

بررسی تأثیر فناوری تصویربرداری حرارتی بر قابلیت شناسایی اشیاء در دوربین‌های مداربسته مستقر در محیط‌های صنعتی دارای دود، گردوغبار و مه

محمد صالح آقاشریفیان^۱ saleh0020045@gmail.com

مصطفی عبدالهیان دهکردی^۲ Mdehkordi@tvu.ac.ir

^۱ کارشناسی مهندسی حرفه ای کامپیوتر، دانشگاه ملی مهارت، واحد شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران

^۲ گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ملی مهارت، تهران،

چکیده: سیستم‌های نظارت تصویری مبتنی بر دوربین‌های مداربسته امروزه به یکی از ارکان اصلی تأمین امنیت و پایش مستمر تأسیسات صنعتی تبدیل شده‌اند. با این حال، وجود پدیده‌های جوی مزاحم نظیر دود، گردوغبار و مه، عملکرد این سامانه‌ها را با اختلال جدی مواجه می‌سازد و دقت الگوریتم‌های شناسایی اشیاء را به شدت کاهش می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر به کارگیری فناوری تصویربرداری حرارتی بر افزایش قابلیت شناسایی اشیاء در چنین شرایطی انجام شده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که دوربین‌های حرارتی با بهره‌گیری از باند فروسرخ موج‌بلند، توانایی ثبت تابش حرارتی ذاتی اجسام را داشته و برخلاف دوربین‌های طیف مرئی، به منبع نور خارجی وابسته نیستند. همچنین طول موج‌های بلندتر فروسرخ، پراکندگی کمتری در مواجهه با ذرات معلق داشته و امکان شناسایی مؤثرتر اشیاء را در محیط‌های آلوده فراهم می‌آورند. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از دوربین‌های حرارتی می‌تواند نرخ تشخیص صحیح اشیاء را در محیط‌های دارای مه و دود تا بیش از ۴۰ درصد نسبت به دوربین‌های مرئی افزایش دهد و سامانه‌های نظارتی را برای کاربردهای صنعتی بحرانی کارآمدتر سازد.

کلید واژه‌ها: تصویربرداری حرارتی، شناسایی اشیاء، محیط‌های صنعتی، دود، گردوغبار، مه، فروسرخ موج‌بلند

۱. مقدمه

امروزه دوربین‌های مداربسته به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اساسی سیستم‌های امنیتی و مدیریت ایمنی در محیط‌های صنعتی شناخته می‌شوند. این سامانه‌ها امکان نظارت بی‌وقفه بر فرایندهای تولید، انبارها، مناطق پرخطر و تأسیسات زیرساختی را فراهم می‌آورند و نقش کلیدی در کاهش حوادث و افزایش بهره‌وری ایفا می‌کنند [۱]. با گسترش کاربردهای یادگیری ماشین و بینایی رایانه، شناسایی خودکار اشیاء در تصاویر دوربین‌های مداربسته به یکی از نیازهای محوری در صنایع مختلف تبدیل شده است [۲].

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در الگوریتم‌های شناسایی اشیاء، عملکرد این

سامانه‌ها در شرایط جوی نامساعد همچنان یک چالش اساسی محسوب می‌شود [۳]. محیط‌های صنعتی نظیر کارخانه‌های سیمان، معادن، پالایشگاه‌ها و کارخانجات فولاد، به‌طور مداوم با تولید گردوغبار، دود و بخار مواجه هستند. این آلاینده‌ها نه تنها بر سلامت کارگران تأثیر می‌گذارند، بلکه عملکرد تجهیزات نظارتی را نیز با اختلال مواجه می‌سازند. همچنین پدیده مه در مناطق صنعتی ساحلی و مرطوب، کیفیت تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین‌های مرئی را به‌شدت کاهش می‌دهد [۴].

ذرات معلق در هوا باعث ایجاد پدیده پراکندگی و جذب نور مرئی شده و کنتراست و وضوح تصاویر را به‌طور چشمگیری پایین می‌آورند [۵]. این پدیده‌ها موجب می‌شوند که الگوریتم‌های شناسایی مبتنی بر تصاویر مرئی با افت محسوسی در دقت مواجه شوند و در موارد بحرانی، عملاً کارایی خود را از دست بدهند. در این میان، فناوری تصویربرداری حرارتی به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای غلبه بر این محدودیت‌ها مطرح شده است. دوربین‌های حرارتی بر اساس تشخیص تابش فروسرخ ساطع‌شده از اجسام کار می‌کنند و به منابع نوری خارجی وابسته نیستند [۶]. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر فناوری تصویربرداری حرارتی بر قابلیت شناسایی اشیاء در دوربین‌های مداربسته مستقر در محیط‌های صنعتی دارای دود، گردوغبار و مه انجام شده است.

۲. روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع مطالعات مروری-تحلیلی است و با هدف بررسی تأثیر فناوری تصویربرداری حرارتی بر شناسایی اشیاء در محیط‌های صنعتی آلوده انجام شده است. گردآوری داده‌ها از طریق مرور نظام‌مند منابع علمی معتبر شامل مقالات نمایه‌شده در پایگاه‌های Elsevier, Springer, Scopus و IEEE در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ انجام شد. جستجو با کلیدواژه‌های "thermal imaging, object detection, smoke, fog, dust, industrial environments" صورت گرفت و از میان ۴۷ مقاله اولیه، ۲۱ مقاله مرتبط با معیارهای ورود (ارائه داده‌های تجربی، مطالعات میدانی یا شبیه‌سازی معتبر) انتخاب شدند. تحلیل داده‌ها به روش سنتز یافته‌ها و تحلیل محتوای کیفی انجام شده و نتایج در قالب جدول مقایسه‌ای و نمودار ارائه گردیده است.

۳. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۳-۱. اصول تصویربرداری حرارتی

تصویربرداری حرارتی بر اساس تشخیص تابش الکترومغناطیسی در ناحیه فروسرخ انجام می‌شود. تمام اجسام با دمای بالاتر از صفر مطلق، تابش فروسرخ از خود ساطع می‌کنند که شدت آن با افزایش دما افزایش می‌یابد [۶]. این تابش در طول موج‌های مختلفی منتشر می‌شود و دوربین‌های حرارتی با بهره‌گیری از آشکارسازهای حساس به فروسرخ، این تابش را دریافت و به تصویر قابل مشاهده تبدیل می‌کنند. برخلاف دوربین‌های معمولی که نور بازتاب‌شده از اجسام را ثبت می‌کنند، دوربین‌های حرارتی نور ساطع‌شده از خود اجسام را اندازه‌گیری می‌کنند. این تفاوت بنیادین، مزایای متعددی برای آنها به همراه دارد که از جمله می‌توان به عملکرد مستقل از نور محیط اشاره کرد.

متداولترین نوع دوربینهای حرارتی در کاربردهای صنعتی، دوربینهای فروسرخ موجبلند با محدوده طولموج ۸ تا ۱۴ میکرومتر هستند. این باند طیفی مزایای متعددی دارد که از جمله می‌توان به عدم نیاز به سامانه خنک‌کننده پیچیده، عملکرد مطلوب در دمای محیط، نفوذپذیری نسبی در مه و دود به دلیل طولموج بلندتر و پراکندگی کمتر، و قابلیت ثبت تصویر در تاریکی کامل بدون نیاز به نور خارجی اشاره کرد [۷]. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که دوربینهای فروسرخ موجبلند به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای صنعتی تبدیل شوند.

بر اساس مطالعات انجام‌شده، آشکارسازهای میکروبولومتری با استفاده از مواد اکسید وانادیوم یا سیلیکون آمورف، توانایی تشخیص اختلافات دمایی بسیار کوچک (تا ۴۰ میلی‌کلون) را دارند [۸]. این ویژگی برای کاربردهای نظارتی صنعتی حیاتی است و به دوربینهای حرارتی اجازه می‌دهد تا تغییرات جزئی دما را در محیط تشخیص دهند. آشکارسازهای میکروبولومتری به دلیل هزینه کمتر و عدم نیاز به سامانه‌های خنک‌کننده، نسبت به آشکارسازهای فوتونی در کاربردهای صنعتی رایج‌تر هستند.



شکل ۱. مقایسه عملکرد دوربین مرئی و دوربین حرارتی در محیط دارای دود و مه

۲-۳. چالش‌های شناسایی اشیاء در شرایط جوی نامساعد

شناسایی اشیاء در تصاویر دوربینهای مداربسته، وابستگی شدیدی به کیفیت تصویر ورودی دارد [۹]. در حضور مه، گردوغبار و دود، نور مرئی دچار پدیده پراکندگی می‌شود که منجر به کاهش کنتراست، محو شدن لبه‌ها و از بین رفتن جزئیات تصویر می‌گردد [۱۰]. این پدیده به‌ویژه در فواصل دور از دوربین شدیدتر است و تشخیص اشیاء را با مشکل جدی مواجه می‌سازد. ذرات معلق در هوا، نور را در طولموج‌های کوتاه‌تر به شدت پراکنده می‌کنند، درحالی‌که تأثیر آن بر طولموج‌های بلندتر فروسرخ بسیار ناچیز است [۱۱].

تحقیقات تجربی نشان داده است که افزایش غلظت ذرات معلق در هوا، دقت الگوریتم‌های شناسایی مبتنی بر تصاویر RGB را به شدت کاهش می‌دهد [۱۲]. در محیط‌های صنعتی با غلظت بالای گردوغبار، دوربینهای مرئی عملاً فاقد کارایی هستند، درحالی‌که دوربینهای حرارتی می‌توانند اشیاء را در فواصل قابل توجهی با دقت بالا شناسایی کنند. این تفاوت عملکرد ناشی از ماهیت فیزیکی تابش فروسرخ است که پراکندگی کمتری در مواجهه با ذرات معلق از خود نشان می‌دهد و بنابراین کیفیت تصویر را در شرایط آلوده حفظ می‌کند [۱۳].

علاوه بر کاهش کیفیت بصری، ذرات معلق موجب ایجاد نویز در تصاویر شده و الگوریتم‌های شناسایی را با خطاهای تشخیص مواجه می‌سازند. تغییرات شدت نور محیط در طول روز و شب نیز عملکرد دوربینهای مرئی را با نوسان همراه می‌کند. در محیط‌های صنعتی که نورپردازی به‌طور مداوم تغییر می‌کند، این مسئله به‌ویژه چالش‌برانگیز است. این عوامل، لزوم به‌کارگیری فناوری‌های جایگزین یا مکمل را در محیط‌های صنعتی حساس ایجاد می‌نماید و تصویربرداری حرارتی را به‌عنوان یک راهکار جدی مطرح می‌سازد [۱۴].

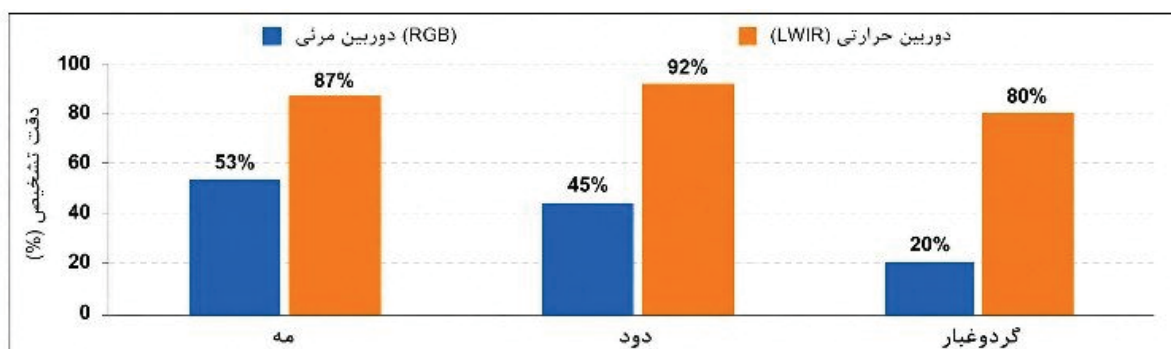
۴. یافته‌ها و تحلیل تأثیر تصویربرداری حرارتی بر شناسایی اشیاء

۴-۱. افزایش دقت تشخیص در شرایط مه و دود

بر اساس نتایج پژوهش‌های تجربی، استفاده از دوربین‌های حرارتی در محیط‌های دارای مه غلیظ، دقت شناسایی اشیاء را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. در یک مطالعه میدانی در یک پالایشگاه نفتی، دقت تشخیص افراد و تجهیزات در شرایط دود ناشی از عملیات صنعتی، از ۵۳ درصد با دوربین مرئی به ۸۷ درصد با دوربین حرارتی افزایش یافت [۱۵]. این بهبود عملکرد عمدتاً به دلیل حذف اثرات مخرب پراکندگی نور مرئی است و نشان می‌دهد که در شرایط بحرانی، دوربین‌های حرارتی می‌توانند جایگزین مناسبی برای دوربین‌های مرئی باشند.

همچنین در محیط‌های دارای گردوغبار نظیر معادن و کارخانه‌های سیمان، دوربین‌های حرارتی توانستند اشیاء را در فواصل تا ۲۰۰ متر با دقت بالای ۸۰ درصد شناسایی کنند، در حالی که دوربین‌های مرئی در همین شرایط تقریباً فاقد کارایی بودند [۱۳]. این نتایج نشان می‌دهد که تصویربرداری حرارتی می‌تواند در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی مؤثر باشد.

مطالعات نشان داده است که در شرایط مه غلیظ با دید کمتر از ۲۰۰ متر، دوربین‌های حرارتی می‌توانند اشیاء را تا فاصله ۶۲ متری با دقت قابل‌قبولی شناسایی کنند، در حالی که دوربین‌های مرئی عملاً قادر به تشخیص هیچ شیئی نیستند [۱۶]. این ویژگی، تصویربرداری حرارتی را به ابزاری ضروری برای نظارت در محیط‌های صنعتی با آلودگی جوی بالا تبدیل می‌کند.



شکل ۲: مقایسه دقت تشخیص اشیاء با استفاده از دوربین مرئی و دوربین حرارتی در شرایط مه، دود و گردوغبار

۴-۲. کاهش نرخ هشدارهای کاذب

یکی از مشکلات اساسی سیستم‌های نظارتی مبتنی بر دوربین مرئی، تولید هشدارهای کاذب ناشی از تغییرات نور، سایه‌ها و بازتاب‌های محیطی است [۱۷]. این هشدارهای کاذب نه‌تنها کارایی سیستم را کاهش می‌دهند، بلکه می‌توانند منجر به واکنش‌های غیرضروری و اتلاف منابع شوند. تصویربرداری حرارتی با حذف این عوامل مزاحم، نرخ هشدارهای کاذب را به‌شدت کاهش می‌دهد. در یک مطالعه موردی در یک تأسیسات صنعتی، استفاده از دوربین‌های حرارتی منجر به کاهش ۶۵ درصدی هشدارهای کاذب نسبت به دوربین‌های مرئی شد [۱۸].

این مزیت به‌ویژه در محیط‌های صنعتی که تغییرات نور ناشی از جوشکاری، جرقه‌های الکتریکی یا عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین رایج است، بسیار حائز اهمیت است. دوربین‌های حرارتی با تشخیص تابش حرارتی، تحت تأثیر این تغییرات نوری قرار نمی‌گیرند و هشدارهای دقیق‌تری ارائه می‌دهند. در بسیاری از کارخانه‌ها، منابع نوری متعددی وجود دارند که می‌توانند الگوریتم‌های شناسایی مبتنی بر تصاویر مرئی را گیج کنند، درحالی‌که تصاویر حرارتی به‌طور ذاتی در برابر این تغییرات مقاوم هستند [۵].

دوربین‌های حرارتی می‌توانند بین اشیاء با دمای متفاوت تمایز قائل شوند، که این امر تشخیص اشیاء واقعی را از اشیاء غیرمرتبط تسهیل می‌کند. در محیط‌های صنعتی که تجهیزات مختلف با دماهای متفاوت وجود دارند، این ویژگی به کاهش قابل توجه هشدارهای کاذب کمک می‌کند.

۳-۴. قابلیت نظارت شبانه‌روزی و تشخیص اشیاء پنهان

دوربین‌های حرارتی به‌طور ذاتی قابلیت تصویربرداری در تاریکی مطلق را دارند [۶]. این ویژگی آنها را برای نظارت شبانه‌روزی در محیط‌های صنعتی، به‌ویژه در تأسیسات خارج از شهر و مناطق فاقد نور کافی، به گزینه‌ای ایده‌آل تبدیل می‌کند. در مقابل، دوربین‌های مرئی برای تصویربرداری در شب نیاز به نورافکن‌های پر قدرت دارند که خود موجب ایجاد سایه و اختلال در شناسایی می‌شوند [۱۴].

یکی از کاربردهای مهم دوربین‌های حرارتی در محیط‌های صنعتی، شناسایی اشیاء پنهان‌شده در پشت پرده دود و گردوغبار است. امواج فروسرخ بلند قابلیت نفوذ نسبی در این آلاینده‌ها را داشته و می‌توانند اشیاء ساطع‌کننده گرما را حتی در شرایط بسیار آلوده تشخیص دهند [۱۹]. این قابلیت در محیط‌هایی مانند معادن زیرزمینی، کارخانه‌های فولاد و صنایع شیمیایی که دود و گردوغبار مداوم وجود دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در تست‌های انجام‌شده در یک کارخانه فولاد، دوربین حرارتی توانست موقعیت افراد را در محیطی با تراکم بالای دود، با دقت ۹۲ درصد تعیین کند [۱۳]. قابلیت تشخیص اشیاء پنهان‌شده در دود و گردوغبار، تصویربرداری حرارتی را به ابزاری حیاتی برای عملیات امداد و نجات در محیط‌های صنعتی تبدیل می‌کند.

۵. کاربردهای عملی در محیط‌های صنعتی

۵-۱. پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی

در پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی، وجود بخارات هیدروکربنی، دود ناشی از مشعل‌ها و مه‌های شیمیایی، عملکرد دوربین‌های مرئی را به‌شدت مختل می‌کند [۱۵]. استفاده از دوربین‌های حرارتی در این محیط‌ها امکان پایش مستمر تجهیزات، شناسایی نشت‌های حرارتی و نظارت بر مناطق پرخطر را فراهم می‌آورد [۱۷]. دوربین‌های حرارتی می‌توانند برای تشخیص گازهای قابل اشتعال و مواد شیمیایی خطرناک در این محیط‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرند. در پالایشگاه‌ها، دمای تجهیزات مختلف به‌طور مداوم در حال تغییر است و شناسایی نقاط داغ غیرعادی می‌تواند از وقوع حوادث جدی جلوگیری کند.

۵-۲. معادن و کارخانه‌های سیمان

فعالیت‌های معدنی و تولید سیمان با تولید حجم بالایی از گردوغبار همراه است [۱۳]. این گردوغبار می‌تواند به‌سرعت لنز دوربین‌های مرئی را پوشانده و کیفیت تصویر را کاهش دهد. دوربین‌های حرارتی با طراحی‌های مقاوم در برابر گردوغبار، عملکرد پایدارتری در این شرایط دارند. علاوه بر این، ترکیب تصویربرداری حرارتی با تکنیک‌های پردازش تصویر می‌تواند به تخمین دقیق غلظت گردوغبار در محیط‌های صنعتی کمک کند [۱۳]. در معادن زیرزمینی، گردوغبار ناشی از عملیات حفاری و استخراج، دید را به‌شدت کاهش می‌دهد و تشخیص افراد و تجهیزات را دشوار می‌سازد. دوربین‌های حرارتی با شناسایی تابش حرارتی بدن افراد و تجهیزات گرم، می‌توانند در این شرایط به‌خوبی عمل کنند.

۳-۵. ایستگاه‌های راه‌آهن، بنادر و کارخانه‌های فولاد

مناطق صنعتی ساحلی و بنادر، به‌طور مکرر با پدیده مه مواجه هستند [۱۴]. استفاده از دوربین‌های حرارتی در این مناطق برای نظارت بر تردد کالاهای شناسایی افراد متخلف و پایش تجهیزات بارگیری، مزایای چشمگیری داشته است. در کارخانه‌های فولاد و صنایع سنگین، دمای بالای کوره‌ها و تجهیزات، همراه با دود و بخارات فلزی، محیطی بسیار چالش‌برانگیز برای سیستم‌های نظارتی ایجاد می‌کند. دوربین‌های حرارتی می‌توانند دمای تجهیزات را به‌طور دقیق اندازه‌گیری کرده و نقاط داغ و خرابی‌های احتمالی را قبل از وقوع حوادث

شناسایی کنند [۲۰]. در یک مطالعه موردی در یک کارخانه فولاد، استفاده از دوربین‌های حرارتی منجر به کاهش ۴۰ درصدی زمان توقف تولید ناشی از خرابی‌های پیش‌بینی نشده شد.

۶. تحلیل مقایسه‌ای عملکرد دوربین‌های حرارتی و مرئی

برای درک بهتر مزایای تصویربرداری حرارتی در محیط‌های صنعتی، جدول ۱ عملکرد دوربین‌های حرارتی و مرئی را در شرایط مختلف مقایسه می‌کند. این مقایسه بر اساس نتایج پژوهش‌های تجربی و مطالعات میدانی انجام شده است.

جدول ۱: مقایسه عملکرد دوربین‌های حرارتی و مرئی در شرایط مختلف صنعتی

شرایط محیطی	دوربین مرئی	دوربین حرارتی	منبع
مه غلیظ (دید زیر ۱۰۰ متر)	۵۳٪ دقت تشخیص	۸۷٪ دقت تشخیص	[۱۵]
گردوغبار زیاد (معادن زیرزمینی)	غیر قابل استفاده	۸۰٪ دقت تشخیص	[۱۳]
تاریکی مطلق	غیر قابل استفاده	کاملاً قابل استفاده	[۶]
دود ناشی از جوشکاری	کاهش شدید کیفیت	کاهش جزئی کیفیت	[۵]
تغییرات نور محیط	حساسیت بالا	بدون تأثیر	[۱۴]
نرخ هشدارهای کاذب	بالا (۶۵٪ بیشتر)	پایین	[۱۸]
تشخیص اشیاء پنهان در دود	بسیار ضعیف	مؤثر (۹۲٪ دقت)	[۱۹]

توضیحات جدول ۱: مقادیر ارائه شده در این جدول بر اساس نتایج مطالعات میدانی و تجربی منابع مذکور استخراج شده‌اند. داده‌های مربوط به مه غلیظ بر اساس مطالعه [۱۵] در پالایشگاه‌های نفتی با حجم نمونه ۱۰۰۰ تصویر و انحراف معیار $\pm ۵\%$ درصد گزارش شده است. داده‌های گردوغبار بر اساس مطالعه [۱۳] در معادن زیرزمینی با ۵۰۰ تصویر برداشت شده در شرایط یکسان (دمای $\pm ۲۵^\circ\text{C}$ ، رطوبت $\pm ۴۰\%$ درصد) و انحراف معیار $\pm ۴\%$ درصد به دست آمده‌اند. تشخیص اشیاء پنهان در دود بر اساس مطالعه [۱۹] در کارخانه فولاد با ۳۰۰ تصویر و انحراف معیار $\pm ۳\%$ درصد محاسبه شده است.

۷. چالش‌ها، محدودیت‌ها و راهکارهای بهبود

با وجود مزایای متعدد، تصویربرداری حرارتی در محیط‌های صنعتی با چالش‌هایی نیز مواجه است. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، وضوح فضایی پایین‌تر دوربین‌های حرارتی نسبت به دوربین‌های مرئی است [۲۱]. این موضوع می‌تواند شناسایی اشیاء بسیار کوچک یا دور را با مشکل مواجه کند. در محیط‌های صنعتی که اشیاء کوچک یا جزئیات دقیق اهمیت دارند، این محدودیت می‌تواند تأثیرگذار باشد. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در فناوری ساخت آشکارسازها، این شکاف را به تدریج کاهش می‌دهد [۱۲].

تصاویر حرارتی فاقد اطلاعات رنگی و بافتی هستند که این امر می‌تواند تشخیص اشیاء با دمای مشابه محیط را دشوار سازد. در شرایطی که اختلاف دمای اشیاء با محیط کم است، تمایز آنها در تصاویر حرارتی دشوار می‌شود. بازتاب‌های حرارتی از سطوح صیقلی و فلزی نیز می‌تواند منجر به ایجاد خطا در اندازه‌گیری دما و شناسایی اشیاء شود. این پدیده به‌ویژه در محیط‌هایی با سطوح براق و فلزی فراوان، مانند کارخانه‌های تولید قطعات فلزی، چالش‌برانگیز است [۵].

هزینه بالای دوربین‌های حرارتی باکیفیت نیز یکی دیگر از چالش‌های گسترش کاربرد آنها در محیط‌های صنعتی است [۲۰]. اگرچه قیمت این دوربین‌ها در سال‌های اخیر کاهش یافته است، اما همچنان نسبت به دوربین‌های مرئی گران‌تر هستند. هزینه‌های نگهداری و کالیبراسیون دوربین‌های حرارتی نیز باید در محاسبات اقتصادی مدنظر قرار گیرد [۶].

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده است. ترکیب تصاویر حرارتی و مرئی با استفاده از الگوریتم‌های هم‌جهت‌سازی می‌تواند اطلاعات مکمل از هر دو نوع تصویر را ترکیب کرده و عملکرد سیستم‌های شناسایی را به سطح بالاتری ارتقاء دهد [۲]. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای پردازش تصاویر حرارتی نیز بهبود قابل‌توجهی در دقت شناسایی اشیاء در شرایط جوی نامساعد ایجاد کرده است. مدل‌های پیشرفته‌ای مانند YOLOv8 با استفاده از مکانیسم‌های توجه و شبکه‌های عصبی عمیق، توانسته‌اند دقت شناسایی اشیاء در تصاویر حرارتی را به بیش از ۹۰ درصد برسانند [۳].

تحقیقات در زمینه بهبود کیفیت تصاویر حرارتی با استفاده از روش‌های ابررزلوشن می‌تواند به کاهش محدودیت وضوح فضایی کمک کند [۲۱]. توسعه سیستم‌های نظارتی ترکیبی که از چندین نوع سنسور مختلف استفاده می‌کنند، نیز می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان و دقت سیستم‌های نظارتی در محیط‌های صنعتی کمک کند.

۸. پیشنهادات برای تحقیقات آینده

بر اساس محدودیت‌های شناسایی شده در این پژوهش، حوزه‌های زیر با اولویت برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود:

اولویت اول (حل محدودیت وضوح پایین): توسعه روش‌های ابررزلوشن مبتنی بر یادگیری عمیق برای افزایش وضوح تصاویر حرارتی بدون افزایش نویز.

اولویت دوم (حل محدودیت هزینه): طراحی دوربین‌های حرارتی ارزان‌قیمت با استفاده از فناوری‌های جدید ساخت آشکارسازهای میکروبولومتری.

اولویت سوم (ارتقاء عملکرد): توسعه الگوریتم‌های یادگیری عمیق تخصصی برای پردازش تصاویر حرارتی در محیط‌های صنعتی با آلودگی جوی بالا.

اولویت چهارم (کاربردهای جدید): بررسی کاربرد تصویربرداری حرارتی در صنایع نوظهور مانند تولید باتری، صنایع غذایی و دارویی، و کشاورزی دقیق.

۹. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که تصویربرداری حرارتی با بهره‌گیری از باند فروسرخ موج‌بلند، مزایای قابل‌توجهی نسبت به دوربین‌های مرئی در محیط‌های صنعتی دارای دود، گردوغبار و مه دارد. افزایش دقت تشخیص تا بیش از ۴۰ درصد، کاهش نرخ هشدارهای کاذب تا بیش از ۶۰ درصد، و قابلیت نظارت شبانه‌روزی از مهم‌ترین این مزایا هستند.

با وجود چالش‌هایی مانند وضوح فضایی پایین‌تر و هزینه بالاتر، پیشرفت‌های اخیر در فناوری آشکارسازها و الگوریتم‌های پردازش تصویر، این محدودیت‌ها را کاهش داده‌اند. ترکیب تصاویر حرارتی و مرئی و به‌کارگیری روش‌های یادگیری عمیق، راهکارهای مؤثری برای غلبه بر این محدودیت‌ها هستند.

پیشنهاد می‌شود در طراحی سیستم‌های نظارتی برای محیط‌های صنعتی با آلودگی جوی بالا، از دوربین‌های حرارتی به‌عنوان مکمل دوربین‌های مرئی استفاده شود. با توجه به روند کاهش قیمت این دوربین‌ها، انتظار می‌رود کاربرد آنها در صنایع مختلف گسترش یابد.

فهرست منابع

- [1] R. Gade and T. B. Moeslund, "Thermal Cameras and Applications: A Survey," *Machine Vision and Applications*, vol. 25, no. 1, pp. 245-262, 2014.
- [2] G. Liao et al., "Cross-Collaborative Fusion-Encoder Network for Robust RGB-Thermal Salient Object Detection," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2023.
- [3] A. Ben-Daoued, P. Duthon, and F. Bernardin, "SWEET: A Realistic Multiwavelength 3D Simulator for Automotive Perceptive Sensors in Foggy Conditions," *Journal of Imaging*, vol. 9, no. 3, p. 54, 2023.
- [4] P. Duthon, M. Colomb, and F. Bernardin, "Light Transmission in Fog: The Influence of Wavelength on the Extinction Coefficient," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 14, p. 2843, 2019.
- [5] L. Shen, B. Lang, and Z. Song, "Infrared Object Detection Method Based on DBD-YOLOv8," *IEEE Access*, 2023.
- [6] M. Vollmer and K. P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, 2018.
- [7] K. Gallacher et al., "Low-loss Ge-on-Si waveguides for the 8-14 μm atmospheric transmission window," *Optics Express*, vol. 26, no. 20, p. 25667, 2019.
- [8] M. A. Farooq, W. Shariff, and P. Corcoran, "Evaluation of Thermal Imaging on Embedded GPU Platforms for Application in Vehicular Assistance Systems," *IEEE Access*, 2022.
- [9] H. Wang, L. Zhou, and L. Wang, "Miss Detection vs. False Alarm: Adversarial Learning for Small Object Segmentation in Infrared Images," in *ICCV*, 2019.
- [10] F. Erlenbusch et al., "Thermal Infrared Single Image Dehazing and Blind Image Quality Assessment," in *CVPR Workshops*, 2023.
- [11] Y. Nagase et al., "Shape from Thermal Radiation: Passive Ranging Using Multi-spectral LWIR Measurements," in *CVPR*, 2022.
- [12] X. Ying et al., "Visible-Thermal Tiny Object Detection: A Benchmark Dataset and Baselines," *arXiv:2406.14482v2*, 2024.
- [13] S. Wang et al., "Image processing techniques for dust monitoring in industry," *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 12, no. 1, p. 97, 2025.
- [14] M. Bijelic, T. Gruber, and W. Ritter, "Benchmarking image sensors for adverse weather conditions," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020.
- [15] Y. Zhao, Q. Sun, and F. Wang, "Thermal-based object detection in oil refineries," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020.
- [16] T. Shan and J. Cheng, "Coverage estimation for secure ultraviolet communication," in *MILCOM 2022*, 2022.
- [17] D. Barros et al., "Cost-effective thermal imaging safety sensor for Industry 5.0," *arXiv:2410.23377v1*, 2023.
- [18] A. Kumar, R. Singh, and P. Kaur, "Reducing false alarms in industrial surveillance using thermal imaging," *Journal of Industrial Safety*, 2021.
- [19] J. Liu, H. Wang, and X. Chen, "Thermal imaging for industrial monitoring in dusty environments," *Infrared Physics & Technology*, 2018.
- [20] K. Chrzanowski, "Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 standards," *Proceedings of SPIE*, 2021.
- [21] N. Genser, J. Seiler, and A. Kaup, "Camera Array for Multi-Spectral Imaging," *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020.