

اندازه‌گیری ترک‌های موجود بر دیواره پل‌های بتنی به وسیله تصاویر ویدیو با تلفیق فتوگرامتری و یادگیری عمیق

فرزاد زارع‌زاده^۱، علی حسینی‌نوه^{۲*}، مجتبی محمودیان^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی نقشه‌برداری، فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی

خواجه‌نصیرالدین طوسی

zarezadeh@email.kntu.ac.ir

^۲ استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

hosseininaveh@kntu.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه RMIT استرالیا

mojtaba.mahmoodian@rmit.edu.au

(دریافت: بهمن ۱۴۰۲، تصویب: آذر ۱۴۰۴)

چکیده

تشخیص ترک یکی از مهم‌ترین مراحل پایش سلامتی سازه‌های بتنی از جمله پل‌های بتنی می‌باشد. با تشخیص به موقع ترک می‌توان از آسیب‌ها و خرابی‌های احتمالی بعدی، جلوگیری به عمل آورد. نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های سنتی از یک فرد به فرد دیگر متفاوت است. از طرف دیگر این روش‌ها بسیار وقت‌گیر و دشوار است. به همین دلیل باید به سمت روش‌های نوین اندازه‌گیری از جمله روش‌های اندازه‌گیری مبتنی بر تصویر رفت. هدف از این تحقیق ارائه روشی مبتنی بر تصویر، جهت شناسایی و اندازه‌گیری ترک‌ها در پل‌های بتنی با تلفیق روش‌های فتوگرامتری و یادگیری عمیق است. در این روش ابتدا یک ویدیو از پل گرفته می‌شود، سپس فریم‌های کلیدی این ویدیو با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق استخراج می‌شود و تمام فریم‌های اضافی با توجه به این موضوع که پوشش تصاویر رعایت شود حذف می‌شوند. در ادامه با استفاده از فریم‌های کلیدی و با توجه به تارگت‌های ایجادشده بر روی پل، مختصات مراکز تصویربرداری مشخص می‌شود. حال با توجه به مختصات مراکز تصویربرداری، تصاویر مربوط به هر ترک خوشه‌بندی می‌شود. در نهایت با استفاده از تصاویر هرکدام از خوشه‌ها، تصویر قائم ترک‌ها تولید می‌شود و در تصویر تولیدشده، طول و عرض ترک‌ها اندازه‌گیری می‌شود. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده می‌تواند با حفظ دقت مناسب میزان تصاویر مورد استفاده را به یک‌پنجم کاهش دهد و به تبع آن سرعت پردازش در حدود پنج برابر افزایش یابد. همچنین با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با مقادیر واقعی مشخص شد که بیشترین خطای اندازه‌گیری، مربوط به عرض ترک ۱/۲ میلی‌متر و طول ترک ۱۱ میلی‌متر می‌باشد بنابراین خطا در روش ارائه‌شده در حدود ۳ تا ۴ درصد می‌باشد.

واژگان کلیدی: فتوگرامتری، یادگیری عمیق، پردازش تصویر، ترک پل‌های بتنی، فریم‌های کلیدی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

تعمیر و نگهداری زیرساخت‌های بزرگ بتنی بسیار پرهزینه است، به عنوان مثال، در اروپا سالانه چهار تا شش میلیارد یورو برای نگهداری زیرساخت‌های بتنی هزینه می‌شود [۱]. این فرض منطقی است که انتظار می‌رود در یک دهه آینده تعداد بازرسی‌های مورد نیاز پل‌ها در ایران افزایش یابد زیرا احتمالاً پل‌های بتنی موجود عمر مفیدشان به پایان می‌رسد. این سازه‌ها با گذشت زمان به دلایل مختلف از جمله شرایط محیطی نامناسب و ترافیک سنگین دچار خرابی‌های متعددی می‌شوند.

این خرابی‌ها در صورت عدم توجه به موقع علاوه بر کاهش سطوح بهره‌برداری و عمر مفید سازه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به شدت افزایش خواهند داد. پوشش بتن بر روی آرماتور یک مانع فیزیکی ایجاد می‌کند. این مانع، از نفوذ عناصر مخرب تولید کلریدها و دی‌اکسید کربن جلوگیری به عمل می‌آورد [۲]. وجود ترک در بتن تأثیر عمده‌ای بر دوام بتن مسلح دارد و باعث خوردگی آرماتور در بتن می‌شود عکس این قضیه نیز صادق است یعنی در مواردی نیز خوردگی آرماتور باعث ترک در بتن می‌شود [۳]. ترک‌ها باعث رسیدن اکسیژن و رطوبت به آرماتور شده و فولاد شروع به خوردگی می‌کند. یون‌های کلرید به پوشش بتنی نفوذ می‌کنند و لایه اکسید محافظ اطراف آرماتورها را می‌شکنند و در نتیجه فولاد را غیرفعال می‌کنند و باعث خوردگی می‌شوند. همان‌طور که خوردگی ادامه می‌یابد، نه تنها منجر به از دست دادن قابل توجه سطح مقطع آرماتور می‌شود، بلکه خوردگی ممکن است باعث ریزش پوشش بتنی شود [۴]. آریا و همکاران [۵] اشاره کرده‌اند که ترک‌ها با اجازه دسترسی دی‌اکسید کربن، کلرید، آب و اکسیژن به فولاد تقویت‌کننده، عمر مفید سازه‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند.

تشخیص ترک یکی از مهم‌ترین حلقه‌های نگهداری سازه‌های بتنی است و مستقیماً نشان‌دهنده میزان ایمنی و دوام سازه بتنی است [۶]. از طرف دیگر تشخیص به موقع اجازه می‌دهد اقدامات پیشگیرانه‌ای برای جلوگیری از آسیب و خرابی احتمالی انجام شود. روش مرسوم و سنتی تشخیص ترک مبتنی بر انسان، متکی به بازرسان آموزش‌دیده است تا بر اساس تخصص و سال‌ها تجربیات خود، ترک‌هایی را در سطح سازه بتنی پیدا کنند [۶]. آن‌ها

ساختار بتن را از طریق تجزیه و تحلیل موقعیت و طول و عرض ترک‌ها ارزیابی می‌کنند. اگرچه روش تشخیص ترک سنتی مبتنی بر انسان یک روش مؤثر برای تشخیص ترک است، اما نتایج تشخیص، ذهنی است و از یک فرد به فرد دیگر متفاوت است زیرا بازرسان فقط با توجه به دستورالعمل‌های موجود و تجربیات خود، ارزیابی وضعیت فعلی را انجام می‌دهند [۶]. از طرف دیگر بازرسی‌های بصری بسیار وقت‌گیر و دشوار است و هنگام برخورد با مناطقی که دسترسی به آن‌ها دشوار است ممکن است ایمنی بازرسان به خطر بیفتد. برای غلبه بر اشکالات روش تشخیص ترک مبتنی بر انسان، می‌توان از روش‌های خودکار برای تشخیص موقعیت، طول، عرض و جهت ترک‌های موجود استفاده کرد. روش‌های مبتنی بر تصویر، روش‌هایی هستند که از لحاظ اقتصادی روش‌های بسیار کم‌هزینه می‌باشند و نیاز به تجهیزات گران‌قیمت ندارند و علاوه بر آن در دسترس هستند، زیرا امروزه با پیشرفت فناوری، دوربین‌های دیجیتال در دسترس همگان است.

یکی از کارهایی که در این زمینه انجام شده است توسط ذلینی^۱ و همکاران [۷] بود که یک روش بررسی غیر مخرب برای مطالعه خرابی (زوال) سطح پل‌های بتنی و گذرگاه‌ها ارائه نمودند. در آن کار، فتوگرامتری زمینی و پهپاد^۲ (UAV) برای بازرسی بصری از یک پل بتنی در ایتالیا استفاده شده است. تعدادی تصویر با استفاده از پهپاد و تعدادی دیگر به وسیله پراتور از روی زمین گرفته شد. با استفاده از این تصاویر ابر نقطه سه‌بعدی تولید شد و بعد از آن محصول ارتوموزاییک تولید نمودند. ارتوموزاییک به دست آمده با استفاده از تجزیه و تحلیل تصویر مبتنی بر شی^۳ (OBIA) برای شناسایی و طبقه‌بندی مناطق خراب و فرم‌های پوسیدگی پردازش شده است. امروزه با پیشرفت فناوری روش‌های یادگیری عمیق جایگاه ویژه‌ای در روش‌های مبتنی بر تصویر به دست آورده‌اند، در زمینه^۴ شناسایی ترک نیز روش‌های مختلفی با استفاده از یادگیری عمیق ارائه شده است در همین زمینه یک روش خودکار تشخیص ترک به منظور تشخیص ترک‌های جاده توسعه یافته است [۸] که ویژگی‌های متمایز را از بسته‌های^۴ تصویر

۱ Zollini

۲ Unmanned aerial vehicle

۳ Object-Based Image Analysis

۴ Patches

می آموزد و هر بسته‌ی تصویر ورودی را به‌عنوان یک تصویر دارای ترک یا بدون ترک طبقه‌بندی می‌کند.

در تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی شناسایی و اندازه‌گیری ترک‌ها دو نکته بسیار مشهود است: یکی اینکه در روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق در اکثر روش‌ها صرفاً هدف فقط شناسایی ترک‌ها در تصاویر می‌باشد و اندازه‌گیری صورت نگرفته است، همچنین در روش‌هایی که اندازه‌گیری ترک‌ها مدنظر قرار گرفته است، به موضوع موقعیت نسبی ترک‌ها نسبت به هم، توجهی صورت نگرفته است. به‌عبارت‌دیگر در تحقیقات قبلی صرفاً یک ترک شناسایی می‌شود و از آن تصویربرداری و اندازه‌های مورد نیاز بعد از پردازش به دست می‌آید ولی برای داشتن یک پایگاه داده کامل از یک سازه مانند پل، نیاز است که تمام ترک‌های موجود در این سازه شناسایی و اندازه‌گیری شوند و موقعیت این ترک‌ها نسبت به هم و نسبت به خود سازه مشخص باشند تا بتوان بررسی جامع و کامل‌تر از سازه‌های پل داشته باشند.

در این تحقیق، هدف شناسایی و اندازه‌گیری ترک‌های موجود بر روی دیواره سازه‌های پل و همچنین تعیین موقعیت ترک‌ها نسبت به هم و نسبت به خود سازه می‌باشد. تعیین موقعیت ترک‌ها نسبت به هم و نسبت به خود سازه این مزیت را دارد که می‌توان یک پایگاه داده کامل و جامع از پل تولید نمود و وضعیت واقعی ترک‌های پل را در این پایگاه داده موردبررسی و تصمیم‌گیری قرار داد.

در این مقاله ابتدا به تحقیقات پیشین انجام‌شده در این زمینه اشاره می‌شود، سپس روش پیشنهادی توضیح داده می‌شود در ادامه پیاده‌سازی روش موردنظر انجام می‌گردد و درنهایت نتایج موردبررسی قرار می‌گیرد.

۲- مروری بر تحقیقات پیشین

شناسایی ترک مبتنی بر تصویربرداری یکی از روش‌های بهینه برای اندازه‌گیری طول، عرض و مساحت ترک می‌باشد. اگر صرفاً هدف شناسایی ترک در تصاویر باشد، می‌توان با گرفتن تک تصویر و به کمک روش‌های پردازش تصویر ترک را در تصویر موردنظر، شناسایی نمود؛ ولی برای شناسایی و اندازه‌گیری ترک، گرفتن تک تصویر کفایت نمی‌کند و باید تعداد تصاویر بیشتری گرفته شود تا بتوان

ترک‌های موجود در تصویر را مدل‌سازی نمود و با استفاده از تصاویر قائم که خطاهای تصویری در آن کاهش پیدا کرده است اندازه‌گیری دقیقی انجام داد.

با توجه به تحقیقات انجام‌شده روش‌های نوین تشخیص ترک را می‌توان در پنج دسته کلی تقسیم‌بندی نمود، این روش‌ها شامل روش‌های مبتنی بر مادون قرمز و حرارتی، روش‌های فراصوتی، روش‌های لیزری، روش‌های رادیوگرافی و روش‌های مبتنی بر تصویر می‌باشند [۹]. هرکدام از این روش‌ها کاربردهای مختلف و مزایا و معایبی دارند. در این بین روش‌های مبتنی بر تصویر نسبت به سایر روش‌ها روشی کم‌هزینه می‌باشد و مانند روش‌های دیگر نیازی به تجهیزات خاص و گران‌قیمت ندارد.

ترک‌ها در روش‌های مبتنی بر تصویر به دو صورت کلی می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند. در روش اول تنها با کمک تک تصویر ترک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در زمینه‌ی روش‌های مبتنی بر تک تصویر تاکنون تحقیقات فراوانی انجام شده است. روش‌های تک تصویر را می‌توان در سه دسته مورد بررسی قرار داد. در دسته اول روش‌های پردازش تصویر سنتی برای بررسی ترک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش‌ها معمولاً در ابتدا تصویر، مورد پیش‌پردازش قرار می‌گیرد، سپس ویژگی‌های موردنظر از تصویر استخراج و درنهایت تشخیص ترک انجام می‌شود. یکی از این روش‌ها، روش‌های ریخت‌شناسی^۱ می‌باشد که ثوریا مرازی مکسن^۲ [۱۰] و پاتریک بروبرگ^۳ [۱۱] از جمله کسانی بودند که از این روش‌ها برای بررسی ترک‌ها استفاده کردند. از جمله روش‌های دیگر برای شناسایی ترک‌ها روش‌های تشخیص لبه [۱۲]، روش‌های آماری، همبستگی تصویر دیجیتال [۱۳] و تطبیق الگو [۱۴] می‌باشند.

به‌طورکلی تشخیص ترک در تصاویر با استفاده از روش‌های پردازش تصویر با چالش‌هایی روبرو است. گردوغبار موجود در محل، نویزهای تصویر، وجود سایه، غیر یکسان بودن روشنایی و پس‌زمینه‌های متعدد از جمله مشکلاتی است که در این روش‌ها وجود دارد. انتخاب یک روش پردازش تصویر به‌منظور شناسایی ترک‌ها به موارد بسیاری از جمله موقعیت دوربین، میزان روشنایی محل،

۱ Morphology

۲ Thouraya Merazi-Meksen

۳ Patrik Broberg

اندازه ترک و زاویه ترک در تصاویر وابسته است و این موارد در موفقیت شناسایی ترک دخیل هستند. سه مورد که نتیجه الگوریتم‌های شناسایی ترک با استفاده از روش‌های پردازش تصویر را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد شامل: فاصله دوربین با جسم، تغییر جهت دوربین و تصاویر دارای نویز زیاد می‌باشند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این روش‌ها الگوریتمی وجود ندارد که اکثر ترک‌ها با شرایط گوناگون را در تصاویر شناسایی کنند و برخی از این روش‌ها برای تشخیص نهایی نیاز به بازرسی عامل انسانی دارند همچنین ویژگی‌هایی که در این الگوریتم‌ها به صورت دستی تولید می‌شوند هزینه محاسباتی بالایی دارند و در شناسایی ترک‌ها با پس‌زمینه‌های پیچیده عملکرد مناسبی ندارند.

در دسته دوم، روش‌های پردازش تصویر با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌باشند. در اکثر زمینه‌های تحقیقاتی از جمله پردازش تصویر، روش‌های یادگیری ماشین، از جمله روش‌های قدرتمند محسوب می‌شوند. برخی روش‌های تشخیص ترک مبتنی بر یادگیری ماشین شامل، روش تشخیص الگوی بافت مبتنی بر روش تقویت سازگار^۱ [۱۵]، روش مبتنی بر مارکوف^۲ [۱۶]، روش مبتنی بر جنگل تصادفی^۳ [۱۷]، روش مبتنی بر شبکه باور عمیق^۴ [۱۸] می‌باشند. در این روش‌ها عملکرد الگوریتم‌ها وابسته به کیفیت استخراج ویژگی می‌باشد، بنابراین، این روش‌ها در تصاویری که ترک‌ها به صورت کاملاً واضح قابل مشاهده نباشند دارای ضعف می‌باشند، همچنین به دلیل اینکه در این روش‌ها استخراج ویژگی به صورت دستی انجام می‌گیرد و از طرفی می‌دانیم که ویژگی‌های معنایی به صورت سلسله مراتبی ایجاد می‌شوند بنابراین این روش‌ها نمی‌توانند ویژگی‌های معنایی برای شناسایی ترک ایجاد نمایند. با این حال این روش‌ها نسبت به روش‌های دسته قبل دارای نتایج بهتری می‌باشند.

دسته سوم روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق می‌باشند. این روش‌ها دیگر نیازمند استخراج ویژگی به صورت دستی نمی‌باشند و این کار زمان‌بر و طاقت‌فرسا به عهده خود الگوریتم گذاشته شده است که به صورت خودکار ویژگی‌های مورد نیاز را استخراج نماید. در بین روش‌های

یادگیری عمیق، شبکه عصبی پیچشی^۵ یکی از پرکاربردترین و پیشروترین الگوریتم‌ها در زمینه پردازش تصویر می‌باشد [۱۹]. در این شبکه لایه‌های آغازین لبه‌ها و الگوها را استخراج می‌کنند که ویژگی‌های سطح پایین‌تری هستند. لایه‌های میانی ویژگی‌هایی مانند شکل و رنگ جسم را استخراج می‌کنند، در حالی که لایه‌های بالاتر ویژگی‌هایی مانند اشیاء کامل را که ویژگی‌های سطح بالا محسوب می‌شوند را استخراج می‌کنند [۲۰]. این شبکه‌ها می‌توانند از طریق طبقه‌بندی، تصاویر حاوی ترک را از تصاویر فاقد ترک متمایز کنند.

یک روش خودکار تشخیص ترک به منظور تشخیص ترک‌های جاده توسعه یافته است [۸] که ویژگی‌های متمایز را از بسته‌های تصویر می‌آموزد و هر بسته تصویر ورودی را به عنوان یک تصویر ترک یا بدون ترک طبقه‌بندی می‌کند. در این تحقیق برای آموزش الگوریتم یادگیری عمیق ۵۰۰ تصویر با استفاده از دوربین تلفن هوشمند گرفته شده است. مدل طراحی شده دارای دقت ۸۶/۹۶ درصد می‌باشد. به طور کلی این روش به دلیل اینکه احتمال وجود ترک را بیش از مقدار واقعی تخمین می‌زند، معیار استاندارد برای تمایز بین تصاویر حاوی ترک و بدون ترک ارائه نمی‌دهد.

یکی از راه‌های افزایش دقت الگوریتم‌ها افزایش میزان داده‌های ورودی می‌باشد. در یک کار تحقیقاتی یک روش تشخیص ترک مبتنی بر معماری گوگل نت^۶ [۲۱] در [۲۲] پیشنهاد شده است. در مجموع ۱۲۵۰ عکس از دنیای واقعی با استفاده از گوشی هوشمند گرفته شد. این تصاویر به تکه‌های کوچک‌تر در حدود ۶۰۰۰۰ بسته تبدیل شدند. شبکه عصبی پیچشی آموزش دیده به دقت ۹۹/۳۹ درصد برای تشخیص ترک دست‌یافت. همان‌طور که مشاهده شد در این تحقیق از تصاویر ورودی بیشتری استفاده شده است و به تبع آن دقت افزایش پیدا کرده است. همچنین در یک تحقیق دیگر، در [۶]، یک معماری اصلاح شده شبکه عصبی پیچشی الکس نت^۷ [۱۹] برای طبقه‌بندی ترک پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی با روش جستجو با پنجره کشویی برای استخراج ویژگی‌های تصاویر ترک و بدون ترک ادغام می‌شود. مجموعه داده به کاررفته دارای

۱ Adaptive boosting

۲ Markov model

۳ Random forest algorithm

۴ Deep belief network

۵ Convolutional neural network

۶ GoogLeNet

۷ AlexNet

۶۰۰۰۰ تصویر است که بر اساس مدل شبکه پیشنهادی آموزش داده شده است و به دقت اعتبارسنجی ۹۹/۰۶ درصد و دقت تست تا ۹۹/۰۹ درصد دست یافته است.

روش های تشخیص ترک با چندین چالش در دنیای واقعی مواجه هستند که می توان آن ها را از طریق روش های یادگیری عمیق به حداقل رساند. تعداد لایه های شبکه نیز می تواند در دقت شبکه تأثیرگذار باشند. در یک تحقیق، اثربخشی یک شبکه عمیق برای تشخیص ترک [۲۳] با تغییر لایه های شبکه و اندازه گیری تأثیر آن بر دقت نشان داده شده است. شبکه پیشنهادی بهینه شده تصاویر ورودی را به عنوان یک تصویر ترک یا بدون ترک طبقه بندی می کند. مجموعه داده شامل ۵۰۰ تصویر اصلی است که به دو زیرمجموعه تقسیم شده است. دو شبکه مختلف برای تجزیه و تحلیل عملکرد طراحی شده اند، چهار لایه پیچشی در یک شبکه و پنج لایه پیچشی در شبکه دیگر استفاده شده است. هر دو شبکه با یک مجموعه داده آموزش داده و آزمایش شدند و بعداً این شبکه های آموزش دیده بر روی مجموعه داده های مختلف آزمایش شدند. نتایج نشان داد که افزایش لایه پیچشی نتایج بهتری ایجاد کرده و به دقت ۹۱/۳ درصد، دست یافته است.

در برخی از تحقیقات از ادغام دو مدل تشخیص شیئی و قطعه بندی اشیاء برای تشخیص ترک استفاده شده است. در یک پژوهش [۲۴] برای شناسایی ترک پل ها از بین ۵ شبکه پیشرفته تشخیص اشیاء به منظور تشخیص ترک پس از ارزیابی های انجام شده مدل (YOLOv7) به عنوان بهترین گزینه به دلیل عملکرد و کارایی برتر انتخاب شد. از طرف دیگر برای قطعه بندی ترک ها مدل U-Net اصلاح شده ارائه شد. با ادغام این دو مدل ترک های روی عرشه پل شناسایی و اندازه گیری شد. در این تحقیق با انتخاب YOLOv7 برای شناسایی ترک ها و استفاده از تصاویر 1024×1024 به جای 2048×2048 زمان آنالیز را چهار برابر کاهش دادند و ترک های موجود بر عرشه پل را شناسایی نمودند. در یک تحقیق دیگر [۲۵] یک مجموعه داده را با تصاویر ترک بتن ایجاد کرده و از آن برای ارزیابی وضعیت خرابی بتن با استفاده از الگوریتم های شبکه عصبی پیچشی استفاده کرده است. از بین سه مدل ارزیابی شده در این تحقیق InceptionV3 بهترین عملکرد را برای دسته بندی ترک ها

۱ You Only Look Once

داشت، همچنین برای قطعه بندی ترک ها از U-Net استفاده شد. در یک کار مطالعاتی [۲۶] دیگر برای تشخیص ترک های سطح پل الگوریتم YOLO v3 را توسعه دادند و با جایگزینی لایه های پیچشی استاندارد با پیچشی تفکیک پذیر عمیق، پارامترهای شبکه و به دنبال آن محاسبات را کاهش دادند. همچنین برای کاهش پیچیدگی تشخیص ترک از ۱۶ لایه پیچشی در شبکه استخراج ویژگی در دو مقیاس متفاوت استفاده کردند. در این تحقیق مشخص شد که در فرایند تشخیص ترک YOLO v3 بهبود یافته به نتایج بهتری در تشخیص ترک های سطح پل دست یافته است و دقت و سرعت تشخیص آن بهتر از YOLO v3 است.

استفاده از یادگیری عمیق به شرط داشتن داده های کافی، سخت افزار و نرم افزار مناسب و همچنین آموزش صحیح و استفاده از معماری مناسب می تواند نسبت به روش های پردازش تصویر سنتی و یادگیری ماشین عملکرد بهتری داشته باشد، همچنین افزایش میزان تحقیقات در زمینه شناسایی ترک با استفاده از یادگیری عمیق در چند سال اخیر مؤید این موضوع می باشد [۲۷].

تمام تحقیقات ذکر شده در بالا از تک تصویر برای شناسایی ترک استفاده می کنند. استفاده از تک تصویر دارای این نقص می باشد که به دلیل هندسه تشکیل تصویر که به صورت پرسپکتیو می باشد، به دست آوردن مقیاس تک تصویر تقریباً غیردقیق می باشد و در نتیجه اندازه گیری ها بر روی تک تصویر دقیق نیستند؛ بنابراین اگر نیاز به اندازه گیری ترک باشد، استفاده از تک تصویر دیگر کارایی مورد نظر را ندارد، به همین دلیل باید از تصاویر بیشتر با هم پوشانی مناسب استفاده نمود تا بتوان با استفاده از روش های فتوگرامتری، اندازه گیری های ترک بر روی تصاویر انجام شود. بر این اساس در یک پژوهش [۲۸]، یک روش آزمایشی برای توسعه مدل های سه بعدی تیر بتنی با روش های برد کوتاه و پردازش تصویر پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی قابلیت شناسایی ترک را دارد. در این روش با استفاده از تصاویر و نقاط کنترل، مدل سه بعدی تهیه شد و ترک ها به صورت دستی با استفاده از مدل سه بعدی اندازه گیری شد. باید به این نکته توجه نمود که این روش در شرایط آزمایشگاهی و با نورپردازی مصنوعی و در شرایط مطلوب انجام شده است. در یک مطالعه دیگر [۲۹] تعدادی تصویر با هم پوشانی مناسب از یک پل گرفته شد، سپس با

استفاده از نرم‌افزار فتومدلر ابر نقاط پل تولید شد، با استفاده از نقاط کنترل زمینی مسئله مقیاس ابر نقطه حل گردید. حال این مدل سه‌بعدی تولید شده، که عیوب و ترک‌های موجود در سازه را ثبت کرده است می‌تواند برای بررسی، ارزیابی و نظارت بر وضعیت پل مورد استفاده قرار گیرد. در روش‌های ذکر شده پس از تولید مدل سه‌بعدی از سازه موردنظر، ترک‌های موجود بر روی سطح سازه باید با استفاده از اپراتور جستجو، شناسایی و اندازه‌گیری شود.

جهت شناسایی ترک‌ها به کمک روش‌های پردازش تصویر و تلفیق آن‌ها با مدل‌های سه‌بعدی و در نهایت اندازه‌گیری ترک‌ها نیز تحقیقاتی انجام شده است. به‌عنوان مثال در [۳۰] یک روش خودکار برای مکان‌یابی ترک بر اساس یک سیستم دید استریو با استفاده از دوربین‌هایی با دو فاصله کانونی مختلف پیشنهاد شده است. سیستم پیشنهادی برای استفاده از دوربین‌هایی با عدسی‌های عریض و تله‌فتو طراحی شده است. در این روش، تصاویر نمای نزدیک گرفته شده توسط دوربین تله فوتو برای تعیین کمیت دقیق ترک با استفاده از مدل آموزش دیده CNN به کار گرفته شد. متعاقباً، این اطلاعات ترک به تصاویر گرفته شده توسط دوربین باز، نگاشت شد تا مدل سه‌بعدی به‌طور مؤثر بازسازی شود. استفاده از دو دوربین، فرایند تصویربرداری را به شدت کند می‌کند و در کارهای عملی استفاده از تک دوربین و گرفتن تصاویر با همپوشانی‌های مناسب می‌تواند عملیات تصویربرداری را سرعت دهد. در همین راستا یک تحقیق [۳۱] برای اندازه‌گیری ترک‌ها ارائه شده است که ابتدا ترک‌ها در تصاویر گرفته شده، قطعه‌بندی می‌شود و این تصاویر ماسک شده و تصاویر اصلی به فرایند ساختار به‌وسیله حرکت وارد می‌شود و مدل سه‌بعدی حاصل می‌گردد و پس از اعمال مقیاس به مدل سه‌بعدی، اندازه‌گیری‌های مورد نظر انجام می‌شود. استفاده از تلفیق تصاویر پهپاد و زمینی نیز می‌تواند در برخی از سازه‌ها راه‌گشا باشد به‌عنوان مثال در این زمینه ذلینی و همکاران [۷] یک روش بررسی غیر مخرب برای مطالعه خرابی (زوال) سطح پل‌های بتنی و گذرگاه‌ها ارائه نمودند. تعدادی تصویر با استفاده از پهپاد و تعدادی دیگر به‌وسیله اپراتور از روی زمین گرفته شد. با استفاده از این تصاویر ابر نقطه سه‌بعدی تولید شد و بعد از آن محصول ارتوموزاییک تولید نمودند. ارتوموزاییک به دست آمده با استفاده از تجزیه و تحلیل تصویر مبتنی بر شیء برای

شناسایی و طبقه‌بندی مناطق خراب و فرم‌های پوسیدگی پردازش شده است. همچنین امکان تعیین کمیت اطلاعات متریک، مانند عرض و طول شکاف‌ها و گسترش نواحی هوازده وجود دارد. در یک تحقیق دیگر [۳۲] یک روش سیستماتیک ارزیابی ترک‌های سطحی را برای پایه‌های پل با استفاده از تصویربرداری پهپاد پیشنهاد شده که هم اعوجاج پرسپکتیو و هم اعوجاج هندسی را بر روی سطوح سازه‌های غیرمسطح تصحیح می‌کند و محلی سازی ترک را انجام می‌دهد. مدل سه‌بعدی با استفاده از روش ساختار به‌وسیله حرکت تولید می‌شود.

با توجه به اینکه هدف این مقاله شناسایی و اندازه‌گیری ترک‌های دیواره پل‌ها با تأکید بر شناسایی موقعیت نسبی ترک‌ها نسبت به هم می‌باشد عملاً استفاده تنها از سه دسته روش‌های تک تصویر راهگشا نمی‌باشد زیرا در تک تصویر امکان اندازه‌گیری دقیق ترک‌ها وجود ندارد ولی می‌توان روش‌های شناسایی ترک در تک تصویر را با روش‌های استفاده از چند تصویر تلفیق نمود، از بین سه دسته از روش‌های شناسایی ترک در تک تصویر، روش پردازش تصویر به دلیل نتایج ضعیف در زمان‌هایی که میزان نوردهی ضعیف می‌باشد و زاویه دوربین مناسب نیست و این امر در تصویربرداری واقعی اجتناب‌ناپذیر می‌باشد دیگر به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. همچنین در بین روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به دلیل اینکه در روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق استخراج ویژگی به عهده خود الگوریتم می‌باشد، به شرط این‌که داده‌های کافی و سخت‌افزار مناسب در دسترس باشد ترجیح داده می‌شود؛ بنابراین استفاده از روش‌های شناسایی ترک در تک تصویر با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق و تلفیق آن با روش‌های چند تصویری ایده مناسبی می‌باشد. در این تحقیق از تلفیق روش‌های شناسایی ترک در تک تصویر مبتنی بر یادگیری عمیق و روش‌های مبتنی بر فتوگرامتری استفاده شده است و در روش پیشنهادی موقعیت نسبی ترک‌ها نسبت به یکدیگر و نسبت به کل سازه پل مشخص می‌گردد. همچنین در روش پیشنهادی سعی شده است کار به گونه انجام شود که از مدل‌سازی و تولید ابر نقاط متراکم کل پل که بیشترین هزینه محاسباتی را دارد اجتناب گردد و تنها موقعیت‌هایی از دیواره پل که ترک در آنجا وجود دارد ابر نقاط متراکم تشکیل گردد. باید

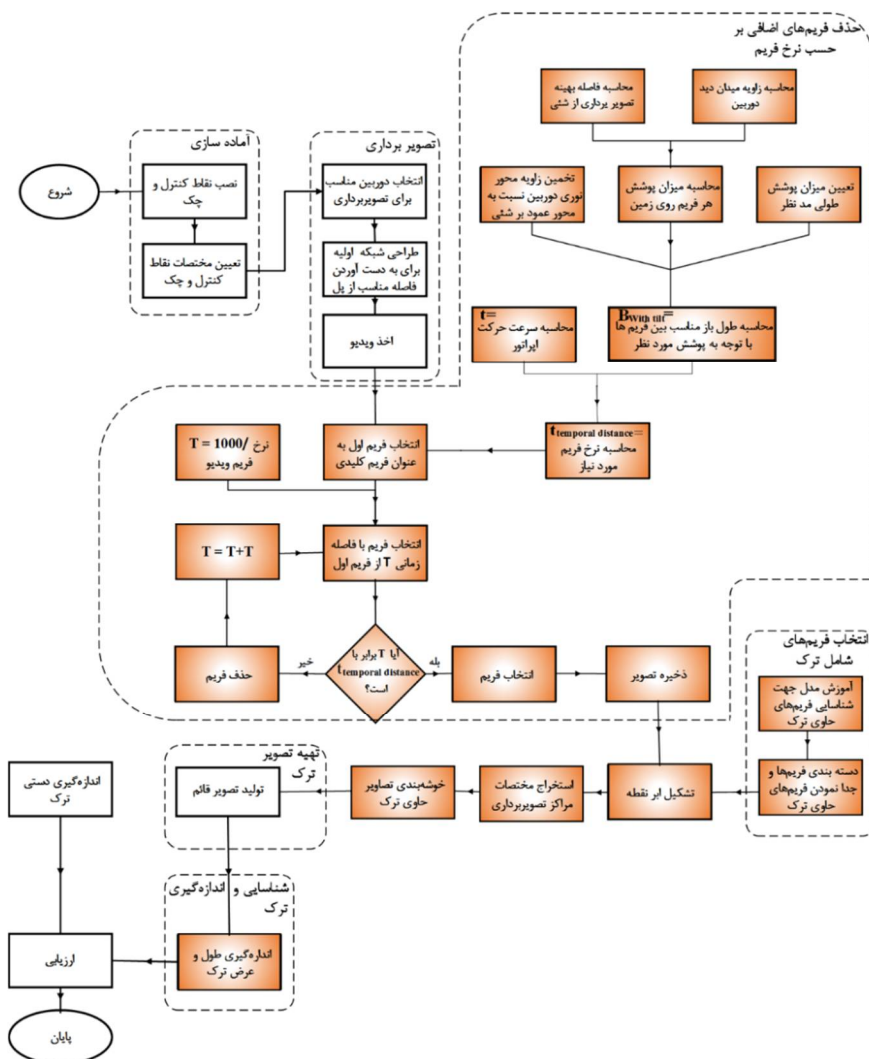
به این نکته توجه نمود که نحوه تصویربرداری از پل نیز امری تأثیرگذار در دقت اندازه‌گیری‌ها می‌باشد.

با توجه به این موضوع حسینی نوه و همکاران [۳۳] در یک پژوهش سه روش مختلف تصویربرداری شامل تصویربرداری به صورتی که محور نوری دوربین عمود بر شیء باشد، محور نوری دوربین به سمت مرکز ثقل شیء باشد و ترکیب این دو روش را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که به صورت ترکیبی نتایج بهتری حاصل می‌شود. البته باید به این نکته توجه داشت که تصویربرداری ترکیبی تعداد تصاویر را افزایش می‌دهد و بار محاسباتی سنگینی به همراه دارد و با توجه به اینکه در این مقاله سعی می‌شود که تعداد تصاویر و بار محاسباتی کاهش یابد بنابراین استفاده از روش ترکیبی برای تصویربرداری توجیهی ندارد از طرف دیگر با توجه به این که در این پژوهش شیء مورد نظر پل می‌باشد و اکثر پل‌ها اشیاء طولی

هستند روش تصویربرداری اشاره به مرکز ثقل به دلیل زاویه زیاد دوربین نسبت به شیء کیفیت تصاویر و به دنبال آن کیفیت ابر نقاط را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین در این تحقیق از روش تصویربرداری اشاره به نما (محور نوری دوربین عمود بر شیء) استفاده شد.

۳- روش پیشنهادی

با توجه به موارد ذکر شده در بخش‌های قبل، برای این تحقیق روش پیشنهادی ارائه شده است که روند کلی روش پیشنهادی را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود. این نمودار پیشنهادی از بخش‌های مختلفی شامل آماده‌سازی، تصویربرداری، حذف فریم‌های اضافی بر حسب نرخ فریم، استخراج مختصات مراکز تصویربرداری، انتخاب فریم‌های شامل ترک و تهیه تصویر ترک تشکیل شده است که هر کدام به تفصیل در ادامه توضیح داده می‌شود.



شکل ۱- روند نمای تحقیق

۳-۱- آماده‌سازی

قبل از انجام تصویربرداری برای حل مسئله مقیاس و زمین مرجع کردن پل لازم است که تارگت‌هایی بر روی بدنه پل ایجاد گردد. این تارگت‌ها باید در فواصل مناسب در جهات طولی و ارتفاعی بر روی بدنه پل ایجاد شود. یکی از چالش‌ها برای استفاده از تارگت‌ها، در مناطق پر رفت آمد شهری این است که نمی‌توان از تارگت‌های کاغذی به مدت طولانی در این مناطق استفاده نمود زیرا امکان از بین رفتن آن وجود دارد بنابراین لازم است این تارگت‌ها در محل به وسیله رنگ‌های قابل شستشو علامت‌گذاری شود. حال با استفاده از یک دوربین توتال استیشن باید مختصات تمام این تارگت‌ها برداشت شود. باید توجه نمود که برای برداشت این تارگت‌ها حتمی باید از توتال استیشن لیزری استفاده شود و استفاده از دستگاه‌های بدون لیزر امکان‌پذیر نمی‌باشد. جهت برداشت مختصات با دقت حداکثری باید محل دوربین به گونه‌ای انتخاب شود که تا آنجایی که امکان دارد، بتوان در یک استقرار تمام مختصات تارگت‌ها برداشت شود و از طرف

دیگر زاویه بین ایستگاه نقشه‌برداری و تارگت‌ها نباید خیلی کم یا زیاد باشد و رعایت زاویه حدود ۴۵ درجه در دقت اندازه‌گیری مختصات تاثیرگذار می‌باشد. به‌منظور تبدیل این مختصات به مختصات جهانی نیاز است که دو نقطه با مختصات معلوم در محل موجود باشد. در صورت عدم وجود نقاط با مختصات معلوم می‌توان از یک دستگاه گیرنده ماهواره‌ای به‌منظور به دست آوردن مختصات جهانی تارگت‌ها استفاده نمود.

۳-۲- تصویربرداری

برای اخذ ویدیو با توجه به پارامترهای دوربین موردنظر، نیاز است تا فاصله مناسب جهت تصویربرداری مشخص شود و اصطلاحاً یک طراحی شبکه ابتدایی انجام گیرد. منظور از طراحی شبکه ابتدایی به دست آوردن فاصله مناسب تصویربرداری اولیه از پل می‌باشد، که برای این منظور نیاز است، قیود مطرح شده در جدول (۱) در نظر گرفته شود و با استفاده از آن‌ها فاصله مناسب جهت تصویربرداری مشخص شود.

جدول ۱- روابط مربوط به قیود طراحی شبکه

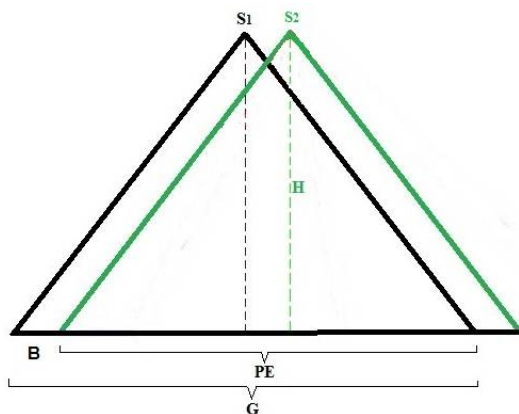
شماره	نام	فرمول	توضیحات
۱	قید عمق میدان	$d_{near} = \frac{d}{1 + \frac{d-f}{D_{HF}}}, d_{far} = \frac{d}{1 - \frac{d-f}{D_{HF}}}$ $D_{HF} = \frac{f^2}{F_{stop}\delta}, \delta = \frac{f}{1720}$	d_{near} و d_{far} نزدیک‌ترین و دورترین عمق از شئی است. d فاصله دوربین از شئی است. f فاصله کانونی و δ قطر دهانه دیافراگم می‌باشد.
۲	قید قدرت تفکیک	$D_{Res}^{max} = \frac{f D_t \sin \varphi}{I_{Res} T_{Point}}$	D_{Res}^{max} بیشترین فاصله دوربین از شئی ناشی از محدودیت قدرت تفکیک، φ زاویه برخورد امتداد اپتیکی دوربین با صفحه، D_t ابعاد تارگت، T کمترین تعداد پیکسل‌های تصویر تارگت و I_{Res} ابعاد پیکسل می‌باشد.
۳	قید میدان دید دوربین	$D_{FOV}^{min} = \frac{D_0 \sin(\alpha + \varphi)}{2 \sin(\alpha)}, \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{0.9d_0}{2f} \right)$	α زاویه رأس هرم دوربین، D_0 طول بزرگ‌ترین قطر شئی، d_0 کمترین ابعاد فریم دوربین می‌باشد.
۴	قید مقیاس تصویر	$D_{Scale}^{max} = \frac{D_0 f \sqrt{k}}{q S_p \sigma_i}$	k تعداد تکرار عکس‌ها، S_p عدد خطای نسبی اندازه‌گیری، σ_i خطای اندازه‌گیری مختصات عکسی و q استحکام هندسی شبکه می‌باشد.
۵	قید تعداد و پراکندگی نقاط عکسی	$D_{Point}^{min} = \frac{a f \sqrt{k}}{d}$	a فاصله متوسط بین نقاط
۶	کمترین و بیشترین فاصله مجاز دوربین تا شئی	$D_{min} = \max(D_{DOF}^{min}, D_{Point}^{min})$ $D_{max} = \min(D_{Scale}^{max}, D_{Res}^{max}, D_{Work}^{max}, D_{FOV}^{max})$	-

$$FOV = 2 \tan^{-1} \frac{d}{2f} \quad (1)$$

از طرف دیگر با توجه به قیود مطرح شده در جدول (۱)، فاصله دوربین تا شئی در دسترس می‌باشد. با استفاده از رابطه (۲) [۳۴] میزان پوشش یک تصویر بر روی زمین به دست می‌آید. البته باید توجه داشت که این فرمول در حالت مطلوب می‌باشد و در عمل به دلیل وجود کجی دوربین، عدد به دست آمده مقداری متفاوت خواهد بود.

$$G = 2H \tan \frac{FOV}{2} \quad (2)$$

حال با توجه به شکل (۲) و رابطه (۳) [۳۵] و همچنین میزان پوشش مدنظر، فاصله بین دو ایستگاه عکس‌برداری مشخص می‌شود؛ بنابراین با توجه به این فاصله و مدت زمان طی کردن این فاصله می‌توان به نرخ فریم مورد نیاز در ثانیه با توجه به پوشش مورد نظر رسید. هر یک از پارامترهای این فرمول‌ها در جدول (۲) تعریف شده است.



شکل ۲- میزان پوشش دو تصویر

$$B = \left(1 - \frac{PE}{100}\right) \times G \quad (3)$$

این موارد در حالت مطلوب می‌باشد ولی در عمل برای تصویربرداری از پل، محور نوری دوربین بر شئی عمود نیست. عمود نبودن محور نوری دوربین یا به عبارت دیگر کجی دوربین بر میزان پوشش تصاویر تأثیرگذار می‌باشد. میزان تأثیر کجی دوربین در ایستگاه S2 بر مقدار پوشش دو تصویر، در شکل (۳) با رنگ آبی نشان داده شده است.

در این جدول یک تعداد قیود در نظر گرفته شده است، که با استفاده از آن‌ها می‌توان یک فاصله بهینه برای تصویربرداری، با توجه به فاصله کانونی دوربین مورد استفاده، جهت اخذ تصاویر با بالاترین دقت و کیفیت، به دست آورد، در واقع با در نظر گرفتن این قیود کمینه‌ترین و بیشینه‌ترین فاصله محاسبه می‌شود که با این کار محدوده مناسب فاصله دوربین از شئی به دست می‌آید. در این پژوهش، برای سنجش توانایی دوربین‌های تلفن همراه، که در دسترس عموم قرار دارد، جهت مدل‌سازی و شناسایی ترک‌ها استفاده شد؛ بنابراین از دوربین تلفن همراه آیفون ۱۱ با فاصله کانونی ۴/۲۵ میلی‌متر و اندازه حس گر ۴/۸۵ × ۶/۴۵ میلی‌متر و با قابلیت ضبط ویدیو با سرعت ۳۰ فریم بر ثانیه استفاده شد.

بعد از انتخاب دوربین و طراحی شبکه ابتدایی، به منظور به دست آوردن فاصله مناسب جهت تصویربرداری، ویدیو مورد نظر باید با رعایت فاصله مناسب که در طراحی شبکه ابتدایی به دست آمده است، اخذ شود. این ویدیو به صورت کلی از پل گرفته می‌شود. در هنگام اخذ ویدیو باید به این نکته توجه داشت که هنگام حرکت از کم و زیاد کردن سرعت خودداری شود و با یک سرعت ثابت در امتداد پل حرکت و تصویربرداری انجام شود.

۳-۳- حذف فریم‌های اضافی برحسب نرخ فریم

سرعت اخذ ویدیو در دوربین‌های دیجیتال زیاد است و فریم‌های زیادی در هر ثانیه اخذ می‌شود؛ و زمانی که یک ویدیو از پل گرفته شود، تعداد بسیار زیادی فریم از پل ذخیره می‌شود که این حجم از فریم‌ها تأثیر مثبتی در فرایند تحقیق ندارند و از طرف دیگر حجم محاسبات را بسیار بالا می‌برند؛ بنابراین نیاز است فریم‌های اضافی حذف شود تا در ادامه بار محاسباتی کمتری در فرایند تحقیق وجود داشته باشد. البته باید به این نکته توجه داشته باشیم که حذف فریم‌های اضافی، پوشش تصاویر را تحت تأثیر قرار ندهد.

برای مشخص کردن نرخ فریم مورد نیاز، با توجه به حفظ پوشش تصاویر، ابتدا باید با توجه به فاصله کانونی و اندازه حس گر دوربین، با استفاده از رابطه (۱) [۳۴] زاویه میدان دید دوربین را به دست آورد.

همچنین در مثلث ۱ در شکل (۴) زاویه رأس B برابر با $90 + \frac{FOV}{2} - t$ می‌باشد. بنابراین با توجه به این مثلث، طول a را می‌توان به دست آورد.

$$\frac{a}{\sin t} = \frac{b}{\sin(90 + \frac{FOV}{2} - t)} \Rightarrow \frac{a}{\sin t} = \frac{b}{\cos(\frac{FOV}{2} - t)} \Rightarrow a = \frac{b \sin t}{\cos(\frac{FOV}{2} - t)} \quad (5)$$

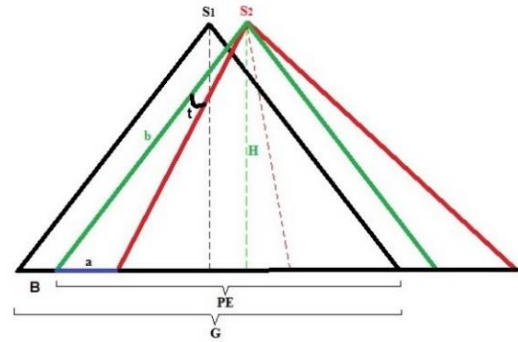
حال می‌توان رابطه (۳) را با توجه به میزان کجی دوربین به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$B_{with\ tilt} = \left(1 - \frac{PE}{100}\right) \times G - \frac{b \sin t}{\cos(\frac{FOV}{2} - t)} \quad (6)$$

البته باید توجه نمود که میزان کجی دوربین قابل اندازه‌گیری نیست و باید این میزان را به صورت تجربی در فرمول جایگذاری نمود؛ بنابراین فواصل مناسب بین ایستگاه‌های تصویربرداری (طول باز مناسب بین فریم‌ها) برای حفظ پوشش موردنظر به دست آمد. حال با توجه به این فاصله یعنی طول باز مناسب بین فریم‌ها و مدت زمان لازم برای طی شدن این فاصله، می‌توان نرخ فریم موردنیاز برای حفظ پوشش مدنظر را به دست آورد. به این ترتیب می‌توان فریم‌های اضافی را حذف نمود. برای روشن‌تر شدن نحوه حفظ فریم‌های کلیدی به فرمول شماره (۷) توجه شود.

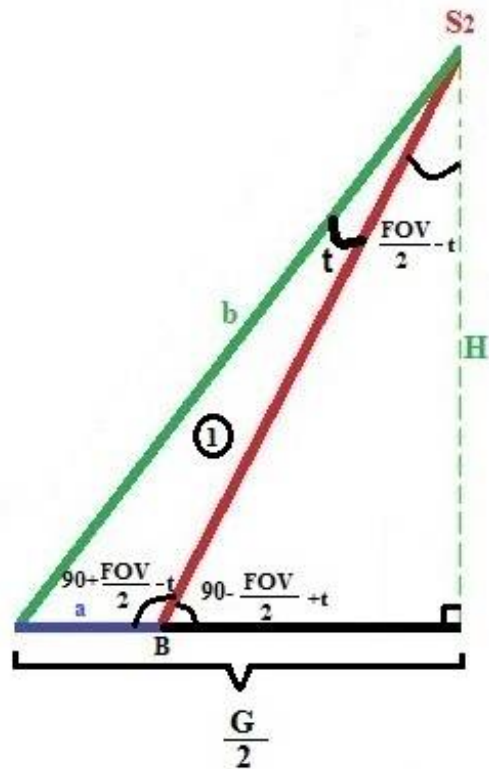
$$t_{temporal\ distance} = \frac{t \times B_{with\ tilt}}{L} \quad (7)$$

در فرمول (۷) $t_{temporal\ distance}$ فاصله زمانی مناسب فریم‌ها یا به عبارت دیگر همان نرخ فریم مورد نیاز بر حسب میلی‌ثانیه است، t مدت زمان لازم برای عبور از یک فاصله یک متری بر حسب میلی‌ثانیه می‌باشد، $B_{with\ tilt}$ طول باز مناسب بین فریم‌ها با توجه به پوشش مورد نظر و L فاصله‌ای است که اپراتور در یک ثانیه طی کرده است. بدین ترتیب و بر اساس این فرمول، فریم‌های که در این فواصل زمانی به دست آمده، قرار داشته باشند حفظ شده و در نهایت فریم‌های اضافی حذف می‌شوند.



شکل ۳- تأثیر کجی در میزان پوشش دو تصویر

این میزان تأثیر کجی دوربین در پوشش دو تصویر را می‌توان با توجه به شکل (۴) فرموله نمود.



شکل ۴- مثلث $bH \frac{G}{2}$

در مثلث $bH \frac{G}{2}$ با توجه به معلوم بودن زاویه رأس S2 و طول H می‌توان طول ضلع b را محاسبه نمود.

$$\cos \frac{FOV}{2} = \frac{H}{b} \Rightarrow b = \frac{H}{\cos \frac{FOV}{2}} \quad (4)$$

جدول ۲- پارامترهای موجود در روابط ۳،۲،۱

پارامتر	تعریف
FOV	زاویه میدان دید
F	فاصله کانونی
D	اندازه حس گر
G	میزان پوشش یک تصویر روی زمین
H	فاصله دوربین تا شی
B	فاصله دو ایستگاه تصویربرداری
PE	میزان پوشش طولی

۳-۴- استخراج مختصات مراکز تصویربرداری

بعد از پیش پردازش و حذف فریم‌های اضافی باید موقعیت مراکز تصویربرداری در فریم‌های کلیدی مشخص شود؛ بنابراین با توجه به این موضوع که تصاویر از پوشش مناسبی برخوردار هستند با استفاده از روش ساختار از حرکت، ابر نقاط تشکیل می‌شود و همچنین با استفاده از نقاط کنترل و معادلات شرط هم‌خطی می‌توان موقعیت‌های مراکز تصویربرداری را محاسبه نمود. رویه ساختار از حرکت شامل چندین مرحله کلیدی است [۳۶].

۱. تناظریابی ویژگی‌ها و رد موارد پرت^۱: از الگوریتم‌هایی مانند RANSAC برای شناسایی و تطبیق ویژگی‌ها در تصاویر استفاده می‌کند و استحکام تخمین ماتریس اساسی را افزایش می‌دهد.

۲. تخمین ماتریس بنیادی (F): یک مرحله مهم که هر دو پارامتر داخلی و خارجی دوربین را در بر می‌گیرد و شناسایی نقاط متناظر بین دو تصویر را برای بازسازی سه بعدی تسهیل می‌کند. ماتریس اساسی به صورت جبری نشان داده شده و از طریق حداقل مربعات خطی با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد^۲ حل می‌شود، که حداقل به هشت نقطه برای حل سیستم نیاز دارد.

۳. تخمین ماتریس اساسی (E): ماتریس اساسی که از ماتریس بنیادی مشتق شده است، وضعیت نسبی بین دو

دوربین را در بر می‌گیرد که برای تخمین وضعیت دوربین بسیار مهم است.

۴. تخمین وضعیت دوربین: این مرحله شامل تجزیه ماتریس اساسی، برای بازیابی پارامترهای چرخش و انتقال دوربین، حرکت به سمت موقعیت دقیق دوربین در صحنه است.

۵. بررسی وضعیت دست‌ساز^۳: اطمینان حاصل می‌کند که نقاط سه بعدی بازسازی شده در جلوی دوربین قرار دارند که شرط لازم، برای بازسازی معتبر است، که از طریق مثلث‌بندی به دست می‌آید.

۶. مسئله Perspective-n-Point (PnP): تخمین موقعیت دوربین را، با تخمین موقعیت دوربینی که مجموعه‌ای از نقاط سه بعدی و نگاشت‌های ۲ بعدی متناظر آن‌ها را در نظر گرفته است، اصلاح می‌کند.

۷. تنظیم بسته^۴: موقعیت‌های دوربین و نقاط سه بعدی را بهینه می‌کند تا خطای باز تصویرسازی^۵ را به حداقل برساند و دقت بازسازی سه بعدی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد.

۸. افزودن نقاط کنترل زمینی: مختصات نقاط کنترل زمینی را در مدل ادغام می‌کند تا با ارائه یک نقطه مرجع شناخته شده در فضا، توجیه مطلق و دقت را تضمین کند.

^۳ Chirality

^۴ Bundle Adjustment

^۵ Reprojection

^۱ Outlier

^۲ Singular Value Decomposition

استفاده از روش ساختار از حرکت نسبت به روش‌های دیگر مانند استریو با دیدهای متعدد^۱ دارای این مزایا می‌باشد که روش ساختار به وسیله حرکت می‌تواند تعداد بیشتری از تصاویر و صحنه‌ها را با هندسه پیچیده‌تر اداره کند.

۳-۵- انتخاب فریم‌های شامل ترک

در این تحقیق هدف نهایی شناسایی و اندازه‌گیری ترک‌ها می‌باشد؛ بنابراین فریم‌هایی که شامل ترک می‌باشند را فریم‌های اساسی می‌نامیم.

با توجه به تعداد بالای فریم‌های ویدیو اخذ شده و حجم محاسبات بالا، به‌منظور رهایی از کار زمان‌بر مهندسی ویژگی و همچنین دستیابی به سرعت پردازش بالا، جهت انتخاب فریم‌های اساسی، بهتر است از روش‌های نوین در حوزه یادگیری ماشین و یکی از زیرمجموعه‌های آن یعنی یادگیری عمیق استفاده نمود. یادگیری عمیق قدرت بسیار زیادی در یادگیری الگوهای پیچیده دارد. البته این یادگیری مستلزم داشتن داده‌های کافی و همچنین داشتن سیستم پردازش قدرتمند می‌باشد. اگر این دو پیش‌نیاز فراهم شود، با استفاده از یادگیری عمیق می‌توان هر الگویی هرچقدر هم که پیچیده باشد را یاد گرفت.

برای انتخاب فریم‌های اساسی راه‌کارهای مختلفی وجود دارد؛ در روش پیشنهادی ابتدا باید یک شبکه عصبی پیچشی، با تعداد لایه‌های مناسب، جهت استخراج ویژگی‌های سطح پایین، سطح متوسط و سطح بالای مناسب، انتخاب نمود. مدل موردنظر برای این تحقیق با توجه به کاربرد و تعداد لایه‌ها، مدل ResNet-18 می‌باشد. ResNet-18، یکی از اعضای خانواده شبکه‌های باقیمانده (ResNet)، مزایای متعددی را نسبت به معماری‌هایی مانند VGG و DenseNet ارائه می‌کند:

۱. کاهش پیچیدگی محاسباتی و کارایی پارامتر:

• VGG: شبکه‌های VGG، دارای تعداد زیادی پارامتر و عملیات ممیز شناور (FLOP) هستند. این پیچیدگی منجر به افزایش بار محاسباتی و زمان طولانی‌تر آموزش می‌شود. در مقابل، ResNet-18 به دقت قابل مقایسه یا بهتری با

پارامترهای بسیار کمتر دست می‌یابد و کارایی محاسباتی را افزایش می‌دهد.

• DenseNet: معماری‌های DenseNet از اتصالات متراکم استفاده می‌کنند، که منجر به استفاده مجدد از ویژگی و پارامترهای بالقوه کمتر، در مقایسه با شبکه‌های بسیار عمیق می‌شود. با این حال، اتصال متراکم می‌تواند باعث پیچیدگی در اجرا و افزایش استفاده از حافظه، در طول آموزش شود. معماری ساده‌تر ResNet-18 با اتصالات باقی‌مانده، عمق و کارایی را متعادل می‌کند، که اغلب منجر به زمان‌های آموزش سریع‌تر و کاهش مصرف حافظه می‌شود.

۲. کاهش مسئله محوشدگی گرادیان:

• VGG: همان‌طور که شبکه‌های VGG عمیق‌تر می‌شوند، می‌توانند با مسئله محوشدگی گرادیان مواجه شوند، جایی که گرادیان در طول پس انتشار کاهش می‌یابد و مانع آموزش مؤثر می‌شود. ResNet-18 این مسئله را از طریق اتصالات باقیمانده حل می‌کند، به گرادیان اجازه می‌دهد تا مستقیماً در شبکه جریان یابد و آموزش مدل‌های عمیق‌تر را تسهیل می‌کند.

• DenseNet: DenseNet همچنین از اتصالات برای کاهش مشکل محوشدگی گرادیان، با اطمینان از جریان گرادیان کارآمد استفاده می‌کند. با این حال، اتصالات در DenseNet می‌تواند منجر به افزایش استفاده و پیچیدگی حافظه شود. نگاشت شناسایی افزودنی ResNet-18 رویکرد ساده‌تری را برای حفظ جریان گرادیان، بدون هزینه مدیریت اتصالات متراکم ارائه می‌دهد.

۳. کارایی و دقت آموزش:

• VGG: شبکه‌های VGG ممکن است به زمان‌های آموزشی طولانی‌تری نیاز داشته باشند و به دلیل تعداد زیاد پارامترها مستعد بیش‌برازش شوند. معماری ResNet-18 امکان همگرایی سریع‌تر را فراهم می‌کند و اغلب با پارامترهای کمتر، به دقت بالاتری دست می‌یابد، که آن را برای کارهای مختلف بدون منابع محاسباتی گسترده مناسب‌تر می‌کند.

• DenseNet: در حالی که معماری‌های DenseNet به دلیل اتصالات متراکم و استفاده مجدد از ویژگی‌ها می‌توانند به دقت بالایی دست یابند، پیچیدگی این اتصالات می‌تواند

^۱ multi-view stereo

منجر به زمان طولانی‌تر آموزش و افزایش نیاز به حافظه شود. ResNet-18 تعادلی بین عمق و سادگی ارائه می‌دهد که اغلب منجر به دقت رقابتی با آموزش کارآمدتر و مصرف کمتر حافظه می‌شود.

به طور خلاصه، ResNet-18 یک معماری متعادل ارائه می‌کند که عمق را با کارایی محاسباتی، جریان‌گردان مؤثر و زمان‌های آموزش سریع‌تر در مقایسه با معماری‌های VGG و DenseNet ترکیب می‌کند. این مزایا آن را به یک انتخاب محبوب برای کارهای مختلف بینایی رایانه تبدیل می‌کند، به خصوص زمانی که منابع محاسباتی محدود هستند؛ بنابراین در این پژوهش از ResNet-18 استفاده می‌شود [۳۷، ۳۸] [۳۹].

این شبکه دارای ۱۸ لایه پیچشی می‌باشد که بر روی مجموعه داده ImageNet با بیش از یک میلیون تصویر آموزش داده شده است. با توجه به این که در مجموعه داده ImageNet تصویر ترک وجود ندارد، این شبکه یا مدل، باید به گونه‌ای آموزش داده شود تا بتواند ویژگی‌های موردنیاز جهت شناسایی ترک در تصاویر را استخراج کند. برای این منظور در مرحله اول باید، از انتقال یادگیری استفاده نمود، به این صورت که وزن‌های به‌دست‌آمده از آموزش بر روی مجموعه داده ImageNet را ثابت نگه‌داشته و لایه آخر را متناسب با این پروژه بازطراحی نمود و تنها لایه آخر را بر روی مجموعه داده‌های ترک تهیه شده، بازآموزش داد. سپس این مدل باز آموزش داده شده را، بر روی داده‌های تست مورد آزمون قرار داد، در صورت رسیدن به دقت مناسب، می‌توان از این مدل برای شناسایی فریم‌های حاوی ترک استفاده نمود. در صورتی که این مدل آموزش داده شده به دقت مناسب نرسد، باید مدل ResNet-18 را تنظیم دقیق نمود، به این صورت که یک قدم فراتر رفته و علاوه بر لایه آخر، برخی از لایه‌های قبلی را نیز دوباره بر روی مجموعه داده‌های ترک آموزش داد. اگر بتوان شبکه را به درستی آموزش داد، در نهایت با اضافه کردن بخش دسته‌بندی به خروجی این شبکه، با استفاده از لایه کاملاً متصل، می‌توان فریم‌های ورودی به این شبکه را دسته‌بندی نمود. دسته‌بندی به این صورت می‌باشد که فریم‌های ویدیو موردنظر، به ترتیب وارد شبکه شده و خروجی شبکه به این صورت است که تصاویر را به دودسته تقسیم می‌کند؛ تصاویر حاوی ترک و تصاویر بدون ترک که تصاویر حاوی

ترک همان فریم‌های اساسی هستند که در این تحقیق به آن‌ها نیاز می‌باشد.

۳-۶- خوشه‌بندی فریم‌های حاوی ترک

با توجه به اینکه مختصات مراکز تمامی تصاویر، در مرحله قبل مشخص شده است، می‌توان با استفاده از معیار فاصله، خوشه‌بندی را به گونه‌ای انجام داد که تصاویر مربوط به هر ترک به یک خوشه تبدیل شوند. تا بتوان در مرحله بعد، تصویر قائم هر کدام از ترک‌های موجود را به صورت مجزا تولید نمود. مراحل خوشه‌بندی را می‌توان در ادامه کار مشاهده نمود.

۱- فریم‌های شامل ترک با توجه به ترتیب اخذ ویدیو مرتب شوند.

۲- فاصله اقلیدسی مرکز اولین فریم اساسی با مرکز فریم اساسی بعدی محاسبه شود و اولین خوشه تشکیل شود.

۳- دو برابر فاصله محاسبه شده در مرحله قبل به عنوان حد آستانه انتخاب شود.

۴- فاصله اقلیدسی مرکز دومین فریم اساسی، با مرکز فریم اساسی بعدی محاسبه شود و اگر از حد آستانه کمتر بود، فریم سوم نیز در این خوشه قرار می‌گیرد.

۵- میانگین فواصل، بین مراکز فریم اول و دوم، دوم و سوم محاسبه می‌شود و حد آستانه به‌روزرسانی می‌شود.

۶- تکرار مراحل ۴ و ۵ برای فریم‌های بعدی، تا زمانی که شرط توقف برقرار شود؛ به عبارت دیگر، فواصل بین یک فریم و فریم بعدی بیشتر از حد آستانه شود.

۷- اولین فریمی که فاصله مرکز آن از فریم قبلی بیشتر از حد آستانه شود، خوشه بعدی را تشکیل می‌دهد.

۸- در این مرحله علاوه بر محاسبه فاصله مرکز دو فریم پشت سر هم، فاصله مرکز فریم با میانگین خوشه‌های قبلی نیز محاسبه می‌شود و فریم به خوشه‌ای اضافه می‌شود که فاصله کمتری از آن خوشه دارد.

۹- این مراحل تکرار می‌شود تا تمام فریم‌ها، خوشه‌بندی شوند.

برای درک بهتر این مراحل، شبه کد خوشه‌بندی را می‌توان در شکل (۵) مشاهده نمود.

```

شبه کد
PC = مختصات مرکز پرسپکتیو فریم های کلیدی
KN = تعداد فریم های کلیدی
KF = فریم کلیدی
AV = میانگین خوشه
ED = فاصله اقلیدوسی
Input: PC, KN
cluster.append(KF [0])
threshold = 2* ED(KF[0], KF[1])
for i in range(1, len(KN)):
    if ED(KF [i], KF [i+1]) < threshold:
        cluster.append(KF[i+1])
    else :
        newcluster.append(KF [i+1])
    if ED(KF [i], KF [i+1]) > ED(AV[i], KF [i+1]) :
        cluster.append(KF[i+1])
    else
        newcluster.append(KF[i+1])

```

شکل ۵- شبه کد خوشه‌بندی

۳-۷- تهیه تصویر قائم ترک

حال با توجه به مرحله قبل، می‌توان تصویر قائم هرکدام از ترک‌های موجود را، با استفاده از تصاویر مربوط به آن ترک تولید نمود. همان‌طور که مشخص است نحوه نگاشت در تصاویر به این صورت است که تمام نقاط از مرکز عدسی دوربین عبور می‌کنند؛ بنابراین دو خط که در واقعیت موازی هستند در تصویر موازی نخواهند بود و این موضوع باعث می‌شود که اندازه‌گیری بر روی تصاویر دقت خوبی نداشته باشد؛ پس نیاز است که تغییراتی بر روی تصویر انجام شود، تا بتوان اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری بر روی تصویر انجام داد. این تغییرات شامل تصحیح اثر کجی و جابجایی ناشی از اختلاف ارتفاع می‌باشد. اگر این دو اثر بر روی تصویر اصلاح شود، اصطلاحاً تصویر موردنظر به تصویر قائم تبدیل می‌شود. اثر جابجایی ناشی از اختلاف ارتفاع، به دلیل وجود عوارض با فواصل مختلف نسبت به دوربین، باعث ایجاد جابجایی در تصویر می‌شود. می‌توان گفت که فاصله کانونی دوربین و فاصله عوارض تا دوربین در مقدار جابجایی تصویر ناشی از اختلاف ارتفاع مؤثر می‌باشد و این جابجایی تصویر ناشی از اختلاف ارتفاع نسبت مستقیم با فاصله عوارض تا دوربین دارد. از طرف دیگر هرچقدر از مرکز تصویر دورتر شویم این جابجایی اثر بیشتری خواهد داشت. در هنگام تصویربرداری یا ضبط ویدیو به دلیل لرزش دست و عوامل دیگر، باعث می‌شود که محور نوری دوربین منطبق بر محور عمود بر دیواره پل نباشد و نسبت به آن زاویه پیدا کند، این زاویه که آن را کجی دوربین می‌نامند باعث جابجایی در تصویر می‌شود

و در نتیجه در محاسبه طول روی عکس و محاسبه مقیاس مؤثر خواهد بود. برای تولید تصویر قائم اصولاً به دو نوع اطلاعات نیاز می‌باشد. ۱- اطلاعات مربوط به دوربین که شامل المان‌های داخلی (فاصله اصلی، نقطه اصلی و اعوجاجات) و خارجی (سه شیفت و سه دوران) می‌باشد؛ ۲- مدل رقومی زمین. برای تولید تصویر قائم با استفاده از مدل رقومی زمین تمام نقاط تصویر اصلاح می‌شوند؛ به این ترتیب که مجموع مختصات مسطحاتی نقاط در مدل رقومی زمین یک نقشه مسطحاتی تولید می‌کنند؛ که درجات خاکستری پیکسل‌های آن از تصویر اولیه به دست آمده است. به عبارت دیگر تصویر قائم موقعیت‌های مسطحاتی نقاط را از مدل رقومی زمین می‌گیرد و مقادیر درجات خاکستری نقاط را از تصویر اولیه و بدین ترتیب تصویر تبدیل به تصویر قائم می‌شود [۴۰] و اندازه‌گیری بر روی تصویر حاصل بسیار دقیق‌تر از تصویر معمولی می‌باشد. مراحل تولید تصویر قائم با استفاده از نرم‌افزار شامل این موارد می‌باشد:

- ۱- با شناسایی نقاط متناظر در تصاویر دارای همپوشانی، تصاویر هم سطح می‌شوند.
- ۲- ابر نقاط پراکنده تولید می‌شود.
- ۳- ابر نقاط متراکم تولید می‌شود.
- ۴- مدل مش سه‌بعدی از ابر نقاط متراکم تولید می‌شود.
- ۵- برای تولید مدل بافت، تصاویر بر روی مش سه‌بعدی نگاشت می‌شود.

۶- مدل ارتفاعی رقومی از ابر نقاط متراکم تولید می‌شود.

۷- از موقعیت دوربین و مدل ارتفاعی رقومی برای تصحیح تصویر (حذف جابجایی ناشی از اختلاف ارتفاع و کجی دوربین) و حذف اعوجاج پرسپکتیو استفاده می‌شود.

۸- تصاویر منفرد تصحیح شده را، در یک تصویر قائم یکپارچه ترکیب می‌کند.

۴- پیاده‌سازی

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، یک پل هوایی شرقی-غربی در شهر شیراز، در نظر گرفته شد. هدف شناسایی و اندازه‌گیری ترک‌ها در دیواره قسمت شمال شرقی پل می‌باشد. در ابتدا ۱۰ عدد تارگت بر روی سطح دیواره، در قسمت شمال شرقی پل در نظر گرفته شد. در مرحله بعد با استفاده از یک دستگاه توتال استیشن "leica ts02 power مختصات این تارگت‌ها با دقت اندازه‌گیری شد.

در مرحله بعد نیاز است که فاصله مناسب تصویربرداری از پل مشخص شود. با توجه به فرمول شماره (۴) موجود در جدول (۱) عدد مقیاس ۴۹۶ میلی‌متر محاسبه شد و با در نظر گرفتن حداقل مقیاس به دست آمده، می‌توان حداکثر فاصله تصویربرداری را، با توجه به فاصله کانونی و عدد مقیاس محاسبه نمود، که برابر ۲۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به رابطه (۶) موجود در جدول (۱)، کمترین فاصله دوربین از شئی برابر با بیشترین فاصله محاسبه شده از دو قید عمق میدان و تعداد نقاط عکسی می‌باشد. حداقل عمق میدان، با توجه به رابطه (۱) موجود در جدول (۱) ۱۰۱۰ میلی‌متر محاسبه شد، همچنین کمترین فاصله برای قید تعداد و پراکندگی نقاط عکسی، با توجه به رابطه (۵) موجود در جدول (۱) عدد ۸۳۰ میلی‌متر به دست آمد؛ بنابراین کمترین فاصله مناسب بین دوربین و شئی، ۱۰۱۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، بیشترین فاصله مجاز بین دوربین و شئی (رابطه (۶) جدول (۱)) ۱۳۷۶۰ میلی‌متر محاسبه شد.

قید قدرت تفکیک نیز، با توجه به رابطه (۲) موجود در جدول (۱)، برابر با ۱۷۷۰ میلی‌متر محاسبه شد؛ بنابراین بیشترین فاصله مناسب بین دوربین و شئی ۱۷۷۰ میلی‌متر می‌باشد.

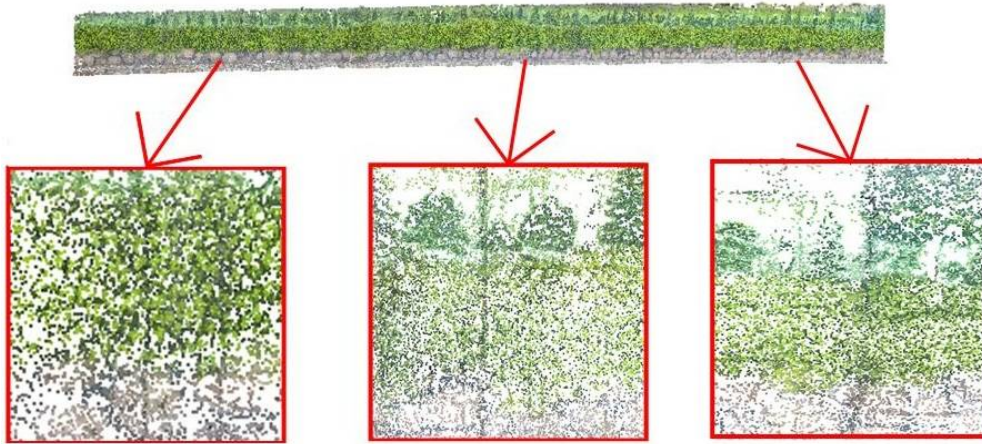
با توجه به این موارد، فاصله دوربین تا شئی در حدود ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. با رعایت این فاصله برای پوشش کل محدوده، یک ویدیو در شش رن از پل گرفته شد. طول ویدیو گرفته شده سه دقیقه و سی‌ودو ثانیه می‌باشد و با توجه به اینکه سرعت اخذ ویدیو ۳۰ فریم بر ثانیه می‌باشد، بنابراین ۶۲۱۰ فریم از پل ذخیره شده است. این حجم از اطلاعات باعث کند شدن مراحل پردازش می‌شود، بنابراین لازم است که فریم‌های مهم حفظ شوند و فریم‌های اضافی حذف گردد.

لازم است که با توجه به حفظ پوشش تصاویر، نرخ فریم مورد نیاز مشخص شود بنابراین ابتدا با توجه به رابطه (۱) زاویه میدان دید دوربین ۹۰/۴۸۳ درجه به دست آمد. در ادامه با توجه به فاصله دوربین تا شئی میزان پوشش یک تصویر بر روی زمین ۳۰۲۰ میلی‌متر (رابطه (۲)) می‌باشد.

حال با توجه به میزان پوشش مدنظر، فاصله بین دو ایستگاه عکس‌برداری توسط رابطه (۶) مشخص می‌شود که ۳۶۰ میلی‌متر می‌باشد؛ بنابراین با توجه به این فاصله و مدت‌زمان طی کردن این فاصله، می‌توان به نرخ فریم مورد نیاز در ثانیه با توجه به پوشش مورد نظر رسید.

نرخ تصویربرداری دوربین، ۳۰ فریم بر ثانیه می‌باشد. با توجه به این موضوع که سرعت جابجایی در هنگام فیلم‌برداری یک متر بر ثانیه می‌باشد و فاصله مناسب تصویربرداری با حفظ پوشش ۸۰ درصد تصاویر، ۳۶۰ میلی‌متر می‌باشد بنابراین لازم است هر ۳۶۰ میلی‌ثانیه یک فریم حفظ شود و فریم‌های اضافی حذف گردد. با توجه به اینکه کیفیت فریم‌های استخراج شده، دارای کیفیت کمتری نسبت به تصاویر معمولی هستند، می‌توان تعداد فریم‌های حفظ شده را بیشتر در نظر گرفت، تا ابر نقاط به راحتی تشکیل گردد. در نهایت از تعداد ۶۳۶۲ فریم ۱۰۷۰ فریم باقی ماند و ۵۲۹۲ فریم حذف گردید.

با توجه به این موضوع که حذف فریم‌های اضافی به‌گونه‌ای انجام گرفت که فریم‌های باقی‌مانده دارای پوشش مناسب باشند بنابراین با استفاده از این تصاویر ابر نقاط در نرم‌افزار متاشیپ [۴۱]، تولید گردید و با استفاده از نقاط کنترل و معادلات شرط هم خطی، مختصات مراکز دوربین‌ها استخراج گردید. ابر نقاط پراکنده تشکیل شده را می‌توان در شکل (۶) مشاهده نمود.



شکل ۶- ابر نقاط پراکنده تولیدشده از دیواره پل

این مدل، بلوک اصلی آن است. این بلوک شامل چندلایه نرمال‌سازی بسته‌ها و تابع فعال‌سازی Relu می‌باشد. مشخصات هر لایه را می‌توان در جدول (۳) مشاهده نمود.

حال نوبت انتخاب فریم‌هایی است که حاوی ترک می‌باشند. برای این کار از مدل ResNet-18 برای استخراج فریم‌های حاوی ترک استفاده شد. مهم‌ترین بخش معماری

جدول ۳- مشخصات لایه‌های ResNet-18

گام	لایه سازی	تعداد فیلتر	اندازه فیلتر	لایه‌ها
(۱،۱)	(۱،۱)	۶۴	(۳×۳)	لایه اول
(۲،۲)	(۱،۱)	۱۲۸	(۳×۳)	لایه دوم
(۲،۲)	(۱،۱)	۲۵۶	(۳×۳)	لایه سوم
(۲،۲)	(۱،۱)	۵۱۲	(۳×۳)	لایه چهارم

جدول (۵) مشاهده نمود. برای جلوگیری از بیش برآزش مدل، با توجه به تعداد داده‌های آموزشی باید از مدلی استفاده نمود که تعداد پارامترهای آن بیش از حد زیاد نباشد و برای این پژوهش مدل ResNet-18 با توجه به تعداد پارامترهای آن، گزینه مناسبی بود. استفاده از تصاویر بدون نویز و با کیفیت و با انتخاب بهینه فرا پارامترها که مقادیر آن، در جدول (۵) مشخص شده است، از بیش برآزش جلوگیری به عمل آمد، که گواه آن دقت مدل بر روی داده‌های ارزیابی می‌باشد که در ادامه در قسمت ارزیابی و نتایج آمده است. بر این اساس، مدل موردنظر، آموزش داده شد و با استفاده از این مدل، تصاویر حاوی ترک شناسایی شدند. نتایج ارزیابی دقت روش ارائه شده در خصوص شناسایی ترک در بخش ارزیابی ارائه شده است. بعد از آموزش مدل، فریم‌های کلیدی مرحله قبل، به مدل داده شد و از مجموع کل تصاویر ۱۳۶ تصویر ترک شناسایی شد. که برخی از این تصاویر شناسایی شده را که حاوی ترک می‌باشند را می‌توان در شکل (۷) مشاهده نمود.

در این پژوهش از وزن‌های مدل ResNet-18 که بر روی تصاویر ImageNet آموزش داده شده است استفاده شد و برای آموزش مجدد این شبکه جهت شناسایی تصاویر حاوی ترک ۱۶۱۱ تصویر ترک و ۱۱۸۶ تصویر بدون ترک تهیه گردید. این تصاویر به وسیله دوربین تلفن همراه، از سطوح بتنی موجود در سطح شهر شیراز گرفته شد، که تصاویر حاوی ترک، شامل ترک در جهات طولی، عرضی و مورب می‌باشد و همچنین تصاویر بدون ترک نیز از سطوح بتنی سالم که در سطح آن‌ها ترک وجود ندارد گرفته شده است. در بین کل تصاویر ترک به صورت رندم ۱۳۶۹ تصویر ترک برای آموزش و ۲۴۲ تصویر ترک برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. همچنین از کل تصاویر بدون ترک ۱۰۰۳ تصویر برای آموزش و ۱۸۳ تصویر برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد تا نسبت ۲۵ به ۷۵ تا ۱۵ به ۸۵ درصد برای انتخاب داده‌های آموزشی و تست رعایت شود. این موارد را می‌توان در جدول (۴) مشاهده نمود. همچنین مقادیر فرا پارامتر در نظر گرفته شده برای این مدل را می‌توان در



شکل ۷- نمونه‌ای از تصاویر شناسایی شده حاوی ترک از دیواره پل

جدول ۴- تعداد تصاویر مورد استفاده در آموزش و اعتبارسنجی

مجموع	بدون ترک	دارای ترک	
۲۳۷۲	۱۰۰۳	۱۳۶۹	آموزش
۴۲۵	۱۸۳	۲۴۲	اعتبار سنجی
۲۷۹۷	۱۱۸۶	۱۶۱۱	مجموع

جدول ۵- مقادیر فراپارامترها

مقادیر فرا پارامتر	فرا پارامترها
۱۶	اندازه بسته
گرادیان کاهشی تصادفی	بهینه‌ساز
۰/۰۰۲	نرخ یادگیری
۰/۹	تکانه
۰/۹	گاما
تابع هزینه آنتروپی متقاطع	معیار

مراکز دوربین، تصاویر مربوط به هر ترک به صورت جداگانه خوشه‌بندی شود. در نهایت سه ترک جداگانه در سرتاسر دیواره پل که از آن تصویربرداری انجام گرفته بود، شناسایی شد. تعداد تصاویر مربوط به هر ترک را می‌توان در جدول ۶ مشاهده نمود.

حال یک دسته تصاویر وجود دارد، که این تصاویر حاوی ترک می‌باشند، ولی مشخص نیست که کدام تصاویر مربوط به کدام ترک هستند و چه تعداد ترک شناسایی شده است. برای مشخص شدن این موضوع لازم است که با توجه به مختصات مراکز دوربین و فاصله بین

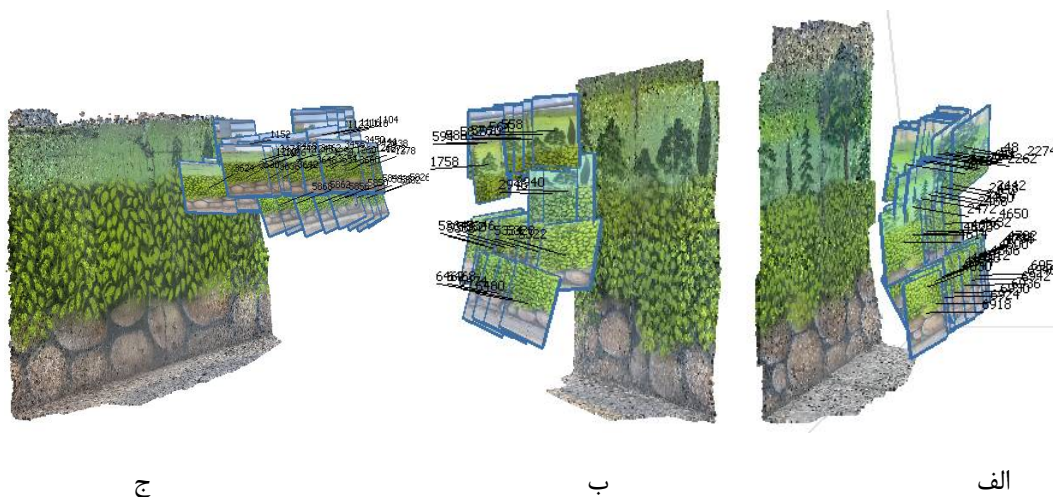
جدول ۶- تعداد تصاویر مربوط به هر ترک

شماره ترک	تعداد تصاویر حاوی ترک
ترک شماره یک	۴۸
ترک شماره دو	۴۲
ترک شماره سه	۴۶
مجموع	۱۳۶

مختلف این ترک‌ها، اندازه‌گیری شد، که می‌توان این اندازه‌ها را در جدول ۷ مشاهده کرد.

در این تحقیق موقعیت نسبی ترک‌ها، نسبت به هم نیز مد نظر می‌باشد، به همین دلیل فاصله افقی این سه ترک نیز اندازه‌گیری شده است که می‌توان در شکل (۱۰) مشاهده نمود. فاصله نسبی و تعداد ترک‌ها، می‌تواند به متخصصین سازه برای ارزیابی وضعیت سلامتی پل‌ها و اتخاذ تصمیم مناسب کمک شایانی کند.

در نهایت سه دسته تصویر، مربوط به سه ترک وجود دارد که با هر کدام از این دسته‌ها، تصویر قائم مربوط به آن ترک، با توجه به مختصات مراکز دوربین که در مراحل قبل به دست آمد و با استفاده از نرم‌افزار متاشیپ تولید شد، ابر نقاط و تصویر قائم مربوط به هر ترک را می‌توان در شکل (۸) و (۹) مشاهده نمود. حال با توجه به این موضوع که، می‌توان بر روی تصویر قائم اندازه‌گیری‌های دقیقی انجام داد، طول این سه ترک و همچنین سه عرض، در نواحی



شکل ۸- ابر نقاط مربوط به هر ترک. الف) ابر نقاط ترک ۱. ب) ابر نقاط ترک ۲. ج) ابر نقاط ترک ۳

جدول ۷- طول و عرض اندازه‌گیری شده ترک‌ها بر روی تصاویر

شماره ترک	طول اندازه‌گیری شده از روی تصویر قائم	عرض اندازه‌گیری شده از روی تصویر قائم
ترک شماره یک	۲/۹۱۲ متر	۴/۰۷ میلی‌متر
		۳/۱۶ سانتی‌متر
		۱/۶۸ سانتی‌متر
ترک شماره دو	۲/۲۷۳ متر	۱/۸۸ سانتی‌متر
		۲/۶۳ سانتی‌متر
		۱/۸۹ سانتی‌متر
ترک شماره ۳	۱/۳۸۱ متر	۶/۰۵ میلی‌متر
		۶/۷۷ میلی‌متر
		۱/۰۱ سانتی‌متر



شکل ۹- تصاویر قائم مربوط به هر ترک. الف) تصویر قائم ترک ۰.۱ (ب) تصویر قائم ترک ۰.۲ (ج) تصویر قائم ترک ۰.۳



شکل ۱۰- فاصله نسبی ترک‌ها نسبت به هم

۵- ارزیابی و نتایج

به دلیل اینکه مرحله شناسایی و دسته‌بندی ترک در تصاویر، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد و تأثیر بسزایی در نتایج پایانی دارد بخش ارزیابی این تحقیق به دو بخش تقسیم می‌شود. ابتدا ارزیابی الگوریتم مورد استفاده در شناسایی تصاویر حاوی ترک، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس ابر نقاط تشکیل شده و در نهایت نتایج محاسبه شده طول و عرض ترک‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در ابتدا روش ارائه شده، جهت شناسایی فریم‌های کلیدی را با روش ارائه شده در پژوهش [۴۲] مورد مقایسه قرار داده تا کارایی روش پیشنهادی نمایان شود. در پژوهش [۴۲] انتخاب فریم‌های کلیدی به عنوان یک مسئله بهینه سازی قید دار در نظر گرفته شده است. در این روش با توجه به اولین فریم یک دنباله ویدیویی، به دنبال یافتن فریم‌هایی است که (۱) خط پایه به اندازه کافی طولانی باشد (از طریق قید نسبت نقاط ویژگی متناظر)، (۲) منجر به حرکت یا ساختار منحنی نشود (بر اساس ماتریس اساسی و

هموگرافی)، و (۳) بهترین برآورد هندسه اپی پلار (با استفاده از دو معیار^۱ GRIC و^۲ PELC) را داشته باشد. به منظور مقایسه این دو روش ابتدا یک ویدیو که دارای ۱۳۵۹ فریم است از پل گرفته شد، سپس با استفاده از هر دو روش، فریم‌های کلیدی این ویدیو استخراج گردید. در روش ارائه شده به منظور حفظ پوشش طولی هشتاد درصد ۹۱ فریم کلیدی انتخاب شد ولی در روش ارائه شده در پژوهش [۴۲]، ۴۶ فریم به عنوان فریم کلیدی انتخاب گردید. برای مقایسه بهتر این دو روش با استفاده از فریم‌های کلیدی استخراج شده دو ابر نقاط پراکنده با هر یک از فریم‌های کلیدی تولید شد، که این ابر نقاط را می‌توان در شکل (۱۱) مشاهده نمود. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود ابر نقاط پراکنده حاصل از روش ارائه شده به دلیل رعایت حفظ پوشش طولی ۸۰ درصد دارای گپ کمتر و ابر نقاط کامل‌تری می‌باشد و در مقابل با توجه به شکل (۱۱) و (۱۲)

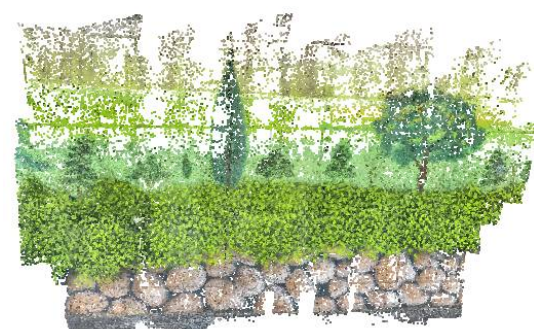
^۱ Geometric robust information criterion

^۲ point-to-epipolar line cost

مشخص است که ابر نقاط حاصل از پژوهش [۴۲] هم در وسط و هم در حاشیه‌های مدل دارای گپ فراوان می‌باشد.

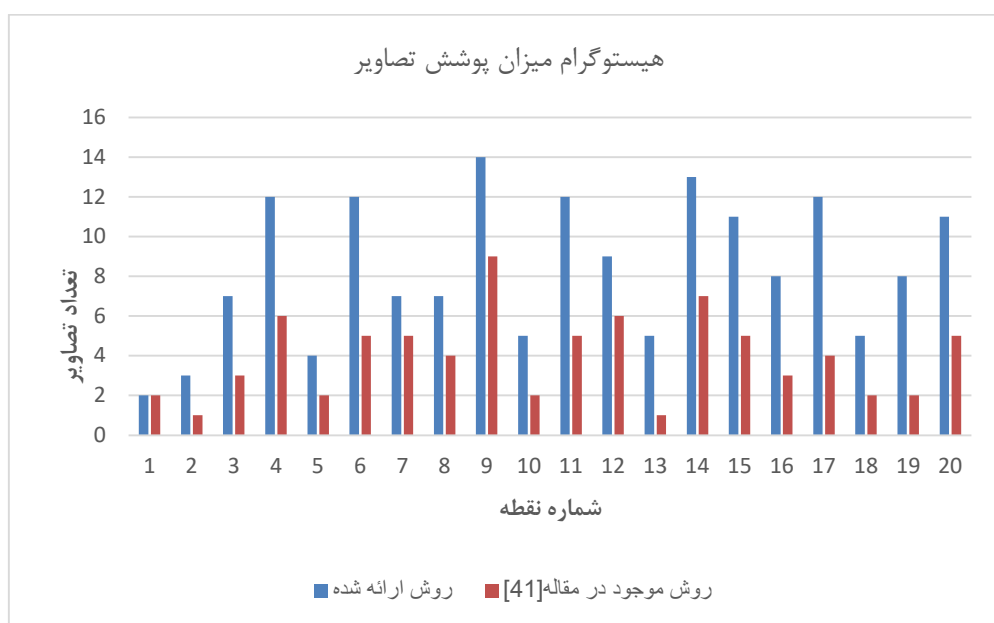


شکل ۱۱- ابر نقاط پراکنده حاصل از فریم‌های کلیدی روش ارائه شده



شکل ۱۲- ابر نقاط پراکنده حاصل از فریم‌های کلیدی پژوهش [۴۲].

برای مقایسه بیشتر این دو روش همان‌طور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود، بیشترین خطای بازتصویرسازی روش ارائه شده، کمتر از روش مقاله [۴۲] می‌باشد همچنین میانگین خطای بازتصویرسازی در روش ارائه شده، کمتر می‌باشد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که پراکندگی خطا در روش ارائه شده کمتر است و میزان فریم‌های پرت و با خطای زیاد، در روش ارائه شده کمتر است و می‌توان نتیجه گرفت که برای انتخاب فریم‌های کلیدی در ویدیوهای گرفته شده از دیواره پل، روش ارائه شده قابل اعتمادتر می‌باشد. جهت مقایسه بیشتر و همچنین مشخص شدن میزان پوشش تصاویر، حدود بیست نقطه در سرتاسر ابر نقاط پراکنده در نظر گرفته شد و تعداد تصاویری که آن نقاط، در آن تصاویر، مشاهده شده‌اند مشخص شد، مقایسه پوشش روش ارائه شده و روش مقاله [۴۲] در قالب یک هیستوگرام در شکل (۱۳) ارائه شده است. همان‌طور که در هیستوگرام مشخص است میزان پوشش تصاویر در روش ارائه شده خیلی بیشتر از روش مقاله [۴۲] می‌باشد. در نقاطی که میزان تصاویر بسیار کاهش پیدا کرده است، نقاط حاشیه مدل می‌باشند که این امر اجتناب ناپذیر است.



شکل ۱۳- هیستوگرام میزان پوشش تصاویر در روش ارائه شده و روش مقاله [۴۲]

جدول ۸- مقایسه ابر نقاط پراکنده حاصل از روش ارائه شده و روش موجود در مقاله [۴۲]

روش	تعداد فریم‌های کلیدی انتخاب شده	خطای بازتصویرسازی			
		کمینه	بیشینه	میانگین	واریانس
روش ارائه شده	۹۱	۰/۶۵۶	۱/۵۵۶	۱/۱۳۱	۰/۰۲۹
روش مقاله [۳۷]	۴۷	۰/۷۱۱	۱/۷۹۸	۱/۲۷۵	۰/۰۳۵

استفاده از این موارد می‌توان سه معیار ارزیابی را به صورت زیر به دست آورد.

$$\text{نرخ تشخیص صحیح مثبت} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۸)$$

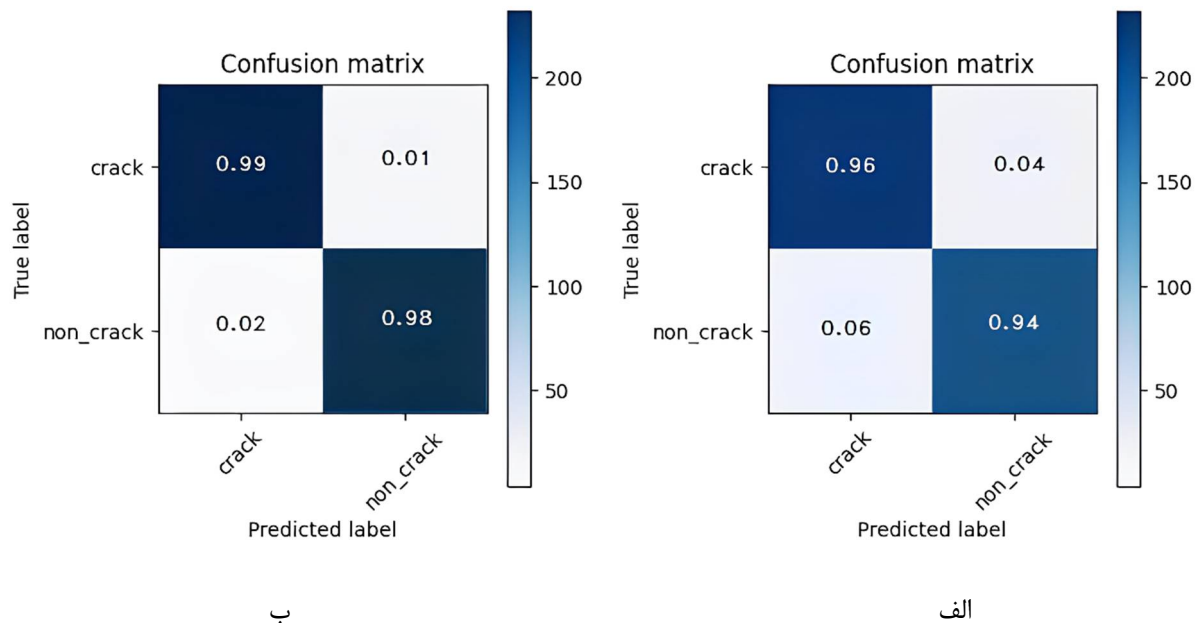
$$\text{نرخ تشخیص صحیح منفی} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (۹)$$

$$\text{دقت کلی} = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad (۱۰)$$

برای ارزیابی و مقایسه، ۴۲۵ تصویر مشترک، به هر دو الگوریتم داده شد و معیارهای ذکر شده برای تمام این ۴۲۵ تصویر حاصل از دو الگوریتم، به دست آمد که می‌توان میانگین نتایج ارزیابی حاصل از دو روش، بر روی این ۴۲۵ تصویر را در جدول (۱۰) و شکل ۱۴ مشاهده نمود.

در این مرحله دو معماری معروف reznet18 و vgg16 برای شناسایی تصویر ترک مورد مقایسه قرار گرفتند.

روشی که برای ارزیابی نتایج این دو الگوریتم در نظر گرفته شده است استفاده از درایه‌های ماتریس درهم‌ریختگی یا ماتریس ابهام می‌باشد، که با استفاده از درایه‌های این ماتریس، می‌توان مقدار شاخص‌های ارزیابی یعنی نرخ تشخیص درست، نرخ تشخیص اشتباه و دقت کلی را به دست آورد. در جدول (۹) تعداد تصاویری است که به درستی به عنوان ترک، شناسایی شده است. FP تعداد تصاویری است که به اشتباه، به عنوان تصاویر حاوی ترک شناسایی شده است. FN تعداد تصاویری است که حاوی ترک می‌باشد، ولی در روش مورد نظر، به اشتباه به عنوان تصاویر حاوی ترک شناسایی نشده است. TN تعداد تصاویری است که حاوی ترک نمی‌باشد و در روش مورد نظر به عنوان تصاویر حاوی ترک شناسایی نشده است. حال با



شکل ۱۴- ماتریس درهم‌ریختگی. الف) روش vgg16 ب) روش reznet18

جدول ۹- ماتریس ابهام

برچسب پیش‌بینی‌شده			
مجموع	بدون ترک	ترک	
FN + TP	FN	TP	ترک
TN + FP	TN	FP	بدون ترک
FN + TN + TP + FP	FN + TN	TP + FP	مجموع

جدول ۱۰- میانگین نتایج ارزیابی دو روش دسته‌بندی

شاخص ارزیابی مدل	نرخ تشخیص درست (%)	نرخ تشخیص اشتباه (%)	دقت کلی (%)
Reznet18	۹۹/۶	۹۸/۹	۹۹/۳
VGG16	۹۶/۷	۹۴/۵	۹۵/۸

مقایسه قرار می‌گیرد. در جدول (۱۱) میزان خطای متوسط باز تصویرسازی برای تصاویر هر دو ابر نقاط مشخص شده است.

در این مرحله دو دسته از ابر نقاط شامل ابر نقاط حاصل از کل تصاویر و ابر نقاط حاصل از تصاویر به دست آمده از روش ارائه شده در این پژوهش مورد بررسی و

جدول ۱۱- مقایسه دو ابر نقاط با استفاده از خطای متوسط باز تصویرسازی برای تصاویر

ابر نقاط حاصل از تصاویر به دست آمده	ابر نقاط حاصل از کل تصاویر	
مدت زمان تشکیل ابر نقاط پراکنده	۷ ساعت و ۳۸ دقیقه	۱ ساعت و ۲۰ دقیقه
تعداد و درصد تصاویر که خطای متوسط باز تصویرسازی بالای ۲ دارند.	۲۰۷ تصویر (۳٪/۲۵)	۴۳ تصویر (۴٪/۰۲)
تعداد و درصد تصاویری که خطای متوسط باز تصویرسازی بین ۱/۵ تا ۲ دارند.	۲۶۸۱ تصویر (۴۲٪/۱۴)	۳۶۰ تصویر (۳۳٪/۶۴)
تعداد و درصد تصاویری که خطای متوسط باز تصویرسازی بین ۱ تا ۱/۵ دارند.	۳۴۲۲ تصویر (۵۳٪/۷۹)	۶۴۹ تصویر (۶۰٪/۶۵)
تعداد و درصد تصاویری که خطای متوسط باز تصویرسازی کمتر از ۱ دارند.	۵۲ تصویر (۰٪/۸۲)	۱۸ تصویر (۱٪/۶۹)

جدول ۱۲- مقایسه دو ابر نقاط با استفاده از خطای متوسط باز تصویرسازی برای نقاط

ابر نقاط حاصل از تصاویر روش ارائه شده		ابر نقاط حاصل از کل تصاویر		
درصد نقاط	تعداد نقاط	درصد نقاط	تعداد نقاط	خطای باز تصویرسازی (پیکسل)
۸/۷۳	۱۷۹۸۹۴	۰	۰	بالای ۰/۶
۶/۱۵	۱۲۶۶۳۴	۴/۲۸	۲۱۵۹۴۰	بین ۰/۵ تا ۰/۶
۹/۲۸	۱۹۱۳۳۹	۶/۲۸	۳۱۶۳۵۳	بین ۰/۴ تا ۰/۵
۱۰/۸۱	۲۲۲۸۳۰	۸/۵۷	۴۳۲۱۹۲	بین ۰/۳ تا ۰/۴
۱۶/۰۶	۳۳۰۹۱۲	۱۴/۱۹	۷۱۵۱۴۲	بین ۰/۲ تا ۰/۳
۲۱/۸۶	۴۵۰۳۷۱	۲۴/۲۵	۱۲۲۲۶۵۷	بین ۰/۱ تا ۰/۲
۲۷/۱۱	۵۵۸۷۶۷	۴۲/۴۳	۲۱۳۲۸۶۵۹	بین ۰/۱ تا ۰

برای پردازش و تشکیل ابر نقاط متراکم را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. از طرف دیگر میزان خطای متوسط باز

با توجه به جدول (۱۱)، مشاهده می‌شود که استفاده از روش ارائه شده، می‌تواند با حذف تصاویر اضافی، زمان لازم

تصویرسازی در تصاویر، پراکندگی نسبتاً یکسانی دارند. به عبارت بهتر، حذف تصاویر اضافی تغییری در میزان پراکندگی این خطا بر روی تصاویر مورد استفاده برای تولید ابر نقاط ایجاد نکرده است. همان طور که می‌دانیم خطای متوسط باز تصویرسازی در تصاویر، مربوط به خطای تناظریایی بر روی نقاط گرهی که در آن تصویر مشخص شده، می‌باشد، بنابراین زمانی که فریم‌های کلیدی انتخاب می‌شوند، در واقع، باز بین تصاویر بیشتر می‌شود و تصاویر اضافی ما بین فریم‌های کلیدی، حذف می‌شوند. با این کار، بار محاسباتی تناظریایی کم می‌شود ولی عملاً چون تصاویر، چکیده همان تصاویر قبلی است در خطای متوسط باز تصویرسازی تغییر زیادی حاصل نمی‌شود و این مورد منطقی به نظر می‌رسد.

برای بررسی و مقایسه بیشتر این دو ابر نقاط با کمک روش‌های پالایش ابر نقاط، از سه معیار باز تصویرسازی در تک تک نقاط، معیار تعداد تصاویر و معیار عدم قطعیت بازسازی استفاده شد، که هرکدام از این معیارها در ادامه توضیح داده خواهد شد.

ابر نقاط پراکنده تولید شده از کل تصاویر دارای ۵۰۴۰۹۴۲ نقطه و تعداد نقاط ابر نقاط تولید شده از تصاویر

حاصل از روش ارائه شده، ۲۰۶۰۷۴۷ نقطه می‌باشد. در جدول (۱۲) میزان خطای باز تصویرسازی در نقاط مختلف ابر نقاط، جمع‌آوری شده است.

در جدول (۱۲) مشاهده می‌شود که با حذف تصاویر اضافی، درصد نقاط با خطای باز تصویرسازی متفاوت، تغییر کرده است، اما این تغییر در همان محدوده مجاز می‌باشد و فقط ۸ درصد نقاط، خطای باز تصویرسازی بالای ۰/۶ دارند که حذف این مقدار نقطه، در روند پالایش ابر نقاط، خللی در تولید ابر نقاط ایجاد نخواهد کرد.

معیار بعدی معیار تعداد تصاویر می‌باشد، بر اساس این معیار مشخص می‌شود که هر نقطه در چند تصویر قابل مشاهده بوده است. بر اساس این معیار، ابر نقاط حاصل از کل تصاویر، دارای نقاطی می‌باشد که در دو تصویر، تا ۲۲۵ تصویر قابل مشاهده می‌باشند، همچنین در ابر نقاط حاصل از تصاویر روش ارائه شده، نقاط در ۲ تا ۳۹ تصویر قابل مشاهده می‌باشند.

همان طور که در جدول ۱۳ مشاهده می‌شود حدود ۵۸ درصد نقاط در ابر نقاط حاصل از کل تصاویر و ۶۴ درصد نقاط در ابر نقاط حاصل از تصاویر روش ارائه شده، حداکثر در دو تصویر قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۱۳- مقایسه دو ابر نقاط با استفاده از معیار تعداد تصاویر^۱

تعداد تصاویر	ابر نقاط حاصل از کل تصاویر		ابر نقاط حاصل از تصاویر روش ارائه شده	
	تعداد نقاط	درصد نقاط	تعداد نقاط	درصد نقاط
دو تصویر	۲۸۹۶۶۹۳	۵۷/۴۶	۱۳۲۷۳۳۲	۶۴/۴۱
سه تصویر	۹۸۳۹۹۴	۱۹/۵۲	۳۲۲۸۳۳	۱۵/۶۷
چهار تصویر	۴۱۶۴۷۶	۸/۲۶	۱۲۶۷۵۱	۶/۱۵
بیش از چهار تصویر	۷۴۳۷۷۹	۱۴/۷۶	۲۸۳۸۳۱	۱۳/۷۷

جدول ۱۴- مقایسه دو ابر نقاط با استفاده از معیار عدم قطعیت بازسازی^۲

عدم قطعیت بازسازی	ابر نقاط حاصل از کل تصاویر		ابر نقاط حاصل از تصاویر روش ارائه شده	
	تعداد نقاط	درصد نقاط	تعداد نقاط	درصد نقاط
بیش از ۲۰۰	۸۴۳۶۷	۱/۶۷	۴۱۸۹	۰/۲۰
از ۱۰۰ تا ۲۰۰	۱۳۵۵۹۹۹	۲۶/۹۰	۸۳۰۱	۰/۴۰
از ۵۰ تا ۱۰۰	۱۷۶۶۵۹۲	۳۵/۰۵	۲۷۱۶۴	۱/۳۲
از ۲۵ تا ۵۰	۳۸۱۱۷۴	۷/۵۶	۸۰۵۲۸	۳/۹۱
از ۱۰ تا ۲۵	۴۴۰۴۵۵	۸/۷۴	۹۸۳۲۸۷	۴۷/۷۲
از ۰ تا ۱۰	۱۰۱۲۳۵۵	۲۰/۰۸	۹۵۷۲۷۸	۴۶/۴۵

۱ Image Count

۲ Reconstrucion Uncertainty

این نقاط مربوط به لبه‌های مدل می‌باشند، یا نقاطی هستند که الگوریتم تناظر یابی سیفت، یک متناظر برای آن‌ها پیدا کرده است ولی این نقاط حداقل در یک تصویر سوم تأیید نشده‌اند. بنابراین، این نقاط به احتمال زیاد، جز نقاط اشتباه تناظر یابی سیفت می‌باشند. مشاهده می‌شود که با حذف تصاویر اضافه، میزان نقاط اشتباه ۸ درصد افزایش یافته، که به دلیل کمتر شدن تعداد تصاویر می‌باشد و این امر اجتناب‌ناپذیر است. معیار بعدی، معیار عدم قطعیت بازسازی می‌باشد، به‌عنوان مثال برای یک نقطه به نام A با استفاده از تصاویر ۱ و ۲، یک مختصات برای نقطه A به دست می‌آید، برای همین نقطه با تصاویر ۱ و ۳ نیز یک مختصات دیگر برای نقطه A حاصل می‌شود و به همین ترتیب با جفت تصاویر مختلف مختصات‌هایی برای نقطه A به دست می‌آید. انتظار می‌رود که مختصات به دست آمده برای نقطه A با تصاویر مختلف، به هم نزدیک باشند، معیار عدم قطعیت بازسازی میزان نزدیکی این مختصات‌های به دست آمده را با اختصاص دادن یک عدد مشخص می‌کند، هرچقدر این عدد کوچک‌تر باشد نشان می‌دهد که این مختصات‌ها به هم نزدیک‌تر می‌باشند. در جدول (۱۴) این معیار برای نقاط مختلف مشخص شده است.

با توجه به جدول (۱۴)، مشاهده می‌شود که عدم قطعیت، در نقاط مدل حاصل از روش ارائه شده، به شدت کاهش یافته است و نقاط حاصل از تصاویر روش ارائه شده، قابلیت اطمینان بیشتری دارند. در توجیه این نتیجه می‌توان بیان کرد که، با توجه به اینکه در ابر نقاط حاصل از کل تصاویر، تصاویر بسیار زیاد با فاصله مراکز تصویربرداری بسیار کوتاه و نزدیک، باعث می‌شود که عمل تقاطع بین تصاویر، با خطای بیشتری رخ دهد و با توجه به روش ارائه شده و رعایت فاصله مراکز تصویربرداری و پوشش مناسب این مسئله حل شده و قطعیت نقاط حاصل بالا رفته است. پس از تولید محصولات فتوگرامتری نوبت به اندازه‌گیری ترک‌های به دست آمده می‌رسد. بر روی سه ترک به دست آمده، دو طول و سه عرض برای هر ترک اندازه‌گیری شده است، از طرف دیگر، این طول‌ها و عرض‌ها نیز با استفاده از دوربین توتال استیشن و متر، نیز اندازه‌گیری شده است که میانگین طول و عرض‌های اندازه‌گیری شده با هر دو وسیله اندازه‌گیری، یعنی متر و دوربین به‌عنوان مقادیر واقعی در نظر گرفته شده است و این مقادیر با اندازه‌گیری‌های حاصل از روش ارائه شده، مورد مقایسه قرار گرفت و میزان خطا، برای هر کدام از اندازه‌گیری‌ها در جدول (۱۵) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱۵- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده بر روی تصاویر با مقادیر واقعی

شماره ترک	طول ترک‌ها	مقدار اندازه‌گیری شده (mm)	مقدار واقعی (mm)	خطا (mm)
ترک شماره یک	طول قسمتی از ترک	۷۰۰	۶۹۳	۷
	طول کل ترک	۲۸۹۰	۲۸۷۹	۱۱
	عرض ۱	۱۲/۱۶	۱۲	-۰/۱۶
	عرض ۲	۴/۱۵	۴/۵	-۰/۳۵
	عرض ۳	۳/۱	۳	-۰/۱۰
ترک شماره دو	طول قسمتی از ترک	۶۳۸	۶۳۳	۵
	طول کل ترک	۲۲۹۰	۲۲۸۱	۹
	عرض ۱	۲۳/۷	۲۳	-۰/۷
	عرض ۲	۲۷/۷	۲۶/۵	۱/۲
	عرض ۳	۷/۴۹	۸	-۰/۵۱
ترک شماره سه	طول قسمتی از ترک	۴۵۹	۴۵۵	۴
	طول کل ترک	۱۶۰۰	۱۵۹۳	۷
	عرض ۱	۷/۱۶	۷/۵	-۰/۳۴
	عرض ۲	۵/۶۶	۶	-۰/۳۴
	عرض ۳	۳/۴۱	۴	-۰/۵۹

یکی از مواردی که باعث کاهش دقت مدل شبکه عصبی می‌شود، تصاویر دارای نویز و با کیفیت پایین است، که به دلیل اینکه فریم‌ها از ویدیو استخراج شده است، ممکن است بعضی از تصاویر دارای کیفیت مناسبی نباشند، که در مرحله پیش‌پردازش و قبل از ورود به شبکه این مسئله، با بهبود کیفیت تصاویر حل می‌شود. یکی دیگر از چالش‌های موجود ترک‌هایی هستند که عمیق نبوده و مربوط به لایه پوششی دیواره‌های پل می‌باشد که این ترک‌ها خطر جدی برای سازه محسوب نمی‌شوند و مدل قادر به تفکیک این ترک‌ها نمی‌باشد. این مدل قابلیت اجرا بر روی دیواره اکثر سازه‌های بتنی با شرط وجود نور کافی برای تصویربرداری را دارا است، البته این مدل در تونل‌ها به دلیل وجود گرد و غبار و عدم نور کافی کارایی ندارد، همچنین این مدل تنها قادر به شناسایی ترک‌ها می‌باشد و برای شناسایی انواع دیگر آسیب‌ها، از جمله خوردگی بتن و قلوه‌کن شدن بتن کار آبی ندارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش هدف، ارائه روشی غیر تماسی برای اندازه‌گیری ترک‌های دیواره پل‌ها بود که مشکلات روش‌های تماسی و اندازه‌گیری سنتی را نداشته باشد. روشی که در این مقاله ارائه شد نسبت به روش‌های دیگر اندازه‌گیری با استفاده از تصویر قابلیت شناسایی تعداد بیش از یک ترک در مدل و همچنین توانایی به دست آوردن موقعیت ترک‌ها، نسبت به هم را دارا هست. در این روش پس از اخذ ویدیو، پردازش‌های لازم بر روی ویدیو انجام می‌شود و سپس بر اساس پوشش مورد نیاز، نرخ فریم مورد نیاز برای استخراج فریم‌های کلیدی مشخص می‌شود و فریم‌های کلیدی بر این اساس انتخاب می‌شوند، در فرایند شناسایی فریم‌های کلیدی علاوه بر کاهش حجم داده‌ها و حفظ پوشش، در مرحله بعد فریم‌های حاوی

مراجع

ترک شناسایی می‌شوند. در این مرحله دو معماری معروف reznet 18 و vgg16 برای شناسایی تصاویر حاوی ترک مورد استفاده قرار گرفت و پس آموزش دو مدل جهت شناسایی تصاویر حاوی ترک، تصاویر مشترک به هر دو مدل داده شد و با استفاده از درایه‌های ماتریس درهم‌ریختگی یا ماتریس ابهام کار آبی این دو مدل مورد مقایسه قرار گرفت که مشخص شد دقت reznet 18 در حدود ۳/۵ درصد بیشتر بود. در ادامه ابر نقاط پراکنده با استفاده از فریم‌های استخراج‌شده، تولید شد و پس از آن فریم‌های مربوط به هر ترک خوشه‌بندی شد و تصویر قائم هر ترک به صورت جداگانه تولید شد و در نهایت ترک‌های شناسایی شده اندازه‌گیری شد و با مقادیر واقعی مقایسه گردید و مشخص شد که بیشترین خطای اندازه‌گیری، مربوط به عرض ترک ۱/۲ میلی‌متر و طول ترک ۱۱ میلی‌متر می‌باشد. با استفاده از روش ارائه شده می‌توان به صورت غیر تماسی بانک اطلاعات جامعی از دیواره پل‌ها، همراه با مشخصات تمامی ترک‌های موجود بر دیواره پل‌ها برای بررسی توسط متخصصان این امر ارائه نمود. در این پژوهش مشخص شد عمده خطای موجود در اندازه‌گیری ترک‌ها مربوط به حاشیه مدل می‌باشد که برای افزایش دقت در این مناطق باید رن‌های تصویربرداری را افزایش داد. همچنین مدل ارائه شده دارا این چالش است که ترک‌های سطحی را از ترک‌های عمیق تشخیص نمی‌دهد زیرا توانایی شناسایی عمق را ندارد. همچنین در این روش مساحت ترک‌ها قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد و باید توجه نمود که به دست آوردن مساحت ترک، نیاز به قطع‌بندی تصویر و جدا نمودن ترک از پس‌زمینه دارد. در کارهای آتی پیشنهاد می‌شود که در ادامه کارهای انجام‌شده تصاویر ترک از پس‌زمینه با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق جدا شود تا بتوان اندازه‌گیری‌های موردنظر از جمله مساحت ترک را انجام داد.

- [۱] De Belie, N. and E. Gruyaert. *HEALCON: Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures*. in *HEALCON-Conference-Self-Healing Concrete for Prolonged Lifetime*. 2016.
- [۲] Clinic, I.C, *Reinforcement corrosion mechanism*. 2016: p. <https://clinicbeton.com/Page/4214/Mechanism-and-causes-of-corrosion-of-reinforcement-in-concrete>.
- [۳] Silva, W.R.L.d. and D.S.d. Lucena. *Concrete cracks detection based on deep learning image classification*. in *Multidisciplinary digital publishing institute proceedings*. 2018.

- [۴] Jumaat, M.Z, M. Kabir, and M. Obaydullah, *A review of the repair of reinforced concrete beams*. Journal of Applied Science Research, 2006. **2**(6): p. 317-326.
- [۵] Arya, C. and L. Wood, *The relevance of cracking in concrete to corrosion of reinforcement*. 1995: Concrete Society.
- [۶] Li, S. and X. Zhao, *Image-based concrete crack detection using convolutional neural network and exhaustive search technique*. Advances in Civil Engineering, 2019. **2019**.
- [۷] Zollini, S, et al, *UAV Photogrammetry for Concrete Bridge Inspection Using Object-Based Image Analysis (OBIA)*. Remote Sensing, 2020. **12**(19): p. 3180.
- [۸] Zhang, L, et al. *Road crack detection using deep convolutional neural network*. in *2016 IEEE international conference on image processing (ICIP)*. 2016. IEEE.
- [۹] Fujita, Y. and Y. Hamamoto, *A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces*. Machine Vision and Applications, 2011. **22**(2): p. 245-254.
- [۱۰] Merazi-Meksen, T, M. Boudraa, and B. Boudraa, *Mathematical morphology for TOFD image analysis and automatic crack detection*. Ultrasonics, 2014. **54**(6): p. 1642-1648.
- [۱۱] Broberg, P, *Surface crack detection in welds using thermography*. Ndt & E International, 2013. **57**: p. 69-73.
- [۱۲] Abdel-Qader, I, O. Abudayyeh, and M.E. Kelly, *Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges*. Journal of Computing in Civil Engineering, 2003. **17**(4): p. 255-263.
- [۱۳] Gehri, N, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, *Automated crack detection and measurement based on digital image correlation*. Construction and Building Materials, 2020. **256**: p. 119383.
- [۱۴] Adhikari, R., O. Moselhi, and A. Bagchi, *Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection*. Automation in construction, 2014. **39**: p. 180-194.
- [۱۵] Cord ,A. and S. Chambon, *Automatic road defect detection by textural pattern recognition based on AdaBoost*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012. **27**(4): p. 244-259.
- [۱۶] Delagnes, P. and D. Barba. *A Markov random field for rectilinear structure extraction in pavement distress image analysis*. in *Proceedings., International Conference on Image Processing*. 1995. IEEE.
- [۱۷] Shi, Y., et al., *Automatic road crack detection using random structured forests*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016. **17**(12): p. 3434-3445.
- [۱۸] Wang, X. and Y. Zhang. *The detection and recognition of bridges' cracks based on deep belief network*. in *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*. 2017. IEEE.
- [۱۹] Aversa, R., et al., *Deep learning, feature learning, and clustering analysis for sem image classification*. Data Intelligence, 2020. **2**(4): p. 513-528.
- [۲۰] Arel, I., D.C. Rose, and T.P. Karnowski, *Deep machine learning-a new frontier in artificial intelligence research [research frontier]*. IEEE computational intelligence magazine, 2010. **5**(4): p. 13-18.
- [۲۱] Szegedy, C., et al. *Going deeper with convolutions*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2015.
- [۲۲] Li, S. and X. Zhao. *Convolutional neural networks-based crack detection for real concrete surface*. in *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018*. SPIE.
- [۲۳] Pauly, L., et al. *Deeper networks for pavement crack detection*. in *Proceedings of the 34th ISARC*. 2017. IAARC.
- [۲۴] Tran, T.S., et al., *Advanced crack detection and segmentation on bridge decks using deep learning*. Construction and Building Materials, 2023. **400**: p. 132839.
- [۲۵] Arafin, P., A.M. Billah, and A. Issa, *Deep learning-based concrete defects classification and detection using semantic segmentation*. Structural Health Monitoring, 2024. **23**(1): p. 383-409.
- [۲۶] Zhang, Y., J. Huang ,and F. Cai, *On bridge surface crack detection based on an improved YOLO v3 algorithm*. IFAC-PapersOnLine, 2020. **53**(2): p. 8205-8210.
- [۲۷] Ali, R., et al., *Structural crack detection using deep convolutional neural networks*. Automation in Construction, 2022 :۱۳۳ .p. 103989.

- [۲۸] Al-Ruzouq, R., et al., *Nondestructive deformation measurements and crack assessment of concrete structure using close-range photogrammetry*. Results in Engineering, 2023. **18**: p. 101058.
- [۲۹] Dabous, S.A., R. Al-Ruzouq, and D. Llorca, *Three-dimensional modeling and defect quantification of existing concrete bridges based on photogrammetry and computer aided design*. Ain Shams Engineering Journal, 2023: p. 102231.
- [۳۰] Kim, H., S.-H. Sim, and B.F. Spencer, *Automated concrete crack evaluation using stereo vision with two different focal lengths*. Automation in Construction, 2022. **135**: p. 104136.
- [۳۱] Majidi, S., M. Omidalizand, and M. Sharifi, *Intelligent 3d Crack Reconstruction Using Close Range Photogrammetry Imagery*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2023. **10**: p. 443-450.
- [۳۲] Liu, Y.F., et al., *Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020. **35**(5): p. 511-529.
- [۳۳] Hosseinaveh, A. and F. Remondino, *An imaging network design for UGV-based 3D reconstruction of buildings*. Remote Sensing, 2021. **13**(10): p. 1923.
- [۳۴] Förstner, W. and B.P. Wrobel, *Photogrammetric Computer Vision*. Springer, 2016: p. 458.
- [۳۵] Kraus, K., *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. 2011: Walter de Gruyter.
- [۳۶] Iglhaut, J., et al., *Structure from motion photogrammetry in forestry: A review*. Current Forestry Reports, 2019. **5**: p. ۱۶۸-۱۰۰ .
- [۳۷] Anwar, A. *Difference between AlexNet, VGGNet, ResNet, and Inception*. 2019; Available from: <https://towardsdatascience.com/the-w3h-of-alexnet-vggnet-resnet-and-inception-7baaecccc96>.
- [۳۸] Malik, P., *What is the difference between densenet and resnet?* 2024.
- [۳۹] Grinjero, *Why Resnet18 works better than VGG16 architecture?* 2021.
- [۴۰] Thomas Luhmann, S.R., Stephen Kyle and Jan Boehm, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter, 2014: p. 288.
- [۴۱] Agisoft, *agisoft metashape professional* .<https://www.agisoft.com/>, 2023.
- [۴۲] Ahmed, M.T., et al. *Robust Key Frame Extraction for 3D Reconstruction from Video Streams*. in VISAPP (1). 2010.