیریت ریسک حرکت کند. امروزه ایمنی حریق تنها به نصب تجهیزات اعلام و اطفای حریق محدود نمی‌شود، بلکه مجموعه‌ای از فعالیت‌های مرتبط با شناسایی خطرات، تحلیل ریسک، پایش مستمر شرایط محیطی، آموزش کارکنان، برنامه‌ریزی واکنش اضطراری و استفاده از فناوری‌های نوین را در بر می‌گیرد. مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل ریسک حریق نشان می‌دهند که بخش قابل توجهی از حوادث آتش‌سوزی صنعتی ناشی از ضعف در پایش شرایط مخاطره‌آمیز، نقص در سیستم‌های هشدار اولیه و نبود اطلاعات کافی برای تصمیم‌گیری سریع مدیران است که این موضوع اهمیت استفاده از سامانه‌های هوشمند را بیش از پیش آشکار می‌سازد (عسگری و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین بررسی عوامل مؤثر بر ایمنی آتش‌سوزی در ساختمان‌ها و تأسیسات پیچیده نشان داده است که شناسایی به‌موقع شرایط خطرناک و مدیریت یکپارچه اطلاعات ایمنی نقش کلیدی در کاهش احتمال وقوع حوادث ایفا می‌کند (موسوی و همکاران، ۱۴۰۳).

در سال‌های اخیر، مفهوم سیستم‌های هوشمند به عنوان یکی از مهم‌ترین دستاوردهای تحول دیجیتال وارد حوزه ایمنی صنعتی شده است. سیستم هوشمند به مجموعه‌ای از تجهیزات، نرم‌افزارها و الگوریتم‌های پردازشی اطلاق می‌شود که قادرند داده‌های محیطی را دریافت کرده، آن‌ها را تحلیل نموده و بر اساس نتایج حاصل، تصمیمات مناسب را به صورت خودکار یا نیمه‌خودکار اتخاذ کنند. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از حسگرها، شبکه‌های ارتباطی، پایگاه‌های داده و ابزارهای تحلیلی پیشرفته قادرند تصویری جامع و بلادرنگ از وضعیت ایمنی محیط ارائه دهند. در حوزه ایمنی حریق، سیستم‌های هوشمند می‌توانند تغییرات دما، افزایش غلظت دود، انتشار گازهای خطرناک و سایر نشانه‌های اولیه آتش‌سوزی را شناسایی کرده و قبل از گسترش حادثه هشدارهای لازم را صادر نمایند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تلفیق سامانه‌های هوشمند با تجهیزات ایمنی موجب افزایش سرعت تشخیص مخاطرات و کاهش زمان واکنش در شرایط اضطراری می‌شود و به همین دلیل به عنوان یکی از ارکان اصلی زیرساخت‌های ایمنی نسل جدید شناخته می‌شوند (Park et al., ۲۰۲۳). علاوه بر این، توسعه سامانه‌های مدیریت هوشمند ساختمان و زیرساخت‌های دیجیتال سبب شده است که بسیاری از تجهیزات ایمنی بتوانند بدون نیاز به مداخله انسانی، شرایط محیط را کنترل و اقدامات حفاظتی لازم را اجرا کنند (کرکه آبادی، ۱۳۹۹).

یکی از مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در سیستم‌های هوشمند، اینترنت اشیاء یا IoT است که امروزه نقش محوری در تحول مدیریت ایمنی ایفا می‌کند. اینترنت اشیاء به شبکه‌ای از اشیاء، تجهیزات و دستگاه‌های فیزیکی متصل به اینترنت گفته می‌شود که قابلیت جمع‌آوری، تبادل و پردازش اطلاعات را دارند. در این فناوری، حسگرهای مختلف داده‌های محیطی را ثبت کرده و از طریق بسترهای ارتباطی به مراکز پردازش منتقل می‌کنند. سپس داده‌ها توسط نرم‌افزارهای تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل برای تصمیم‌گیری یا کنترل تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرد. اهمیت اینترنت اشیاء در مدیریت ایمنی حریق از آن جهت است که امکان پایش لحظه‌ای و مستمر تمامی بخش‌های یک محیط صنعتی را فراهم می‌کند و مدیران می‌توانند بدون محدودیت مکانی به اطلاعات ایمنی دسترسی داشته باشند. تحقیقات انجام‌شده در زمینه سامانه‌های هشدار حریق مبتنی بر IoT نشان می‌دهد که این فناوری توانایی قابل توجهی در تشخیص زودهنگام حریق و ارسال هشدارهای فوری دارد و می‌تواند به میزان زیادی از گسترش حوادث جلوگیری کند (Al Hasani et al., ۲۰۲۲). همچنین استفاده از شبکه‌های اینترنت اشیاء در سامانه‌های پایش ایمنی باعث افزایش قابلیت اطمینان فرایندهای نظارتی و بهبود عملکرد سیستم‌های حفاظتی شده است (Palamar & Palamar, ۲۰۲۳).

معماری اینترنت اشیاء معمولاً از چند لایه اصلی شامل لایه حسگرها، لایه ارتباطات، لایه پردازش داده و لایه کاربرد تشکیل می‌شود. در لایه نخست، انواع حسگرهای دما، دود، شعله، گاز و فشار اطلاعات مورد نیاز را جمع‌آوری می‌کنند. در مرحله بعد، داده‌ها از طریق شبکه‌های ارتباطی به مراکز پردازش منتقل می‌شوند و سپس با استفاده از الگوریتم‌های تحلیلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در آخر نتایج حاصل در قالب هشدارها، گزارش‌ها یا دستورات کنترلی در اختیار کاربران و تجهیزات قرار می‌گیرد. این ساختار چندلایه موجب می‌شود که اطلاعات ایمنی به صورت مستمر در سراسر سازمان جریان داشته باشد و تصمیم‌گیری بر اساس داده‌های واقعی و به‌روز انجام گیرد. پژوهشگران معتقدند که هرچه یکپارچگی میان اجزای مختلف این معماری بیشتر باشد، اثربخشی سیستم در پیشگیری از حوادث نیز افزایش خواهد یافت (Peng & Ke, ۲۰۲۳). در همین راستا، مطالعات انجام‌شده در زمینه شهرهای هوشمند و زیرساخت‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء نشان داده‌اند که ارتباط مؤثر میان حسگرها، سامانه‌های پردازش و مراکز تصمیم‌گیری می‌تواند سطح تاب‌آوری سیستم‌ها را در برابر مخاطرات مختلف از جمله آتش‌سوزی ارتقا دهد (Anabestani et al., ۲۰۲٤؛ Mahdnejad, ۲۰۲۵).

ارتباط میان اینترنت اشیاء و مدیریت ایمنی را می‌توان در چارچوب رویکرد «ایمنی مبتنی بر داده» تبیین کرد. در این رویکرد، تصمیمات مدیریتی به جای اتکا به مشاهدات مقطعی یا تجربیات فردی، بر پایه داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده از محیط اتخاذ می‌شوند. اینترنت اشیاء امکان تولید حجم عظیمی از داده‌های ایمنی را فراهم می‌کند و این داده‌ها پس از تحلیل می‌توانند الگوهای پنهان خطر، نقاط آسیب‌پذیر و شرایط مستعد وقوع حادثه را آشکار سازند. از این منظر، IoT نه تنها ابزاری برای نظارت و هشداردهی است، بلکه به عنوان بستری برای پیش‌بینی و پیشگیری از حوادث نیز عمل می‌کند. مطالعات جدید در حوزه مدیریت اضطراری نشان داده‌اند که اتصال تجهیزات ایمنی به شبکه‌های هوشمند می‌تواند زمان تشخیص حادثه را کاهش داده، هماهنگی میان واحدهای امدادی را افزایش دهد و اثربخشی برنامه‌های واکنش اضطراری را بهبود بخشد (Damaševičius et al., ۲۰۲۳). همچنین پژوهش‌های مرتبط با خودسازندگی سیستمی در محیط‌های صنعتی بیانگر آن هستند که فناوری اینترنت اشیاء می‌تواند موجب ارتقای پویایی، انعطاف‌پذیری و قابلیت یادگیری سامانه‌های ایمنی شده و زمینه را برای شکل‌گیری نسل جدید مدیریت هوشمند حریق فراهم سازد (جهانیان و نابغ وطن، ۱۴۰۳).

۳. فناوری‌های هوشمند مورد استفاده در مدیریت ایمنی حریق

تحول دیجیتال در سال‌های اخیر موجب شده است که فناوری‌های هوشمند به بخش جدایی‌ناپذیر سامانه‌های مدیریت ایمنی حریق تبدیل شوند. در گذشته، سامانه‌های ایمنی عمدتاً بر تجهیزات مکانیکی و هشداردهنده‌های مستقل متکی بودند، اما امروزه استفاده از فناوری‌های هوشمند امکان پایش مستمر، تحلیل بلادرنگ شرایط محیطی و واکنش سریع به مخاطرات را فراهم ساخته است. این فناوری‌ها با ایجاد ارتباط میان تجهیزات، حسگرها، پایگاه‌های داده و سامانه‌های تصمیم‌گیری، رویکردی نوین در مدیریت حریق ایجاد کرده‌اند که هدف آن پیشگیری از وقوع حادثه پیش از رسیدن به مرحله بحرانی است. پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه ایمنی هوشمند نشان می‌دهند که بهره‌گیری از فناوری‌های نوین نه تنها دقت تشخیص مخاطرات را افزایش می‌دهد، بلکه موجب کاهش زمان واکنش، بهبود تصمیم‌گیری و افزایش قابلیت اطمینان سامانه‌های ایمنی می‌شود (Park et al., ۲۰۲۳). همچنین توسعه زیرساخت‌های اینترنت اشیاء و سیستم‌های هوشمند، زمینه را برای ایجاد شبکه‌های ایمنی یکپارچه در محیط‌های صنعتی فراهم کرده است که می‌توانند به صورت خودکار شرایط خطرناک را شناسایی و مدیریت کنند (جهانیان و نابغ وطن، ۱۴۰۳).

۱. حسگرهای هوشمند تشخیص دود، حرارت و گاز: حسگرهای هوشمند نخستین و مهم‌ترین لایه فناوری در سامانه‌های مدیریت ایمنی حریق محسوب می‌شوند. این حسگرها وظیفه دارند تغییرات محیطی مرتبط با وقوع حریق را شناسایی و اطلاعات لازم را در کوتاه‌ترین زمان ممکن به سامانه‌های مرکزی منتقل کنند. حسگرهای دود، دما، شعله و گازهای قابل اشتعال امروزه با دقت بسیار بالاتری نسبت به نسل‌های قدیمی عمل می‌کنند و قادرند کوچک‌ترین تغییرات محیطی را ثبت نمایند. برخلاف آشکارسازهای سنتی که تنها در زمان عبور از یک آستانه مشخص فعال می‌شدند، حسگرهای هوشمند قادرند روند تغییرات را نیز تحلیل کرده و هشدارهای زودهنگام ارائه دهند. مطالعات انجام شده در زمینه سامانه‌های هشدار حریق مبتنی بر اینترنت اشیاء نشان داده است که استفاده از حسگرهای هوشمند می‌تواند زمان تشخیص حریق را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و احتمال هشدارهای کاذب را نیز کم کند (Al Hasani et al., ۲۰۲۲). همچنین پژوهش‌های

مرتبط با تشخیص زودهنگام حریق در محیط‌های هوشمند نشان داده‌اند که تلفیق چند نوع حسگر مختلف موجب افزایش دقت سامانه‌های پایش و بهبود قابلیت اطمینان آن‌ها می‌شود (Morchid et al., ۲۰۲٤).

۲. شبکه‌های بی‌سیم و سامانه‌های پایش لحظه‌ای: یکی از الزامات اساسی در عملکرد سامانه‌های هوشمند ایمنی حریق، وجود بسترهای ارتباطی پایدار برای انتقال داده‌ها است. شبکه‌های بی‌سیم امکان اتصال هزاران حسگر و تجهیز ایمنی را در سطح یک مجموعه صنعتی فراهم می‌کنند و داده‌های جمع‌آوری‌شده را به صورت بلادرنگ در اختیار مراکز کنترل قرار می‌دهند. در چنین ساختاری، تمامی نقاط حساس یک کارخانه، نیروگاه یا مجتمع صنعتی می‌توانند به صورت لحظه‌ای تحت نظارت قرار گیرند و هرگونه تغییر غیرعادی فوراً شناسایی شود. مزیت اصلی این شبکه‌ها در مقایسه با سامانه‌های سیمی، انعطاف‌پذیری بالا، کاهش هزینه نصب و قابلیت توسعه آسان آن‌ها است. در بسیاری از صنایع، شبکه‌های بی‌سیم به مدیران HSE اجازه می‌دهند تا وضعیت ایمنی را از طریق داشبوردهای مدیریتی و حتی تجهیزات همراه مشاهده و کنترل کنند. تحقیقات نشان داده‌اند که سامانه‌های پایش لحظه‌ای مبتنی بر اینترنت اشیاء می‌توانند کارایی برنامه‌های واکنش اضطراری را به شکل چشمگیری افزایش دهند و هماهنگی میان واحدهای مختلف را بهبود بخشند (Palamar & Palamar, ۲۰۲۳). همچنین توسعه اینترنت خدمات اضطراری موجب شده است که داده‌های حاصل از حسگرها به صورت همزمان در اختیار مراکز امدادی و تیم‌های واکنش قرار گیرد و زمان مداخله در حوادث کاهش یابد (Damaševičius et al., ۲۰۲۳).

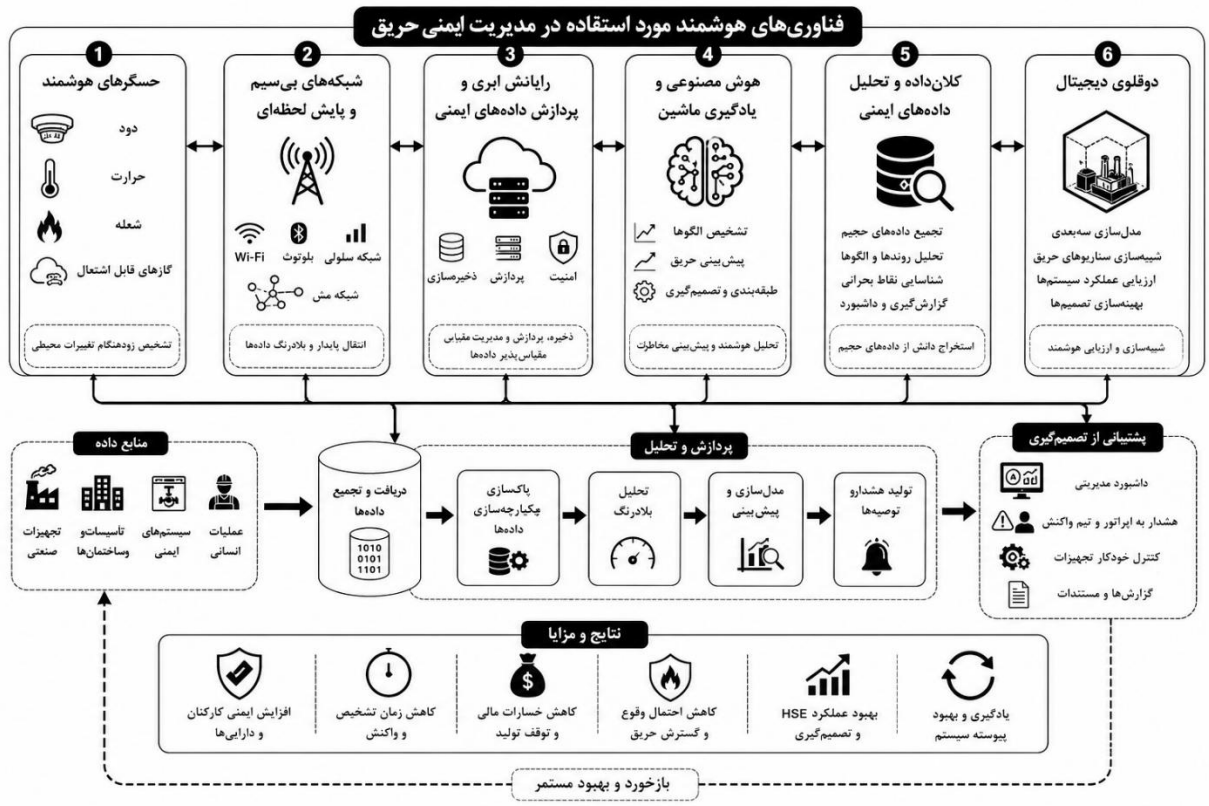
۳. رایانش ابری و پردازش داده‌های ایمنی: افزایش تعداد حسگرها و تجهیزات متصل به شبکه موجب تولید حجم عظیمی از داده‌های ایمنی شده است که مدیریت و تحلیل آن‌ها بدون استفاده از زیرساخت‌های پردازشی پیشرفته امکان‌پذیر نیست. رایانش ابری به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در سامانه‌های هوشمند، امکان ذخیره‌سازی، پردازش و مدیریت داده‌های ایمنی را در مقیاس وسیع فراهم می‌کند. در این فناوری، اطلاعات جمع‌آوری‌شده از حسگرها در بسترهای ابری ذخیره شده و از طریق الگوریتم‌های پردازشی مورد تحلیل قرار می‌گیرند. این امر موجب می‌شود که مدیران بتوانند به اطلاعات ایمنی از هر مکان و در هر زمان دسترسی داشته باشند. علاوه بر این، رایانش ابری قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌های حاصل از بخش‌های مختلف سازمان را فراهم می‌سازد و تصویری جامع از وضعیت ایمنی ارائه می‌دهد. مطالعات مرتبط با سامانه‌های هوشمند مدیریت ساختمان نشان داده‌اند که استفاده از زیرساخت‌های ابری موجب افزایش سرعت پردازش اطلاعات، بهبود تصمیم‌گیری و ارتقای عملکرد سامانه‌های ایمنی می‌شود (Park et al., ۲۰۲۳). همچنین پژوهشگران معتقدند که رایانش ابری یکی از زیرساخت‌های اصلی توسعه شهرهای هوشمند و سامانه‌های ایمنی آینده خواهد بود (Mahdnejad, ۲۰۲۵).

٤. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در پیش‌بینی حریق: هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین از مهم‌ترین فناوری‌هایی هستند که رویکرد مدیریت حریق را از واکنش پس از حادثه به پیش‌بینی و پیشگیری تغییر داده‌اند. این فناوری‌ها با تحلیل حجم عظیمی از داده‌های تاریخی و داده‌های لحظه‌ای قادرند الگوهای مرتبط با وقوع حریق را شناسایی کرده و احتمال بروز حادثه را پیش‌بینی نمایند. برای مثال، افزایش تدریجی دما در یک بخش صنعتی، تغییرات غیرعادی در مصرف انرژی یا انتشار گازهای خاص می‌تواند به عنوان نشانه‌های اولیه خطر توسط الگوریتم‌های هوشمند شناسایی شود. مزیت اصلی این فناوری در توانایی آن برای کشف روابط پیچیده‌ای است که ممکن است برای تحلیلگران انسانی قابل مشاهده نباشد. در سال‌های اخیر، استفاده از هوش مصنوعی در سامانه‌های ایمنی ساختمان‌ها و زیرساخت‌های صنعتی

رشد چشمگیری داشته است و نتایج مطالعات نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند دقت پیش‌بینی مخاطرات را به طور قابل توجهی افزایش دهد (Peng & Ke, ۲۰۲۳). همچنین ترکیب هوش مصنوعی با سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء، نسل جدیدی از سامانه‌های ایمنی خودیادگیر را ایجاد کرده است که با گذشت زمان عملکرد آن‌ها بهبود می‌یابد (Sayeduzzaman et al., ۲۰۲٤).

۵. کلان‌داده و تحلیل داده‌های ایمنی: کلان‌داده به مجموعه‌ای از داده‌های حجیم، متنوع و پرسرعت اطلاق می‌شود که پردازش آن‌ها با روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. در سامانه‌های ایمنی حریق، حسگرها، تجهیزات کنترلی، سامانه‌های مدیریت ساختمان و شبکه‌های ارتباطی به طور مداوم داده‌های فراوانی تولید می‌کنند که تحلیل آن‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت ایمنی سازمان ارائه دهد. تحلیل کلان‌داده امکان شناسایی روندهای بلندمدت، نقاط بحرانی، تجهیزات پرریسک و عوامل مؤثر بر وقوع حوادث را فراهم می‌کند. از طریق این فناوری می‌توان الگوهای خطر را پیش از وقوع حادثه شناسایی کرد و اقدامات پیشگیرانه مناسب را طراحی نمود. پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه مدیریت اضطراری شهری نشان داده‌اند که تحلیل داده‌های گسترده حاصل از سامانه‌های هوشمند می‌تواند اثربخشی برنامه‌های پیشگیری از حریق را به میزان قابل توجهی افزایش دهد (Peng & Ke, ۲۰۲۳). همچنین استفاده از تحلیل کلان‌داده در محیط‌های هوشمند موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های مدیریتی بیش از گذشته بر شواهد و داده‌های واقعی استوار شوند (Anabestani et al., ۲۰۲٤).

٦. دوقلوی دیجیتال در مدیریت ایمنی حریق: دوقلوی دیجیتال یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های نوظهور در حوزه ایمنی حریق است که امکان ایجاد یک نسخه مجازی و پویا از تجهیزات، ساختمان‌ها و فرایندهای صنعتی را فراهم می‌کند. در این فناوری، داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده از حسگرها به صورت مداوم به مدل دیجیتال منتقل می‌شوند و شرایط واقعی سیستم در محیط مجازی بازسازی می‌گردد. این قابلیت به مدیران اجازه می‌دهد تا سناریوهای مختلف حریق را پیش از وقوع واقعی شبیه‌سازی کرده و پیامدهای احتمالی آن‌ها را ارزیابی کنند. به کمک دوقلوی دیجیتال می‌توان عملکرد سامانه‌های اطفای حریق، مسیرهای تخلیه اضطراری، رفتار دود و گسترش شعله را در شرایط مختلف بررسی نمود و بهترین راهکارهای کنترلی را انتخاب کرد. مطالعات انجام‌شده در زمینه کنترل هوشمند سامانه‌های حفاظت حریق نشان داده‌اند که دوقلوهای دیجیتال می‌توانند دقت تصمیم‌گیری و اثربخشی برنامه‌های مدیریت بحران را به شکل چشمگیری افزایش دهند (Jiang et al., ۲۰۲۳). همچنین پژوهش‌های جدید در حوزه ایمنی تونل‌های هوشمند نشان می‌دهد که تلفیق دوقلوی دیجیتال، اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی قادر است نسل جدیدی از سامانه‌های پیشگیرانه ایمنی حریق را ایجاد کند که در آن مخاطرات پیش از تبدیل شدن به حادثه شناسایی و کنترل می‌شوند (Zhang et al., ۲۰۲٤).



شکل ۲. چارچوب فناوری‌های هوشمند مورد استفاده در مدیریت ایمنی حریق و فرایند تبدیل داده به تصمیم در محیط‌های صنعتی

شکل ۲ معماری مفهومی فناوری‌های هوشمند به‌کاررفته در مدیریت ایمنی حریق را نمایش می‌دهد. در این چارچوب، حسگرهای هوشمند تشخیص دود، حرارت، شعله و گازهای قابل اشتعال به‌عنوان نخستین لایه سامانه، اطلاعات محیطی را به‌صورت مستمر جمع‌آوری می‌کنند. داده‌های تولیدشده از طریق شبکه‌های ارتباطی و بسترهای اینترنت اشیاء به مراکز پردازش منتقل شده و در زیرساخت‌های رایانش ابری ذخیره و مدیریت می‌شوند. در مرحله بعد، فناوری‌های پیشرفته نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، تحلیل کلان‌داده و دوقلوی دیجیتال با پردازش داده‌های دریافتی، امکان شناسایی الگوهای خطر، پیش‌بینی حوادث احتمالی و ارزیابی سناریوهای مختلف حریق را فراهم می‌کنند. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، خروجی این فرایند تحلیلی در قالب تولید هشدارهای هوشمند، پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی، کنترل خودکار تجهیزات ایمنی و بهینه‌سازی عملیات واکنش اضطراری ظاهر می‌شود. بنابرین، به‌کارگیری یکپارچه این فناوری‌ها موجب افزایش دقت تشخیص مخاطرات، کاهش زمان واکنش، کاهش خسارات انسانی و مالی، ارتقای عملکرد سامانه‌های HSE و افزایش تاب‌آوری محیط‌های صنعتی در برابر حوادث آتش‌سوزی می‌شود. همچنین چرخه بازخورد موجود در مدل بیانگر آن است که داده‌ها و تجربیات حاصل از عملکرد سامانه به‌طور مداوم برای اصلاح، یادگیری و بهبود مستمر سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند و زمینه شکل‌گیری مدیریت هوشمند و پیشگیرانه ایمنی حریق را فراهم می‌سازند.

۴. کاربردهای اینترنت اشیاء در پیشگیری و کنترل حریق در محیط‌های صنعتی

اینترنت اشیاء در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین فناوری‌های تحول‌آفرین در حوزه ایمنی صنعتی تبدیل شده است و نقش قابل توجهی در پیشگیری، پایش و کنترل حریق ایفا می‌کند. در محیط‌های صنعتی که معمولاً با حجم بالایی از مواد قابل اشتعال، تجهیزات پیچیده و فرایندهای پرخطر مواجه هستند، تشخیص سریع شرایط بحرانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اینترنت اشیاء با ایجاد شبکه‌ای از حسگرها، تجهیزات کنترلی و سامانه‌های ارتباطی هوشمند، امکان نظارت مستمر بر شرایط محیطی را فراهم می‌سازد و مدیران را قادر می‌کند تا پیش از تبدیل شدن یک وضعیت مخاطره‌آمیز به حادثه واقعی، اقدامات اصلاحی لازم را اجرا نمایند. در این رویکرد، داده‌های مرتبط با دما، دود، گازهای قابل اشتعال، فشار، ارتعاش و عملکرد تجهیزات به صورت لحظه‌ای جمع‌آوری شده و برای تحلیل به مراکز پردازش ارسال می‌شوند. این قابلیت موجب شده است که مدیریت ایمنی حریق از یک رویکرد واکنشی به سمت مدیریت پیش‌بینانه و پیشگیرانه حرکت کند و تصمیمات ایمنی بر پایه داده‌های واقعی و به‌روز اتخاذ شوند (Palamar & Palamar, ۲۰۲۳؛ Al Hasani et al., ۲۰۲۲).

یکی از مهم‌ترین کاربردهای اینترنت اشیاء در محیط‌های صنعتی، شناسایی زودهنگام شرایط مستعد حریق است. در بسیاری از موارد، پیش از وقوع آتش‌سوزی علائمی نظیر افزایش تدریجی دما، نشت گاز، افزایش غلظت دود یا تغییرات غیرعادی در عملکرد تجهیزات ظاهر می‌شود. سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء قادرند این تغییرات را در مراحل اولیه شناسایی کرده و هشدارهای لازم را در اختیار اپراتورها و مدیران قرار دهند. این موضوع به ویژه در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی که کوچک‌ترین تأخیر در تشخیص خطر می‌تواند پیامدهای فاجعه‌باری به همراه داشته باشد، اهمیت بسیار زیادی دارد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از سامانه‌های هوشمند مبتنی بر IoT می‌تواند زمان تشخیص حریق را کاهش داده و احتمال گسترش حادثه را به طور قابل توجهی محدود کند (Morchid et al., ۲۰۲٤؛ سید حسن راضی و همکاران، ۱۴۰۱).

از دیگر کاربردهای مهم اینترنت اشیاء می‌توان به مدیریت هوشمند واکنش اضطراری اشاره کرد. پس از شناسایی خطر، سامانه‌های IoT قادرند به صورت خودکار هشدارهای لازم را برای کارکنان، مدیران ایمنی و تیم‌های امدادی ارسال کنند و همزمان اطلاعات مربوط به محل حادثه، شدت خطر و شرایط محیطی را در اختیار آنان قرار دهند. در برخی سامانه‌های پیشرفته، تجهیزات اطفای حریق، سیستم‌های تهویه، درب‌های اضطراری و مسیرهای تخلیه نیز به شبکه اینترنت اشیاء متصل هستند و می‌توانند به صورت خودکار فعال شوند. این قابلیت موجب افزایش سرعت واکنش، کاهش زمان تخلیه اضطراری و جلوگیری از گسترش آتش در بخش‌های مختلف مجموعه صنعتی می‌شود (Damaševičius et al., ۲۰۲۳). علاوه بر این، اتصال سامانه‌های اینترنت اشیاء به فناوری‌های هوش مصنوعی و تحلیل داده امکان پیش‌بینی روند توسعه حریق و انتخاب مناسب‌ترین راهبردهای کنترلی را فراهم می‌کند که این امر نقش مهمی در کاهش خسارات انسانی و مالی دارد (Peng & Ke, ۲۰۲۳؛ Park et al., ۲۰۲۳).

کاربرد دیگر اینترنت اشیاء در حوزه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه تجهیزات ایمنی و عملیاتی است. بسیاری از حوادث آتش‌سوزی ناشی از نقص تجهیزات الکتریکی، خرابی سیستم‌های کنترلی یا فرسودگی تجهیزات صنعتی هستند. حسگرهای متصل به اینترنت اشیاء می‌توانند وضعیت عملکرد تجهیزات را به صورت مداوم پایش کرده و علائم اولیه خرابی را شناسایی کنند. در نتیجه، سازمان‌ها قادر خواهند بود پیش از وقوع نقص فنی و ایجاد شرایط خطرناک، اقدامات تعمیراتی لازم را انجام دهند. این رویکرد نه تنها احتمال

وقوع حریق را کاهش می‌دهد، بلکه موجب افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات، کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقای سطح ایمنی سازمان نیز می‌شود. به همین دلیل، اینترنت اشیاء امروزه به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای پیشگیری از حریق و مدیریت هوشمند ریسک در محیط‌های صنعتی شناخته می‌شود و انتظار می‌رود با توسعه فناوری‌های نوین، نقش آن در آینده ایمنی صنعتی بیش از پیش گسترش یابد (جهانیان و نابغ وطن، ۱۴۰۳؛ Zhang et al., ۲۰۲٤؛ موسوی و همکاران، ۱۴۰۳).

۵. مزایا و فرصت‌های پیشگیرانه سیستم‌های هوشمند در مدیریت ایمنی حریق

سیستم‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء و فناوری‌های نوین دیجیتال، رویکرد مدیریت ایمنی حریق را از حالت سنتی و واکنشی به سمت رویکردی پیشگیرانه، داده‌محور و پیش‌بینانه سوق داده‌اند. مهم‌ترین مزیت این سامانه‌ها، توانایی در «تشخیص زودهنگام خطر» و جلوگیری از تبدیل شرایط بحرانی به حادثه واقعی است. در محیط‌های صنعتی که به دلیل وجود مواد قابل اشتعال و فرایندهای پیچیده همواره در معرض ریسک بالا قرار دارند، این ویژگی نقش حیاتی دارد. استفاده از شبکه‌های حسگری هوشمند باعث می‌شود تغییرات جزئی در دما، دود یا گازهای خطرناک در همان مراحل اولیه شناسایی شده و هشدارهای لازم صادر گردد. این قابلیت در مطالعات مختلف به عنوان عامل کلیدی در کاهش خسارات انسانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی معرفی شده است (Al Hasani et al., ۲۰۲۲؛ Morchid et al., ۲۰۲٤). همچنین پژوهش‌های مرتبط با تحلیل ریسک حریق نشان می‌دهد که بسیاری از حوادث ناشی از ضعف در سیستم‌های هشدار اولیه است و فناوری‌های هوشمند می‌توانند این شکاف را به‌طور مؤثر جبران کنند (عسگری و همکاران، ۱۴۰۲). از این منظر، سیستم‌های هوشمند نه‌تنها ابزار تشخیص، بلکه یک لایه پیشگیرانه فعال در ساختار ایمنی محسوب می‌شوند.

یکی دیگر از مزایای اساسی این سیستم‌ها، «یکپارچه‌سازی داده‌ها و تصمیم‌گیری بلادرنگ» است که امکان مدیریت جامع ایمنی را فراهم می‌سازد. در معماری‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء، داده‌های حاصل از حسگرهای متعدد در یک بستر واحد جمع‌آوری و در لحظه تحلیل می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود مدیران ایمنی بتوانند تصویری جامع و به‌روز از وضعیت محیطی در اختیار داشته باشند و تصمیمات خود را بر اساس داده‌های واقعی اتخاذ کنند. چنین رویکردی در مطالعات مربوط به شهرهای هوشمند و سامانه‌های ایمنی صنعتی به عنوان یکی از عوامل کلیدی افزایش تاب‌آوری سیستم‌ها معرفی شده است (Anabestani et al., ۲۰۲٤؛ Mahdnejad, ۲۰۲۵). از سوی دیگر، در پژوهش‌های مرتبط با سامانه‌های مدیریت حریق مبتنی بر IoT نیز تأکید شده است که یکپارچگی داده‌ها موجب افزایش سرعت واکنش و کاهش خطای انسانی در شرایط بحرانی می‌شود (Palamar & Palamar, ۲۰۲۳). این ویژگی به‌ویژه در صنایع بزرگ مانند نیروگاه‌ها و پتروشیمی‌ها اهمیت دارد، جایی که تصمیم‌گیری سریع و دقیق می‌تواند از گسترش یک حادثه گسترده جلوگیری کند (سید حسن راضی و همکاران، ۱۴۰۱).

از منظر فرصت‌های پیشگیرانه، ترکیب فناوری‌های هوشمند با هوش مصنوعی و تحلیل کلان‌داده‌ها، امکان «پیش‌بینی حوادث قبل از وقوع» را فراهم کرده است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین با تحلیل داده‌های تاریخی و بلادرنگ قادرند الگوهای پنهان خطر را شناسایی کرده و احتمال وقوع آتش‌سوزی را در بخش‌های مختلف یک مجموعه صنعتی تخمین بزنند. این قابلیت موجب تحول اساسی در رویکرد مدیریت ایمنی شده است، به‌گونه‌ای که تمرکز از واکنش به حادثه به پیشگیری از آن منتقل شده است. پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه مدیریت اضطراری نشان داده‌اند که استفاده از تحلیل داده‌های هوشمند می‌تواند دقت پیش‌بینی مخاطرات را به میزان قابل

توجهی افزایش دهد (Peng & Ke, ۲۰۲۳). همچنین فناوری‌هایی مانند دوقلوی دیجیتال امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف حریق را فراهم کرده و به مدیران اجازه می‌دهند پیش از وقوع حادثه، بهترین استراتژی واکنش را انتخاب کنند (Jiang et al., ۲۰۲۳؛ Zhang et al., ۲۰۲٤). این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های هوشمند نه‌تنها در شناسایی خطر، بلکه در مدیریت پیشگیرانه و کاهش ریسک نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند.

در نهایت، یکی از مهم‌ترین فرصت‌های پیشگیرانه این فناوری‌ها، «بهبود نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه تجهیزات صنعتی» و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های ایمنی است. بسیاری از حوادث حریق ناشی از خرابی تجهیزات الکتریکی، فرسودگی سیستم‌ها یا نقص در عملکرد تجهیزات کنترلی هستند. سیستم‌های هوشمند مبتنی بر IoT با پایش مستمر وضعیت تجهیزات، امکان شناسایی علائم اولیه خرابی را فراهم می‌کنند و بدین ترتیب از وقوع شرایط خطرناک جلوگیری می‌نمایند. این موضوع در مطالعات مرتبط با سامانه‌های هوشمند ایمنی صنعتی به عنوان یکی از عوامل مهم کاهش ریسک معرفی شده است (جهانیان و نابغ وطن، ۱۴۰۳). همچنین پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از شبکه‌های هوشمند در مدیریت ایمنی ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها موجب افزایش طول عمر تجهیزات و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود (Park et al., ۲۰۲۳). از سوی دیگر، توسعه سامانه‌های یکپارچه مبتنی بر اینترنت خدمات اضطراری (IoES) نیز موجب بهبود هماهنگی میان واحدهای امدادی و افزایش سرعت واکنش در شرایط بحرانی شده است (Damaševičius et al., ۲۰۲۳). در مجموع، این فناوری‌ها با ایجاد یک اکوس

۶. چالش‌های فنی و اجرایی پیاده‌سازی اینترنت اشیاء در ایمنی حریق

با وجود رشد سریع فناوری‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء و نقش برجسته آن‌ها در ارتقای ایمنی حریق، پیاده‌سازی این سامانه‌ها در محیط‌های صنعتی با مجموعه‌ای از چالش‌های چندلایه مواجه است. این چالش‌ها نه‌تنها ماهیت فنی دارند، بلکه ابعاد زیرساختی، انسانی، اقتصادی و حقوقی را نیز در بر می‌گیرند. در واقع، هرچه سطح هوشمندسازی سیستم‌های ایمنی افزایش می‌یابد، پیچیدگی الزامات پیاده‌سازی و نگهداری نیز بیشتر می‌شود. از این‌رو، تحلیل دقیق موانع موجود برای موفقیت در استقرار سامانه‌های IoT در حوزه مدیریت حریق، یک ضرورت اساسی در مطالعات HSE و مهندسی ایمنی محسوب می‌شود.

۱. چالش‌های زیرساختی و ارتباطی: یکی از بنیادی‌ترین چالش‌ها در پیاده‌سازی اینترنت اشیاء در ایمنی حریق، ضعف یا ناکارآمدی زیرساخت‌های ارتباطی در محیط‌های صنعتی است. سامانه‌های IoT برای عملکرد مؤثر نیازمند شبکه‌های پایدار، پرسرعت و کم‌تاخیر هستند، در حالی که بسیاری از محیط‌های صنعتی—به‌ویژه در صنایع نفت، گاز و معادن—با محدودیت‌های جدی در پوشش شبکه، نویزهای الکترومغناطیسی و قطع و وصل ارتباط مواجه‌اند. این مسئله می‌تواند موجب تأخیر در انتقال داده‌های حیاتی و کاهش دقت سیستم‌های هشداردهنده شود. از سوی دیگر، نبود یکپارچگی میان پروتکل‌های ارتباطی مختلف (مانند ZigBee، LoRa، Wi-Fi و G۵ صنعتی) باعث ایجاد ناهمگونی در تبادل داده‌ها می‌شود. در چنین شرایطی، داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرهای مختلف ممکن است به‌صورت کامل و هم‌زمان در دسترس سیستم مرکزی قرار نگیرند که این موضوع کارایی سامانه‌های تشخیص زودهنگام حریق را کاهش می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که یکپارچگی شبکه‌ای و توسعه زیرساخت‌های ارتباطی مقاوم، یکی از پیش‌شرط‌های اصلی موفقیت سیستم‌های ایمنی مبتنی بر IoT است (Peng & Ke, ۲۰۲۳؛ Damaševičius et al., ۲۰۲۳).

۲. محدودیت‌های فنی حسگرها و تجهیزات: حسگرها به عنوان هسته اصلی سامانه‌های اینترنت اشیاء در ایمنی حریق، با محدودیت‌های فنی متعددی روبه‌رو هستند. یکی از مهم‌ترین این محدودیت‌ها، دقت و پایداری عملکرد در شرایط محیطی سخت صنعتی است. عواملی مانند دمای بالا، رطوبت، گردوغبار، مواد خورنده و ارتعاشات شدید می‌توانند عملکرد حسگرها را تحت تأثیر قرار دهند و موجب خطاهای اندازه‌گیری یا هشدارهای کاذب شوند. علاوه بر این، محدودیت در عمر باتری و نیاز به تعمیر و کالیبراسیون دوره‌ای، از دیگر چالش‌های مهم در استفاده گسترده از حسگرهای IoT است. در بسیاری از موارد، هزینه نگهداری و تعویض حسگرها در مقیاس بزرگ می‌تواند بار مالی قابل توجهی برای سازمان‌ها ایجاد کند. همچنین، نبود استانداردهای یکپارچه در طراحی و تولید تجهیزات IoT باعث می‌شود سازگاری میان دستگاه‌های مختلف به‌طور کامل تضمین نشود. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از حسگرهای چندمنظوره و مقاوم‌سازی تجهیزات می‌تواند بخشی از این محدودیت‌ها را کاهش دهد (Al Hasani et al., ۲۰۲۲؛ Morchid et al., ۲۰۲٤).

۳. امنیت سایبری و حفاظت از داده‌ها: با گسترش اتصال تجهیزات صنعتی به شبکه‌های اینترنت اشیاء، سطح جدیدی از آسیب‌پذیری‌های سایبری ایجاد شده است. سامانه‌های ایمنی حریق که به‌صورت لحظه‌ای داده‌های حساس محیطی را جمع‌آوری و منتقل می‌کنند، در صورت عدم تأمین امنیت مناسب، می‌توانند هدف حملات سایبری قرار گیرند. این حملات ممکن است شامل دستکاری داده‌های حسگرها، اختلال در عملکرد سیستم‌های هشدار یا حتی از کار انداختن کامل سامانه‌های ایمنی باشد. یکی از چالش‌های مهم در این حوزه، محدودیت توان پردازشی دستگاه‌های IoT برای اجرای الگوریتم‌های پیچیده رمزنگاری است. از سوی دیگر، تنوع زیاد تجهیزات و نبود استانداردهای امنیتی واحد، مدیریت امنیت شبکه را دشوارتر می‌کند. مطالعات اخیر تأکید دارند که امنیت سایبری باید به عنوان یکی از ارکان اصلی طراحی سامانه‌های IoT در ایمنی صنعتی در نظر گرفته شود و نه یک لایه افزوده (Damaševičius et al., ۲۰۲۳؛ Park et al., ۲۰۲۳).

٤. قابلیت اطمینان و پایداری سامانه‌ها: قابلیت اطمینان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد در سامانه‌های ایمنی حریق است. هرگونه خطا، تأخیر یا اختلال در عملکرد سیستم‌های IoT می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی سیستم‌های هوشمند، هنوز هم احتمال بروز خطاهای نرم‌افزاری، قطعی شبکه یا نقص در پردازش داده‌ها وجود دارد. یکی دیگر از چالش‌ها، وابستگی شدید سامانه‌های IoT به زیرساخت‌های مرکزی و پردازش ابری است. در صورت بروز اختلال در سرورها یا شبکه‌های ارتباطی، ممکن است کل سیستم ایمنی با کاهش عملکرد مواجه شود. بنابراین، طراحی سیستم‌های افزونه‌پذیر (Redundant Systems) و استفاده از معماری‌های توزیع‌شده برای افزایش تاب‌آوری سامانه‌ها ضروری است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که افزایش سطح افزونگی و استفاده از الگوریتم‌های خودترمیم‌گر می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم‌های ایمنی هوشمند را به طور قابل توجهی ارتقا دهد (Jiang et al., ۲۰۲۳).

٥. هزینه‌های استقرار و نگهداری: هزینه‌های اولیه پیاده‌سازی سامانه‌های اینترنت اشیاء در ایمنی حریق معمولاً بالا است و شامل خرید تجهیزات، نصب زیرساخت‌های ارتباطی، توسعه نرم‌افزارها و آموزش نیروی انسانی می‌شود. علاوه بر هزینه‌های اولیه، هزینه‌های نگهداری، به‌روزرسانی نرم‌افزارها، تعویض حسگرها و مدیریت داده‌ها نیز در بلندمدت قابل توجه است. برای بسیاری از سازمان‌های صنعتی، به‌ویژه صنایع کوچک و متوسط، این هزینه‌ها می‌تواند مانعی جدی برای پذیرش فناوری‌های IoT باشد. اگرچه در بلندمدت این سامانه‌ها باعث کاهش هزینه‌های ناشی از حوادث و افزایش بهره‌وری می‌شوند، اما توجیه

اقتصادی اولیه همچنان یکی از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های سرمایه‌گذاری تدریجی و استفاده از زیرساخت‌های ابری می‌تواند بخشی از این فشار مالی را کاهش دهد (Park et al., ۲۰۲۳؛ Peng & Ke, ۲۰۲۳).

۶. چالش‌های انسانی، آموزشی و مدیریتی: یکی از مهم‌ترین موانع در پیاده‌سازی موفق سامانه‌های IoT در ایمنی حریق، کمبود نیروی انسانی متخصص و آشنا با فناوری‌های نوین است. بسیاری از کارکنان HSE و مدیران صنعتی هنوز با مفاهیم پیشرفته‌ای مانند تحلیل داده، یادگیری ماشین و معماری اینترنت اشیاء آشنایی کافی ندارند. این موضوع می‌تواند موجب استفاده نادرست یا ناکارآمد از سامانه‌های هوشمند شود. از سوی دیگر، مقاومت سازمانی در برابر تغییر نیز یکی از چالش‌های مهم مدیریتی است. در بسیاری از سازمان‌ها، جایگزینی روش‌های سنتی با سیستم‌های هوشمند با مقاومت کارکنان مواجه می‌شود. بنابراین، آموزش مستمر، توسعه مهارت‌های دیجیتال و ایجاد فرهنگ سازمانی مبتنی بر فناوری، از الزامات اساسی موفقیت در این حوزه است. پژوهش‌ها تأکید دارند که عامل انسانی نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی سامانه‌های ایمنی هوشمند دارد (جهانیان و نابغ وطن، ۱۴۰۳).

۷. موانع قانونی و استانداردسازی: نبود چارچوب‌های قانونی جامع و استانداردهای بین‌المللی یکپارچه یکی دیگر از چالش‌های مهم در توسعه سامانه‌های IoT در ایمنی حریق است. در حال حاضر، بسیاری از کشورها هنوز مقررات مشخصی برای طراحی، نصب، بهره‌برداری و ارزیابی عملکرد این سامانه‌ها تدوین نکرده‌اند. این خلأ قانونی می‌تواند موجب عدم اطمینان سازمان‌ها در سرمایه‌گذاری و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین شود. همچنین نبود استانداردهای مشترک میان تولیدکنندگان تجهیزات، مشکل سازگاری و یکپارچگی سیستم‌ها را تشدید می‌کند. از این‌رو، توسعه استانداردهای بین‌المللی و تدوین مقررات تخصصی در حوزه ایمنی هوشمند، یکی از پیش‌نیازهای اصلی گسترش اینترنت اشیاء در مدیریت حریق محسوب می‌شود (Anabestani et al., ۲۰۲٤؛ Elham, ۲۰۲٦).

در مجموع، چالش‌های پیاده‌سازی اینترنت اشیاء در ایمنی حریق را می‌توان مجموعه‌ای از موانع به‌هم‌پیوسته دانست که حل آن‌ها نیازمند رویکردی جامع، میان‌رشته‌ای و هماهنگ میان حوزه‌های مهندسی، مدیریت، حقوق و علوم داده است. موفقیت در غلبه بر این چالش‌ها می‌تواند مسیر توسعه نسل جدید سامانه‌های ایمنی هوشمند و پیشگیرانه را هموار سازد.

۷. یافته‌ها

۷-۱. روندهای پژوهشی در حوزه ایمنی حریق هوشمند

بررسی ادبیات علمی در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که حوزه ایمنی حریق هوشمند به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تحول دیجیتال و به‌ویژه اینترنت اشیاء قرار گرفته است. روندهای پژوهشی نشان می‌دهند که تمرکز مطالعات از «تشخیص ساده حریق» به سمت «پیش‌بینی، تحلیل داده‌محور و مدیریت هوشمند ریسک» تغییر یافته است. در این میان، ترکیب فناوری‌های IoT با هوش مصنوعی، کلان‌داده و دوقلوی دیجیتال بیشترین سهم را در مقالات جدید به خود اختصاص داده است. همچنین افزایش مطالعات مبتنی بر شبیه‌سازی و مدل‌سازی دیجیتال نشان‌دهنده حرکت به سمت رویکردهای پیشگیرانه است. از سوی دیگر، بررسی روند انتشار مقالات

نشان می‌دهد که پس از سال ۲۰۲۰ رشد چشمگیری در پژوهش‌های مرتبط با سیستم‌های هوشمند ایمنی حریق رخ داده است. این رشد عمدتاً ناشی از توسعه شهرهای هوشمند، صنایع ۴.۰ و نیاز به مدیریت ریسک در محیط‌های پیچیده صنعتی بوده است. در نتیجه، می‌توان گفت که حوزه ایمنی حریق هوشمند در حال تبدیل شدن به یکی از حوزه‌های میان‌رشته‌ای کلیدی در مهندسی ایمنی و علوم داده است.

جدول ۱. روندهای پژوهشی در حوزه ایمنی حریق هوشمند

سال/دوره	محور پژوهشی غالب	فناوری غالب	نتیجه کلیدی
۲۰۱۵-۲۰۱۸	سیستم‌های هشدار سنتی	سنسورهای پایه	تمرکز بر تشخیص اولیه
۲۰۱۸-۲۰۲۰	توسعه IoT اولیه	شبکه حسگر بی‌سیم	افزایش سرعت هشدار
۲۰۲۰-۲۰۲۲	تحلیل داده‌های ایمنی	کلان‌داده	بهبود پیش‌بینی
۲۰۲۲-۲۰۲۳	هوش مصنوعی در حریق	یادگیری ماشین	تشخیص الگوهای خطر
۲۰۲۳-۲۰۲۴	دوقلوی دیجیتال	مدل‌سازی مجازی	شبیه‌سازی حوادث
۲۰۲۴-۲۰۲۵	سیستم‌های یکپارچه AIoT	ترکیب IoT+AI	مدیریت هوشمند ریسک
۲۰۲۵ به بعد	سیستم‌های خودمختار	AIپیشرفته	پیشگیری خودکار حریق

۷-۲. مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که فناوری‌های مورد استفاده در ایمنی حریق هوشمند به‌صورت چندلایه و ترکیبی عمل می‌کنند. اینترنت اشیاء به‌عنوان زیرساخت اصلی، داده‌های محیطی را جمع‌آوری کرده و سایر فناوری‌ها مانند هوش مصنوعی، کلان‌داده و رایانش ابری بر روی این داده‌ها عملیات تحلیلی انجام می‌دهند. این ترکیب باعث شده است که سامانه‌های ایمنی از حالت واکنشی به حالت پیش‌بینانه تغییر یابند. در بسیاری از پژوهش‌ها، حسگرهای هوشمند به‌عنوان مهم‌ترین منبع داده معرفی شده‌اند، در حالی که الگوریتم‌های یادگیری ماشین نقش کلیدی در تحلیل این داده‌ها دارند. همچنین دوقلوی دیجیتال به‌عنوان ابزار شبیه‌سازی، امکان ارزیابی سناریوهای مختلف حریق را فراهم کرده است.

جدول ۲. مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در ایمنی حریق هوشمند

فناوری	نقش اصلی	سطح اثرگذاری	کاربرد کلیدی
اینترنت اشیاء	جمع‌آوری داده	بسیار بالا	پایش لحظه‌ای
هوش مصنوعی	تحلیل داده	بسیار بالا	پیش‌بینی حریق
کلان‌داده	پردازش داده حجیم	بالا	تحلیل الگوها

رایانش ابری	ذخیره‌سازی	بالا	مدیریت داده
دوقلوی دیجیتال	شبیه‌سازی	متوسط تا بالا	مدل‌سازی حوادث
شبکه‌های حسگر	تشخیص اولیه	بسیار بالا	هشدار سریع
سیستم‌های کنترلی هوشمند	واکنش خودکار	بالا	اطفای خودکار

۷-۳. اثرات سیستم‌های هوشمند بر کاهش ریسک حریق

یافته‌های مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های هوشمند مبتنی بر IoT تأثیر قابل توجهی بر کاهش ریسک حریق دارد. مهم‌ترین اثر این سیستم‌ها، کاهش زمان تشخیص و افزایش سرعت واکنش است که به‌طور مستقیم موجب کاهش خسارات انسانی و مالی می‌شود. علاوه بر این، سیستم‌های هوشمند از طریق پایش مستمر شرایط محیطی، احتمال وقوع حریق را در مراحل اولیه شناسایی می‌کنند. همچنین نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از تحلیل داده و هوش مصنوعی موجب کاهش خطای انسانی در تصمیم‌گیری‌های اضطراری شده است. این موضوع به‌ویژه در صنایع پرخطر مانند نفت و گاز اهمیت ویژه‌ای دارد.

جدول ۳. اثرات سیستم‌های هوشمند بر کاهش ریسک حریق

شاخص اثر	قبل از هوشمندسازی	بعد از هوشمندسازی	میزان بهبود
زمان تشخیص حریق	بالا	بسیار پایین	کاهش ۶۰–۸۰٪
نرخ هشدار کاذب	بالا	پایین	کاهش ۴۰–۷۰٪
سرعت واکنش	کند	بسیار سریع	افزایش ۵۰٪+
دقت پیش‌بینی	پایین	بالا	افزایش چشمگیر
خسارات مالی	زیاد	کم	کاهش قابل توجه
تلفات انسانی	محتمل	محدود	کاهش شدید
قابلیت پایش	محدود	لحظه‌ای	بهبود کامل

۷-۴. تحلیل چالش‌ها و محدودیت‌های گزارش‌شده

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که با وجود مزایای گسترده، پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند با چالش‌های متعددی همراه است. مهم‌ترین چالش‌ها شامل مسائل زیرساختی، امنیت سایبری، هزینه‌های بالا و کمبود نیروی انسانی متخصص است. همچنین نبود استانداردهای یکپارچه یکی از موانع اصلی توسعه این فناوری‌ها محسوب می‌شود. چالش امنیت سایبری در سال‌های اخیر اهمیت

بیشتری یافته است، زیرا اتصال تجهیزات صنعتی به شبکه اینترنت، سطح جدیدی از آسیب‌پذیری‌ها را ایجاد کرده است. علاوه بر این، مشکلات مربوط به سازگاری تجهیزات و کیفیت داده‌ها نیز در بسیاری از مطالعات گزارش شده است.

جدول ۴. چالش‌ها و محدودیت‌های سیستم‌های هوشمند ایمنی حریق

نوع چالش	شرح مشکل	شدت اثر	راهکار پیشنهادی
زیرساختی	ضعف شبکه ارتباطی	بالا	توسعه 5G صنعتی
فنی	خطای حسگرها	متوسط تا بالا	کالیبراسیون دوره‌ای
امنیتی	حملات سایبری	بسیار بالا	رمزنگاری پیشرفته
اقتصادی	هزینه بالا	بالا	سرمایه‌گذاری مرحله‌ای
انسانی	کمبود تخصص	بالا	آموزش نیروی HSE
استانداردی	نبود چارچوب واحد	متوسط	تدوین استاندارد جهانی
عملیاتی	پیچیدگی سیستم	متوسط	ساده‌سازی معماری

۷-۵. فرصت‌های آینده برای توسعه سامانه‌های ایمنی هوشمند

بررسی روندهای پژوهشی نشان می‌دهد که آینده سیستم‌های ایمنی حریق به سمت هوشمندسازی کامل و خودمختاری حرکت می‌کند. ترکیب هوش مصنوعی پیشرفته، اینترنت اشیاء و دوقلوی دیجیتال می‌تواند نسل جدیدی از سامانه‌های ایمنی پیشگیرانه را ایجاد کند. در این سامانه‌ها، تصمیم‌گیری به‌صورت خودکار و بدون دخالت انسانی انجام خواهد شد. از دیگر فرصت‌های آینده می‌توان به توسعه سیستم‌های پیش‌بینی بلادرنگ، یکپارچه‌سازی جهانی داده‌های ایمنی و استفاده از ربات‌های هوشمند در اطفای حریق اشاره کرد. همچنین توسعه شهرهای هوشمند زمینه مناسبی برای گسترش این فناوری‌ها فراهم می‌کند.

۷-۶. چارچوب پیشنهادی برای صنایع آینده

بر اساس یافته‌های این مطالعه، چارچوب پیشنهادی برای صنایع آینده شامل چهار لایه اصلی است: لایه حسگرها، لایه ارتباطی، لایه پردازش هوشمند و لایه تصمیم‌گیری خودکار. این چارچوب به‌گونه‌ای طراحی شده است که امکان پایش مستمر، تحلیل لحظه‌ای و واکنش خودکار به حوادث را فراهم می‌سازد. در این مدل، داده‌ها ابتدا توسط حسگرهای هوشمند جمع‌آوری شده و سپس از طریق شبکه‌های IoT به سیستم‌های ابری منتقل می‌شوند. در مرحله بعد، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و تحلیل کلان‌داده، داده‌ها را پردازش کرده و در نتیجه تصمیمات کنترلی به‌صورت خودکار اجرا می‌شوند. این چارچوب می‌تواند به‌عنوان یک مدل مرجع برای طراحی سامانه‌های ایمنی حریق در صنایع آینده مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی کاربرد سیستم‌های هوشمند و اینترنت اشیاء (IoT) در مدیریت ایمنی حریق در محیط‌های صنعتی انجام شد و نشان داد که تحول دیجیتال نقش بنیادینی در تغییر رویکردهای سنتی ایمنی از حالت واکنشی به رویکردهای پیشگیرانه و پیش‌بینانه داشته است. یافته‌ها حاکی از آن است که ترکیب فناوری‌های نوینی همچون اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، کلان‌داده و دوقلوی دیجیتال توانسته است سطح جدیدی از کارآمدی در شناسایی، پایش و کنترل مخاطرات حریق ایجاد کند و زمینه را برای توسعه سامانه‌های ایمنی هوشمند فراهم سازد.

بررسی ادبیات نشان داد که استفاده از شبکه‌های حسگر هوشمند و سامانه‌های متصل به IoT موجب کاهش چشمگیر زمان تشخیص حریق، افزایش دقت هشدارها و بهبود سرعت واکنش در شرایط اضطراری شده است. این موضوع به‌ویژه در صنایع پرخطر مانند نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاه‌ها اهمیت حیاتی دارد، زیرا در این محیط‌ها کوچک‌ترین تأخیر در شناسایی حادثه می‌تواند پیامدهای گسترده انسانی و اقتصادی به همراه داشته باشد. همچنین مشخص شد که تحلیل داده‌های بلادرنگ و بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین امکان پیش‌بینی شرایط بحرانی را فراهم کرده و نقش مهمی در جلوگیری از وقوع حوادث ایفا می‌کند. از سوی دیگر، نتایج مطالعه نشان داد که علی‌رغم مزایای قابل توجه این فناوری‌ها، پیاده‌سازی آن‌ها با چالش‌هایی نظیر ضعف زیرساخت‌های ارتباطی، مسائل امنیت سایبری، هزینه‌های بالا، محدودیت‌های فنی حسگرها و کمبود نیروی انسانی متخصص مواجه است. این چالش‌ها بیانگر آن هستند که موفقیت در استقرار سامانه‌های ایمنی هوشمند نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی شامل توسعه زیرساخت‌ها، استانداردسازی، آموزش نیروی انسانی و ارتقای امنیت شبکه است. بنابرین آینده مدیریت ایمنی حریق در محیط‌های صنعتی به‌طور مستقیم با توسعه فناوری‌های هوشمند و یکپارچه‌سازی آن‌ها با سامانه‌های تصمیم‌گیری گره خورده است. حرکت به سمت سیستم‌های خودکار، پیش‌بینانه و داده‌محور نه‌تنها موجب افزایش سطح ایمنی و کاهش ریسک حوادث خواهد شد، بلکه بهره‌وری سازمانی و پایداری زیست‌محیطی را نیز به‌طور قابل توجهی ارتقا خواهد داد.

منابع

۲- موسوی, سبحان اردکانی, سهیل, جوزی. (۱۴۰۳). شناسایی و رتبه‌بندی عوامل حیاتی مؤثر بر ایمنی آتش‌سوزی در ساختمان‌های بلندمرتبه شهر کرج با استفاده از تلفیق روش‌های ANP-DEMATEL. مجله مهندسی بهداشت محیط, ۱۱(۴), ۴۲۲-۴۴۲.

۳- سید حسن راضی, حسین مرادپور گیلوائی, محمد علیزاده پیربستی. (۱۴۰۱). برنامه‌ریزی اطفای حریق نیروگاه برق. نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری, ۵(۱۶), ۲۱۴-۲۲۳.

٤- عسگری, زراوشانی, قلعه نوی, مهران, اکبری شهرستانکی. (۱۴۰۲). تحلیل ریسک حریق با استفاده از روش FSES در یکی از بیمارستانهای آموزشی دانشگاه علوم پزشکی قزوین. بهداشت و ایمنی کار, ۱۳(۲), ۲۶۹-۲۸۷.

٥- کرکه آبادی. (۱۳۹۹). خانه های هوشمند بی ام اس مبتنی بر شبکه های اینترنت اشیا. فصلنامه علمی دانش انتظامی ویژه شرق تهران, ۷(۲۶), ۸۵-۱۰۲.

٦- جهانیان, نابغ وطن. (۱۴۰۳). تأثیر بهکارگیری اینترنت اشیا در ایجاد خودسازندگی سیستمی به‌منظور بهبود عملکرد علائم و نشانه‌های ایمنی صنعتی. پژوهش در مدیریت تولید و عملیات, ۱۵(۱), ۷۱-۸۸.

- Mahdnejad, H. (۲۰۲٥). Smart City Knowledge Mapping: An Analytical Approach Using VOSviewer. Urban Economics, ۱۰(۲), ۳٥-٥۰.
- Anabestani, A., Kalantari, M., Niknami, N. (۲۰۲٤). Spatial Analysis of Smart City Indicators Based on the Internet of Things (IoT) in the Metropolis of Mashhad. Spatial Planning, ۱۳(٤), ۷۱-۹٦.
- Elham, Z. T. (۲۰۲٦). Smart City Planning Approaches in the Face of War (Pre-and Post-Conflict). Reports, ۳۳(۱۲), e۲۱۳۹۰.
- Palamar, A., Palamar, M. (۲۰۲۳). Fire Safety Monitoring System Based on Internet of Things. In CITI (pp. ۱٦٤-۱۷۲).
- Peng, T., Ke, W. (۲۰۲۳). Urban fire emergency management based on big data intelligent processing system and Internet of Things. Optik, ۲۷۳, ۱۷۰٤۳۳.
- Park, S., Lee, S., Jang, H., Yoon, G., Choi, M. I., Kang, B., ... Park, S. (۲۰۲۳). Smart fire safety management system (SFSMS) connected with energy management for sustainable service in smart building infrastructures. Buildings, ۱۳(۱۲), ۳۰۱۸.
- Al Hasani, I. M. M., Kazmi, S. I. A., Shah, R. A., Hasan, R., Hussain, S. (۲۰۲۲). IoT based fire alerting smart system. Sir Syed University Research Journal of Engineering Technology, ۱۲(۲), ٤٦-٥۰.
- Morchid, A., Oughannou, Z., El Alami, R., Qjidaa, H., Jamil, M. O., Khalid, H. M. (۲۰۲٤). Integrated internet of things (IoT) solutions for early fire detection in smart agriculture. Results in engineering, ۲٤, ۱۰۳۳۹۲.
- Jiang, L., Shi, J., Wang, C., Pan, Z. (۲۰۲۳). Intelligent control of building fire protection system using digital twins and semantic web technologies. Automation in construction, ۱٤۷, ۱۰٤۷۲۸.
- Damaševičius, R., Bacanin, N., Misra, S. (۲۰۲۳). From sensors to safety: Internet of Emergency Services (IoES) for emergency response and disaster management. Journal of sensor and actuator networks, ۱۲(۳), ٤۱.
- Sayeduzzaman, M., Hasan, T., Nasser, A. A., Negi, A. (۲۰۲٤). An internet of things-integrated home automation with smart security system. Automated Secure Computing for Next-Generation Systems, ۲٤۳-۲۷۳.
- Zhang, X., Jiang, Y., Wu, X., Nan, Z., Jiang, Y., Shi, J., ... Huang, G. G. (۲۰۲٤). AIoT-enabled digital twin system for smart tunnel fire safety management. Developments in the Built Environment, ۱۸, ۱۰۰۳۸۱.