

فناوری‌های نوین در آتش‌نشانی: آینده‌ای ایمن‌تر

حسین فاتحی^۱

^۱ کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه فضیلت سمنان، ایران.

نام نویسنده مسئول:

حسین فاتحی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

چکیده

مقاله حاضر به بررسی فناوری‌های نوین در حوزه آتش‌نشانی و تأثیر آن‌ها بر بهبود ایمنی و کارایی عملیات اطفای حریق می‌پردازد. با پیشرفت‌های اخیر در فناوری اطلاعات، ارتباطات، و حسگرها، روش‌های سنتی مقابله با آتش به تدریج جای خود را به راهکارهای هوشمند و کارآمدتر داده‌اند. این مقاله به تحلیل فناوری‌هایی نظیر پهپادها، ربات‌ها، حسگرهای دما و دود، سیستم‌های مدیریت بحران هوشمند می‌پردازد با توجه به ماهیت کیفی بودن تحقیق برای مطالعه روش تحلیل محتوا انتخاب شد. تحلیل محتوا یکی از مهمترین روش‌های تحقیق کیفی است که در پی شناخت اطلاعات به تحلیل آنها می‌پردازد در این مقاله فناوری‌های نوین در آتش‌نشانی: آینده‌ای ایمن‌تر، مورد مطالعه قرار گرفته است که به تحلیل کیفی فناوری‌های نوین در آتش‌نشانی پرداخته شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از این فناوری‌ها، می‌توان نه تنها زمان واکنش و کارایی تیم‌های آتش‌نشانی را بهبود بخشید، بلکه ایمنی شهروندان و حفظ منابع طبیعی را نیز تضمین کرد. به علاوه، این مقاله به آینده‌ای امن‌تر در مواجهه با حوادث آتش‌سوزی نوید می‌دهد و نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه را تأکید می‌کند.

واژگان کلیدی: آتش‌نشانی، اطفاء حریق، آتش‌سوزی، ایمن، فناوری.

مقدمه

در دنیای امروز، با پیشرفت سریع فناوری، ابزارها و روش‌های نوینی برای مقابله با چالش‌های مختلف، به‌ویژه حوادث آتش‌سوزی، به وجود آمده است. آتش‌سوزی‌ها نه تنها تهدیدی برای جان انسان‌ها و اموال هستند، بلکه می‌توانند آسیب‌های جبران‌ناپذیری به محیط زیست نیز وارد کنند. از این رو، کاهش خطرات ناشی از آتش‌سوزی و بهبود روش‌های اطفای حریق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آتش‌سوزی‌ها به طور فزاینده‌ای به یک مشکل جهانی تبدیل شده‌اند و آسیب‌های قابل توجهی هم به جمعیت انسانی و هم به اکوسیستم‌ها وارد می‌کنند. آتش‌سوزی در طول تاریخ بشریت یک ابزار ارزشمند بوده است، با این حال، اگر به دقت کنترل نشود، می‌تواند فاجعه‌ای به همراه داشته باشد. با پیشرفت دستگاه‌های الکترونیکی، حسگرها،

ارتباطات اطلاعاتی، و فناوری‌ها، صنعت ساخت و ساز در حال تجربه تحول است. این امر منجر به ظهور بسیاری از پیشرفت‌های تکنولوژیکی شده است. انقلاب دیجیتال به طور قابل توجهی به کاهش هزینه‌های جاری و در عین حال بهبود عملکرد کمک کرده است، پیشرفت‌های تکنولوژیکی به طور قابل توجهی بر حوزه‌های مختلف تأثیر گذاشته است، ضرورت دخالت مستقیم انسان را کاهش داده و اتکا به رباتیک را برای کاربردهای واقعی افزایش داده است. این تغییر به ویژه در سناریوهای بحرانی که ایمنی انسان در معرض خطر است، مانند موارد اضطراری آتش‌سوزی، مشهود است. توانایی ربات‌ها برای تقلید از رفتار انسان و انجام وظایف پیچیده به طور مستقل، فرصت‌های جدیدی را برای مقابله با بلایایی مانند آتش‌سوزی که هم مکرر و هم بالقوه کشنده هستند، باز کرده است. این ماشین‌های هوشمند نقشی حیاتی در نجات جان انسان‌ها و به حداقل رساندن خسارت در محیط‌های خطرناک ایفا می‌کنند (S. Sakthi et al, 2017).

اهمیت و ضرورت پژوهش

آتش جایگاه مهمی در زندگی انسان دارد. زمانی منبع انرژی برای پخت و پز، گرمایش و سایر اهداف بود. امروزه هنوز هم برای اهداف مشابه استفاده می‌شود. شکی نیست که آتش نقش حیاتی در زندگی ما دارد، اما زمانی که از کنترل خارج شود خطرناک می‌شود (Leotronics, 2022). آتش نشانی حرفه خطرناکی است، آتش نشانان اغلب در معرض محیط‌های فوری خطرناک برای زندگی یا سلامتی (IDLH) در محل آتش‌سوزی قرار می‌گیرند. پیشرفت‌های تکنولوژیکی برای کاربردهای متعدد آتش‌سوزی برای حمایت از آتش نشانان در سناریوهای مختلف آتش‌سوزی مانند سازه، وسیله نقلیه، مواد مخدر، آتش‌سوزی‌های وحشی و غیره انجام شده است. علاوه بر این، فناوری‌های نوین آتش نشانی می‌توانند از آتش نشانان با سایر عملیات‌های واکنش اضطراری مانند جستجو و نجات، اندازه‌گیری و مکان آتش‌سوزی، کنترل و سرکوب آتش پشتیبانی کنند. اگرچه نیاز به نوآوری مداوم در همه صنایع برجسته است، اما این نیاز به ویژه در آتش نشانی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تجهیزات و تکنیک‌های جدید می‌توانند به نجات جان انسان‌ها و کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی کمک کنند. همچنین، پیشرفت‌های تکنولوژیکی مانند سیستم‌های هشداردهنده پیشرفته، تجهیزات حفاظت شخصی بهبود یافته و روش‌های مدیریت بحران می‌توانند کارایی و ایمنی آتش نشانان را بهبود بخشند. در طول دهه گذشته، چندین فناوری جدید تشخیص آتش با پیشرفت در حسگرها، فناوری اطلاعات و میکروالکترونیک و همچنین درک عمیق فیزیک آتش ایجاد شده است. تکنیک‌هایی برای اندازه‌گیری تقریباً هر گونه گازی پایدار تولید شده قبل یا در حین احتراق در حال حاضر در دسترس است. معرفی سنسورهای دمای فیبر نوری توزیع شده در کاربردهایی با شرایط آب و هوایی دشوار مانند تونل‌ها، راه آهن‌های زیرزمینی و ایستگاه‌ها، می‌تواند پیشگیری از آتش‌سوزی را فراهم کند، فناوری جدید، از جمله هوش مصنوعی و روبات‌ها، لزوماً به این معنی نیست که جایگزین شغل انسان و قضاوت انسان خواهد شد، بلکه به عنوان ابزاری برای به حداقل رساندن خطرات در شرایط بحرانی استفاده می‌شود و به حل مشکلات به روشی سریعتر و کارآمد کمک می‌کند حوادث آتش‌سوزی اساساً پدیده‌های غیرقابل پیش‌بینی هستند مهار کمتر از حد مطلوب در شروع آتش‌سوزی می‌تواند گسترش سریع و کنترل نشده را تسریع کند و خطرات جدی را برای جان و مال انسان ایجاد کند (Ren, Y et al, 2025).

مفهوم شناسی

آتش: آتش به عنوان یک منبع انرژی حیاتی برای حفظ اکوسیستم جهانی شناخته می‌شود، اما همچنین می‌تواند تبدیل به یک خطر جهانی شود که تأثیرات کاتاستروفی بر محیط زیست، حیات وحش و زندگی انسان‌ها خواهد داشت. خطرات ناشی از آتش‌سوزی نه تنها در جنگل‌های وحشی نمایان می‌شود، بلکه می‌تواند به بلایای مختلف در محیط‌های داخلی نیز گسترش یابد. این بلاها شامل آتش‌سوزی در ساختمان‌ها، انبارها و حتی صنایع می‌شود که تأثیرات فراوانی بر کل جامعه دارند. دمای بالا و تولید دود و گازهای سمی ناشی از آتش‌سوزی می‌توانند آسیب‌های جدی به سلامت انسان‌ها وارد کنند. مواجهه با این مواد سمی می‌تواند به مشکلات تنفسی، بیماری‌های قلبی و در موارد شدیدتر، به مرگ منجر شود. همچنین، آتش‌سوزی‌های بزرگ می‌توانند تأثیر فزاینده‌ای بر کیفیت هوا داشته باشند و روانه شدن ذرات آلاینده به جو، به بروز واکنش‌های آلرژیک و

مشکلات بهداشتی در بین افراد حساس منجر شود. از آنجا که خطرات آتش‌سوزی می‌تواند به شکل‌های مختلفی ظاهر شود، لازم است جوامع به مدت زمان و عوامل بالقوه خطر ساز توجه ویژه‌ای داشته باشند. اقدامات پیشگیرانه در این راستا بسیار حائز اهمیت است، شامل آموزش جامعه در زمینه رفتار ایمن با آتش، استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای شناسایی و رصد فعالیت‌های آتش‌زا، و اجرای قوانین و مقررات سخت‌گیرانه در زمینه استفاده از آتش در مناطق خشک و حساس. علاوه بر این، طراحی محیطی و ایجاد فضای سبز مناسب می‌تواند در کاهش خطر آتش‌سوزی موثر باشد. به‌کارگیری روش‌های کشاورزی پایدار و استفاده از زمین‌های حاصل می‌تواند به جلوگیری از گسترش آتش کمک کند. تجهیز نیروهای آتش‌نشانی با تجهیزات مناسب و آموزش مداوم آن‌ها نیز به مداخله سریع و اطفای آتش ناشی از حوادث کمک خواهد کرد. در نتیجه، با توجه به هزینه‌های جدی اقتصادی ناشی از آتش‌سوزی، ضرورت دارد که جوامع برای پیشگیری از این خطرات تلاش کنند. هزینه‌هایی که به دلیل خسارات مالی، آسیب به زیرساخت‌ها و هزینه‌های درمانی ناشی از مشکلات بهداشتی ایجاد می‌شوند، قابل چشم‌پوشی نیستند. بنابراین، تخصیص منابع کافی برای پیشگیری و مدیریت آتش‌سوزی، نه تنها می‌تواند خطرات آتش را کاهش دهد، بلکه به حفظ سلامت جامعه و اکوسیستم جهانی نیز کمک می‌کند. به عبارتی، مسئولیت حفظ آینده‌ای امن و پایدار در برابر خطرات آتش بر عهده تمام اعضای جامعه بوده و همه باید در این راستا همکاری و تلاش کنند (Khan, F et al, 2022).

آتش‌سوزی: آتش‌سوزی جنگل‌ها به عنوان یکی از معضلات زیست‌محیطی مهم و پیش‌رو، پیوسته در حال افزایش است و پیامدهای گسترده‌ای بر اکوسیستم‌ها، جوامع انسانی و شرایط اقلیمی به همراه دارد. این آتش‌سوزی‌ها تنها به تخریب پوشش گیاهی محدود نمی‌شوند، بلکه به زیستگاه‌های حیات‌وحش نیز آسیب می‌زنند و بسیاری از گونه‌ها را در معرض خطر نابودی قرار می‌دهند و تنوع زیستی را تهدید می‌کنند. علاوه بر این، آتش‌سوزی‌ها گازهای گلخانه‌ای را به جو آزاد می‌کنند که به گرم شدن جهانی دامن می‌زند و چرخه معیوبی را ایجاد می‌کند که باعث خشکسالی، تغییرات آب و هوایی و افزایش تعداد آتش‌سوزی‌ها می‌شود. خسارات اقتصادی این حوادث نیز قابل توجه است، زیرا می‌توانند به تخریب زیرساخت‌ها و زمین‌های کشاورزی و مسکونی منجر شوند و جان انسان‌ها و حیوانات را به خطر بیندازند. با توجه به این پیامدهای خطرناک، جوامع و کشورهای مختلف اقداماتی را برای پیشگیری، شناسایی زودهنگام و مدیریت آتش‌سوزی تدوین کرده‌اند که این اقدامات شامل سیاست‌های پیشگیرانه نظیر مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌های آموزشی برای کاهش خطرات آتش‌سوزی می‌شود. همچنین، ایجاد سیستم‌های پیش‌گام برای شناسایی تغییرات دما و رطوبت، به شناسایی آتش‌سوزی‌های در حال شکل‌گیری کمک می‌کند. مضاف بر این، آموزش نیروهای آتش‌نشانی و تجهیز آن‌ها به وسایل مدرن و فراهم کردن زیرساخت‌های مناسب برای جابه‌جایی سریع تجهیزات و نیروها در هنگام بروز آتش‌سوزی، می‌تواند به مداخله سریع و خاموش کردن به موقع آتش کمک کند. با این وجود، چالش‌های زیادی همچنان وجود دارد، از جمله فقدان معلومات کافی درباره الگوهای آتش‌سوزی، کمبود نیروی انسانی و تجهیزات، و عدم همکاری بین نهادهای دولتی و خصوصی. در نتیجه، آتش‌سوزی جنگل‌ها که به دلایل انسانی و طبیعی به وقوع می‌پیوندد، به عنوان یکی از بحران‌های جدی زیست‌محیطی، نیازمند اقدامات جدی و جامع برای پیشگیری و مدیریت است و تنها با همکاری گسترده و به‌کارگیری فناوری‌های نوین می‌توان به کاهش تأثیرات مخرب این پدیده‌های طبیعی پرداخت و امنیت محیط زیست و جوامع انسانی را تأمین کرد (Khan, F et al, 2022).

اطفاء حریق: اطفاء حریق به معنی مجموعه اقدامات و استفاده از تجهیزات است که در هنگام وقوع حریق و آتش‌سوزی، از گسترش حریق و آتش‌سوزی جلوگیری کرده و با کنترل آتش، از جان و مال افراد حفاظت کرده یا آسیب و خسارت را به حداقل می‌رساند. این فرآیند می‌تواند شامل استفاده از تجهیزات و روش‌های مختلف برای اطفاء و مدیریت آتش‌سوزی باشد که به طور کلی به دو دسته عمده تقسیم می‌شود:

اطفاء حریق در محل حادثه: این مفهوم به اقداماتی اشاره دارد که در زمان وقوع آتش‌سوزی برای کنترل و خاموش کردن آتش انجام می‌شود. نیروهای آتش‌نشانی، با استفاده از تجهیزات ویژه مانند شلنگ‌ها، کپسول‌های آتش‌نشانی، و دستگاه‌های آب‌پاش، به محل حادثه می‌روند و با بررسی شرایط و خطرات موجود، اقدامات لازم را برای خاموش کردن آتش به عمل می‌آورند. این نوع اطفاء باید به سرعت و با دقت انجام شود تا از ایجاد آسیب‌های بیشتر جلوگیری شود. ایمنی پیشگیرانه: این

بخش از اطفای حریق به اقدامات و تدابیری اطلاق می‌شود که به منظور جلوگیری از وقوع آتش‌سوزی در ابتدا انجام می‌گیرد. شامل طراحی و اجرای سازه‌های ایمن به لحاظ آتش‌سوزی، نصب سیستم‌های هشداردهنده، آموزش نیروهای انسانی و شهروندان در خصوص روش‌های ایمنی، و شناسایی و ارزیابی خطرات ممکن می‌باشد. برنامه‌های پیشگیری از آتش‌سوزی به عنوان خط اول در کاهش خطرات و خسارات ناشی از حریق اهمیت زیادی دارند (Khan, F et al, 2022).

روش پژوهش

برای گردآوری داده‌ها، از تکنیک اسنادی و کتابخانه‌ای استفاده می‌شود و با رجوع به منابع مرتبط در این زمینه تلاش می‌شود تا ابعاد مختلف موضوع شناسایی و بیان شود برای تحلیل داده‌ها نیز از روش کیفی استفاده شده است. لذا هر چیزی قابل محتوا است و هر پدیده‌ای تحلیلی می‌تواند محتوا شود در تحلیل محتوای کیفی مفاهیمی وجود دارد که در متن بسیار به آن اشاره می‌شود. از جمله این مفاهیم محتوای آشکار و نهفته واحد تحلیل، واحد معنا، فشردگی خلاصه سازی حیطه محتوا کد طبقه و تم است. هنگامی که متن با جنبه‌هایی از محتوا سر و کار دارد، اجزایی آشکار را توصیف میکند و بر عکس زمانی که متن با جنبه‌های ارتباطی محتوا سر و کار دارد و تحلیل گر درگیر تفسیر معانی متن است به تحلیل محتوای نهفته اشاره می‌شود. واحد تحلیل شامل تنوع وسیعی از نمونه‌های مطالعه است. در واقع جامعه و یا هر عبارت یا کلمه نوشته شده در متن نسخه برداری شده میتواند به عنوان واحد تحلیل مورد توجه قرار گیرد. واحد معنای کلمات یا عباراتی هستند که به معنای اصلی مربوط هستند. منظور از تنزل یا فشردگی کم کردن اندازه متن بدون تغییر در کیفیت آنچه در متن وجود دارد و خلاصه سازی فرایند کوتاه کردن متن است؛ در حالی که هسته اصلی متن حفظ شود. حیطه محتوا بخشی از متن بر اساس فرضیه‌ها و یا بخش‌هایی از متن است که به عنوان خاصی در یک راهنمای مصاحبه و یا مشاهده اشاره دارد کد بر چسب واحدی معنایی است و طبقه گروهی از محتوا است که اشتراکات را به مشارکت می‌گذارد. در واقع هسته اصلی شکل تحلیل محتوای کیفی طبقات است و سرانجام تم را یک باز رخداد منظم در یک طبقه معرفی میکنند ادیب حاج باقری و همکاران، (۱۳۸۶: ۲۵۶).

یافته‌های پژوهش

ربات آتش نشانی

ربات آتش نشانی پیشنهادی گواهی بر ادغام مهندسی پیشرفته و فناوری‌های نوآورانه با هدف محافظت از آتش نشانان انسانی در برابر خطرات تهدید کننده زندگی است، با ترکیب سنسورهای پیچیده این ربات‌ها با الگوریتم‌های تصمیم گیری هوشمند و مکانیسم‌های کارآمد اطفاء حریق، ایمنی و اثربخشی عملیات اطفاء حریق را افزایش می‌دهند (K. Sh Rejab et al, 2017). چنین پیشرفت‌هایی نه تنها خطر انسانی را کاهش می‌دهد، بلکه زمان پاسخگویی و دقت عملیاتی را در سناریوهای چالش برانگیز بهبود می‌بخشد. ربات‌های آتش نشانی مدرن اکنون از فناوری‌های پیشرفته اینترنت اشیا (IoT) استفاده می‌کنند که کنترل و کارایی عملیاتی را افزایش می‌دهد (S. Chitti et al, 2020). تکامل ربات‌های آتش نشانی پتانسیل رباتیک را برای تغییر چارچوب‌های واکنش اضطراری برجسته می‌کند. این سیستم‌ها مجهز به طیف وسیعی از قابلیت‌ها هستند، از کنترل از راه دور از طریق پلتفرم‌های اینترنت اشیا گرفته تا نوابری بلادرنگ و تصمیم گیری در محیط‌های پویا. کاربرد آنها فراتر از آتش نشانی است و شامل نقش‌هایی در بازیابی فاجعه، عملیات جستجو و نجات و جابجایی مواد خطرناک می‌شود (B. R.V.Prasad, 2023). مشابه اعلام حریق و آپاش‌های خودکار، سیستم‌های آتش نشانی ثابت در مناطق خطرناک و پرجمعیت برای سرکوب آتش‌سوزی‌های کوچک قبل از اینکه از کنترل خارج شوند استفاده می‌شود. این ربات‌ها از طرح‌های ساده‌تری استفاده می‌کنند که از تشخیص IR و UV برای تشخیص آتش استفاده می‌کنند. از سوی دیگر، سیستم‌های رباتیک آتش نشانی متحرک با کنترل از راه دور از راه دور کار می‌کنند. آنها معمولاً به شکل وسایل نقلیه حمل و نقل از راه دور مجهز به ابزارهای اطفای پیشرفته هستند. این ربات‌های فوق فناوری می‌توانند در مکان‌هایی حرکت کنند که برای انسان امن نیست. آنها مجهز به حسگرهای مادون قرمز، دوربین‌های بصری و سایر فناوری‌های پیشرفته حسگر هستند که به طور موثر اطلاعات اپراتور را برای

پیمایش انتقال می‌دهند. اخیراً مهندسان رباتیک بر روی پهپادها و ربات‌هایی کار می‌کنند که قادر به مقابله با آتش‌سوزی از فاصله نزدیک هستند. در ادامه به شرح برخی از ربات‌های آتش‌نشانی می‌پردازیم:

• واکمن (Walkman)

این یک ربات انسان نما است که توسط موسسه فناوری ایتالیا ساخته و آزمایش شده است. این نام به این دلیل است که شبیه انسانی است که می‌تواند از قسمت‌های ناپایدار یک سازه محافظت کند و آتش را قبل از ورود آتش‌نشان‌ها به داخل آن خاموش کند. این ربات می‌تواند وارد یک ساختمان در حال سوختن شود، محل آتش‌سوزی را مشخص کند و آن را از بین ببرد. ۲۲۰ پوند وزن و ۶ فوت قد دارد. این می‌تواند بارهای سنگین را در مسافت‌های طولانی حمل کند و دارای باتری داخلی است که می‌تواند ۲ ساعت دوام بیاورد. یک اسکنر لیزری سه بعدی منحصر به فرد، دوربین‌ها و حسگرهای میکروفون تعبیه شده در ربات می‌توانند به سرعت در مواقع اضطراری حرکت کرده و حرکت کنند. در صورت لزوم می‌توان آن را به سنسورهای شیمیایی نیز مجهز کرد. این بازو عکس‌هایی با کیفیت خوب از منطقه آتش گرفته و به اپراتور کنترل کننده آن ارسال می‌کند. اگرچه هنوز ربات واکمن در حال توسعه است، اما قبلاً تمام آزمایشات را با موفقیت پشت سر گذاشته است. شاید در آینده واکمن به تولید انبوه برسد و توسط سازمان آتش‌نشانی برای ارائه کمک‌های ارزشمند در اطفای حریق مورد استفاده قرار گیرد (Leotronics, 2022).

• ربات دود (The Smoke Bot)

این یک ربات کوچک اما موثر آتش‌شان است که در دانشگاه اوربرو^۱ در سوئد ساخته شده است. پرسنل نجات آلمان و دورتموند در ساخت این ربات شرکت داشتند. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد ربات دود، نقشه برداری و ناوبری در مکان‌هایی است که به دلیل دود متراکم یا گرد و غبار برای انسان قابل مشاهده نیست و برای ربات‌های غول پیکر غیرقابل دسترسی است. اپراتور که ربات را کنترل می‌کند، از محیط اطراف آن نقشه می‌کشد و گزارشی را به آتش‌نشانی ارسال می‌کند تا با خیال راحت روی زمین حرکت کند. ربات دود دارای یک اسکنر لیزری، یک تصویرگر حرارتی سه بعدی و ترکیبی از حسگرهای گاز است. این حسگرها می‌توانند وجود گازها را تشخیص دهند، غلظت گاز را محاسبه کنند و خطر انفجار را تعیین کنند. علاوه بر این، دود ربات می‌تواند از طریق Wi-Fi تحت کنترل باشد. ربات دود هنوز برای استفاده گسترده آماده نیست، زیرا جمع‌آوری اطلاعات حدود ۲۰ تا ۳۰ دقیقه طول می‌کشد. به محض اینکه توسعه دهندگان کارایی را بهبود بخشند و زمان جمع‌آوری داده‌ها را کوتاه کنند، به ابزاری ارزشمند برای نجات جان افراد و از بین بردن آتش‌سوزی تبدیل خواهد شد (Leotronics, 2022).

تعامل بین انسان و ربات‌های آتش‌نشانی

ربات‌های دور کار ساده ترین فرمان بردارها برای دستور دادن هستند، زیرا مستقیماً توسط یک اپراتور انسانی و با استفاده از رابط انسان و ماشین (HMI) کنترل می‌شوند HMI مانند یک مترجم بین ربات و اپراتور آن عمل می‌کند، داده‌های جمع‌آوری شده توسط ربات را می‌گیرد و آن را به گونه‌ای پیش‌بینی می‌کند که انسان‌ها درک کنند، و کنترل‌های وارد شده توسط اپراتور را برمی‌دارد و آنها را به اقدامات واقعی انجام‌شده توسط ربات تبدیل می‌کند. در سناریوهای اطفاء حریق، محیط خشن و استرس‌زا است، بنابراین یک HMI به خوبی طراحی شده نقش کلیدی در تضمین کارایی ربات‌های دورکار دارد. اطلاعاتی که توسط HMI به اپراتور نمایش داده می‌شود شامل یک یا چند ویدیوی زنده ضبط‌شده توسط ربات، بلبرینگ‌های ربات و بازخوانی‌هایی از حسگرهای داخلی است که به اپراتورها اجازه می‌دهد تا به تمام اطلاعات مشابهی دسترسی داشته باشند که گویی یک وسیله نقلیه سرنشین دار است (Foster N, 2023).

¹ Örebro University

پهپادهای آتش نشانی

در سال‌های اخیر، هواپیماهای بدون سرنشین (پهپادها) در زمینه‌های بیشتری در سراسر صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا استقرار آنها آسان است و حداقل خطر عملیاتی را دارند. نمونه‌ها از بازرسی صنعتی یا جستجو و نجات گرفته تا نظارت بر آتش‌فشان را شامل می‌شود. یکی از زمینه‌های مورد علاقه برای استفاده از آنها آتش نشانی است، با توجه به خطرناک بودن کار با اهمیت واکنش سریع. آتش‌سوزی می‌تواند به سرعت گسترش یابد و نه تنها به مردم، بلکه به آرمیچر ساختمان‌ها یا سازه‌های مشابه نیز آسیب برساند و اکسیژن را در فضاهای بسته مصرف کند. بنابراین، استفاده از پهپادها به دلیل ایمنی و سرعت عملکرد، می‌تواند یک پروتکل اقدام اول خوب به عنوان یک پاسخ سریع به شروع آتش باشد. استقرار سریع و توانایی آن برای رسیدن به مکان‌های دسترسی دشوار به آنها اجازه می‌دهد تا راحت‌تر از یک تیم انسانی با هر نوع ابزار یا وسیله نقلیه دیگری به آتش برسند (Perez-Saura, D et al, 2023).

فناوری توصیه شده برای مبارزه با آتش‌سوزی در مناطق خطرناک را می‌توان به عنوان "پهپاد آتش نشانی" توصیف کرد. این پهپاد را می‌توان رویکردی سریع‌تر و ایمن‌تر برای اطفاء حریق در نظر گرفت که می‌تواند به هر گونه هشدار آتش‌سوزی پاسخ دهد و در مکان‌های باریک داخل کارخانه‌ها (مخازن ذخیره نفت خام) جنگل‌ها، در کوچه‌ها و خیابان‌های پر ازدحام شهری پرواز کند و بدون ترس از برخورد آن به چیزی به سرعت به محل دقیق آتش‌سوزی برود و خطر رسیدن به ساختمان‌های بلندمرتبه را که ایمن نیستند و دید کمی دارند، از بین می‌برد. پهپاد آتش نشانی که توپ‌های کپسول آتش نشانی را حمل می‌کند، جایی که عمدتاً از پودرهای خشک حاوی ملامین فسفات به عنوان یک جزء خاموش کننده تشکیل شده است. این توپ خاموش کننده به عنوان یک شیر آتش نشانی خودکار که به هواپیمای بدون سرنشین متصل است عمل می‌کند. این مکانیسم به هواپیمای بدون سرنشین کمک می‌کند تا توپ‌های کپسول آتش نشانی را به هر مکانی حمل کند و توپ را برای سرکوب آن به داخل آتش بیندازد. مزیت اصلی این توپ‌های کپسول آتش نشانی سبک وزن آن در مقایسه با آب است و در صورت استفاده در مناطق خطرناک مانند کارخانه‌های نفت و گاز برای بدن انسان از نظر زیست محیطی بی‌ضرر و بی‌ضرر است. مطالعات نشان می‌دهد که توپ‌های کپسول آتش نشانی از کارایی اطفاء حریق بالایی برخوردار هستند و طیف گسترده‌ای از کاربردها را انجام می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که اندازه توپ در حدود ۰/۵ کیلوگرم قابلیت خاموش کردن شعاع ۱ متری را دارد. (Almughani-Alnaqbi, M. A., 2021).

• کاربرد پهپادهای آتش نشان

نظارت: استفاده از پهپادهای آتش نشانی برای به دست آوردن تصویر واضحی از وضعیت آتش‌سوزی قبل از توسعه استراتژی اطفاء حریق منطقی است. پهپادهای تصویربرداری حرارتی مفیدترین ابزار هنگام استفاده از پهپادها در آتش نشانی هستند. آنها به طور دقیق هر دو را شناسایی می‌کنند: مناطق گرم و سرد، به شما امکان می‌دهند از میان دود شدید، گرد و غبار، و سایر عناصری که دید را مختل می‌کنند، مشاهده کنید، در نتیجه به تصمیم‌گیری در مورد بهترین روش در یک موقعیت آتش‌سوزی خاص کمک می‌کند. علاوه بر این، پهپادها را می‌توان به دستگاه‌های پیشرفته‌ای مجهز کرد که به عنوان نورافکن شبانه استفاده می‌شوند (Leotronics, 2022).

عملیات جستجو و نجات: با استفاده از پهپاد، اپراتورها می‌توانند از زمین و داده‌های ضروری دید چشم پرنده‌ای داشته باشند، عملیات جستجو و نجات به کمک پهپادها، به اپراتورها این امکان را می‌دهد که از ارتفاع بالا و با دیدی وسیع، محیط را بررسی کنند و داده‌های مهم را جمع‌آوری کنند. به عبارت دیگر، استفاده از این فناوری، به آنها کمک می‌کند تا نقاط خطرناک یا نیازمند کمک را سریع‌تر شناسایی کنند و اطلاعات لازم برای نجات افراد را به دست آورند. این نوع بررسی به آنها اجازه می‌دهد تا با دقت بیشتری در اقدامات نجات خود عمل کنند (Leotronics, 2022).

سیستم سنجش از راه دور

تکنیک‌های سنجش از دور از روش‌های متفاوتی برای شناسایی و تجزیه و تحلیل منابع گرما، دود و امضای فرا از مکان‌های دور استفاده می‌کنند. با انجام این کار، این تکنیک‌ها اطلاعات مهمی مانند مکان آتش شدت و اثرات زیست محیطی را ارائه می‌دهند. سنجش از دور به فرآیند تشخیص و نظارت بر برخی از ویژگی‌ها از راه دور اشاره دارد. در ابتدا، این مفهوم تا زمان

ظهور تکنیک‌های سنجش از دور نزدیک به زمین، مانند دوربین‌های برج مراقبت و هواپیماهای بدون سرنشین (پهپاد) مجهز به دوربین‌های با وضوح بالا، محدود به فناوری‌های ماهواره‌ای یا هواپیمایی بود. این فناوری‌های مبتنی بر تصویر را می‌توان به عنوان رویکردهای سنجش از دور نیز طبقه بندی کرد که به دسته‌های سنتی محدود نمی‌شوند، بلکه طیف گسترده‌ای از حسگرها را در بر می‌گیرند (Chuvieco et al. 2020). سنجش از دور نقش مهمی در شناسایی و نظارت بر آتش‌سوزی‌های وحشی در سال‌های اخیر در جهان ایفا می‌کند، زیرا امکان تشخیص سریع و پاسخ به شیوع‌های جدید را فراهم می‌کند. علاوه بر این، فناوری‌های سنجش از دور امکان ایجاد نقشه‌هایی را فراهم می‌کنند که وسعت و الگوی گسترش آتش را مشخص می‌کند، که برای توسعه سرکوب اثرات بسیار مهم است، پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های سنجش از دور نزدیک زمین، طیف وسیعی از ابزارهای موجود برای مدیریت آتش را گسترش داده است. این ابزارها شامل پهپادها و دوربین‌های برج دیده بانی است که تصاویر با وضوح مکانی بالاتری نسبت به ماهواره‌ها ارائه می‌دهند و از نظر استقرار و جمع آوری داده‌ها قابلیت انعطاف پذیری بیشتری دارند (Li, Y et al, 2024). هواپیماهای بدون سرنشین (پهپادها) می‌توانند اطلاعات ثابت و با وضوح بالا ارائه دهند، اما به دلیل سطح استقامت آنها محدود می‌شوند، که کارایی آنها را برای نظارت طولانی مدت بر آتش‌سوزی محدود می‌کند (Lattimer et al. 2023).

سیستم‌های تشخیص حریق پیشرفته

• سنسورهای حرارتی

سنسورهای حرارتی برای اندازه گیری گرمای محیط در یک محل سکونت به دلیل وقوع آتش‌سوزی استفاده می‌شوند. سنسورها به دمایی که مربوط به تغییرات مقاومت، جابجایی و ضریب شکست و غیره است حساس هستند. به طور کلی، سه نوع سنسور گرما وجود دارد: دمای ثابت، نرخ افزایش، و نرخ جبران. سنسور گرمای دمای ثابت زمانی فعال می‌شود که دما از مقدار آستانه بالاتر می‌رود، که در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد یا بالاتر است. دسته‌های مختلفی از سنسورهای دمای ثابت وجود دارد، مانند فیوزالمنت، دو فلز، و فیبر نوری توزیع شده. سنسور حرارتی از نوع عنصر فیوز بر اساس ذوب عنصر گرمایش در یک سطح دمایی تنظیم شده کار می‌کند و عمدتاً در سیستم آبیاز آتش نشانی استفاده می‌شود. سنسور حرارتی دو فلزی با توجه به مکانیسم انبساط حرارتی فلزات کار می‌کند. هنگامی که دما افزایش می‌یابد، نوار دو فلزی با ضریب انبساط حرارتی کم به فلز خم می‌شود. سنسورهای حرارتی توزیع شده بیشتر به سه گروه ترموکوپل‌های الکتریکی، روکش دار و نوری تقسیم می‌شوند. سنسورهای حرارتی ترموکوپل الکتریکی و روکش دار طبق اصل تغییر مقاومت سیم و دمای سطح کار می‌کنند. آشکارسازهای حرارتی نوع الکترونیکی با اثر ترموالکتریک کار می‌کنند که از یک یا دو ترمیستور برای تشخیص دما استفاده می‌کند (Wu, J et al, 2019).

• سنسورهای گاز

گازها در هر مرحله از احتراق ساطع می‌شوند و از ویژگی‌های منحصر به فرد گاز می‌توان برای تشخیص قابل اعتماد آتش‌سوزی استفاده کرد، با اندازه گیری تغییر خروجی سنسور گاز، وجود گازها در یک موقعیت خاص توسط سنسور گاز حس می‌شود. سنسورهای گاز موجود بر اساس مهره‌های کاتالیزوری، نیمه هادی‌ها، اپتیک، فوتوویونیزاسیون، آکوستیک، IR، الکتروشیمی، کروماتوگرافی گازی، سیستم‌های کالری سنجی و غیره هستند. در مقایسه با اجزای کیفیت هوای خوب، استانداردهای کیفیت هوا به دلیل خطرات آتش‌سوزی مختل می‌شود. در صورت خطرات آتش‌سوزی، مقدار قابل توجهی CO₂ منتشر می‌شود و مضرترین گازهای آتش‌سوزی CO و HCN هستند. با افزایش محتوای CO میزان اکسیژن کاهش می‌یابد. تغییرات غلظت کم اکسیژن نشانه دود است، در حالی که تغییر غلظت اکسیژن بالا هشدار احتراق سوخت مایع است. حسگرهای مهره کاتالیزوری که به عنوان پلیستورها نیز شناخته می‌شوند، رایج ترین عناصر حسگر برای تشخیص غلظت گازهای قابل احتراق در هوا هستند، آنها را می‌توان در تجهیزات متحرک و ثابت در معادن و سایر صنایع برای نشان دادن وجود شرایط انفجاری استفاده کرد (Reddy, A.P.K et al, 2020).

• سنسورهای دود

دود تولید شده توسط شعله سوزان اغلب بزرگتر از ذرات محصول احتراق است. آتش در حین احتراق دود ایجاد می‌کند که مجموعه‌ای از ذرات جامد، ذرات مایع و گازهای موجود در هوا است. در اثر احتراق مواد ایجاد می‌شود و همچنین کیفیت هوا را در محیط کاهش می‌دهد. اندازه‌گیری دود به شرایط احتراق دود بستگی دارد، به عنوان مثال، پیرولیز، شعله‌ور شدن و دود. روش تشخیص دود با توجه به نوع آتش‌سوزی و محل آن تعیین می‌شود. فناوری اندازه‌گیری دود مبتنی بر فوتوالکتریک به طور خاص برای سوختن استفاده می‌شود و می‌تواند آتش‌سوزی را با سرعت بیشتری تشخیص دهد. دود با سطح یونیزاسیون هوا توسط سنسور دود یونیزاسیون اندازه‌گیری می‌شود. تشخیص با ایجاد اختلاف پتانسیل بین محفظه‌ها و اندازه‌گیری جریان حاصل از آن انجام می‌شود. توانایی دود در پراکندگی نور با میزان دود موجود در هوا تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری تفاوت در پراکندگی نور با استفاده از یک دستگاه نوری، سنسور دود فوتوالکتریک سطح دود را محاسبه می‌کند (Drysdales, D.D, 2016).

• سنسور مبتنی بر حسگر

روش‌های مختلف تشخیص آتش و دود برای مقابله با این چالش‌های گرمای جهانی و مشکلات جسمی و روحی بعد از آتش‌سوزی توسعه یافته‌است. این روش‌ها در درجه اول در تکنیک‌های مبتنی بر حسگر و بینایی کامپیوتری قرار می‌گیرند. سیستم‌های مبتنی بر حسگر به دلیل مقرون به صرفه بودن معمولاً در محیط‌های بسته مانند ساختمان‌های مسکونی و مراکز بهداشتی و درمانی مستقر می‌شوند (Chowdhury N et al, 2019).

سیستم مدیریت بحران هوشمند

سیستم‌های مدیریت بحران هوشمند (ICMS) نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملیات آتش‌نشانی ایفا می‌کنند. این سیستم‌ها با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های لحظه‌ای از منابع مختلف، از جمله حسگرها و دوربین‌ها، به نیروهای آتش‌نشانی اجازه می‌دهند تا تصمیم‌گیری‌های سریع و مؤثری انجام دهند. با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، ICMS می‌تواند منابع موجود را به شکل بهینه مدیریت کند و سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی کند، که این امر به مدیران آتش‌نشانی کمک می‌کند تا مسیرهای بهینه برای واکنش به حوادث را شناسایی کنند. همچنین، این سیستم‌ها به ارتقاء ارتباطات مؤثر بین تیم‌های مختلف و تسريع در زمان واکنش کمک می‌کنند. مزایای استفاده از سیستم‌های مدیریت بحران هوشمند شامل افزایش سرعت واکنش، کاهش تلفات و خسارات، و بهینه‌سازی هزینه‌ها است. با این حال، چالش‌هایی مانند نیاز به زیرساخت‌های دیجیتال مناسب و هزینه‌های اولیه بالا برای نصب و آموزش نیز وجود دارد. در مجموع، سرمایه‌گذاری در این فناوری‌ها نه تنها باعث افزایش ایمنی در عملیات آتش‌نشانی می‌شود، بلکه کارایی و صرفه‌جویی در منابع را نیز به همراه خواهد داشت (NFPA, 2023).

نتیجه‌گیری

توسعه فناوری‌های نوین در آتش‌نشانی نشان‌دهنده یک تغییر اساسی در رویکردها و استراتژی‌های مقابله با آتش‌سوزی است. استفاده از ابزارها و تکنیک‌های پیشرفته مانند پهپادها، حسگرهای هوشمند، و سیستم‌های مدیریت بحران، به طور قابل توجهی زمان واکنش و کارایی عملیات را افزایش می‌دهد. این فناوری‌ها همچنین به بهبود ایمنی شهروندان و کاهش خسارت‌های جانی و مالی کمک می‌کنند. به طور کلی، آینده‌ای ایمن‌تر در آتش‌نشانی مستلزم ادغام فناوری‌های نوین با آموزش و آمادگی بالای نیروهای آتش‌نشانی است. با همراهی این دو عنصر، می‌توان به نتایج بهتری دست یافت و از آسیب‌های ناشی از حوادث آتش‌سوزی جلوگیری کرد. لذا، توجه به تحقیق و توسعه در این زمینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های جدید می‌تواند نقش بسزایی در حفاظت از زندگی و اموال افراد ایفا کند.

پیشرفت‌های تکنولوژیکی در رباتیک منجر به استفاده و توسعه بالقوه ربات‌ها برای کاربردهای متعدد آتش‌نشانی برای حمایت از آتش‌نشانان در سناریوهای مختلف آتش‌سوزی مانند سازه، وسیله نقلیه، هزمت، آتش‌سوزی‌های وحشی و غیره شده است. علاوه بر این، ربات‌ها می‌توانند از آتش‌نشانان در سایر عملیات واکنش اضطراری مانند جستجو و نجات، اندازه‌گیری و مکانیابی آتش، کنترل و سرکوب آتش پشتیبانی کنند، آتش‌نشانان از استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین به عنوان ابزاری

برای جمع آوری اطلاعات مرتبط برای فعالیتهای پیشگیری، نظارت و اطفاء حریق پشتیبانی می‌کنند. در موارد پیشگیری و نظارت، آنها تولید نقشه‌هایی را تأیید می‌کنند که به ترتیب به سازماندهی وظایف آماده‌سازی پوشش گیاهی و شناسایی مناطقی که بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند، کمک می‌کند. در مورد اطفاء حریق، آنها معتقدند که هواپیماهای بدون سرنشین می‌توانند اطلاعات بلادرنگ در مورد آتش‌سوزی در اختیار آنها قرار دهند تا اقدامات آنها را ایمنتر و موثرتر کنند (Roldán-Gómez, J. J et al, 2021). در آتش‌سوزی‌های جنگلی پیشگیری اولین گام اطفاء حریق محسوب می‌شود و دو دسته از اقدامات را در بر می‌گیرد. اولین آنها شامل فعالیتهای اجتماعی است که به دنبال جلوگیری از وقوع آتش‌سوزی است و معمولاً کمپین‌های آگاهی بخشی را با هدف قرار دادن گروه‌های کلیدی به عنوان کشاورزان یا گردشگران توسعه می‌دهد. مورد دوم چندین کار را روی پوشش گیاهی گروه بندی می‌کند تا خطر آتش‌سوزی را کاهش دهد و ناپیوستگی‌هایی را ایجاد کند تا تکثیر آنها دشوار شود. از نظر منطقی، پتانسیل ربات‌ها برای بهبود نتایج فعلی در این عملیات اخیر بیشتر است. آماده سازی پوشش گیاهی فعالیتی است که نیاز به تلاش‌های قابل توجهی دارد، جایی که کمبود منابع انسانی و مادی درک می‌شود. فناوری‌های رباتیک می‌توانند این فعالیت را از دو طریق کارآمدتر کنند (Roldán-Gómez, J. J et al, 2021). از طرف دیگر هواپیماهای بدون سرنشین می‌توانند تصاویر هوایی بگیرند که می‌توان از آنها برای برنامه ریزی این وظایف استفاده کرد: شناسایی مشکل سازترین مناطق، انتخاب پوشش گیاهی برای برداشتن، برنامه ریزی مسیرهای استخراج آن و غیره. برخی از تکنیک‌های توسعه یافته برای کشاورزی دقیق را می‌توان در این زمینه به کار برد، مانند تشخیص و شناسایی گیاهان و درختان در تصاویر با وضوح بالا، اسکن‌های سه بعدی LIDAR و تصاویر چند طیفی به دست آمده توسط هواپیماهای بدون سرنشین (Valente, J et al, 2020). در تمام این وظایف، هواپیماهای بدون سرنشین به عنوان جایگزین مناسبی برای ماهواره‌ها آشکار شده‌اند، زیرا آنها در دسترس بودن بیشتر با هزینه کمتر ارائه می‌دهند و همچنین وابستگی کمتری به شرایط آب و هوایی در منطقه مورد نظر دارند از سوی دیگر، ربات‌های زمینی می‌توانند از فعالیتهایی با هدف حذف پوشش گیاهی در جنگل‌ها پشتیبانی کنند و نقش میانی بین کار دستی آتش نشانان و ماشین آلات سنگین مورد استفاده آنها ایفا کنند. این ربات‌ها می‌توانند بین انعطاف پذیری و دقت آتش نشانان و سرعت و عملکرد ماشین آلات به مصالحه برسند. ربات‌های جنگل داری و کشاورزی چالش‌ها و الزامات مشترکی دارند، مانند حرکت در زمین‌های ناهموار، مکانیابی و نقشه برداری در محیط‌های بدون ساختار، و برنامه‌ریزی تحت عدم قطعیت (Aguilar, A.S. et al, 2020).

منابع

1. S. Sakthi, P. R. Sangeetha, S. Suvedha, and M. G. Vijayalakshmi, "Android Controlled Fire Fighting Robot," 2017.
2. K. Sh Rejab and W. Emad Rauf, "Wireless Mobile Robotic Arm Controlled by Ps2 Joystick Based on Microcontroller," 2017.
3. S. Chitti, P. Ramchandrarao, C. Padmaja, and D. Raghava Kumari, "Fire Detection and Direction Control of Fire Fighting Robot," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 981, no. 3, Dec. 2020
4. Bugatha Ram Vara Prasad, "ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AN AUTONOMOUS FIRE FIGHTING ROBOT ", International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, April 2023.
5. Chuvieco E, Aguado I, Salas J, García M, Yebra M, Oliva P (2020) Satellite remote sensing contributions to wildland fire science and management. Curr For Rep 6(2):81–96. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00116-5>
6. Li, Y., Zhang, T., Ding, Y., Wadhwani, R., & Huang, X. (2024). Review and perspectives of digital twin systems for wildland fire management. [Journal Name], [Volume(Issue)], pages. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01810-x>

7. Lattimer BY, Huang XY, Delichatsios MA, Levendis YA, Kochersberger K, Manzello S, Frank P, Jones T, Salvador J, Delgado C, Angelats E, Parés ME, Martín D, McAllister S, Suzuki S (2023) Use of unmanned aerial systems in outdoor firefighting. *Fire Technol* 59(6):2961–2988. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01437-0>
8. Chowdhury N, Mushfiq DR, Chowdhury AE (2019) Computer vision and smoke sensor based fire detection system, in: 2019 1st international conference on advances in science, engineering and robotics technology (ICASERT), pp 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICASERT.2019.8934458>
9. **Almughani-Alnaqbi, M. A.** (2021). *Firefighting Drones - A Safer & Efficient Technology to Confront Industrial Fires*. Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE. Paper Number: SPE-208043-MS. <https://doi.org/10.2118/208043-MS>. Published: December 09, 2021.
10. Perez-Saura, D., Fernandez-Cortizas, M., Perez-Segui, R., Arias-Perez, P., & Campoy, P. (2023). Urban firefighting drones: Precise throwing from UAV. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-01883-6>
11. **Roldán-Gómez, J. J., González-Gironda, E., & Barrientos, A.** (2021). A Survey on Robotic Technologies for Forest Firefighting: Applying Drone Swarms to Improve Firefighters' Efficiency and Safety. *MDPI*. Retrieved from <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
12. Valente, J.; Sari, B.; Kooistra, L.; Kramer, H.; Múcher, S. (2020). Automated crop plant counting from very high-resolution aerial imagery. *Precis. Agric.* (2020), 21, 1366–1384.
13. Aguiar, A.S.; dos Santos, F.N.; Cunha, J.B.; Sobreira, H.; Sousa, A.J. (2020) Localization and Mapping for Robots in Agriculture and Forestry: A Survey. *Robotics*, 9, 97.
14. Wu, J.; Wu, Z.; Ding, H.; Wei, Y.; Yang, X.; Li, Z.; Yang, B.-R.; Liu, C.; Qiu, L.; Wang, X. Multifunctional and high-sensitive sensor capable of detecting humidity, temperature, and flow stimuli using an integrated microheater. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 43383–43392.
15. Reddy, A.P.K.; Reddy, E.S.; Bhaskar, T.; Yadav, B.P.; Singh, A.K. Design of Fire and Gas Detection System for a Process Plant: A Review. In *Advances in Industrial Safety*; Springer: Singapore, 2020; pp. 271–280.
16. Drysdale, D.D. Thermochemistry. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*; Springer: New York, NY, USA, 2016; pp. 138–150.
17. Leotronics. (2022, February 8). Robots for firefighting. Leotronics Blog. Retrieved from <https://leotronics.eu/en/blog/robots-for-firefighting>
18. **Nathan Foster.** *Final Report*. Fire Protection Research Foundation, Quincy, USA, September 2023. ©2023 Fire Protection Research Foundation. 1 Batterymarch Park, Quincy, MA 02169. Retrieved from www.nfpa.org/foundation; Email: foundation@nfpa.org.
19. **Ren, Y., Zhang, P., Bian, H., Ding, D., Li, C., Sang, N., Zhang, J., Huang, F., & Zhu, Z.** (2025). Enhancing fire suppression in restricted spaces with fine water mist microcapsules. *Chemical Engineering Journal*, 503, 158422.
20. **National Fire Protection Association (NFPA).** (2023). *The Impact of Technology in Fire Service Operations*. Available at: www.nfpa.org.
21. Khan, F., Xu, Z., Sun, J., Khan, F. M., Ahmed, A., & Zhao, Y. (2022). Recent Advances in Sensors for Fire Detection. *Sensors*, 22(9), 3310. <https://doi.org/10.3390/s22093310>