مروری بر روش‌های نظارت و بازرسی از راه دور پل‌ها با استفاده از پهپاد

محمد امین محمدیان سمنانی[1*]، شروان عطایی [2]، مرتضی ملاجعفری [3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران m_mohammadian99@rail.iust.ac.ir

2- دانشیار ، دانشکده مهندسی راه آهن دانشگاه علم و صنعت ایران ، ataei@iust.ac.ir

3- استادیار ، دانشکده مهندسی خودرو دانشگاه علم و صنعت ایران، mollajafari@iust.ac.ir

*محمد امین محمدیان سمنانی

چکیده

نظارت و بازرسی از راه دور پل ها با استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین به دلیل مزایایی که نسبت به روش های بازرسی سنتی ارائه می دهد، در سال های اخیر به یک روش رایج تبدیل شده است. استفاده از پهپادها مسیر های ایمن تر، کارآمدتر و مقرون به صرفه تر را برای بازرسی پل ها و ارزیابی وضعیت آنها فراهم می کند. پهپادهای مجهز به سنسورها و دوربین‌های مختلف، می‌توانند تصاویر و داده‌هایی با وضوح بالا ثبت کنند که می‌توان از آنها برای شناسایی ترک‌ها، خوردگی ها و سایر اشکال خرابی در ساختار استفاده کرد، سپس می توان از این اطلاعات برای برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات استفاده نمود و اطمینان حاصل کرد که پل ها برای استفاده ایمن باقی می مانند. این مقاله به بررسی روش‌های نظارت از راه دور به کمک پهپاد با فن‌آوری‌های مادون‌قرمز، دستگاه‌های تصویر برداری بصری VI ، لیدار و سنسورهای دیگر می‌پردازد که می‌توانند برای نظارت پل‌ها استفاده شوند.

واژه های کلیدی): *پهپاد - بازرسی از راه دور- فن‌آوری‌های غیر مخرب ، پایش پل*

۱- مقدمه

ایمنی سازه یکی از مهم‌ترین مسائل در طول چرخه عمر سازه‌ها، به خصوص در پل‌ها می‌باشد [1]. پل‌ها به خاطر پیری، خوردگی، خستگی و اثرات غیر منتظره در معرض زوال قرار دارند. در نتیجه، آسیب به روسازه یا زیر سازه پل مانند ترک‌خوردگی، تورق، نشست پی و ... ممکن است رخ دهد [2]. آسیب به یک پل می‌تواند اثرات اقتصادی قابل‌توجهی داشته باشد و به سرعت به یک فاجعه تبدیل شود. اگرچه عوارض متعدد بازرسی و نظارت بر پل‌ها کاری زمان‌بر و پرهزینه می باشد [3] اما اغلب کمبود بودجه برای بازرسی‌های متناوب، تعمیرات و نگهداری وجود دارد. بنابراین، نیاز به راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه برای بازرسی از اهمیت ویژه ای برخوردار است .

2- انواع وسایل نقلیه بدون سرنشین

وسایل نقلیه بدون سرنشین (UAVs) را می توان به عنوان بخشی از صنایع هوایی تعریف کرد که بدون خلبان کار می‌کنند. اگرچه آن‌ها به طور گسترده به عنوان هواپیماهای بدون سرنشین، هواپیماهای بدون خلبان راه دور (RPA) و یا سیستم‌های هوایی بدون سرنشین (UAS) شناخته می‌شوند، اما تفاوت‌های ظریفی بین هر یک از اصطلاحات وجود دارد.

درن‌ها (Drone) معمولا به هر وسیله نقلیه کنترل از راه دور شامل زیردریایی‌ها یا وسایل نقلیه خودکار مبتنی بر سطح (هوا، زمین، دریا) اشاره می‌کنند، در حالی که یک پهپاد(UAV) هواپیمایی است که قادر به پرواز از راه دور یا خودکار در مسافت‌های طولانی با کمک یک دستگاه کنترل است [4] .از سوی دیگر، سیستم‌های هوایی بدون سرنشین (UAS) به سیستم کاملی اشاره دارد که وسایل نقلیه بدون سرنشین، واحدهای فرعی و همچنین اپراتور روی زمین را در بر می‌گیرد. در شکل 1 موارد استفاده پهپاد در زمینه‌های مختلف را مشاهده می کنیم.

شکل1-کاربرد پهپاد

3- عوامل موثر بر عملکرد پهپاد

عملیات پهپادی با عوامل متعددی از جمله تجهیزات، پروتکل های آزمایشی، مصالح و هندسه پل، محیط و مقررات ایمنی مشخص می‌شود. بهینه‌سازی مسیر پرواز و انتخاب مکان‌های کنترل به این فاکتورها و همچنین به شکل و اندازه پل هدف بستگی دارد. که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

3-1- تجهیزات

ظرفیت بار مفید، ظرفیت باتری و محدوده کنترل، از جمله فاصله و مدت زمان پرواز ایمن، برخی از عوامل مربوط به تجهیزات موثر بر عملکرد پهپاد هستند [5].

به طور معمول، مدت زمان پرواز، اغلب به بار و ظرفیت باتری بستگی دارد، از سوی دیگر مدت زمان پرواز نیز می‌تواند به وضوح دوربین برای کیفیت مطلوب بررسی وابسته باشد.

اگر چه پهپاد به طور معمول می‌تواند بار را بالاتر از بار مشخص شده توسط تولید کننده تحمل کند، فراتر رفتن از حداکثر ظرفیت می‌تواند به طور قابل

توجهی بر عملکرد پهپاد تاثیر بگذارد که منجر به پروازهای ناپایدار و کوتاه‌تر، به دلیل مصرف انرژی بیشتر می‌شود [6], [7].

2-3- پروتکل های آزمایشی

کیفیت داده‌های بدست آمده به شدت به قابلیت‌ها و راحتی خلبان در طول عملیات پرواز بستگی دارد [8]. خلبان پهپاد مجاز نیست تحت تاثیر الکل یا مواد مخدر و همچنین داروهای خاص قرار داشته باشد و یا بیماری‌های زمینه‌ای پزشکی مانند صرع، هیپرونتیلاسیون، استرس، خستگی، دهیدراتاسیون و سکته مغزی داشته باشد [9]. پرواز تحت هر یک از این شرایط می‌تواند منجر به اختلال و از دست دادن زمینه ادراکی شود. خلبان مجبور است قبل از هر پرواز یک خود ارزیابی فیزیکی انجام دهد. اغلب مقررات، یک ناظر کمک‌کننده را برای ارزیابی مجدد مسیرهای پرواز و حفاظت از عملیات هواپیماهای بدون سرنشین ضروری می‌سازد. علاوه بر این، آموزش خلبانان ضروری است زیرا این امر بر کنترل هواپیماهای بدون سرنشین، ارتباط بین تیم در محل کار و همچنین رعایت مقررات ایمنی تاثیر می‌گذارد. اداره هوانوردی فدرال در سال 2016 گزارش داد که بزرگ‌ترین درصد تصادفات بدون سرنشین در نتیجه خطا از طرف خلبان رخ داده است [10] این مساله در درجه اول ناشی از عدم قطعیت در مورد محدودیت‌های قانونی و عدم وجود استراتژی‌های کاهش ریسک در محل است.

3-3- مصالح و هندسه پل

شناسایی آسیب مبتنی بر پهپاد برای مواد متنوع (فولاد، الوار، بتن) و طیف گسترده عناصر متعدد پل (عرشه، تکیه‌گاه‌ها، خرپاها، تیر آهن‌ها و غیره) می تواند تاثیر گذار باشد [11], [12].

تومیچک (Tomiczek) و همکاران گزارش دادند عملکرد بهتر وسایل نقلیه بدون سرنشین هنگام بازرسی دهانه‌های تیر بتنی پیش تنیده در مقایسه با دهانه‌های تیر فولادی[13] دلیل احتمالی این بود که مغناطیس سنج روی پهپاد تحت‌تاثیر مواد فولادی، ممکن است پتانسیل تشخیص حسگر را مهار کرده باشد. همچنین اشاره شد که هندسه‌های خاص، مانند دهانه‌های با فضای خالی کم، ممکن است منجر به شرایط نوری کم شود که عامل دیگری است که بر قابلیت‌های حسگر جریان نوری تاثیر می‌گذارد. چنین مواردی همچنین این پتانسیل را دارند که بر برآورد دقیق سرعت و موقعیت سیستم‌های هوایی تاثیر بگذارند، در نتیجه پرواز مستقل تحت هندسه‌های خاص را مانع گردد . مطالعه دیگر محدوده حداکثر ترک تا فاصله دوربین را برای شناسایی ترک‌های ناشی از خستگی به صورت 0/3 متر (شرایط نوری ضعیف) تا 1/1 متر (شرایط نوری خوب) تعیین کرد [14].

سئو (Seo) و همکاران برای جلوگیری از خدشه در تصویر، برنامه ریزی دقیق پرواز را پیشنهاد کردند. نوردهی زیاد و اجتناب از موانع و همچنین اتصال چراغ قوه به سیستم برای بهبود روشنایی هندسه‌های با نور ضعیف، مانند عرشه پل را توصیه نمودند [11].

4-3- محیط

عوامل محیطی، به طور معمول شرایط آب و هوایی یا موانع مسیر، برخی از عوامل محوری موثر بر عملکرد پهپاد برای نظارت بر شرایط پل هستند [8]. بارندگی باعث می‌شود که پهپاد غیرقابل استفاده شود. به طور خاص، تندبادها می‌توانند به شدت بر پایداری هواپیماهای بدون سرنشین تاثیر بگذارند، که منجر به آشفتگی و کیفیت داده‌ها شود. علاوه بر این، حالت پرواز ممکن است از حالت خودکار به دستی تغییر کند که نیاز به پرسنل آموزش‌دیده دارد.

یکی از این مطالعات، پهپاد با وزن 2.5 کیلوگرم را با سرعت باد 6.7 متر بر ثانیه به حرکت درآورد. درختان، سیم‌های برق یا موانع دیگر در مسیر پهپاد می توانند مانع دید اپراتور شده و همچنین بر ایمنی هواپیما تأثیر بگذارند[13].

مطالعه دیگری شرایط بیش از حد باد و نوردهی زیاد دوربین بصری به خورشید یا برف را به عنوان برخی از عوامل موثر بر عملکرد پهپاد شناسایی کرده‌است [11]. اتصال ضعیف سیستم موقعیت یابی جهانی و شرایط باد نیز می‌تواند منجر به از دست دادن کنترل مستقل و کسب داده‌های مبهم شود که منجر به مشکلاتی در تشخیص آسیب می‌شود[13], [14]. علاوه بر این، هنگام پرواز نزدیک به سطح زمین، کیفیت تصویربرداری پهپاد می‌تواند تحت‌تاثیر ذرات گرد و غبار قرار گیرد [15].

در مطالعه‌ای دیگر سرعت باد کم‌تر از 24.1 کیلومتر بر ساعت برای عملیات ایمن وسایل نقلیه بدون سرنشین توصیه شده‌است [11]. دمای مناسب محیط در طول بدست آوردن تصویر حیاتی است، زیرا سرمای شدید می‌تواند بر عملکرد باتری هواپیما تاثیر بگذارد، در نتیجه مدت زمان پرواز را کاهش دهد [16], [17]. علاوه بر این، توصیه شد که آزمایش مورد نظر را در روزهای ابری یا در ساعات اولیه صبح انجام شود تا از روشنایی ثابت اطمینان حاصل شود.

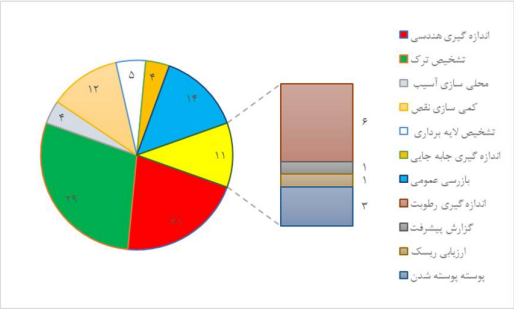
5-3- مقررات ایمنی

مانع اصلی پیش روی توسعه سریع وسایل نقلیه بدون سرنشین برای فعالیت‌های تجاری مربوط به ایمنی آن‌ها است. این مقررات وزن پهپاد و محدودیت‌های ارتفاع پرواز، فواصل ایمن برای حفظ از سازه‌های ساخته‌شده، ترافیک و جمعیت انسانی و همچنین محدود کردن عملیات آن‌ها به روز، را تصریح می‌کند. بسیاری از این مقررات همچنین به کسب مجوز و تاییدیه آزمایشی از مقامات محلی قبل از پرواز نیاز دارند. عملیات‌های سخت در مناطق خاصی مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، زندان‌ها، سایت‌های نظامی، فرودگاه‌ها و غیره محدود شده‌اند. با این حال باید توجه داشت که برخی از این مقررات ممکن است تحت شرایط مناسب لغو شوند. برای غلبه بر موانع نظارتی، چندین متخصص علمی و مهندسی فن‌آوری پهپاد را در رشته‌های مربوطه خود بررسی کرده‌اند. این مقررات باید قبل از استقرار وسایل نقلیه بدون سرنشین به طور کامل بررسی شوند زیرا برخی از این محدودیت‌ها از جمله محدودیت‌های مربوط به ترافیک ممکن است بر فرآیند جمع‌آوری داده بخش‌های مجاور جاده‌ها تاثیر بگذارند، که به نوبه خود ممکن است نیاز به بازرسان پل برای اعمال اقدامات کاهنده برای جلوگیری از مجموعه داده‌های ناقص داشته باشند [18].

4- آسیب های شناسایی شده پل توسط پهپاد

بخش حاضر همچنین در مورد مطالعاتی بحث می‌کند که مقایسه و ادغام سیستم‌های آزمایش غیر مخرب (NDT-UAV) را بررسی کرده‌اند. تجزیه

و تحلیل اولیه مطالعه حاضر تلاش کرد تا مناطق عمده کاربردNDT - UAV را در نظارت بر وضعیت پل شناسایی کند. این تحلیل نشان داد که اکثر کاربردها بر تشخیص ترک‌ها بر روی سازه‌های پل تمرکز دارند. اندازه‌گیری هندسی عناصر پل یکی دیگر از کاربردهای مهم بود که به دنبال آن بازرسی عمومی، کمی سازی نقص و شناسایی نفوذ رطوبت صورت گرفت. تشخیص لایه‌لایه شدگی، تعیین محل آسیب، اندازه‌گیری جابجایی، شناسایی سطوح تماس یافته، ارزیابی ریسک، دیگر کاربردهای NDT - UAV هستند. شکل 2 خلاصه‌ای از کاربردهای NDT - UAV در نظارت بر وضعیت پل را نشان می‌دهد.



شکل2-کاربردهای NDT-UAV در پایش وضعیت پل[18]

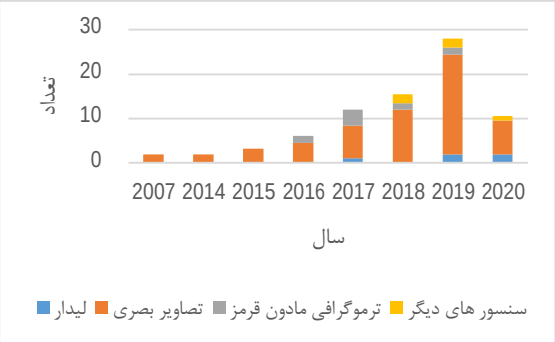
تکنیک‌های بازرسی موجود، مانند بازرسی بصری، زمانبر، ذهنی و اغلب ناقص هستند. تست های غیر مخرب (NDT) با استفاده از وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین در سال‌های اخیر، به ویژه به دلیل افزایش دسترسی و بهره‌وری هزینه، بازدارندگی از بسته شدن ترافیک و بهبود ایمنی در طول بازرسی، در حال افزایش است . هدف اصلی این مقاله بررسی جامع کاربرد وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین در نظارت بر وضعیت پل است که در ارتباط با فن‌آوری‌های سنجش از دور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تکنولوژی‌های تست‌های غیر مخرب که به طور مکرر با هواپیماهای بدون سرنشین برای بازرسی پل ترکیب می‌شوند، در این بخش ارائه می‌شوند. تکنیک‌های تصویربرداری بصری، متشکل از دوربین‌های عکس و ویدئویی، رایج‌ترین تکنیک‌های تست‌های غیرمخرب برای کسب داده‌های مبتنی بر هواپیماهای بدون سرنشین بودند که توسط ترموگرافی مادون قرمز ، لیدار و حسگر ها دنبال شدند (به شکل 3رجوع کنید).

5- فن‌آوری‌های ارزیابی پل به کمک پهپاد

فن‌آوری‌های سنجش از دور مانند تصویر سازی بصری، ترموگرافی مادون‌قرمز، لیدار و دیگر حسگرها، که با وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین برای کسب داده‌ها یکپارچه شده‌اند، به صورت عمیق مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. ما در این جا سیستم‌های وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین مبتنی بر تست غیر مخرب را مورد بررسی قرار داده‌ایم. علاوه بر مقایسه روش‌های NDT - UAV به صورت جداگانه و با یک دیگر، تسهیل بازرسی پل با استفاده از وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین به طور کامل از نظر سهولت استفاده، دقت، هزینه، بهره‌وری ابزارهای جمع‌آوری داده به کار گرفته‌شده و پلتفرم‌های شبیه‌سازی مورد بحث قرار گرفته است [19].

این مقاله به بررسی فن‌آوری‌های غیر مخرب می‌پردازد که می‌توانند بر روی وسایل نقلیه بدون سرنشین برای نظارت بر پل و جمع‌آوری داده‌ها شامل سیستم‌های مادون‌قرمز، دستگاه‌های تصویر برداری بصری VI ، لیدار و دیگر حسگرها نصب شوند. مقالات کنفرانس و ژورنال منتشر شده در سراسر جهان، در طول دوره مطالعاتی 2000 تا 2020، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. شکل 3 توزیع مطالعات پهپاد مبتنی برفن‌آوری‌های غیرمخرب گردآوری‌شده در طول دوره مطالعه را نشان می‌دهد. اخیرا علاقه به این حوزه از تحقیق در حال افزایش است و بیشتر مطالعات بررسی شده در سه سال گذشته انجام شده‌است [18].



شکل3-توزیع سالانه فناوری های NDT-UAV که برای ارزیابی وضعیت پل استفاده می شود[18]

5-1- ترموگرافی مادون‌قرمز

ترموگرافی مادون‌قرمزیک تکنولوژی غیر تماسی است که قادر به تشخیص آسیب زیر سطحی می‌باشد [7]، [20]. شکل 4 یک سیستم پهپاد مبتنی بر ترموگرافی مادون‌قرمز و یک نمونه از داده‌های ترموگرافی مادون‌قرمز بدست‌آمده را نشان می‌دهد. این روش سطوح بتنی لایه لایه شده و سطوح بتنی بدون لایه، را بر اساس گرادیان درجه حرارت سطوح تحت حرارت طبیعی یا مصنوعی در معرض حرارت قرار می دهد و از هم تفکیک می کند. نواحی بالاتر از سطوح لایه لایه شده داغ‌تر از نواحی متناظر در بالای بتن سالم شناخته می‌شوند زیرا تورق انتقال حرارت را مختل می‌کند.

شکل4-تجهیزات IR-UAV معمولی و داده های ترموگرافی نمونه[18]

مطالعات بسیار کمی به بررسی استفاده از وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین مبتنی بر ترموگرافی در نظارت بر وضعیت پل پرداخته‌اند.

مقایسه ترموگرافی مادون‌قرمز با روش های سنتی

یکی از این مطالعات تصاویر حرارتی دو عرشه پل بتنی در حال بررسی را با استفاده از یک هواپیمای ارتفاع پایین نصب‌شده با دوربین IR به دست آورد [21].

مناطقی از نقایص زیرسطحی شناسایی‌شده توسط سیستم IRT - UAV در برابر تکنیک‌های سنتی مانند پتانسیل نیم سلول و صدای چکش تایید شدند. نتایج نشان داد که ضربه زدن چکشی در تشخیص تورق در مقایسه با IRT UAVs - تقریبا 9 % دقیق‌تر بود. از سوی دیگر، سیستم پیشنهادی 6 تا 8 درصد دقت بالاتری را در هنگام تشخیص عیوب زیرسطحی در مقایسه با پتانسیل نیم سلول نشان داد که به توانایی پتانسیل نیم سلول تنها در تشخیص نواحی با فعالیت خوردگی پیشرفته نسبت داده شد.

مقایسه تصاویر دوربین ترموگرافی مادون قرمز پهپاد با دوربین مادون قرمز دستی در مطالعه دیگر سودمندی سیستم‌های مادون‌قرمز هوابرد را برای ترموگرافی تورق مصنوعی بر روی نمونه عرشه پل بتنی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌است [22]. کنتراست مطلق ایجاد شده توسط IRT - UAVs در مقایسه با یک دوربین مادون‌قرمز دستی کمی کم‌تر بود. با این حال، مشابه با سیستم دستی، IRT - UAV ثابت شد که قادر به شناسایی تورق تا عمق 4 سانتی متر و داشتن نسبت عرض به عمق کم‌تر از 1.9 است.

2-5- تصاویر بصری

تصویر سازی بصری، مشابه با فتوگرامتری، با کسب تصاویر گرافیکی، ویدئو و دیگر اطلاعات بصری سر و کار دارد. این‌ها معمولا با کمک دوربین‌های تصویر ثابت، دوربین‌های ویدئویی، تلفن‌های همراه و غیره به دست می‌آیند. شکل 5 جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از یک پهپاد با تجهیزات تصویر سازی بصری را نشان می‌دهد. اکثر مطالعات از تصویر سازی بصری، برای کسب داده‌ها بر روی هواپیماهای بدون سرنشین استفاده می‌کنند.

از سوی دیگر، مطالعه‌ای توسط ژونگ (Zhong) و همکارانش نشان داد که اندازه‌گیری ترک بتنی با استفاده از تصاویر هوایی به‌دست‌آمده از طریق یک سیستم VI - UAVدر مقایسه با تصاویر بدست‌آمده از مشابه سنتی، مانند تصاویر استاتیک و ابزار اندازه‌گیری عرض ترک قابل‌اعتمادتر بود [23].

به طور مشابه، سو (Seo) و همکاران گزارش دادند که نظارت بر وضعیت پل مبتنی بر VI - UAV کارآمد بود. در شناسایی آسیب‌ها در عین حال که به طور همزمان نسبت به روش‌های سنتی مقرون به‌صرفه‌تر است [24].

شکل5- تجهیزات VI-UAV و نمونه ای از داده های به دست آمده[18]

جلینوس (Jalinoos) و همکارانش از یک هواپیمای بدون سرنشین برای ارزیابی خسارت پس از آسیب زیر ساخت‌های پل در معرض رویدادهای زمین‌شناسی و هیدرولیکی شدید استفاده کردند[6]. روش پیشنهادی دقت بالایی را در تشخیص حرکت انتقالی، چرخش و ... شبیه‌سازی شده گزارش کرده‌است. نتایج نشان داد که میانگین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده به ترتیب 0/7 سانتی متر، 1 سانتی متر و 1/4 سانتی متر در جهت انتقال، چرخش و نشست بود.

سو و همکاران نتایج حاصل از بازرسی هوایی در مقایسه با بازرسی چشمی سنتی در تشخیص ترک‌های بتنی، پوسته‌پوسته شدن، رسوب نمک و آسیب رطوبتی به دست آمده‌است را مورد بررسی قرار دادند [25]. این مطالعه مشاهده کرد که تشخیص خرابی توسط پهپاد دقیق‌تر بود و آسیب‌های خاصی در گزارش بازرسی چشمی، به ویژه آسیب مربوط به رطوبت بر روی تیر پل گزارش نشده بود.

یک چارچوب مبتنی بر VI - UAV برای تشخیص خوردگی بیش از حد بر روی پل‌های فولادی توسط مارچوکا (Marchewka) و دیگران [12] توسعه داده شد. توسعه مدل رنگی زنگ زدن سطح خورده‌شده، دقت 96 % را نشان می‌دهد. با این حال، لازم به ذکر است که مطالعات بلند مدت برای تایید قطعی روش پیشنهادی مورد نیاز است.

یک سیستم هوایی بدون سرنشین مبتنی بر ویدئو برای نظارت بر جابجایی سازه پل مورد بررسی قرار گرفت [26]. رویکرد پیشنهادی معایب مربوط به دوربین‌های ثابت میدانی از جمله پیدا کردن یک مکان بهینه برای نصب دوربین با خط دید کافی را از بین برد. آزمایش‌ها بر روی پل راه‌آهن، نتایج دقیقی را نشان داد که منجر به خطای جذر میانگین مربعات برابر با 2.14 میلی متر شد.

مطالعه دیگری اثبات کرد که دوربین‌های RGB بر روی سیستم‌های هوایی دارای قابلیت‌های تشخیص آسیب، مشابه با بازرسی بصری هستند [27].

3-5- لیدار

لیدار که مخفف عبارت آشکار سازی نوری و بردیابی است، یک نوع حسگر نوری از راه دور می باشد، که در آن با استفاده از لیزر پالسی، پالس هایی به درون محیط تزریق، آن گاه بازتاب نور پراکنده شده با تأخیر زمانی معین توسط سامانه آشکار ساز لیدار، آشکار می گردد. این سامانه با ارسال پالس های لیزری به سمت هدف، زمان بازگشت پالس به سمت گیرنده را اندازه گیری و با توجه به سرعت نور، فاصله هدف را محاسبه می کند. لیدار با سامانه فاصله یاب و کشف لیزری یک سامانه سنجش از راه دور است، که به منظور جمع آوری اطلاعات توپوگرافی استفاده می‌گردد. بر این اساس، تکنیک لیدار شباهت بسیار زیادی به تکنیک رادار دارد. به این دلیل به رادار لیزری نیز مشهور است. تفاوت این دو را می توان در طول موج های مورد استفاده آنها جستجو کرد. در حالی که رادار از امواج رادیویی با طول موج هایی در حد سانتی متر استفاده می نماید، لیدار از طول موج های نوری که توسط لیزرها فراهم می شوند، بهره می‌برد. این سامانه با سامانه های موقعیت یاب جهانی در یگان های پروازی نصب می‌شود.

حسگر های لیدار، اطلاعات نقاطی که به طور مرتب توسط سامانه موقعیت یاب جهانی ثبت می‌گردد را جمع‌آوری، پردازش و تجزیه و تحلیل می‌کند سپس این اطلاعات به صورت طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ثبت و به صورت مدل ارتفاع دیجیتالی نمایش داده می شود. اطلاعاتی که توسط سامانه لیدار جمع آوری می‌گردد، به صورت مختصات سه بعدی X، Y و Z است. اطلاعات لیدار قابل تلفیق با اطلاعات تصاویر هوایی بوده و با مقایسه

این تصاویر می‌توان خصوصیات زمین و دریا را به سادگی شناسایی کرد [28] .

به طور کلی یک سامانه لیدار از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

الف) فرستنده

ب) گیرنده

ج) آشکارساز

لیدار یک فناوری شبیه به رادار است که با ارسال موج لیزر به سمت عارضه و دریافت آن، با ثبت شدت موج برگشتی و اندازه گیری زمان رفت و برگشت موج، تصویر عارضه را ثبت و فاصله را محاسبه می‌نماید.

در سامانه لیدار که به نام های رادار لیزری ، رادار نوری و ALSM بیان می‌گردد، از فرکانس های نوری استفاده می‌شود. این فناوری قادر است فاصله بین سنجنده تا شی یا یک سطح را توسط پالس های لیزر اندازه گیری نماید. سامانه رادار با استفاده از امواج رادیویی و با اندازه گیری زمان ارسال تا دریافت موج، فاصله را محاسبه می‌کند، اما سامانه لیدار از نور یا لیزر استفاده می‌نماید. تفاوت اصلی لیدار و رادار در طول موج‌های مورد استفاده می‌باشد. در لیدار از طول موج های بسیار کوچک که به نوعی در محدوده ماوراء بنفش، مرئی یا مادون قرمز نزدیک است، استفاده شده اما در رادار از امواج با طول موجهای بلند در محدوده ماکروویو استفاده می‌شود. لازم به ذکر است طول موج‌های به کار گرفته شده در لیدار حدودا 10000 تا 100000 برابر کوچک تر از طول موج های سامانه رادار است. در لیدار ممکن است موج پیوسته یا پالس به صورت متمرکز یا به صورت پرتوهای موازی استفاده شود. امواج پیوسته در لیدار هنگامی استفاده می‌شود که فواصل کوتاه و پریودهای طولانی مورد نظر باشد. از لیزر به صورت پالس در مواردی استفاده می‌شود که از توان بسیار بالاتری در طول کار استفاده شود. بنابراین نسبت سیگنال به نویز بیشتر است، در سامانه‌های لیدار برای اندازه گیری فواصل دور معمولا از پالس استفاده می شود. لیدار ممکن است دارای یک فرستنده و یک گیرنده به صورت جداگانه باشد یا دارای یک بخش بوده که در آن ارسال و دریافت امواج صورت می‌گیرد.

4-5- سنسورهای دیگر

ارتعاش سنج لیزری داپلر (LDV) یک ابزار علمی است که برای اندازه-گیری ارتعاشات غیر تماسی یک سطح استفاده می شود. پرتو لیزر از ارتعاش سنج لیزری داپلر به سطح مورد نظر هدایت می‌شود و دامنه و فرکانس ارتعاش از تغییر داپلر فرکانس پرتو لیزر منعکس شده به دلیل حرکت سطح استخراج می‌شود. فرکانس و دامنه ارتعاش، از جابجایی داپلر فرکانس نور لیزر حاصل می‌شود. خروجی یک ارتعاش سنج لیزری داپلر به طور کلی یک ولتاژ آنالوگ پیوسته است. برخی از مزایای ویبرومتر لیزری داپلر نسبت به دستگاه‌های اندازه‌گیری مشابه مانند شتاب سنج این است که ویبرومتر لیزری داپلر می‌تواند به اهدافی هدایت شود که دسترسی به آن‌ها دشوار است.

مطالعه دیگر وسایل نقلیه بدون سرنشین جاسازی شده با ارتعاش سنج لیزری داپلر را برای اندازه‌گیری جابجایی دینامیکی پل مورد استفاده قرار داده‌است[29] . بررسی انجام شده نشان داد نتایج استفاده از این فناوری با روش های سنتی بسیار نزدیک است .

ضربه زدن هوایی (Aerial tap testing)، مورئو(Moreu) و همکاران یک سیستم آزمایش ضربه زدن هوایی را برای شناسایی مناطق آسیب دیده توسعه دادند [30] سیستم قادر بود از راه دور سطح را تحت‌تاثیر قرار دهد و داده‌های صوتی را برای نظارت بر وضعیت پردازش کند. با این حال، اشاره شد که صداهای پهپاد با داده‌های صوتی روش تست ضربه تداخل دارند و ممکن است تا حدی بر دقت نتایج تاثیر گذاشته شود.

سیستم موقعیت یابی جهانی (GPS) معمولا برای کنترل پرواز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، آن‌ها قابلیت اطمینان ضعیفی را ارائه می‌دهند زیرا اتصال ماهواره‌ای می‌تواند در مناطق خاصی مانند پایین عرشه پل قطع شود.

بعد از جمع‌آوری داده‌ها به روش های ذکر شده باید به تجزیه تحلیل اطلاعات بپردازیم که این مهم به وسیله پردازش تصویر امکان‌پذیر می‌گردد.

5-5- عملکرد توام حسگرها

تکنیک‌ها به تنهایی، اگر چه در عملکرد رضایت‌بخش هستند، اما دارای ضعف در تشخیص آسیب هستند [31], [32] . یکپارچگی فن‌آوری‌های مختلف تست های غیر تماسی می‌تواند به طور بالقوه قدرت تشخیص در شناسایی و همچنین بهبود قابلیت اطمینان نتایج را در فرآیند رتبه‌بندی شرایط پل افزایش دهد. این تکنولوژی‌ها می‌توانند درکنار یکدیگر کار کنند، نرخ تشخیص را افزایش دهند و محدودیت‌ها را کاهش دهند.

اسکوبار ولف (Escobar-Wolf) و همکارانش پتانسیل ادغام دوربین‌های مرئی و مادون‌قرمز برای ارزیابی آسیب مورد مطالعه قرار داد[33]. اگر چه سیستم UAV - IRT مستقل (که در برابر آزمون‌های اندازه‌گیری چکش تایید شده‌است) نتایج رضایت‌بخشی را ارائه می‌دهد، ادغام با فتوگرامتری عملکرد را با حذف مناطق تورق به طور اشتباه ترسیم شده را بهبود می‌بخشد.

مطالعه دیگری امکان ترکیب دوربین‌های بصری و حرارتی پهپاد و همچنین اسکنرهای لیزری را برای توسعه یک سیستم نظارت بر شرایط جامع ارائه داد [34] UAV-VI ترک را مشخص می کند، در حالی که حسگرهای IR اجازه تشخیص و طبقه بندی آسیب‌های ناشی از رطوبت را می دهند. از سوی دیگر حسگرهای لیدار برای تشخیص تغییر شکل مفید بودند.

6- مراحل اساسی پردازش تصویر

مرحله اول این فرآیند، تصویر برداری، یعنی به دست آوردن یک تصویر دیجیتال می باشد. دستگاه های مختلفی برای دریافت تصویر وجود دارند که هر یک مبتنی بر روش به خصوصی کار می‌کنند، مانند تصویر برداری توسط یک دوربین عکس برداری یا فیلم برداری، تصویر برداری با استفاده از اشعه x، تصویر برداری مادون قرمز و...

مرحله دوم فرآیند پردازش تصویر، پیش پردازش نامیده می-شود. وظیفه اصلی پیش پردازش، بهبود تصویر با استفاده از روش‌هایی است که امکان توفیق سایر پردازش‌ها را نیز افزایش می‌دهد در این مرحله، روی تصویر کار می‌کنیم تا تصویر را برای مرحله پردازش آماده کنیم. اغلب در پردازش تصویر وقتی فریم در ثانیه دوربین نسبت به حرکت تصویر کم باشد کشیدگی تصویر ایجاد می‌شود در این حالت برای بهبود تصویر نیاز است که پیش پردازش انجام گیرد.

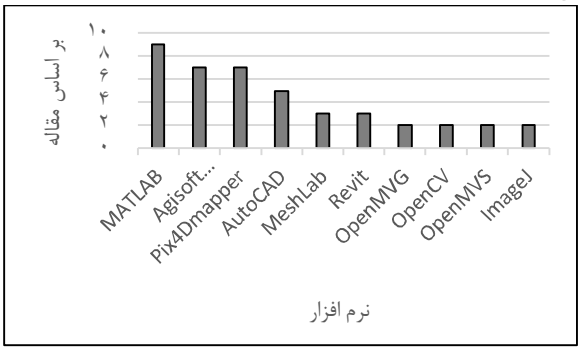
مرحله سوم این فرآیند، بخش بندی نامیده می‌شود. بخش بندی، فرآیندی است که تصویر ورودی را به قسمت ها یا اجزا تشکیل دهنده اش تقسیم

می‌کند. در پردازش تصاویر دیجیتال، بخش بندی یکی از مشکل ترین کارهاست. از طرفی یک شیوه قوی بخش بندی، تا حد زیادی فرایند را به حل موفق مساله مورد نظر نزدیک می‌کند و از طرف دیگر، الگوریتم های ضعیف یا خطا دار بخش بندی تقریباً همیشه باعث خطا در پردازش تصویر می‌شوند.

مرحله بعد، مرحله پردازش تصویر نامیده می‌شود. در این مرحله با اعمال الگوریتم‌هایی بر روی تصاویری که در مراحل قبل روی آنها پیش پردازش و بخش بندی انجام گرفته است، تصویر را پردازش می‌نماییم و در مرحله آخر با استفاده از تصویر پردازش شده در مرحله قبل، آن را آنالیز نموده و اطلاعاتی را که برای دستیابی به آن‌ها تصویر را در این زنجیره قرار داده ایم بدست می‌آوریم. این مرحله که آخرین مرحله از فرایند پردازش تصویر می-باشد، آنالیز تصویر نامیده می‌شود[35].

7- نرم افزار های پردازش تصویر

شبیه سازی مختلف و نرم افزارهای پردازش داده برای پردازش اطلاعات بدست آمده از سیستم‌های NDT - UAV در دسترس هستند. شکل6 نرم‌افزار مورد استفاده برای نظارت بر وضعیت پل مبتنی بر پهپاد را نشان می‌دهد.



شکل6-انواع بسترهای شبیه سازی و تعداد مطالعات مربوطه [18]

8- برآورد هزینه در بازرسی پل

در طول دهه گذشته، پیشرفت‌های تکنولوژیکی سیستم‌های پهپاد را بیشتر در دسترس قرار داده و عملکرد را بهبود بخشیده‌است، در حالی که به طور همزمان هزینه‌ها را کاهش داده‌است. طیف گسترده‌ای از سیستم‌های پهپاد در محدوده قیمت متغیر در بازار در دسترس هستند تا تقاضای رو به افزایش ناشی از برنامه‌های غیر نظامی را برآورده سازند. تخصص و ویژگی‌های عملکرد پهپاد شامل طراحی پهپاد، ظرفیت بار مفید، قابلیت باتری، مدت‌زمان پرواز، امکانات پردازش داده‌ها، سازگاری سنسور و غیره بر هزینه‌های مرتبط با سیستم‌های هوایی تاثیر می‌گذارند. هزینه وسایل نقلیه بدون سرنشین تجاری براساس سطح تخصص، پیچیدگی و یکپارچگی سیستم می‌تواند بین کم‌تر از 50 تا بیش از 50000 دلار آمریکا باشد [36]. مطالعات کمی هزینه‌های نظارت بر پل با استفاده از پهپاد را مورد بررسی قرار داد و نتایج مختلفی را گزارش کرده‌اند یکی از این مطالعات هزینه‌های مربوط به بازرسی‌های پل را با استفاده از پهپاد و بازرسی با کامیون زیر پل (UBIT) و مقایسه کرده‌است [37]. هزینه ساعتی بازرسی با کامیون دو برابر هزینه بازرسی پهپاد بود، بازرسی با کامیون زمان بیشتری برای بازرسی کامل پل در مقایسه با پهپاد نیاز داشت.

ولز (Wells) و همکاران 66 % صرفه‌جویی در هزینه را با استفاده از بازرسی مبتنی بر پهپاد در مقایسه با روش‌های سنتی گزارش کردند [38]. اولی به 20 هزار دلار آمریکا و فقط 5 روز در محل نیاز داشت، در حالی که دومی تقریبا به 59000 دلار آمریکا و 8 روز بازرسی در محل نیاز داشت.

به طور مشابه، مطالعه دیگری 46 % سریع‌تر و 61 % بازرسی مقرون به صرفه‌تر را به دلیل استقرار پهپاد گزارش کرد [39]. این اختلاف می‌تواند به این واقعیت نسبت داده شود که مزایای صرفه‌جویی در هزینه و زمان وسایل نقلیه بدون سرنشین تنها برای پروژه‌های بازرسی پل در مقیاس بزرگ قابل اجرا هستند.

9- نتیجه گیری

مقاله حاضر، مطالعات تحقیقاتی جدیدی را که به کاربرد وسایل نقلیه بدون سرنشین در حوزه نظارت بر وضعیت پل، با تمرکز بر امکان استفاده از فن‌آوری‌های غیر مخرب با فرآیند جمع‌آوری داده‌های پهپاد اختصاص داده شده بود مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. این مقاله، عملکرد وسایل نقلیه بدون سرنشین مجهز به فناوری‌های غیرمخرب، شامل سیستم‌های مادون‌قرمز، دستگاه‌های تصویربرداری بصری، لیدار و دیگر سنسورها را به صورت انتقادی مورد تحقیق قرار داده است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که تعداد قابل توجهی از مطالعات انجام‌شده در این زمینه از تصاویر بصری برای جمع‌آوری و پردازش داده‌های مبتنی بر پهپاد استفاده کرده‌اند. این امر را می‌توان به استحکام ابزارهای تصویربرداری ثابت و محبوبیت سیستم‌های پهپاد با دوربین‌های یکپارچه نسبت داد. اگرچه وسایل نقلیه بدون سرنشین مزایای متعددی نسبت به تکنیک‌های بازرسی سنتی ارائه می‌دهند ولی باتوجه به محدودیت‌های ذاتی و چالش‌های متعددی که پیش روی پژوهشگران قرار دارد، لزوم بررسی این پیشرفت‌ها باید در دستور کار قرار گیرد.

خطوط محدودیت دید اغلب نیاز ناظران بصری یا فن‌آوری نظارت را هنگام بازرسی عناصر پل از راه دور ضروری می‌سازد. این بررسی بر کمبود استفاده از تکنولوژی‌های فناوری های غیر مخرب خاص مانند لیدار با پهپاد برای جمع‌آوری داده‌ها تاکید کرد. تصویر برداری حرارتی برای تشخیص ناهنجاری‌های زیرسطحی مفید است. دستورالعمل‌های استاندارد برای ترموگرافی پهپاد مبتنی بر پایش وضعیت پل‌ها هنوز در مقالات محدود است. مطالعات بیشتری مورد نیاز است تا نقایص سطحی و زیرسطحی را به طور جامع به طور همزمان مشخص کند که ممکن است با تجهیز وسایل نقلیه بدون سرنشین با چندین سنسور مانند لیدار، دوربین‌های حرارتی و نوری به دست آید. تحقیقات زیادی برای بهبود عملکرد هواپیماهای بدون سرنشین تحت شرایط مختلف آب و هوایی و روشنایی مورد نیاز است. شناسایی رابطه بین ارتفاع پرواز هواپیماهای بدون سرنشین و دقت تشخیص آسیب بسیار مهم می‌باشد.

10- مراجع

[1] M. Yanaka, S. Hooman Ghasemi, Nowak, A.S. Reliability-based and life-cycle cost-oriented design recommendations for prestressed concrete bridge girders. Struct. Concr. 2016, 17, 836–847

[2] Y. Fang,L. Sun, Developing A Semi-Markov Process Model for Bridge Deterioration Prediction in Shanghai. Sustainability 2019, 11, 5524.

[3] I. Zambon,A. Vidovi´c, A. Strauss, Matos, J. Condition Prediction of Existing Concrete Bridges as a Combination of Visual Inspection and Analytical Models of Deterioration. Appl. Sci. **2019**, 9, 148.

[4] P. Patel and P. Gohil, "Role of additive manufacturing in medical application COVID-19 scenario: India case study," J. Manuf. Syst., vol. 60, pp. 811–822, 2021.

[5] B. J. Perry, Y. Guo, R. Atadero, and J. W. van de Lindt, "Streamlined bridge inspection system utilizing unmanned aerial vehicles (UAVs) and machine learning," Measurement, vol. 164, p. 108048, 2020.

[6] F. Jalinoos, M. Amjadian, A. K. Agrawal, C. Brooks, and D. Banach, "Experimental Evaluation of Unmanned Aerial System for Measuring Bridge Movement," J. Bridg. Eng., vol. 25, no. 1, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001508.

[7] F. Elghaish, S. Matarneh, S. Talebi, M. Kagioglou, M. R. Hosseini, and S. Abrishami, "Toward digitalization in the construction industry with immersive and drones technologies: a critical literature review," Smart Sustain. Built Environ., 2020.

[8] Y. Xu and Y. Turkan, "BrIM and UAS for bridge inspections and management," Eng. Constr. Archit. Manag., vol. 27, no. 3, pp. 785–807, 2019, doi: 10.1108/ECAM-12-2018-0556.

[9] F. A. A. R. P. U. Aircraft, "Systems Study Guide," Fed. Aviat. Adm. Washington, DC, USA, 2016.

[10] J. Diiulio, L. G. Militello, and D. E. Klein, "UAS integration in congested terminal airspace: challenges posed to pilots," J. Unmanned Veh. Syst., vol. 8, no. 2, pp. 79–88, 2020.

[11] J. Seo, L. Duque, and J. P. Wacker, Field Application of UAS-Based Bridge Inspection, vol. 2672, no. 12. 2018.

[12] A. Marchewka, P. Ziółkowski, and V. Aguilar-Vidal, "Framework for structural health monitoring of steel bridges by computer vision," Sensors (Switzerland), vol. 20, no. 3, 2020, doi: 10.3390/s20030700.

[13] A. P. Tomiczek, T. J. Whitley, J. A. Bridge, and P. G. Ifju, "Bridge Inspections with Small Unmanned Aircraft Systems: Case Studies," J. Bridg. Eng., vol. 24, no. 3, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001376.

[14] S. Dorafshan and M. Maguire, "Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation," J. Civ. Struct. Heal. Monit., vol. 8, no. 3, pp. 443–476, 2018, doi: 10.1007/s13349-018-0285-4.

[15] U. M. Angst, "Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete," Mater. Struct., vol. 51, no. 1, pp. 1–20, 2018.

[16] V. Hoskere, J.-W. Park, H. Yoon, and B. F. Spencer, "Vision-Based Modal Survey of Civil Infrastructure Using Unmanned Aerial Vehicles," J. Struct. Eng. (United States), vol. 145, no. 7, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002321.

[17] Y.-F. Liu, X. Nie, J.-S. Fan, and X.-G. Liu, "Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction," Comput. Civ. Infrastruct. Eng., vol. 35, no. 5, pp. 511–529, 2020, doi: 10.1111/mice.12501.

[18] S. Feroz and S. A. Dabous, "UAV-Based Remote Sensing Applications for Bridge Condition Assessment," Remote Sens. 2021, Vol. 13, Page 1809, vol. 13, no. 9, p. 1809, May 2021, doi: 10.3390/RS13091809.

[19] A. C. Hill, E. J. Laugier, and J. Casana, "Archaeological remote sensing using multi-temporal, drone-acquired thermal and near infrared (NIR) imagery: A case study at the Enfield Shaker Village, New Hampshire," Remote Sens., vol. 12, no. 4, 2020, doi: 10.3390/rs12040690.

[20] S. A. Dabous and S. Feroz, "Condition monitoring of bridges with non-contact testing technologies," Autom. Constr., vol. 116, p. 103224, 2020.

[21] S. Dorafshan, R. J. Thomas, and M. Maguire, "Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete," Constr. Build. Mater., vol. 186, pp. 1031–1045, 2018.

[22] V. H. Mac, J. Huh, N. S. Doan, G. Shin, and B. Y. Lee, "Thermography-based deterioration detection in concrete bridge girders strengthened with carbon fiber-reinforced polymer," Sensors, vol. 20, no. 11, p. 3263, 2020.

[23] K. Jang, N. Kim, and Y.-K. An, "Deep learning–based autonomous concrete crack evaluation through hybrid image scanning," Struct. Heal. Monit., vol. 18, no. 5–6, pp. 1722–1737, 2019.

[24] J. Yang, S. Li, Z. Wang, H. Dong, J. Wang, and S. Tang, "Using deep learning to detect defects in manufacturing: a comprehensive survey and current challenges," Materials (Basel)., vol. 13, no. 24, p. 5755, 2020.

[25] J. Seo, L. Duque, and J. Wacker, "Drone-enabled bridge inspection methodology and application," Autom. Constr., vol. 94, pp. 112–126, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.06.006.

[26] S. Sony, S. Laventure, and A. Sadhu, "A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring," Struct. Control Heal. Monit., vol. 26, no. 3, 2019, doi: 10.1002/stc.2321.

[27] B. F. Spencer Jr, V. Hoskere, and Y. Narazaki, "Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring," Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 199–222, 2019.

[۲۸] آ. ، ج. ؛ ا. ، ج. جواد, "معرفی سیستم لیدار," فصلنامه سپهر ، نشریه سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح دوره شانزدهم ، شماره ۶۱.

[29] A. Zona, "Vision-based vibration monitoring of structures and infrastructures: An overview of recent applications," Infrastructures, vol. 6, no. 1, p. 4, 2020.

[30] F. Moreu, E. Ayorinde, J. Mason, C. Farrar, and D. Mascarenas, "Remote railroad bridge structural tap testing using aerial robots," Int. J. Intell. Robot. Appl., vol. 2, no. 1, pp. 67–80, 2018, doi: 10.1007/s41315-017-0041-7.

[31] S. Abu Dabous and S. Feroz, "Condition monitoring of bridges with non-contact testing technologies," Autom. Constr., vol. 116, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103224.

[32] E. O. Ichi, "Validating NDE Dataset And Benchmarking Infrared Thermography For Delamination Detection In Bridge Decks," 2021.

[33] R. Escobar-Wolf, T. Oommen, C. N. Brooks, R. J. Dobson, and T. M. Ahlborn, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Assessment of Concrete Bridge Deck Delamination Using Thermal and Visible Camera Sensors: A Preliminary Analysis," Res. Nondestruct.

Eval., vol. 29, no. 4, pp. 183–198, 2018, doi: 10.1080/09349847.2017.1304597.
[34] T. Rakha and A. Gorodetsky, “Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones,” Autom. Constr., vol. 93, pp. 252–264, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.05.002.
[35] Y.-C. Zhu and S.-K. Au, “Bayesian data driven model for uncertain modal properties identified from operational modal analysis,” Mech. Syst. Signal Process., vol. 136, p. 106511, 2020.
[36] W. W. Greenwood, J. P. Lynch, and D. Zekkos, “Applications of UAVs in civil infrastructure,” J. Infrastruct. Syst., vol. 25, no. 2, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464.
[37] M. Azimi, A. D. Eslamlou, and G. Pekcan, “Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review,” Sensors, vol. 20, no. 10, p. 2778, 2020.
[38] J. L. Wells, B. Lovelace, and T. Kalar, Use of unmanned aircraft systems for bridge inspections, vol. 2612. 2017.
[39] D.-G. J. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, and M. Rashidi, “Digital twin application in the construction industry: A literature review,” J. Build. Eng., vol. 40, p. 102726, 2021.