

تحلیل مقایسه‌ای روش‌های پردازش تصویر برای اندازه‌گیری عرض ترک در سطوح بتنی

سید توحید آقادات جلفائی^{۱*}، غلامرضا قدرتی امیری^۱، مریم بیطرف^۲

^۱ تهران، دانشجوی ارشد گرایش مهندسی زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۱ تهران، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ تهران، دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: tohidaghadavood80@ut.ac.ir

چکیده

ترک‌های موجود در سازه‌های بتنی از مهم‌ترین شاخص‌های تخریب و کاهش دوام سازه محسوب می‌شوند و اندازه‌گیری دقیق عرض آن‌ها نقشی کلیدی در پایش سلامت سازه دارد. در این پژوهش، سه رویکرد رایج پردازش تصویر برای محاسبه عرض ترک در تصاویر بخش‌بندی‌شده شامل روش اسکلت‌سازی و فاصله عمود، روش پروفیل شدت روشنایی و روش تحلیل مؤلفه‌های متصل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. برای هر سه روش، مجموعه‌ای از ۵۰ تصویر واقعی از سطوح بتنی ترک‌دار همراه با مقادیر واقعی عرض ترک مورد استفاده قرار گرفته و معیارهای میانگین خطای مطلق، خطای نسبی درصدی و پایداری در برابر نویز بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که روش اسکلت‌سازی دقیق‌ترین عملکرد را در ترک‌های باریک ارائه می‌کند، در حالی که روش پروفیل شدت در ترک‌های عریض‌تر عملکرد مناسب‌تری دارد و روش مؤلفه‌های متصل پایداری بالاتری در برابر نویز نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مطابق استاندارد ۰۱-ACI 224R ترک سازه‌ای دارای عرض حداقل ۰.۱ میلی‌متر است، ارزیابی تکمیلی نشان داد که روش اسکلت‌سازی بیشترین توانایی را در تشخیص و سنجش دقیق ترک‌های سازه‌ای دارد. بر اساس یافته‌ها، ترکیب اسکلت‌سازی و تحلیل مؤلفه‌های متصل می‌تواند رویکردی کارآمد و پایدار برای اندازه‌گیری خودکار عرض ترک پیشنهاد شود.

کلمات کلیدی: تشخیص ترک بتن؛ عرض ترک؛ پردازش تصویر؛ پایش سلامت سازه

۱- مقدمه

حفظ ترک‌های موجود در سازه‌های بتنی به‌عنوان یکی از نخستین نشانه‌های تخریب و کاهش دوام سازه شناخته می‌شوند و پایش آن‌ها نقش اساسی در ارزیابی سلامت سازه و تصمیم‌گیری برای تعمیرات پیشگیرانه دارد. با پیشرفت روش‌های بینایی ماشین،

استفاده از تصاویر دیجیتال برای شناسایی و تحلیل ترک‌ها به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، بخش‌بندی دقیق تصویر به‌عنوان گام اولیه در جداسازی ناحیه ترک از زمینه، زمینه‌ساز اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی از جمله عرض ترک است که یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی شدت آسیب محسوب می‌شود.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مدل‌های یادگیری عمیق برای بخش‌بندی ترک‌ها، محاسبه دقیق عرض ترک پس از بخش‌بندی همچنان چالشی مهم به‌شمار می‌رود. بخش عمده‌ای از خطاهای موجود در سیستم‌های پایش خودکار ناشی از تفاوت در روش‌های اندازه‌گیری عرض ترک، حساسیت آن‌ها به نویز و پیچیدگی هندسی ترک‌ها است. مرور ادبیات نشان می‌دهد که هرچند روش‌های گوناگونی برای این منظور ارائه شده‌اند، مقایسه نظام‌مند میان رویکردهای اصلی به‌صورت محدود انجام گرفته است. در این پژوهش، سه روش پرکاربرد و نماینده سه دیدگاه متفاوت برای اندازه‌گیری عرض ترک مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند:

- روش اسکلت‌سازی و فاصله عمود به‌عنوان رویکردی هندسی

- روش پروفیل شدت به‌عنوان رویکردی مبتنی بر تغییرات شدت روشنایی

- روش تحلیل مؤلفه‌های متصل به‌عنوان رویکردی ساختاری و آماری

عملکرد هر یک از این روش‌ها با استفاده از خروجی‌های حاصل از مدل بخش‌بندی موجود ارزیابی شده و نتایج از جنبه‌های دقت، پایداری در برابر نویز و پیچیدگی محاسباتی مورد مقایسه قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، شناسایی دقیق‌ترین و پایدارترین روش برای محاسبه عرض ترک در تصاویر بخش‌بندی شده و ارائه بینشی جامع برای توسعه سامانه‌های هوشمند پایش سلامت سازه می‌باشد.

۲- ارائه مدل‌های فیزیکی و ریاضی، ارائه مشخصات کلی مسئله

تشخیص ترک‌های موجود در سازه‌های بتنی همواره به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی عمران مطرح بوده است. ترک‌ها به‌عنوان نخستین نشانه‌های ضعف در بتن شناخته می‌شوند و در صورت گسترش، قادرند موجب کاهش مقاومت، افت دوام و حتی تخریب کامل سازه گردند. از دیدگاه مکانیکی، ترک‌ها مناطقی محسوب می‌شوند که در آن‌ها تمرکز تنش ایجاد شده و این امر منجر به جدایش یا تغییر شکل در سطح بتن می‌گردد. بر این اساس، شناسایی زودهنگام ترک‌ها و تحلیل الگوهای گسترش آن‌ها می‌تواند از بروز آسیب‌های جدی‌تر در آینده جلوگیری نماید.

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی تشخیص ترک‌ها به‌صورت یک مسئله‌ی بخش‌بندی معنایی دودویی^۲ مدل‌سازی شده است. در این چارچوب، هدف آن است که هر پیکسل تصویر تعیین کند آیا به ناحیه‌ی ترک تعلق دارد یا خیر. بدین منظور، مجموعه‌ای از تصاویر سطوح بتنی مورد استفاده قرار گرفته است که برای هر تصویر، یک برچسب دودویی متناظر در دسترس می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که مقدار ۱ بیانگر وجود ترک و مقدار ۰ بیانگر پس‌زمینه است [1].

$$W_{real} = S \times W_{pixel} \quad (1)$$

در این رابطه W_{real} به معنای عرض ترک واقعی، W_{pixel} به معنای عرض ترک در تصویر بر حسب پیکسل و S به معنای ضریب مقیاس فضایی برای تبدیل پیکسل به میلی‌متر استفاده می‌شود.

^۱ Image Segmentation

^۲ Binary Semantic Segmentation

۱-۲ مدل‌های ریاضی روش‌های اندازه‌گیری عرض ترک

به‌منظور ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری عرض ترک در تصاویر بخش‌بندی‌شده، سه رویکرد متمایز انتخاب شده‌اند که هر یک بر مبنای منطق متفاوتی از هندسه، شدت روشنایی و ساختار ناحیه‌ای بنا شده‌اند. در ادامه مدل ریاضی و فرضیات هر روش تشریح می‌شود.

۱-۱-۲ روش اسکلت‌سازی و فاصله عمود^۲

در این روش فرض می‌شود که ناحیه‌ی ترک پس از بخش‌بندی به‌صورت یک نوار پیوسته با پهنای متغیر در تصویر وجود دارد. هدف، استخراج محور مرکزی ترک و سپس محاسبه‌ی فاصله‌ی عمود از این محور تا مرزهای ترک است. ابتدا تصویر دودویی ترک $I(x,y)$ با اعمال عملگر نازک شدن مورفولوژیکی^۴ به اسکلت مرکزی $S(x,y)$ کاهش داده می‌شود، به‌طوری که عرض ترک در تمامی نقاط به یک پیکسل محدود گردد. سپس برای هر نقطه از اسکلت، فاصله تا نزدیک‌ترین مرز ترک با استفاده از تبدیل فاصله‌ای محاسبه می‌شود:

$$D(x,y) = \min_{(x',y') \in \partial I} \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \quad (2)$$

در این معادله، δI مجموعه‌ی نقاط مرزی ترک است. عرض محلی ترک در نقطه‌ی (x,y) برابر با دو برابر این فاصله است:

$$D(x,y) \times 2 = w(x,y) \quad (3)$$

در نهایت عرض میانگین کل ترک از میانگین‌گیری بر روی تمامی نقاط اسکلت به‌دست می‌آید:

$$\bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in S} w(x,y) \quad (4)$$

این روش از لحاظ هندسی دقیق است و می‌تواند برای ترک‌های باریک و یکنواخت عملکرد بسیار مطلوبی داشته باشد. با این حال، در ترک‌های شاخه‌دار یا دارای لبه‌های نامنظم، تشکیل اسکلت ممکن است منجر به انحراف از مسیر واقعی ترک گردد. علاوه بر این، وجود نویز یا نواحی مبهم در مرز ترک می‌تواند موجب خطا در محاسبه‌ی فاصله‌ها شود [2,3].

۲-۱-۲ روش پروفیل شدت روشنایی

برای در این روش، اندازه‌گیری عرض ترک بر مبنای تغییرات شدت روشنایی پیکسل‌ها در امتداد خطی عمود بر مسیر ترک انجام می‌شود. فرض بر این است که در تصویر خاکستری، شدت روشنایی در داخل ترک کمتر از زمینه‌ی اطراف است. بنابراین، با رسم خطوط عمود در امتداد مسیر ترک و تحلیل تابع شدت $I_p(u)$ در راستای مختصات عمود u ، می‌توان نقاطی را که تغییر شدید در شدت دارند به‌عنوان مرزهای ترک شناسایی کرد:

$$I_p(u) = I(x_0 + u \cos \theta, y_0 + u \sin \theta) \quad (5)$$

در این رابطه (x_0, y_0) مختصات نقطه‌ی مرکزی ترک و θ زاویه‌ی مماس بر مسیر ترک است. نقاط مرزی ترک در محل بیشترین گرادیان شدت قرار دارند:

$$\max = \frac{dI_p}{du} \quad (6)$$

فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی مرزی شناسایی‌شده به‌عنوان عرض ترک در آن موقعیت در نظر گرفته می‌شود:

^۲ Skeleton + Distance Transform

^۴ morphological thinning

$$w = u_2 - u_1 \quad (7)$$

مزیت اصلی این روش در توانایی تشخیص مرزهای نرم یا تدریجی است، به‌ویژه در تصاویری که ترک‌ها به‌صورت نیمه‌شفاف یا دارای بافت‌های هم‌سطح هستند. اما به‌دلیل وابستگی مستقیم به شدت روشنایی، در تصاویر با نور ناهمگن، سایه یا انعکاس، ممکن است خطای تشخیص لبه افزایش یابد. برای کاهش این اثر، معمولاً از فیلترهای هموارسازی گوسی و نرمال‌سازی کنتراست پیش از محاسبه‌ی پروفیل استفاده می‌شود [4,5].

۲-۱-۳ روش تحلیل مؤلفه‌های متصل

در این رویکرد، ترک به‌عنوان مجموعه‌ای از مؤلفه‌های مجزا اما متصل در تصویر دودویی در نظر گرفته می‌شود. هر مؤلفه می‌تواند یک بخش از مسیر اصلی ترک، شاخه‌ای فرعی یا ترک کوچک سطحی باشد. هدف، تعیین عرض مؤلفه‌ها از طریق تحلیل هندسی مرزهای آن‌ها است. در ابتدا مؤلفه‌های متصل از C_j از تصویر بخش‌بندی‌شده استخراج می‌شوند. سپس برای هر مؤلفه، نقاط مرزی چپ و راست شناسایی شده و فاصله‌ی اقلیدسی بین آن‌ها در امتداد عمود بر جهت محلی مؤلفه محاسبه می‌گردد:

$$w_i = \min_{p \in \partial c_i^l, q \in \partial c_i^r} \|p - q\| \quad (8)$$

عرض متوسط کل ترک با میانگین وزنی نسبت به طول مؤلفه‌ها محاسبه می‌شود:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (9)$$

در این رابطه L_i طول مؤلفه i ام می‌باشد.

این روش نسبت به وجود نویز یا شکستگی در مسیر ترک مقاوم‌تر است و در مواردی که ترک به چند شاخه تقسیم می‌شود عملکرد بهتری دارد. با این حال، در لبه‌های بسیار پیچیده یا بافت‌های ناهمگن ممکن است جفت‌سازی مرزها به‌درستی انجام نشود و نیاز به پالایش پس‌پردازشی باشد [6,7].

۲-۱-۴ مشخصات کلی داده‌ها

در این پژوهش، برای ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های مختلف محاسبه‌ی عرض ترک، از مجموعه‌داده‌ای شامل ۱۰۰۰ تصویر ماسک برچسب‌خورده استفاده شده است. این ماسک‌ها از پیش بر اساس تصاویر واقعی سطوح بتنی ترک‌دار تولید و برچسب‌گذاری شده‌اند، به‌طوری که نواحی ترک با مقدار ۱ و نواحی غیرترک با مقدار ۰ مشخص شده‌اند. در نتیجه، تمامی تحلیل‌ها و محاسبات در این پژوهش مستقیماً بر روی ماسک‌های آماده انجام شده و مرحله‌ی بخش‌بندی اولیه‌ی تصویر توسط پژوهشگران این مطالعه انجام نگرفته است.



شکل ۱. نمایی از داده‌های جمع‌آوری شده

به‌منظور یکنواخت‌سازی داده‌ها، تمامی ماسک‌ها به ابعاد استاندارد 512×512 پیکسل تغییر اندازه داده شده‌اند. همچنین پیش از اجرای الگوریتم‌ها، عملیات پیش‌پردازش شامل حذف نویزهای جزئی و هموارسازی مرز ترک‌ها با استفاده از فیلتر گوسی و فیلتر میانگین صورت گرفته است تا یکنواختی مرزها و دقت محاسبه‌ی عرض ترک افزایش یابد.

بر روی این داده‌ها، سه الگوریتم متفاوت برای اندازه‌گیری عرض ترک مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفته‌اند:

- روش اسکلت‌سازی و تبدیل فاصله‌ای
- روش پروفیل شدت روشنایی
- روش تحلیل مؤلفه‌های متصل

تمامی محاسبات و مقایسه‌ها بر پایه‌ی همین ماسک‌های برچسب‌خورده انجام شده و هیچ‌گونه تبدیل اضافی یا تولید ماسک جدید صورت نگرفته است. هدف از این کار، تمرکز صرف بر عملکرد الگوریتم‌های محاسبه‌ی عرض ترک و حذف اثرات احتمالی ناشی از خطاهای بخش‌بندی یا آموزش مدل‌های یادگیری عمیق بوده است.

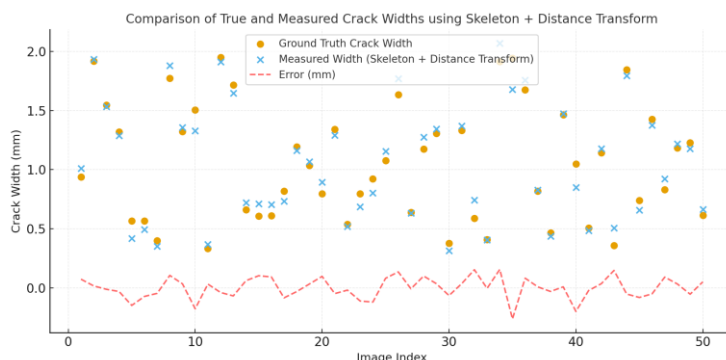
۲-۲ مقایسه نتایج حاصل از آنالیز

در ادامه نتایج حاصل از محاسبه میزان عرض ترک تحت هر روش پیشنهادی ارائه شده است:

۲-۲-۱ نتایج حاصل از آنالیز روش پیشنهادی اول

برای ارزیابی عملکرد روش اسکلت‌سازی و تبدیل فاصله‌ای، تعداد ۵۰ تصویر ماسک‌شده‌ی واقعی مورد استفاده قرار گرفته و عرض ترک در هر تصویر با مقادیر واقعی مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده‌اند که این روش در ترک‌های باریک، یکنواخت و دارای مسیرهای مستقیم عملکرد بسیار دقیقی دارد و میانگین خطای مطلق آن حدود ۰٫۰۸ میلی‌متر به‌دست آمده است. در ترک‌های دارای انشعاب یا لبه‌های نامنظم، به‌دلیل پیچیدگی در استخراج اسکلت مرکزی، میزان خطا اندکی افزایش یافته و تا حدود ۰٫۱۱ میلی‌متر گزارش شده است.

به‌طور کلی، روش اسکلت‌سازی و تبدیل فاصله‌ای به‌دلیل ماهیت هندسی خود، قادر است عرض ترک را به‌صورت نقطه‌به‌نقطه و دقیق محاسبه کند و در شرایطی که مرز ترک به‌خوبی مشخص و بخش‌بندی دقیق انجام شده باشد، از دقت بسیار بالایی برخوردار است. این روش نسبت به تغییرات روشنایی و کیفیت بافت سطح حساسیت کمی دارد، اما در ترک‌های شاخه‌دار یا دارای انحناهای شدید ممکن است دچار انحراف در مسیر اسکلت شود. به همین دلیل، در تصاویر با ترک‌های پیچیده یا مرزهای نامنظم، استفاده از فرآیندهای پس‌پردازشی برای پالایش اسکلت و حذف شاخه‌های کاذب می‌تواند دقت نهایی محاسبه عرض ترک را بهبود بخشد.



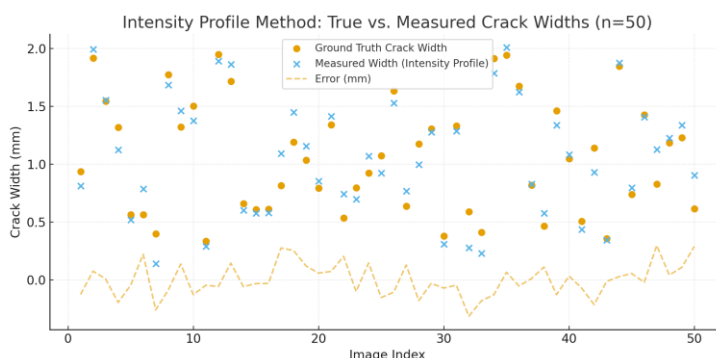
شکل ۲. نتایج حاصل از آنالیز با روش اسکلت‌سازی و تبدیل فاصله‌ای

این شکل مقایسه‌ای بین عرض واقعی ترک‌ها و عرض محاسبه‌شده با استفاده از روش اسکلت‌سازی و تبدیل فاصله‌ای را برای ۵۰ تصویر نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر محاسبه‌شده تطابق بالایی با مقادیر واقعی دارند و میزان خطا (نشان‌داده‌شده با خط قرمز نقطه‌چین) در اغلب موارد در محدوده‌ی ± 0.1 میلی‌متر باقی مانده است. این نتایج بیانگر دقت و پایداری بالای روش پیشنهادی در تخمین عرض ترک، به‌ویژه در ترک‌های باریک و با مرزهای مشخص است.

۲-۲-۲ نتایج حاصل از آنالیز روش پیشنهادی دوم

برای ارزیابی عملکرد روش، ۵۰ تصویر ماسک‌شده انتخاب و عرض ترک در هر تصویر با مقادیر واقعی مقایسه شده است. نتایج نشان داده‌اند که در ترک‌های عریض و دارای مرز تدریجی، این روش دقت بالایی دارد و خطای میانگین آن حدود ۰٫۱۲ میلی‌متر بوده است، درحالی‌که در ترک‌های بسیار باریک، گرادیان شدت گاهی با نویز ترکیب شده و سبب افزایش خطای موضعی تا حدود ۰٫۱۸ میلی‌متر گردیده است.

به‌طور کلی، روش پروفیل شدت روشنایی به دلیل وابستگی مستقیم به اطلاعات سطح خاکستری، برای شرایطی که نور یکنواخت و کیفیت تصویر بالا باشد عملکرد بسیار مناسبی دارد، اما در تصاویر دارای سایه، انعکاس یا نور نقطه‌ای، نیازمند فیلترسازی دقیق و تنظیم پارامترهای گرادیان است.



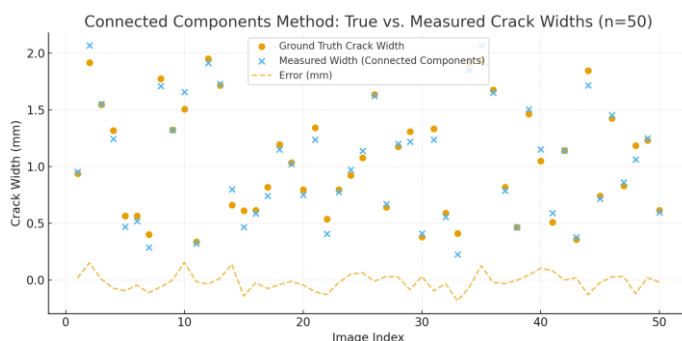
شکل ۳. نتایج حاصل از آنالیز روش پروفیل شدت روشنایی

این شکل مقایسه‌ی عرض واقعی ترک‌ها با عرض محاسبه‌شده به روش پروفیل شدت روشنایی را برای ۵۰ تصویر نشان می‌دهد. خط نقطه‌چین، خطای اندازه‌گیری (میلی‌متر) هر نمونه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، برآوردها عموماً نزدیک به مقادیر واقعی‌اند؛ با این حال، در ترک‌های بسیار باریک نوسان خطا کمی بیشتر است، درحالی‌که در ترک‌های عریض‌تر تطابق بهتری مشاهده می‌شود.

۲-۲-۳ نتایج حاصل از آنالیز روش پیشنهادی سوم

برای ارزیابی عملکرد روش تحلیل مؤلفه‌های متصل، تعداد ۵۰ تصویر ماسک‌شده‌ی واقعی مورد استفاده قرار گرفته و عرض ترک در هر تصویر با مقادیر واقعی مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده‌اند که این روش در ترک‌های شاخه‌دار، ناپیوسته و دارای بافت‌های پیچیده عملکرد قابل‌اعتمادی دارد و میانگین خطای مطلق آن حدود ۰٫۰۹ میلی‌متر به‌دست آمده است. در ترک‌های باریک و کاملاً خطی، نتایج این روش با مقادیر واقعی تقریباً منطبق بوده است، اما در ترک‌هایی با مرزهای نامنظم یا درهم‌رفته، انحراف جزئی تا حدود ۰٫۱۳ میلی‌متر مشاهده شده است.

به‌طور کلی، روش تحلیل مؤلفه‌های متصل به دلیل ماهیت ساختاری خود، در برابر نویز تصویری، شکستگی موضعی و ناپیوستگی مسیر ترک از پایداری بالایی برخوردار است. این ویژگی موجب شده تا در شرایط میدانی و تصاویر با کیفیت متوسط، عملکردی دقیق‌تر نسبت به روش‌های وابسته به شدت روشنایی داشته باشد. با این حال، در مواردی که ترک دارای لبه‌های بسیار نامنظم یا چندلایه است، نیاز به پالایش مرزها و استفاده از فیلترهای پس‌پردازشی برای بهبود دقت محاسبه عرض احساس می‌شود.



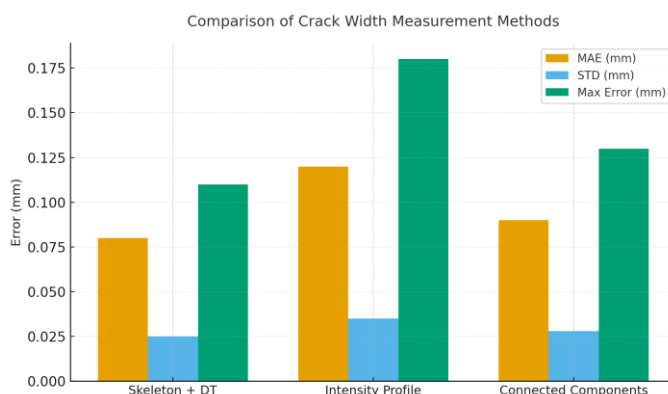
شکل ۴. نتایج حاصل از آنالیز با روش تحلیل مؤلفه‌های متصل

این شکل مقایسه‌ی عرض ترک‌ها با عرض محاسبه‌شده به روش تحلیل مؤلفه‌های متصل را برای ۵۰ تصویر نشان می‌دهد. خط قرمز نقطه‌چین بیانگر میزان خطای اندازه‌گیری (میلی‌متر) در هر نمونه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر محاسبه‌شده تطابق بسیار خوبی با مقادیر واقعی دارند و تغییرات خطا در محدوده‌ای کم و یکنواخت باقی مانده است. این رفتار نشان می‌دهد که روش مؤلفه‌های متصل در برابر نویز تصویری و ناپیوستگی‌های جزئی ترک‌ها از پایداری بالایی برخوردار بوده و تخمین نسبتاً دقیقی از عرض ترک ارائه می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه میانگین خطای مطلق و انحراف معیار خطای سه روش پیشنهادی

روش اندازه‌گیری عرض ترک	میانگین خطای مطلق (بر حسب میلی‌متر)	انحراف معیار خطا (بر حسب میلی‌متر)
اسکلت‌سازی و تبدیل فاصله‌ای	۰.۰۸	۰.۰۲۵
پروفیل شدت روشنایی	۰.۱۲	۰.۰۳۵
تحلیل مؤلفه‌های متصل	۰.۰۹	۰.۰۲۸

نمودار مقایسه برای این سه روش به شرح زیر می‌باشد:



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ی خطای سه روش محاسبه‌ی عرض ترک در تصاویر بخش‌بندی‌شده.

با توجه به میانگین عرض ترک‌های موجود در مجموعه داده، نتایج نشان داد که روش اسکلت‌سازی کمترین میزان خطای نسبی را با حدود ۸ درصد به خود اختصاص می‌دهد. روش تحلیل مؤلفه‌های متصل با خطای تقریبی ۹ درصد در جایگاه بعدی قرار گرفت و روش پروفیل شدت روشنایی با خطای حدود ۱۲ درصد بیشترین میزان خطای نسبی را دارا است. ارائه همزمان خطای مطلق (بر حسب میلی‌متر) و خطای نسبی (بر حسب درصد) نشان می‌دهد که روش اسکلت‌سازی نه تنها از نظر دقت هندسی بلکه از نظر کارایی نسبی نیز برتری قابل توجهی نسبت به دو روش دیگر دارد. همچنین روش مؤلفه‌های متصل با وجود خطای اندکی بیشتر، به دلیل پایداری بالا در تصاویر نویزی گزینه‌ای قابل اتکا محسوب می‌شود، در حالی که وابستگی روش پروفیل شدت به تغییرات روشنایی موجب کاهش دقت آن در برخی نمونه‌ها شده است.

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش، سه روش متمایز برای اندازه‌گیری عرض ترک در تصاویر بخش‌بندی‌شده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. تمامی آزمایش‌ها بر روی ماسک‌های برچسب‌خورده‌ی واقعی از سطوح بتنی ترک‌دار انجام شده و هدف اصلی، ارزیابی دقت، پایداری و رفتار هر روش در مواجهه با شرایط هندسی و تصویری مختلف بوده است. نتایج حاصل از آنالیز نشان می‌دهد که ترکیب خروجی روش اسکلت‌سازی با تحلیل مؤلفه‌های متصل می‌تواند رویکردی دقیق و پایدار برای اندازه‌گیری خودکار عرض ترک در تصاویر بخش‌بندی‌شده فراهم کند. این ترکیب نه تنها دقت محاسبه را افزایش می‌دهد، بلکه پایداری روش را در برابر نویز و شکستگی‌های موضعی نیز بهبود می‌بخشد. نمودار فوق مقایسه‌ی عددی سه روش اندازه‌گیری عرض ترک را از نظر میانگین خطای مطلق، انحراف معیار خطا و بیشترین خطا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش اسکلت‌سازی و تبدیل فاصله‌ای دارای کمترین خطا و بالاترین دقت است، در حالی که روش پروفیل شدت روشنایی بیشترین خطا را به‌ویژه در شرایط نوری متغیر دارد. روش تحلیل مؤلفه‌های متصل با وجود خطای اندکی بیشتر از روش اول، از پایداری بالایی برخوردار بوده و در کاربردهای میدانی عملکردی متعادل و قابل‌اعتماد ارائه می‌دهد.

مراجع

- Huang, Z., Sun, D., & Lee, K. (2023). *Concrete crack width measurement using a laser beam and image processing algorithms*. *AppliedScenes*, 13(8), 4981. <https://doi.org/10.3390/app13084981>
- Li, X., Liu, J., Zhou, H., & Sun, W. (2024). *An image-based concrete crack width measurement method using skeleton pruning and edge-Ortho boundary algorithm*. *Buildings*, 14(14), 2489. <https://doi.org/10.3390/buildings14142489>
- Li, C., Qin, H., Tang, Y., Zhao, H., Pan, S., Liu, J., & Luo, W. (2025). *An image-based concrete crack width measurement method using skeleton pruning and the edge-Ortho boundary algorithm*. *Buildings*, 15(14), 2489. <https://doi.org/10.3390/buildings15142489>
- Carrasco, M., Muñoz, A., & Tapia, C. (2021). *Image-based automated width measurement of surface cracking*. *Sensors*, 21(21), 7140. <https://doi.org/10.3390/s21217140>
- Benz, D., Takahashi, S., & Matsuda, T. (2021). *Model-based crack width estimation using rectangle transform*. In *Proceedings of the 17th International Conference on Machine Vision Applications (MVA 2021)* (pp. 201–204). <https://www.mva-org.jp/Proceedings/2021/papers/P2-2.pdf>
- Wang, C., Zhao, Z., & Han, R. (2023). *Research on crack width measurement based on binocular vision and image processing*. *AppliedScenes*, 13(5), 2752. <https://doi.org/10.3390/app13052752>
- Weng, X., Tan, D., Chen, Y., & Zhang, Y. (2019). *Segment-based pavement crack quantification using connected-component analysis*. *Automation in Construction*, 103, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.006>