

تشخیص و تحلیل الگوهای ترک در اعضای بتنی آسیب دیده با استفاده از روش های پردازش تصویر

حسین بهشتی نژاد^۱، ملیکا محمودآبادی^۲

۱- مرکز تحقیقات فناوری بتن، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران.

hbeheshti.nezhad@iau.ir

۲- مرکز تحقیقات فناوری بتن، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران.

melika00366@gmail.com

خلاصه

توسعه ترکها در سازه های بتنی یکی از مهم ترین عوامل تخریب این سازه ها است که تأثیرات مخرب آن به ویژه در نتیجه خوردگی میلگردهای فولادی مشهود است. ترکها به عنوان اولین نشانه های آسیب، نشان دهنده کاهش پیوند میان بتن و میلگرد و شروع تخریب سازه ای هستند. گسترش تدریجی ترکها می تواند موجب کاهش قابل توجه مقاومت مکانیکی سازه و ناپایداری کلی آن شود. از این رو، بررسی دقیق روند توسعه ترکها و شناسایی الگوی ایجاد و گسترش آن ها نقشی حیاتی در پیشگیری از تخریب گسترده سازه و افزایش عمر مفید آن ایفا می کند. در این پژوهش، از فناوری پردازش تصویر به عنوان یک ابزار پیشرفته غیرمخرب برای شناسایی و تحلیل ترکها در سازه های بتنی آسیب دیده استفاده شده است. این روش امکان بررسی هندسی ترکها شامل طول، عرض، عمق و مسیر گسترش را فراهم می کند. علاوه بر این، پردازش تصویر به مهندسان امکان می دهد تا نقاط بحرانی سازه را شناسایی کرده و شدت آسیب را به دقت بررسی کنند. نتایج این تحلیل ها نه تنها برای برنامه ریزی ترمیم و نگهداری بسیار مفید است، بلکه امکان پیش بینی روند آینده توسعه ترکها و ارزیابی خطرات احتمالی تخریب را نیز فراهم می کند. استفاده از این روش با ارائه تحلیل سریع، دقیق و مقرون به صرفه، جایگزین مناسبی برای روش های سنتی ارزیابی سازه های بتنی است. این رویکرد علاوه بر شناسایی آسیب های موجود، به کاهش زمان و هزینه های ارزیابی و تعمیر سازه کمک می کند. یافته های این پژوهش نشان می دهد که تمرکز بر پایش روند توسعه ترکها و بهره گیری از فناوری های نوین مانند پردازش تصویر می تواند گامی اساسی در مدیریت آسیب های سازه های بتنی باشد و موجب ارتقای ایمنی، پایداری و طول عمر این سازه ها شود.

کلمات کلیدی: سازه های بتنی مسلح، الگوی ترک، هوش مصنوعی، پردازش تصویر، پایش غیرمخرب، تحلیل آسیب های ساختاری، مدل سازی ترک، دوام سازه های بتنی

۱. مقدمه

سازه‌های بتنی مسلح به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد نظیر استحکام بالا و دوام زیاد، نقش کلیدی در پروژه‌های عمرانی و زیرساخت‌های مهندسی ایفا می‌کنند. با این حال، یکی از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با این نوع سازه‌ها، پدیده خوردگی میلگردها است که می‌تواند بدنه اصلی سازه را تحت تأثیر قرار داده و عملکرد آن را به شدت کاهش دهد. خوردگی میلگردها، به عنوان یک فرآیند الکتروشیمیایی، زمانی آغاز می‌شود که عوامل محیطی خورنده نظیر یون‌های کلرید، دی‌اکسید کربن و رطوبت به بتن نفوذ کرده و لایه محافظ اکسیدی روی آرماتور را از بین می‌برند [1]. با آغاز این فرآیند، میلگرد دچار اکسیداسیون شده و محصولات ناشی از خوردگی حجم بیشتری نسبت به فلز اولیه دارند؛ این انبساط باعث ایجاد تنش‌های داخلی در بتن و در نهایت ترک‌های سطحی و عمقی می‌شود [2]. ایجاد ترک‌ها در سازه‌های بتنی مسلح، نگرانی‌های فراوانی ایجاد کرده است. ترک‌ها مسیری برای ورود عوامل خورنده به داخل بتن فراهم می‌کنند، که نه تنها سبب کاهش ظرفیت باربری سازه می‌شود، بلکه فرآیند تخریب را تسریع می‌کند [3]. با توسعه ترک‌ها، کاهش سطح مقطع بتن و کاهش پیوستگی میلگرد و بتن ظرفیت خمشی اعضا کاهش می‌یابد. شناسایی و تحلیل دقیق این ترک‌ها به منظور پیشگیری از تخریب بیشتر و کاهش هزینه‌های تعمیرات آینده، بسیار ضروری است. روش‌های سنتی ارزیابی ترک‌ها شامل بررسی‌های چشمی، آزمایش‌های مخرب و نیمه‌مخرب بوده که معمولاً محدودیت‌هایی مانند زمان‌بر بودن، هزینه بالا و دشواری در پایش مداوم دارند [4]. روش‌های نوین با استفاده از فناوری پردازش تصویر به عنوان ابزاری غیرمخرب برای شناسایی و تحلیل ترک‌ها در سازه‌های بتنی معرفی شده‌اند. پردازش تصویر، با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته‌ای نظیر بینایی کامپیوتری، امکان استخراج ویژگی‌های دقیق ترک‌ها مثل طول، عرض، عمق، جهت گسترش و روند رشد را فراهم می‌کند [5]. این فناوری نسبت به روش‌های سنتی، مقیاس‌پذیرتر، مقرون‌به‌صرفه‌تر و قابل اجرا به صورت مداوم است [6]. علاوه بر شناسایی ترک‌ها، ترکیب پردازش تصویر با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین تحولی اساسی در این حوزه ایجاد کرده است. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق نه تنها امکان شناسایی ترک‌ها با دقت بالا را فراهم می‌آورد، بلکه می‌تواند روند پیشرفت ترک‌ها را مدل‌سازی کرده و تأثیر آن‌ها بر پایداری کلی سازه را پیش‌بینی کند [7]. این رویکرد ترکیبی یک ابزار قدرتمند مدیریتی برای مهندسان سازه و مدیران پروژه فراهم می‌آورد که از آن برای بهینه‌سازی برنامه‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه استفاده کنند [8]. پیشرفت‌های اخیر در زمینه پردازش تصویر و الگوریتم‌های یادگیری عمیق، امکان بهره‌برداری از سیستم‌های خودکار برای تحلیل ترک‌های ناشی از خوردگی و اعمال بار را فراهم کرده‌اند. این سیستم‌ها از داده‌های ثبت‌شده توسط پهپادها، دوربین‌های صنعتی، و حسگرهای تصویربرداری برای تحلیل وضعیت سازه استفاده می‌کنند. نرم‌افزارهای مدرن، با بهره‌گیری از قابلیت‌های «یادگیری خودتقویتی»، می‌توانند با دریافت اطلاعات بیشتر، دقت ارزیابی خود را بهبود دهند و حتی امکان پیش‌بینی روند تخریب در آینده را نیز فراهم کنند [9]. این پیشرفت‌ها در سال‌های اخیر تأثیر مهمی بر کارایی و توسعه کاربردهای پردازش تصویر در حوزه مهندسی عمران داشته‌اند [10]. در سال‌های اخیر، تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند پردازش تصویر و مدل‌سازی دیجیتال ابزارهایی قوی برای مطالعه و تحلیل توسعه ترک‌ها فراهم کرده‌اند. این روش‌ها، به‌ویژه در سازه‌های تحت خوردگی میلگرد، امکان شناسایی ترک‌های کوچک

و اندازه‌گیری دقیق رشد آن‌ها در طول زمان را مهیا می‌کنند [11]. پردازش تصویر با استفاده از تکنیک‌هایی مثل بینایی کامپیوتری و تحلیل پیکسل به پیکسل، اطلاعات دقیق‌تری از ویژگی ترک‌ها، شامل اندازه، جهت و میزان رشد در گذر زمان، ارائه می‌دهد [12]. ترکیب پردازش تصویر با الگوریتم‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری عمیق، امکان پیش‌بینی رشد ترک‌ها بر اساس داده‌های تاریخی و الگوهای از پیش تعریف‌شده را فراهم می‌کند. این مدل‌ها می‌توانند روند توسعه ترک‌ها را شبیه‌سازی کرده و نقاط بحرانی پیش‌روی ترک را شناسایی کنند. به عنوان مثال، Liu et al. (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای نشان دادند که روش‌های یادگیری عمیق قادر به تشخیص ترک‌ها با دقتی بیش از ۹۰٪ بوده و می‌توانند تغییرات کوچک در گسترش ترک‌ها را ثبت کنند [13]. علاوه بر این، حسگرهای تصویربرداری و تحلیل داده‌ها با استفاده از پهپادها یا دوربین‌های ثابت امکان پایش مداوم را فراهم می‌کنند. این فناوری‌ها به‌طور خاص در پایش ترک‌های ناشی از خوردگی و بارگذاری، فضای جدیدی در مدیریت سازه‌های بتنی ایجاد کرده‌اند [14]. این موضوع نشان می‌دهد که پردازش تصویر علاوه بر دقت بالا، قابلیت ارائه اطلاعات گسترده‌تری از سطح سازه را داراست. به‌ویژه در سازه‌های بزرگ‌تر یا پیچیده که نیاز به نظارت بر الگوهای توسعه‌ی ترک‌ها در طولانی‌مدت وجود دارد، این روش می‌تواند به عنوان ابزاری کلیدی در پایش ترک‌ها و شبیه‌سازی نقاط بحرانی عمل کند. استفاده از فناوری‌های مکمل، مانند پهپادها و دوربین‌های ثابت برای ثبت تصاویر و ترکیب آن‌ها با الگوریتم‌های یادگیری عمیق، امکان تحلیل دقیق‌تری از تغییرات کوچک در گسترش ترک‌ها فراهم می‌کند. این قابلیت‌ها نه تنها دقت و کارایی در ارزیابی خرابی‌های سازه‌ای را افزایش می‌دهد، بلکه به مهندسان اجازه می‌دهد تا تصمیمات بهتری درباره تعمیر و نگهداری سازه‌ها اتخاذ کنند و از هزینه‌های مازاد جلوگیری شود. در نهایت، پردازش تصویر به عنوان یک روش نوین و قابل اعتماد می‌تواند افق‌های جدیدی را در مدیریت سازه‌های بتنی و ارزیابی سلامت آن‌ها ایجاد کند [15].

۲. روش تحقیق

سازه‌های بتنی به عنوان یکی از اجزای اساسی در صنعت ساخت‌وساز، به دلیل دوام بالا، مقاومت در برابر بارهای سنگین، و هزینه مناسب، به‌طور گسترده در پروژه‌های عمرانی و زیرساختی به کار می‌روند. با این حال، دوام و طول عمر این سازه‌ها به عوامل متعددی وابسته است که یکی از مهم‌ترین تهدیدها، خوردگی میلگردهای فولادی درون بتن است. خوردگی میلگردها، فرآیندی الکتروشیمیایی است که در حضور رطوبت، اکسیژن و یون‌های مخرب نظیر کلریدها رخ می‌دهد. این فرآیند به تدریج باعث کاهش سطح مقطع میلگردها و تشکیل ترک‌ها در بتن می‌شود که در نهایت ممکن است منجر به تخریب سازه گردد.

عدم بررسی و تشخیص به‌موقع این ترک‌ها، می‌تواند باعث شکست سازه و خطرات جانی و مالی شود. از این رو، نظارت، شناسایی و تحلیل ترک‌ها در سازه‌های بتنی، بخشی حیاتی از فرآیند نگهداری و مدیریت ریسک در زیرساخت‌ها محسوب می‌شود.

در این میان، فناوری پردازش تصویر به عنوان یکی از ابزارهای مدرن و غیرمخرب، توانسته است راه‌حل‌های نوینی برای شناسایی ترک‌ها و تحلیل آسیب‌های سازه‌ای ارائه دهد. پردازش تصویر شامل استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی و بینایی کامپیوتر است که قابلیت شناسایی خودکار ترک‌ها و پیش‌بینی الگوی گسترش ترک‌ها را فراهم می‌کند. این روش‌ها نه تنها کارایی بالاتری نسبت به روش‌های سنتی بازرسی (مانند بررسی چشمی یا آزمایش‌های مخرب) دارند، بلکه دقت بیشتری در تشخیص ترک‌های غیرقابل مشاهده ارائه می‌دهند. کاربرد یادگیری ماشین در پردازش تصویر تحولی چشمگیر ایجاد کرده است. با استفاده از این فناوری‌ها، می‌توان فرآیندی دقیق، سریع و مقرون‌به‌صرفه برای ارزیابی وضعیت سازه‌های بتنی ارائه داد. برای تحلیل رفتار سازه‌های بتنی تحت بارگذاری، از داده‌های حاصل از پژوهش انجام شده توسط بهشتی نژاد در سال ۱۳۹۷ استفاده شده است [16]. در این پژوهش جهت ساخت نمونه‌های بتن در هر متر مکعب بتن، از ۴۰۰ کیلوگرم سیمان، ۱۸۰ کیلوگرم آب، ۹۴۳ کیلوگرم ریزدانه و ۶۹۵ کیلوگرم درشت‌دانه استفاده شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاصل از این طرح برابر با ۳۷۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است. جهت بررسی رفتار تیرهای بتنی تحت بارگذاری و ارزیابی مکانیزم شکست آن‌ها، آزمایش شکست تیرها مطابق با استاندارد ASTM C1609 انجام شده است. این استاندارد یکی از معتبرترین دستورالعمل‌ها برای ارزیابی عملکرد مکانیکی تیرهای بتنی تقویت‌شده و غیرتقویت‌شده تحت بارگذاری خمشی است و شرایط دقیق و کنترل‌شده‌ای را برای انجام آزمایش‌های مکانیکی فراهم می‌کند. در این آزمایش، پارامترهایی از جمله میزان بار اعمال‌شده، تغییرشکل‌ها، مقاومت خمشی و نوع شکست تیرها مورد سنجش و تحلیل قرار گرفتند. تصویر شماره ۱ نمایی از فرآیند آزمایش نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهد که در این فرآیند، نمونه‌ها تحت تأثیر بارگذاری یکنواخت قرار گرفته و رفتار ترک‌خوردگی، نحوه گسترش ترک‌ها و مشخصه‌های مکانیکی آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این آزمایش‌ها با هدف شناسایی نقاط ضعف سازه‌ای، بررسی چگونگی شکست نمونه‌ها و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد تیرهای بتنی در شرایط واقعی انجام شده‌اند.



شکل ۱- بارگذاری چهار نقطه ای تیرها [16]

در آزمایش‌های تجربی انجام‌شده بر روی تیرهای بتنی تقویت‌شده، ارزیابی الگوی ترک‌ها و تحلیل مکانیزم شکست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این فرآیند نقش کلیدی در فهم رفتار سازه‌ای تیرها تحت شرایط مختلف بارگذاری ایفا می‌کند. شناسایی و بررسی دقیق ترک‌ها، نه تنها اطلاعات جامعی در مورد نحوه توزیع تنش و کرنش در سازه ارائه می‌دهد، بلکه امکان ارزیابی ظرفیت باربری و پیش‌بینی رفتار شکست تیرها را نیز فراهم می‌سازد. علاوه بر تحلیل‌های کلاسیک که بر اساس معیارهای مکانیکی و سازه‌ای صورت می‌گیرد، در این پژوهش از روش‌های نوین مبتنی بر پردازش تصویر بهره گرفته شده است.

این روش‌ها امکان شناسایی دقیق ترک‌ها، تعیین نوع و الگوی شکست و ارزیابی ویژگی‌های ترک‌ها، همچون عرض، عمق و مسیر پیشروی آن‌ها را با دقت بالا فراهم می‌کنند و به درک بهتر مکانیزم شکست در سازه‌های بتنی تحت بارگذاری کمک می‌کنند.

در ادامه، فرآیند جمع‌آوری داده‌ها و پیش‌پردازش تصاویر به منظور آماده‌سازی آن‌ها برای تحلیل دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جمع‌آوری داده‌ها و ثبت تصاویر ترک

تصاویر ترک‌ها در مراحل مختلف آزمایش با استفاده از دوربین دیجیتال ثبت شدند. این تصاویر شامل ترک‌های خمشی، برشی و فشاری بوده که در تیرهای تحت بارگذاری ایجاد شده‌اند. تصاویر اولیه به‌طور مستقیم قابل استفاده نیستند و نیاز به پیش‌پردازش دارند.

پیش‌پردازش تصویر

برای آماده‌سازی تصاویر جهت تحلیل دقیق‌تر، مراحل زیر برابر روش انجام شده در پژوهش [17] صورت پذیرفت:

کاهش مؤلفه‌های رنگی تصویر:

به منظور بهینه‌سازی فرآیند شناسایی ترک‌ها، تصاویر رنگی با کاهش مؤلفه‌های رنگی به فضای شدت روشنایی تبدیل شدند. این رویکرد با حذف اطلاعات غیرضروری، موجب تمرکز بیشتر بر ویژگی‌های ساختاری مرتبط با ترک‌ها شده و ضمن کاهش پیچیدگی داده‌ها، دقت و سرعت پردازش تصاویر را به میزان قابل توجهی ارتقا داده است. تغییر اندازه:

تصاویر به اندازه استاندارد تغییر داده شدند تا حذف داده‌های غیرضروری و افزایش کیفیت پردازش انجام شود.

تشخیص لبه به روش Canny :

این مرحله برای شناسایی مرز ترک‌ها و تفکیک اطلاعات پس‌زمینه از جزئیات اصلی تصویر انجام شد. در این فرآیند، نویز موجود در تصویر کاهش داده شده و ترک‌ها به‌صورت دقیق شناسایی می‌شوند.

تحلیل الگوهای شکست ترک با استفاده از یادگیری ماشین

پس از آماده‌سازی تصاویر، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل و شناسایی ترک‌ها استفاده شد. فرآیند تحلیل به دو مرحله تقسیم شد:

آموزش مدل‌ها: در این مرحله، داده‌های تصاویر ترک به الگوریتم‌های یادگیری ماشین داده شد تا مدل‌ها برای شناسایی ترک‌های جدید آموزش ببینند.

آزمایش و طبقه‌بندی: پس از آموزش مدل‌ها، تصاویر آزمایشی مورد تحلیل قرار گرفتند تا نوع ترک‌ها (خمشی، برشی یا فشاری) و مکانیزم شکست شناسایی شود.

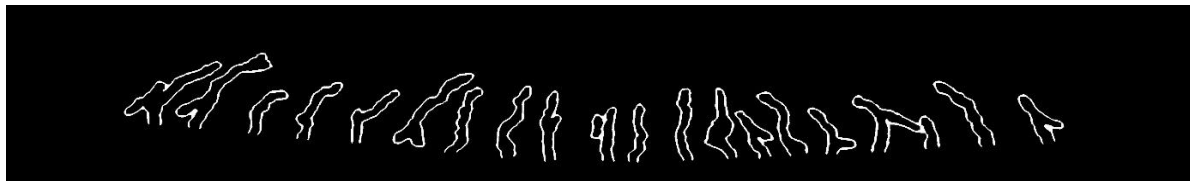
در ادامه فرآیند آزمایشگاهی و تحلیل ترک‌ها، از روش‌های پردازش تصویر برای بررسی دقیق‌تر الگوهای شکست استفاده شد. تصاویر زیر روند شکل‌گیری و پردازش الگوهای ترک در هر تیر به صورت جداگانه را دقیق‌تر نشان می‌دهند:

تصویر اول نمایی از یک تیر بتنی ترک‌خورده را نشان می‌دهد که در آن ترک‌های سطحی با خطوط رنگی مشخص شده‌اند. این ترک‌ها به‌طور مستقیم ناشی از فرآیند خوردگی میلگرد و کاهش پیوستگی بین بتن و میلگرد است. بررسی این ترک‌ها اولین قدم در تحلیل وضعیت سازه و تعیین شدت خوردگی میلگردها محسوب می‌شود.

تصویر دوم به صورت شماتیکی توزیع ترک‌ها را در طول تیر بتن نمایش می‌دهد. این دیاگرام محل‌های دقیق ترک‌ها و روند رشد آن‌ها را مشخص می‌کند، به‌ویژه مناطقی که دچار آسیب‌دیدگی بیشتر شده‌اند. مشاهده این دیاگرام امکان شناسایی نقاط ضعف سازه و مناطق بحرانی را فراهم می‌سازد.

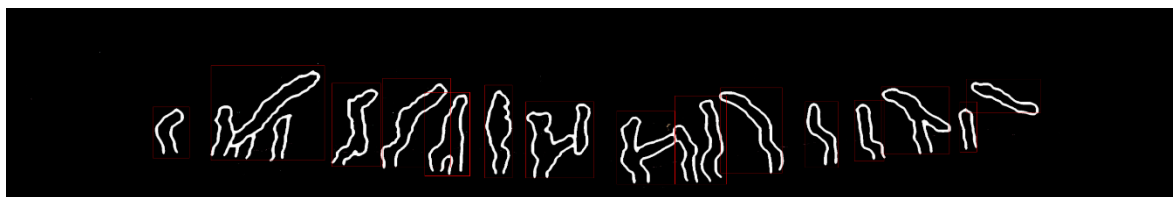
تصاویر سوم و چهارم نمونه‌ای از خروجی‌های پردازش تصویر برای شناسایی ترک‌ها هستند. در تصویر سوم، الگوریتم‌های پردازش تصویر ترک‌های سطحی را به صورت خطوط سفید شناسایی کرده‌اند که محل دقیق آن‌ها قابل مشاهده است. تصویر چهارم نیز با استفاده از مرزبندی رنگی، هندسه دقیق ترک‌ها شامل طول، عرض و مسیر گسترش را نمایش می‌دهد. این اطلاعات به مهندسان کمک می‌کند تا تحلیل کاملی از شرایط سازه انجام داده و اقدامات لازم برای ترمیم را برنامه‌ریزی کنند.

این مراحل به‌طور منظم و دقیق، فرآیند بررسی ترک‌ها را ساده‌تر و موثرتر کرده و امکان مدیریت آسیب‌ها و افزایش طول عمر سازه‌های بتنی فراهم می‌کند. در ادامه، تصاویر ۲ تا ۷ از تیرهای بتنی آسیب‌دیده و مراحل تحلیل آن ارائه می‌شود:



شکل ۲_ الگوهای ارزیابی تیر s2c1



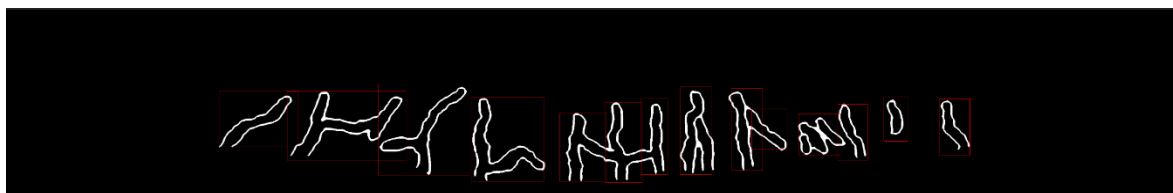


شکل ۳_ الگوهای ارزیابی تیر s2c2



شکل ۴_ الگوهای ارزیابی تیر s2c3





شکل ۵_ الگوهای ارزیابی تیر s2c4



شکل ۶_ الگوهای ارزیابی تیر s2c5





شکل ۷- الگوهای ارزیابی تیر s2c7

بحث و یافته‌ها:

۱. تأثیر خوردگی میلگردها بر سازه‌های بتنی:
خوردگی میلگردها به کاهش اتصال میان بتن و فولاد منجر شده و ترک‌هایی را در سازه ایجاد می‌کند که مقاومت مکانیکی کل سازه را به شدت کاهش می‌دهد.
گسترش ترک‌ها قدرت باربری سازه را تضعیف کرده و خطر تخریب ناگهانی را افزایش می‌دهد.
۲. نقش شناسایی و پایش ترک‌ها:
شناسایی ترک‌ها در مراحل اولیه یکی از کلیدهای مدیریت سازه‌ها محسوب می‌شود.
فناوری پردازش تصویر امکان شناسایی دقیق ویژگی‌های ترک‌ها (مانند عرض، طول، عمق و مسیر گسترش) را فراهم می‌کند و نقاط ضعف سازه را مشخص می‌سازد.
۳. مزایای فناوری پردازش تصویر:
استفاده از پردازش تصویر روش غیرمخرب و موثری است که نسبت به روش‌های سنتی کارایی بالاتری دارد.
این فناوری علاوه بر افزایش دقت، زمان و هزینه‌های ارزیابی را نیز کاهش می‌دهد.
۴. کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین:
این الگوریتم‌ها توانایی مدل‌سازی ترک‌ها، پیش‌بینی گسترش آن‌ها و طبقه‌بندی آسیب‌ها را دارند.
ترکیب الگوریتم‌های یادگیری عمیق با داده‌های تصویری باعث افزایش سرعت تحلیل و بهبود نتایج می‌شود.

نتیجه گیری

خوردگی میلگردهای فولادی در سازه‌های بتنی یکی از شایع‌ترین و مخرب‌ترین مشکلات در زیرساخت‌های عمرانی است که بهره‌وری و دوام سازه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده با گسترش ترک‌های سطحی و کاهش پیوند میان بتن و میلگرد، می‌تواند مقاومت مکانیکی و عملکرد کلی سازه را به شدت کاهش دهد. بررسی و پایش ترک‌های خمشی ناشی از ضعف ایجاد شده در اثر خوردگی، به‌ویژه در مراحل اولیه تخریب، یکی از مراحل کلیدی برای ارزیابی وضعیت سازه و برنامه‌ریزی جهت ترمیم و نگهداری آن است. در این راستا، استفاده از روش‌های پیشرفته مانند پردازش تصویر و هوش مصنوعی یک رویکرد نوین و کارآمد محسوب می‌شود که امکان تحلیل دقیقی را در سطح میکروسکوپی و ماکروسکوپی فراهم می‌کند. پردازش تصویر به عنوان یک ابزار غیرمخرب و سریع، قابلیت شناسایی ترک‌های ریز و نامرئی را که با چشم انسان قابل مشاهده نیستند، دارد. این فناوری با تحلیل هندسی ترک‌ها شامل طول، عرض، عمق و گسترش آن‌ها در سطح سازه، به مهندسان این امکان را می‌دهد تا شدت آسیب دیدگی، الگوی توسعه ترک‌ها و نقاط بحرانی سازه را به‌طور دقیق تعیین کنند. در همین راستا، استفاده از تصاویر پردازش‌شده و الگوریتم‌های یادگیری عمیق در شناسایی و دسته‌بندی ترک‌ها، دقت و سرعت ارزیابی‌های میدانی را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. فرآیند تحلیل تصاویر با داده‌های به‌دست‌آمده، علاوه بر ارائه اطلاعات دقیق، امکان پیش‌بینی رفتار سازه‌ای در آینده را نیز فراهم می‌کند. این روش‌ها نه تنها از نظر دقت و کارایی، بلکه از لحاظ اقتصادی نیز بسیار مقرون‌به‌صرفه هستند، زیرا نیاز به تجهیزات سنگین و روش‌های پرهزینه سنتی را کاهش می‌دهند. در مرحله ترمیم و نگهداری نیز این اطلاعات می‌تواند کمک شایانی به تدوین برنامه‌های عملیاتی و تعیین محدوده‌های آسیب‌دیده برای ترمیم موضعی کند و از تعویض یا تعمیر غیرضروری اجتناب شود. در نهایت، نتایج و تحلیل‌های ارائه‌شده در این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌هایی مانند پردازش تصویر و هوش مصنوعی در زمینه شناسایی و ارزیابی آسیب دیدگی‌های ناشی از خوردگی میلگرد، گامی بزرگ به سوی مدیریت بهتر سازه‌های بتنی و افزایش طول عمر مفید آن‌ها است. این رویکرد، علاوه بر کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، بهبود ایمنی سازه‌ها و کاهش احتمال رخداد خرابی‌های ناگهانی را تضمین می‌کند. به همین دلیل، پیشنهاد می‌شود این روش‌ها به عنوان بخش اساسی از برنامه‌های پایش و نگهداری مستمر سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

- [1] Bertolini, L., et al. (2004). Corrosion of steel in concrete. Wiley
- [2] Neville, A. M. (2011). Properties of concrete. Pearson Education
- [3] Tang, L., & Nilsson, L. O. (1992). "Chloride transport in concrete". Magazine of Concrete Research
- [4] Tuutti, K. (1982). Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute
- [5] Andrade, C., & Alonso, C. (1996). "Corrosion rate measurements". Cement and Concrete Research
- [6] El Maaddawy, T., & Soudki, K. (2003). "Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete". Cement and Concrete Research
- [7] Zhang, J., et al. (2016). "Crack detection in concrete structures using machine learning algorithms". Engineering Structures
- [8] Chen, Y., et al. (2020). "Applications of deep learning in structural engineering". Structural Monitoring and Maintenance
- [9] Saleh, N., et al. (2022). "Impact of chloride ingress and automated crack detection in reinforced concrete". Advances in Civil Engineering Materials
- [10] Ghosh, S., et al. (2023). "Automation in structural health monitoring using AI tools". Journal of Artificial Intelligence in Civil Engineering
- [11] Ashraf, W. et al. (2022). "Application of AI-based techniques in structural health monitoring: A review." *Construction and Building Materials*, 340, 125758.
- [12] Huang, Y., & Zhao, Y. Y. (2019). "Visual crack detection using machine learning techniques." *Automation in Construction*, 104, 123-134.
- [13] Liu, Z., Huang, Y., Zhang, Z. (2020). "Crack detection using computer vision and deep learning techniques." *Automation in Construction*, 114, 103115.

[14] Lins, R. G., & Ghaboussi, J. (2018). "Structural health monitoring of concrete structures with automated crack evaluation using image processing." *Journal of Infrastructure Systems*, 24(4), 04018038.

[15] بهشتی نژاد حسین و محمودآبادی ملیکا، (۱۴۰۳)، تحلیل مقایسه ای روش های مکانیکی و پردازش تصویر در ارزیابی ترک های تیر بتنی مسلح، دومین کنگره بین المللی توسعه علمی و فناوری دانشجویان مهندسی عمران ایران، تهران، <https://civilica.com/doc/2242653>

[16] بهشتی نژاد حسین، (۱۳۹۷)، بررسی آزمایشگاهی رفتار اعضای خمشی با آرماتورهای خورده شده و ارائه روش جدید جهت تحلیل قابلیت اطمینان آنها. پایان نامه دکتری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده عمران

[17] N Aravind, S Nagajothi, S Elavenil, Machine learning model for predicting the crack detection and pattern recognition of geopolymers concrete beams, *Construction and Building Materials*, (2021), ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123785>.