



بهبود دقت محاسبه طول ترک در خشت رسی با استفاده از ماشین بینایی

خلیل خلیلی^{۱*}، مجتبی وحیدنیا^۲ و سجاد خیشه^۳

^۱ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۲ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۳ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۱۷

چکیده

پنجیدگی ساختاری در طبیعت ترک‌ها و وجود شاخه‌های زیاد، امکان اینکه بتوان شکل آن‌ها را با استفاده از تطبیق بر اشکال متعارف هندسی شناخت و یا اینکه بتوان با استفاده از روابط معمول ریاضی ابعاد آن‌ها را محاسبه کرد، عملاً غیرممکن ساخته است. در این مقاله، شیوه جدیدی از بررسی ابعاد ترک در مواد ترد با استفاده از ماشین بینایی ارائه شده است. روش به دست آمده برای محاسبه ابعاد ترک در اجسام، استفاده از ماشین بینایی، تصویربرداری، پردازش تصویر، تعریف الگوریتم‌های جدیدی در نرم‌افزارهای برنامه‌نویسی و در نهایت تفسیر تصاویر به منظور بهبود دقت‌های اندازه‌گیری است. از آنجا که ترک‌ها فاقد شکل هندسی منظم و قابل پیش‌بینی هستند، نمی‌توان از روابط تعریف‌شده ریاضی جهت به دست آوردن دقیق ابعاد ترک استفاده کرد. ماشین بینایی، می‌تواند یکی از راهکارهای مناسب جهت انجام این فرآیند باشد که در این مقاله، سعی شد که دو روش متفاوت اسکلتون تصویر و نصف محیط ترک بعد از تعریف الگوریتم‌های جدید بهبوددهنده، بتوانند طول دقیق هر ترکی را با صحت و قابلیت تکرار در اختیار قرار دهند. در نهایت با اعمال الگوریتم جدید در این مقاله، مشخص می‌شود که می‌توان به صورت عملی برای نمونه آزمایشی به خطای کمتر از ۱٪ در رزولوشن ۰/۱ میلی‌متر دست یافت.

کلمات کلیدی: اندازه‌گیری طول ترک؛ پردازش تصویر؛ اسکلتون؛ هرس کردن.

Improving the Accuracy of Crack Length Measurement in Clay Brick Using Machine Vision

Kh. Khalili^{1*}, M. Vahidnia² and S. Khisheh³

¹ Ph.D. President University of Birjand, Birjand, Iran

² MS, Mech. Eng, University of Birjand, Birjand, Iran

³ Ph.D. Student, Mech. Eng, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

In the current paper a new method is introduced to analyze and measure the cracks dimensions in solid materials such as mechanical tools and bricks. Since the cracks do not have a regular or predictable shape, in order to achieve the exact dimensions of such cracks, the conventional mathematical formulas are by no means applicable. Hence, while studying different crack analyzing methods, we argue on their faults and limits and propose our method which aims to measure the crack dimensions in a solid object by utilizing machine vision, image capturing and image processing techniques. We define new algorithms and perform picture scaling in real dimensions and analyze the acquired data to obtain the most precise results. This optimal machine vision technique is performed in two different ways. The first method is based on the measurement of the length of the image skeleton, while the second technique is based on measuring the half of the perimeter of the crack's image. After obtaining the measurements, we optimize the results with the help of some pre-defined algorithms. It is shown that our proposed algorithms provide a reliable method which can be used to measure any crack dimensions. Also, we apply these techniques on a sample brick with some random cracks on it. After gaining the binary images, filters are applied to gain the best results among all images.

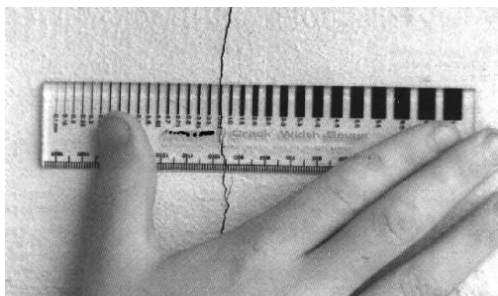
Keywords: Measurement of Crack; Image Processing; Skeleton; Pruning.

۱- مقدمه

شیوه سنتی، اولاً زمان‌بر بوده، مشکلاتی همچون خطای اپراتوری هنگام خواندن و ثبت اطلاعات و غیریکنواختی نتایج را به همراه دارد. علاوه بر آن اگر عرض ترک از حد دید انسان کوچک‌تر باشد، عملاً این روش بلااستفاده خواهد بود. برای بالاتر بردن دقت نیز می‌توان از کولیس و یا تجهیزات دیگر، در این روش استفاده کرد. نمونه استفاده از خط کش مدرج را در شکل ۱ دیده می‌شود [۱].

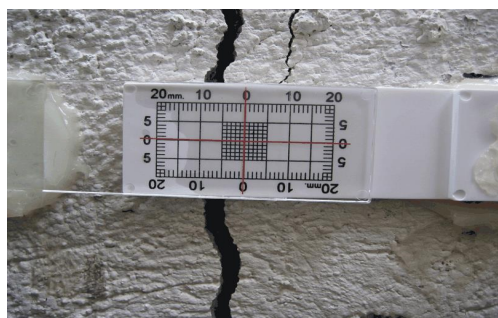
۱-۱-۲- ترک سنج^۱

از روش‌های دیگر موجود برای محاسبه عرض، استفاده از ترک سنج است که همانند شکل ۲ قبل از وقوع ترک یا رشد بروی نمونه قرار می‌گیرد و با ایجاد ترک یا افزایش عرض ترک (رشد ترک) مقادیر تغییر کرده شکل نمونه، نشان‌دهنده ضخامت تغییر کرده ترک است. این روش، بیشتر برای محاسبه رشد ترک استفاده می‌شود و حتماً باید قبل از وقوع ترک یا رشد ترک روی نمونه نصب شود. این روش و روش قبلی تنها از بعد عرضی می‌توانند ترک را اندازه‌گیری کنند [۱].



شکل ۱- اندازه‌گیری عرض ترک با استفاده از خط کش مدرج

[۱]



شکل ۲- اندازه‌گیری عرض ترک با استفاده از ترک سنج [۱]

شاید بتوان به جرات عنوان کرد که یکی از مهم‌ترین بخش‌های علوم، مبحث اندازه‌گیری است. از این رو اهمیت دقت و صحت اندازه‌گیری، همیشه یکی از دغدغه‌های اصلی دانشمندان در علوم مختلف بوده است؛ چرا که با دانستن مشخصات دقیق یک پدیده، می‌توانند در مورد آن اظهارنظر مناسبی داشته باشند و یا جهت بهبود یا رفع نقیصه در آن‌ها به صورت مناسبی عمل کنند. یکی از پدیده‌های موجود در طبیعت و صنعت ترک‌ها هستند. ترک یا گسیختگی به حالتی گفته می‌شود که جسم، پس از تحمل مقداری تنش، تغییرات حجمی داشته باشد و به همین دلیل، پیوند میان مولکول‌های جسم در قسمت‌هایی که تمرکز تنش در آن بالاتر است، از هم گسیخته می‌شود و این گسیختگی ممکن است، مقدمه شکست کامل جسم است. اندازه‌گیری ابعاد ترک‌ها از جمله طول، عرض و عمق آن‌ها و یا اندازه‌گیری تغییرات ابعادی ترک‌ها به نسبت زمان، موضوع مورد بحث در این مقاله است. روش‌های متفاوت اندازه‌گیری هندسه ترک را می‌توان به دو دسته کلی، آزمون مخرب و یا غیر مخرب بخش‌بندی کرد. طبیعتاً آزمایش‌های غیر مخرب، به این دلیل که نمونه بدون نیاز به تخریب آن بررسی می‌شود، روش مناسب‌تری است. در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری ماشین بینایی و روش‌های پردازش تصویر به عنوان یک روش اندازه‌گیری و بازرسی انعطاف‌پذیر، غیر تماسی، با سرعت عمل بسیار بالا و دقت قابل‌قبول برای اندازه‌گیری ترک‌های سطحی، مورد توجه زیادی قرار گرفته است.

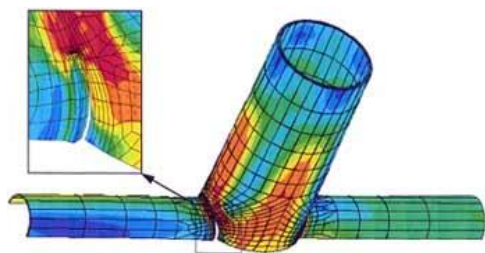
۱-۱-۱- بررسی فعالیت‌های انجام‌شده پیشین

ابزارها و روش‌های متعددی جهت محاسبه دقیق مشخصات ترک‌ها استفاده شده‌اند که اغلب از روش‌های آزمون غیر مخرب هستند. هر کدام از این روش‌ها، معایب و مزایایی دارند. برخی از این روش‌ها به شرح زیر هستند.

۱-۱-۱- استفاده از خط کش مدرج

برای دسته‌بندی ترک‌ها از نظر ضخامت آن‌ها، از خط کش‌های مدرج به ضخامت‌های متفاوت استفاده می‌شود که در هر نقطه، می‌بایست آن‌ها را بروی سطح قرارداد و با مشاهده چشمی تصمیم‌گیری صورت گیرد که کدام مقدار، نزدیک‌تر به ترک موجود است. طبیعتاً اندازه‌گیری به این

¹ Crack meter



شکل ۳- تنش‌ها در نزدیکی محل وقوع ترک، با استفاده از المان محدود [۲]

اما اگر ایراد ساختاری در شیء وجود داشته باشد، زمان بازگشت این موج متفاوت خواهد بود. دقیقاً همین حالت برای لیزرهای دوپلر نیز صدق می‌کند (شکل ۴). در جدیدترین روش با ترکیب موج سطحی آکوستیک و اندازه‌گیری‌های نوری، سعی شده است که دقت را به میزان چشمگیری افزایش دهند؛ اما وجود نویز، اعم از سر و صدا، شدت نور، آلودگی محیط و یا غلظت هوای موجود، سبب ایجاد اختلاف در سرعت و در نتیجه اندازه‌گیری‌ها می‌شود [۶].

۱-۱-۶- استفاده از ربات پیش‌رونده مسیریاب

پیمایش یک مسیر و شمردن گام‌های طی شده، یکی از ابتدایی‌ترین روش‌های اندازه‌گیری طول است. حال برای سادگی و دقت این عمل از دستگاه‌ها یا ربات‌ها استفاده می‌شود که با پیمودن یک مسیر مشخص، بتوانند مسافت پیموده شده را اندازه‌گیری نمایند [۴]. این مکانیزم معمولاً ترکیبی از یک چرخ و یک شمارشگر است. این وسایل، عمدتاً برای ابعاد و مسافت‌های زیاد استفاده می‌شوند. برای ترک‌ها و مسیرهای کوچک، می‌توان از ربات‌های مسیریاب استفاده کرد. مشکل عمده این روش، گم کردن مسیر، چرخ اضافه خوردن (درجا زدن) یا بالعکس چرخ کمتر از مسافت پیموده (لیز خوردن) است. پس در جایی که نیاز به دقت بالا است یا محدوده بسیار کوچک باشد و یا اینکه شرایط برای حرکت ربات فراهم نباشد، نمی‌توان از این روش استفاده کرد [۷-۸]. شکل ۵، یک ربات را نشان می‌دهد که روی مسیر ترک حرکت می‌کند و تقریبی از طول ترک را محاسبه نماید.

۱-۱-۳- پیش‌بینی ترک با روش‌های المان محدود

در روش‌های اجزا محدود (المان محدود)، جسم به صورت اجزای کوچک‌تری شبیه‌سازی می‌شود و در نهایت، با در نظر گرفتن برخی فرضیات و نیروهای وارده، بازخورد جسم را بررسی و حل می‌کنند که اگر میزان تنش‌ها از حد مشخصی بیشتر شود، این روش احتمال اینکه ترک در چه نقاطی و به چه اندازه است را مشخص می‌کند (شکل ۳). همان‌طور که مشخص است، این روش را می‌توان یک نوع از پیش‌بینی وقوع ترک دانست به همین دلیل، نمی‌توان از آن به عنوان روشی با قطعیت بالا در اندازه‌گیری نام برد. هرچند که پیشرفت‌های جدید در زمینه این روش، سعی در بهبود دقت محاسباتی آن دارند [۲ و ۳].

۱-۱-۴- روش‌های ارسال امواج با فرکانس‌های معین

ارسال موج‌های متفاوت را می‌توان برای اندازه‌گیری فاصله با دقت بالا استفاده کرد. این روش، معمولاً با دو روش استفاده از دیافراگم مصنوعی و یا زمان بازگشت موج می‌تواند در اندازه‌گیری‌ها استفاده شود.

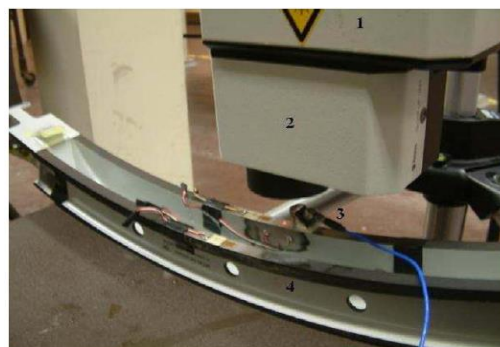
در این روش‌ها، موج‌ها پس از بازگشت می‌توانند عمق ترک را اندازه‌گیری کنند؛ ولی در اندازه‌گیری عرض و طول ترک‌ها از کارایی خاصی برخوردار نیستند [۵].

۱-۱-۵- امواج سطحی آکوستیک و لیزرهای دوپلر

استفاده از امواج سطحی آکوستیک و لیزرهای دوپلر، یکی از روش‌های آزمون غیرمخرب است که مکانیزم به کار برده شده برای این روش، معمولاً پیچیده و شامل فرستنده و گیرنده است. اساس این روش، از نوع جهت‌یابی خفاش‌ها در طبیعت الهام گرفته شده است که با استفاده از فرستادن یک موج و محاسبه زمان بازگشت آن موج بتوانند فاصله مورد نظر را اندازه‌گیری کنند. در این روش، فرستنده موجی با فرکانس و طول مشخص را ارسال می‌کند، پس از بازگشت این موج به گیرنده که در نزدیکی همان فرستنده قرار دارد، فاصله تا شیء مورد نظر تشخیص داده می‌شود.

گستره بالایی برخوردار است و روش‌های جدیدی به صورت روزافزون از آن استخراج می‌شود.

یکی از این روش‌های معمول، استفاده از دوربین DSR^۱ است که به صورت‌های مختلف همراه با محفظه‌هایی برای کم کردن نویز و ثابت نگه‌داشتن شرایط محیطی کاربرد دارد (شکل ۶). این سیستم که شامل، یک محفظه، یک دوربین و سیستم روشنایی است، امروزه پرکاربردترین روش ماشین بینایی برای محاسبه عرض ترک‌ها است، اما از لحاظ محاسبه طول این دوربین فاقد کارایی است [۱۰].



شکل ۴- لیزر دوپلر، (۱) منبع تولید (۲) فرستنده (۳) قطعه نمونه (۴) فک متحرک [۶]



شکل ۶- استفاده از دوربین DSR [۱۰]



شکل ۵- ربات پیمایش مسیر [۴]

۱-۷- میدان جریان

با استفاده از یک میدان جریان، یک پراب که به صورت دستی حرکت داده می‌شود و یک سیستم دریافت اطلاعات رایانه‌ای هدایت‌شونده، فضاهای خالی به عنوان ترک در سیستم شناسایی می‌شوند. این روش، یکی از روش‌هایی است که هم عمق و هم طول را می‌تواند محاسبه کند. در این روش، بازگشت اطلاعات از میدان مغناطیسی ایجادشده به علت ترک، با پایگاه اطلاعات ترک‌هایی مقایسه می‌شود که پیش از این اندازه‌گیری شده‌اند و پس از مطابقت با یکی از این اطلاعات موجود، مشخصات ترک حدس زده می‌شود [۹].

۱-۸- ماشین بینایی

در کنار روش‌های ذکرشده، روش ماشین بینایی نیز می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های مناسب اندازه‌گیری باشد که می‌تواند برخی از محدودیت‌ها که در روش‌های قبلی وجود داشت را از بین برده و اطلاعات به دست آمده را به میزان چشمگیری بهبود بخشد. حال آنکه علم ماشین بینایی خود از

۱-۲- تعریف مسئله

اندازه‌گیری ابعاد هندسی ترک و به ویژه طول، عرض و مساحت آن در بسیاری کاربردهای بازرسی و تحلیلی مورد نیاز بوده، دقت و سرعت اندازه‌گیری بر دقت بازرسی و تحلیل و یا عملی بودن به‌کارگیری روش، تأثیرگذار است. روش‌های موجود، مشکلاتی همچون، دقت ناکافی، سرعت عمل کم، غیر خودکار بودن، عدم امکان یکپارچه‌سازی فعالیت اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات را به همراه دارند. مقاله حاضر، ضمن بررسی روش‌های موجود سعی می‌نماید تا با به‌کارگیری ماشین بینایی و روش‌های پردازش تصویر، به ارائه الگوریتم جدیدی برای اندازه‌گیری طول ترک پرداخته و دقت اندازه‌گیری را بهبود دهد. این روش، نه تنها برای محاسبات ترک، بلکه برای تمام اندازه‌گیری‌ها قابل استفاده است که در تمامی ابعاد قابل تعمیم دادن است. مثلاً در دسته‌بندی و

^۱ digital single-lens reflex

پردازنده‌ها را به عهده دارد. طبیعتاً هر چقدر رزولوشن و دقت دوربین بالاتر باشد و اعوجاجات مکانی در تصویر کمتر باشد، پردازش‌ها دقیق‌تر و بهتر خواهند بود. در آزمایش صورت گرفته در این مقاله، برای به دست آوردن تصاویر از یک دوربین با رزولوشن ۱۲ مگاپیکسل و لنز HikVision HV4510M-MPIR با فاصله کانونی ۴/۵~۱۰mm استفاده شده است. همچنین به منظور به دست آوردن اطلاع بهتر و جلوگیری از خطاهای حرکتی و کالیبره کردن مقادیر پیکسل‌ها با اعداد واقعی در یکاهای SI، از یک سازه فلزی استفاده شده است که دوربین به صورت عمودی روبروی جسم مورد آزمایش در فاصله‌ای معین قرار می‌گیرد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با استفاده از این سازه همچنین می‌توان بدون تغییر شرایط نمونه، تصاویر متعددی بدون تغییر در ابعاد به دست آورد. همچنین مهم‌ترین بخش، قبل از محاسبه طول ترک عملیات کالیبراسیون است. با انجام این مرحله، امکان تبدیل مختصات جسم از واحد تصویر (پیکسل) به واحد متریک مورد نظر، امکان‌پذیر است. کالیبراسیون شامل، تشخیص و معرفی موقعیت مکانی دوربین و همچنین لیزر به سیستم و برقراری ارتباط بین آن‌ها است. یکی از متداول‌ترین روش‌های کالیبراسیون، که در این پژوهش نیز از آن روش استفاده شده است، استفاده از صفحه شطرنجی مطابق شکل ۸ و برقراری ارتباط بین نقاط واقع در آن و نقاط متناظرشان در تصویر است [۱۲-۱۳].

پس از به دست آوردن تصاویر، این تصاویر به پردازنده انتقال داده می‌شوند و در آن واحد، تمامی عملیات پردازش، تغییر بروی تصاویر و محاسبات انجام می‌شود که در این پژوهش، از یک رایانه شخصی به منظور پردازش و محاسبه استفاده شده است. همچنین برای این پردازش‌ها، از سه نرم‌افزار متلب^۸، لب ویو^۹ و Vission Assitant استفاده شده است. اعمال عملگرها و تغییرات روی شکل با نرم‌افزار Vission Assitant صورت گرفته شده است و محاسبات و به دست آوردن اعداد به کمک متلب و لب ویو انجام شده است.

غریب کردن اجسام از نظر ابعاد، کنترل کیفیت مواد و دیگر موارد که در آن‌ها خواص فیزیکی مثل طول و عرض از اهمیت بالایی برخوردار باشد قابل استفاده است.

استفاده از روش‌های ماشین بینایی، همیشه همراه با پردازش مناسب تصویر است. این پردازش‌ها، انواع متفاوتی دارند که به تناسب کاربرد یا استفاده ماشین بینایی می‌بایست بروی تصویر اعمال شوند. برخی از این پردازش‌ها به جهت از بین بردن یا کم کردن نویزها، برخی دیگر به جهت ترمیم شکل، برخی برای جداسازی اطلاعات مورد نیاز و برخی دیگر به منظور بهبود تصویر استفاده می‌شوند؛ بنابراین دانستن کاربرد هر یک از این پردازش‌ها بروی تصویر، می‌تواند کمک شایانی در انجام محاسبات داشته باشند.

در این مقاله، به جهت استخراج ابعاد ترک برخی از این عملگرها استفاده شده‌اند تا علاوه بر حفظ خصوصیات ابعادی ترک، بتوانند محاسبات را به نحوی دقیق‌تر و آسان‌تر کنند. این عملگرها به صورت یک تابع بروی تصویر تغییراتی ایجاد می‌کنند. با دانستن تأثیر هر عملگر، می‌توان تصویر را به صورت دلخواه تغییر داد و به شیوه‌ای تبدیل کرد که مناسب پردازش باشد. در این مقاله، برخی از این عملگرها استفاده شده‌اند [۱۱]. عملگرهایی که در این مقاله استفاده شده‌اند عبارت‌اند از:

- دودویی کردن تصویر^۱
- معکوس کردن^۲
- پهن کردن^۳
- بستن^۴
- لبه یاب داخلی و لبه یاب خارجی^۵
- اسکلتون^۶
- هرس کردن^۷

۲-۱- تجهیزات

مهم‌ترین عنصر در پردازش‌های ماشین بینایی، دوربین است که وظیفه تصویربرداری، کمی‌سازی و ارسال تصاویر به

^۱ RGB to Binary

^۲ Reverse

^۳ Thicken

^۴ Closing

^۵ Edge detector

^۶ Skeleton

^۷ Pruning

^۸ Matlab

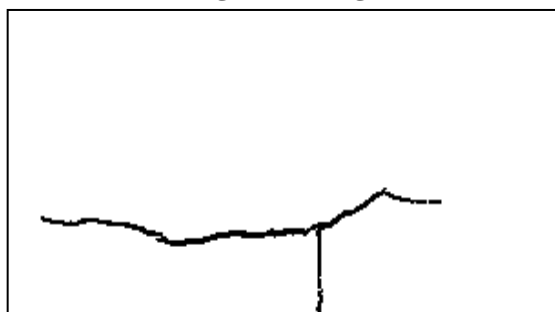
^۹ Labview

استفاده کرد. با مشخص شدن لبه‌ها که همگی به اندازه یک پیکسل عرض دارند و با شمارش آن‌ها، مقدار طول برحسب پیکسل به دست می‌آید. لازم به ذکر است که با مقیاس بندی اندازه پیکسل‌ها در مختصات‌های جهانی، طول واقعی ترک به دست می‌آید [۱۴-۱۵].

روش دیگر به دست آوردن محیط ترک، این است که با استفاده از عملگر نازک کردن، تصویر را به میزان یک پیکسل از هر طرف نازک کرد.



شکل ۸- نمونه ترک در یک خشت از خاک رس با ابعاد واقعی 112×186 میلی‌متر



شکل ۹- تصویر پس از باینری شدن

با کم کردن تصویر ایجاد شده از تصویر اصلی، محیط ترک باقی می‌ماند و یا اینکه تصویر یک پیکسل بزرگ شود و تصویر اصلی از آن کم شود. تفاوت این دو حالت، در این است که اگر تصویر بزرگ شود، برخی ناهمواری‌های کوچک ترک با یکدیگر ادغام می‌شوند. به این ترتیب، طول به دست آمده توسط این حالت به اندازه بسیار اندکی کوچک‌تر است (شکل ۱۱). نتایج حاصل برای روش‌های اندازه‌گیری متفاوت بروی قطعه نمونه را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

نتایج به دست آمده با این دلیل می‌توانند توجیه شوند که عرض ترک و همچنین پستی بلندی‌های موجود در محیط



شکل ۷- دوربین و سازه بکار برده شده

۲-۳- بهبود دقت اندازه‌گیری با استفاده از الگوریتم‌های اصلاحی

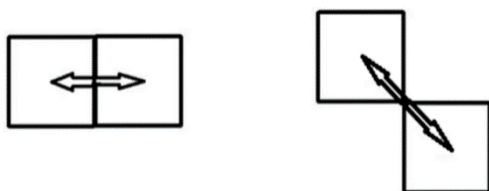
در این مقاله، روش‌های متفاوتی برای به دست آوردن اندازه طول ترک مطرح شده است که همگی پس از اعمال عملگرهای مناسب، می‌توانند طول ترک را اندازه‌گیری کنند؛ اما برای مقایسه صحت اندازه‌گیری‌ها لازم است تا اندازه ترک‌ها به صورت آزمایش‌های تجربی اندازه‌گیری شوند. جهت این کار از قرار دادن یک نخ در طول ترک استفاده شده است که بروی نمونه قرار می‌گیرد و سپس طول آزاد آن برابر با طول ترک محاسبه می‌شود. در شکل ۹، تصویر یک نمونه ترک در یک خشت از خاک رس مشاهده می‌شود. اندازه دقیق این ترک با استفاده از اندازه‌گیری نخ قرار گرفته‌شده بروی ترک، برابر با $15/1$ میلی‌متر به دست آمده است.

در ابتدای پردازش برای کم کردن حجم محاسباتی، سرعت بخشیدن به مراحل پردازش تصویر و از طرف دیگر، به دلیل اینکه اعمال برخی عملگرهای شکل‌شناسی، مستلزم این است که تصویر در حالت دوتایی باشد، لازم است که تصویر به صورت باینری در این پردازش باشد (شکل ۱۰). به منظور، بدست آوردن تصویر باینری از حد آستانه 170 برای این تصویر استفاده شده است.

روش اول اندازه‌گیری، استفاده از مقدار محیط ترک است. از آنجا که معمولاً ترک‌ها ضخامت کمی دارند، می‌توان با نصف کردن محیط ترک به تقریب مناسبی از طول ترک دست یافت. برای یافتن محیط، می‌توان از عملگرهای لبه یاب

این نتایج روی نمونه پس از اعمال عملگر پهن کردن و به دست آوردن محیط ترک محاسبه شده‌اند. البته باید به این نکته توجه داشت که الگوریتم ارائه شده، فقط بروی تصاویر با ۸ همسایگی قابل استفاده است؛ چرا که فاصله‌ها در ۴ همسایگی‌ها همگی برابر با ضلع هستند، ولی در حالت ۸ همسایگی، هم فاصله قطری وجود دارد و هم فاصله ضلعی که شکل ۱۲ این موضوع را نشان می‌دهد.

روش دیگر به دست آوردن طول ترک، استفاده از روش اسکلتون است. می‌توان اسکلتون را به عنوان اساس و اسکلت تشکیل دهنده تصویر دانست که تصویر مانند گوشته‌ای^۱ دور آن را احاطه می‌کند. اساس استفاده از اسکلتون، تعریف ساده‌ای از تصویر یا یک جسم است که جزئیات ضخامتی در آن اهمیتی نداشته باشد. به این ترتیب، اطلاعات اضافی از تصویر حذف می‌شود و اسکلت تصویر باقی می‌ماند که به واسطه آن برخی خصوصیات تصویر بیان می‌شوند. برای به دست آوردن اسکلتون ۳، روش متفاوت ارائه شده است. در هر سه روش، تلاش می‌شود که جسم از نظر ضخامتی به یک پیکسل تبدیل شود؛ ولی از نظر طول تغییر زیادی نکند.



شکل ۱۱- تفاوت طول در محاسبه فاصله میان دو پیکسل

جدول ۲- تفاوت اندازه‌ها در همسایگی‌های متفاوت

خطا	طول ترک	روش اندازه‌گیری
٪۲/۶	۱۵.۵	طول محیط با ۴ همسایگی
٪۲/۱۰	۱۴.۸	طول محیط با ۸ همسایگی
٪۱/۳	۱۵.۳	طول محیط با الگوریتم پیشنهادی

- روش نازک کردن: این روش تصویر را تا جایی که عرض آن برابر با یک پیکسل شود نازک می‌کند؛ بنابراین پس از اعمال این عملگر، مساحت تصویر یا تعداد پیکسل‌های

ترک، در این روش کاملاً در نتایج تأثیرگذارند؛ ولی در اندازه‌گیری‌های لحاظ نشده‌اند.



شکل ۱۰- تصویر (الف) محیط بخشی از ترک که با روش پهن کردن به دست آمده است و تصویر (ب) از روش نازک کردن

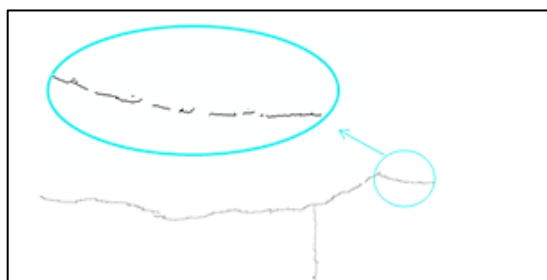
جدول ۱- محاسبه اندازه طول ترک با استفاده از روش نصف محیط ترک

روش اندازه‌گیری	طول ترک	خطا
محیط با استفاده از عملگر لبه یاب	۱۵/۸	٪۴/۶
محیط با استفاده از نازک کردن تصویر	۱۵/۷	٪۳/۹
محیط با استفاده از پهن کردن تصویر	۱۵/۴	٪۲

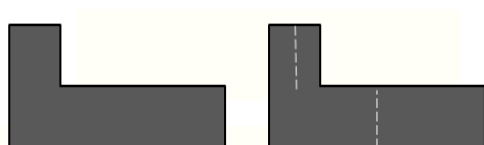
از دیگر مسائلی که در مسئله محاسبه طول به کمک ماشین بینایی باید مورد توجه قرار گیرد، نحوه حرکت پیکسل‌ها در همسایگی‌ها است که معمولاً به دو صورت ۴ همسایگی و ۸ همسایگی هستند؛ یعنی اگر تصویر به صورت ۴ همسایگی در نظر گرفته شود، برای اتصال یک پیکسل به پیکسل دیگر، لزوماً می‌بایست در یکی از چهار جهت اصلی (شمال، جنوب، شرق و غرب) آن پیکسل قرار داشته باشد، ولی در حالت ۸ همسایگی، پیکسل‌ها می‌توانند در جهات فرعی نیز به یکدیگر متصل باشند. این خود سبب ایجاد تفاوت در اندازه‌گیری‌ها می‌شود. همچنین در شمارش پیکسل‌ها، پیکسل‌هایی که در جهات اصلی هستند، به اندازه ضلع پیکسل هستند؛ ولی اگر در جهات فرعی حرکت کنند، می‌بایست به اندازه قطر پیکسل اندازه‌گیری شوند (شکل ۱۲).

از این رو در این مقاله، الگوریتمی جهت اندازه‌گیری دقیق به همراه احتساب همسایگی هر پیکسل و میزان طول آن‌ها آماده شده است تا صحت محاسبات افزایش یابد. همچنین نتایج براساس ۴ همسایگی، ۸ همسایگی و الگوریتم بکار برده شده در این مقاله، مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در جدول ۲ قابل مشاهده است.

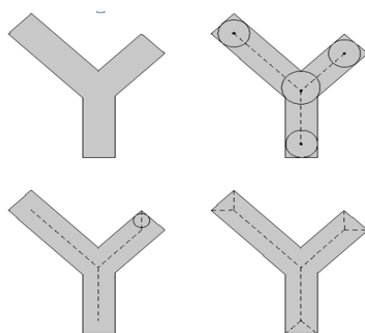
^۱ mantle



شکل ۱۲- اسکلتون تصویر نمونه با استفاده از نازک کردن



شکل ۱۳- روش نقاط بحرانی



شکل ۱۴- اسکلتون با استفاده از روش بزرگ‌ترین دیسک

ایراد اساسی این روش، ایجاد شاخه‌های زیاد در اسکلتون اصلی شکل است. دلیل آن هم، وجود پستی بلندی‌های کوچک در محیط تصویر است. برای از بین بردن این شاخه‌ها نیز می‌بایست سطح تصویر را هموار کرد و یا اینکه این شاخه‌ها از اسکلتون اصلی هرس شوند (شکل ۱۶) که مهم‌ترین عملیات در این پژوهش نیز است. در اینجا قابل ذکر است که در کل مراحل بررسی پردازش تصویرها، همانند شکل ۱۷ برای مشاهده جزئیات از بزرگ‌نمایی مقطعی از ترک استفاده شد.

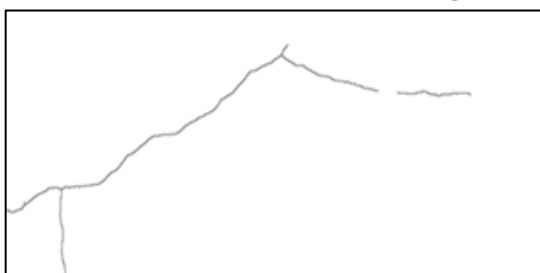
روش‌های هرس کردن، مکمل اساسی برای الگوریتم‌های باریک کردن و اسکلتون هستند. هرس کردن، این‌گونه تعریف می‌شود که تمامی شاخه‌هایی که مقدار آن‌ها از یک حد معین کوچک‌تر باشد، از تصویر حذف شود.

موجود برابر با طول تصویر است؛ اما این نازک کردن به ازای تعداد دفعاتی که عرض را کم می‌کند تا به یک پیکسل برسد از طول تصویر هم می‌کاهد (شکل ۱۳).

- روش نقاط بحرانی: در این روش حرکت در یک راستای تصویر آغاز می‌شود، پس از رسیدن به اولین نقطه سفید رنگ و آخرین نقطه سفید، میانگین این دو نقطه را نقطه اسکلتون در نظر می‌گیرند و سپس به خط بعدی می‌روند. به همین ترتیب، تمام خطوط تصویر را پیمایش می‌کند و این نقاط به دست آمده در کنار یکدیگر تشکیل اسکلتون تصویر را می‌دهند (شکل ۱۴)؛ اما یک ایراد اساسی این روش، این است که اگر تصویر در راستای طولی و در جهت سطری تصویر باشد، این روش عملاً بدون استفاده و با خطای بسیار زیادی همراه خواهد بود. محققان در تلاش هستند تا الگوریتمی طراحی کنند که بتواند این نقیصه را با پیدا کردن بیش‌ترین ضخامت و حرکت در آن جهت از بین ببرد و نیز بتواند نقطه میانی را به عنوان نقطه اسکلت معرفی کند؛ ولی هنوز الگوریتمی دقیق و کاربردی برای این روش ارائه نشده است.

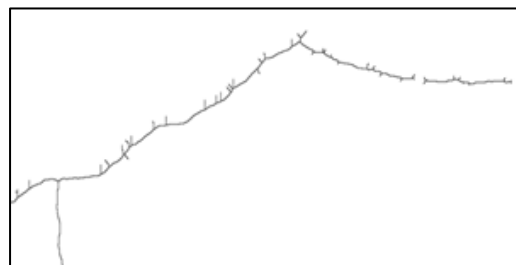
- روش بزرگ‌ترین دیسک: این روش را می‌توان دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش برای به دست آوردن اسکلتون دانست (شکل ۱۵). در این روش، اسکلتون حاصل از مراکز تمام دایره‌هایی که داخل تصویر قرار دارند و در ۲ نقطه با محیط تصویر مماس هستند (یا به عبارت دیگر از بزرگ‌ترین دایره‌ای که در داخل تصویر در نقاط مختلف نشان‌دهنده نقطه‌ای میانی آن قسمت است) به دست می‌آید. بدین ترتیب، مراکز این دایره‌ها تشکیل مسیری می‌دهند که آن را با نام اسکلتون تصویر می‌شناسند و هیچ دایره دیگری در این تصویر یافت نمی‌شود که از دو نقطه مماس باشد ولی مرکز آن روی اسکلتون نباشد؛ بنابراین بهتر است تا از الگوریتم بزرگ‌ترین دیسک بروی تصویر استفاده شود تا با ثابت نگه داشتن طول، عرض را به یک پیکسل برساند [۱۶-۱۷]. این روش نسبت به روش قبلی، کامل‌تر است و اطلاعاتی از تصویر را حذف یا کم نمی‌کند؛ اما باز هم این روش ایراداتی دارد.

حذف می‌کنند؛ اما در این پژوهش، سعی شده است الگوریتمی نوشته شود که این نقایص را بر طرف کند و به صورت بهینه اسکلتون را هرس کند. این الگوریتم به گونه‌ای است که در نقاط شاخه‌ای تصمیم‌گیری می‌کند که آیا شاخه موجود اضافی است یا اینکه قسمتی از ترک اصلی است که باید در محاسبات لحاظ شود. پس از آن شاخه‌های اضافی را حذف کرده، شاخه‌های اصلی را بدون تغییر نگه می‌دارد. برای مشخص شدن اینکه کدام شاخه اصلی است، این الگوریتم از نقطه شاخه به میزان تعریف‌شده‌ای از همسایگی که توسط کاربر انتخاب می‌شود، تمامی شاخه‌های موجود در این محدوده را بررسی می‌کند. اگر در این فاصله شاخه‌ای وجود داشته باشد که از محدوده بزرگ‌تر باشد، آن‌ها را به عنوان شاخه اصلی می‌پذیرد و بدون تغییر رها می‌کند و تمامی شاخه‌های کوچک موجود در این همسایگی را که به عنوان شاخه اضافی می‌شناسد را پاک می‌کند؛ اما اگر شاخه‌ای بزرگ‌تر از حد تعریف شده وجود نداشته باشد، بزرگ‌ترین شاخه را به عنوان شاخه اصلی در نظر می‌گیرد و مابقی شاخه‌ها را حذف می‌کند. از ویژگی‌های این روش، این است که نیازی به تکرار ندارد. ثانیاً با دانستن موقعیت نقاط انشعابی، نیازی به بررسی کل تصویر در هر بار تکرار نیست. همچنین تغییری در طول اصلی ترک ایجاد نمی‌کند. و مهم‌تر از همه اینکه، کاربر را از بررسی تصویر پس از هر بار تکرار بی‌نیاز می‌کند؛ چرا که در روش‌های هرس کردن قبلی، پس از هر بار هرس کردن باید این موضوع بررسی شود که آیا به اندازه کافی هرس صورت گرفته است یا خیر.



شکل ۱۷- هرس کردن به کمک نرم‌افزار متلب

ولی در الگوریتم ارائه شده، فقط کافی است تعریف مناسبی از میزان مرز میان شاخه‌های اصلی و فرعی داشته باشد. از این رو در این مقاله، الگوریتمی برای حذف صحیح این شاخه‌ها از ترک اصلی ارائه شده است. در شکل ۱۹، مشخص است که با حفظ ابعاد اصلی ترک شاخه‌های اضافی از تصویر



شکل ۱۵- وجود شاخه‌های زائد پس از ایجاد اسکلتون

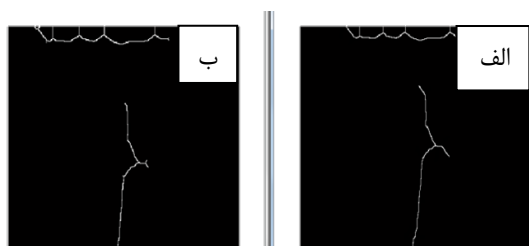


شکل ۱۶- بزرگ‌نمایی مقطعی از ترک برای مشاهده بهتر جزئیات

برای پیدا کردن شاخه‌ها هم نیاز است تا رئوس انشعابات شناخته شوند. برای این عمل کافی است تا نقاط اطراف هر نقطه بررسی شود. اگر در همسایگی نقطه مورد نظر انشعاباتی وجود داشت که با دیگر انشعابات فاصله داشته باشند، پس آن نقطه، یکی از رئوس انشعابی تلقی می‌شود. پس از آن مقدار انشعابات اگر از حد مجازی بیشتر باشد، آن‌ها را تماماً حذف می‌کند. الگوریتم‌های متعددی جهت هرس کردن اسکلتون ارائه شده‌اند [۱۸-۲۲]، که در نرم‌افزار متلب با استفاده از دستور spure می‌توان یک تصویر را به دفعات دلخواه هرس کرد (شکل ۱۸).

از معایب هرس کردن با الگوریتم‌های موجود در متلب، این است که این عملگر به تعداد دفعات وارد شده روی کل تصویر اعمال می‌شود که این کار، به شدت زمان بر است. از دیگر معایب آن، کوتاه شدن شاخه‌های اصلی است.

الگوریتم‌های هرس کردن موجود در برنامه متلب، پس از پیدا کردن نقطه انشعابی، المان ساختاری با اندازه پیش‌فرض را در آن نقطه قرار می‌دهند. اگر در کوچک‌تر از المان ساختاری نقطه‌ای داخل این المان باشد، تماماً پاک خواهند شد، حتی اگر قسمتی از شکل باشد. به همین دلیل، در نقاط انتهایی یا انقطاع‌ها، این الگوریتم‌ها سبب کوتاه شدن اسکلتون می‌شوند [۲۳]. با این وجود، تمامی این الگوریتم‌ها جهت هرس کردن ریز شاخه‌ها، تمامی شاخه‌های کوچک‌تر از حد تعریف را



شکل ۱۹- تصویر (الف) اسکلتون هرس شده توسط دستور ارائه شده و تصویر (ب) با استفاده از دستور هرس کردن برنامه متلب

جدول ۳- اندازه‌گیری اسکلتون

خطا	طول ترک	روش اندازه‌گیری
٪۱۳/۹	۱۳/۰	اسکلتون با نازک کردن تصویر
٪۸/۶	۱۶/۴	اسکلتون بدون هرس کردن
٪۲/۶	۱۴/۷	اسکلتون با هرس کردن متلب
٪۰/۰	۱۵/۱	اسکلتون با هرس کردن با الگوریتم ارائه شده

جدول ۴- بررسی اندازه‌گیری‌ها با همسایگی‌های متفاوت

خطا	طول ترک	روش اندازه‌گیری
٪۴/۶	۱۵/۸	محیط با استفاده از عملگر لبه یاب
٪۳/۹	۱۵/۷	محیط با استفاده از نازک کردن تصویر
٪۲	۱۵/۴	محیط با استفاده از پهن کردن تصویر

جدول ۵- بررسی طول پنج نمونه بعد از هرس کردن

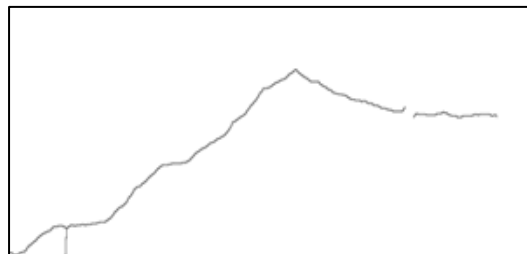
شماره نمونه	طول واقعی	طول بدون هرس کردن	طول با هرس کردن	طول با هرس کردن روش پیشنهادی
۱	۱۲۱	۱۴۳/۶۶	۱۱۸/۹۲	۱۲۰/۲۳
۲	۹۵	۱۱۱/۷۱	۹۴/۴۸	۹۵
۳	۲۴	۴۵/۵۶	۲۲/۱	۲۳/۶۴
۴	۲۹۶	۳۱۹/۲	۲۹۳/۸	۲۹۵/۴
۵	۱۱	۲۱/۸۱	۱۰/۵۳	۱۱

۳- نتیجه‌گیری

در این آزمایش، برای به دست آوردن طول ترک از ماشین بینایی استفاده شد که در آن الگوریتم‌های مختلف و جدیدی تدوین گردید و این الگوریتم‌ها بعد از پیاده‌سازی و آزمایش موفق عمل کردند. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها

حذف شده‌اند. برای درک بهتر تفاوت میان الگوریتم پیش فرض متلب و الگوریتم ارائه شده، آن‌ها بروی یک اسکلتون در برنامه متلب اجرا شده‌اند. در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، تصویر سمت چپ، با وجود اینکه المان ساختاری کوچکی انتخاب شده است؛ ولی هنوز چند شاخگی در شکل مشاهده می‌شود و همچنین مقداری زیادی از تصویر را کاهش داده است. در صورتی که تصویر سمت راست، این معضل را ندارد.

جدول ۳، نشان‌دهنده محاسبات انجام شده بروی ترک در سه حالت بدون هرس کردن، هرس کردن توسط الگوریتم‌های موجود در برنامه‌نویسی متلب و هرس کردن با الگوریتم ارائه شده است. با دقت به نتایج حاصله و توضیحات ارائه شده، اعداد به دست آمده قابل توجیه هستند، چرا که در اسکلتون به دست آمده از روش نازک کردن و با توجه به شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که میزان بسیار زیادی از طول تصویر در فرآیند نازک کردن از بین رفته‌اند. پس خطای زیاد این روش، قابل توجیه است. از سوی دیگر در اسکلتون بدون هرس کردن، وجود شاخه‌های زیاد اضافی، طول محاسبه شده را زیاد می‌کند. همچنین در اسکلتون با هرس کردن در برنامه متلب، همان طور که در شکل ۱۸ نشان داده شد، میزان طول از میزان واقعی کمتر محاسبه می‌شود. همچنین می‌توان این روش را با در نظر گرفتن همسایگی‌هایی که پیش‌تر شرح داده شدند، بیشتر مورد بررسی قرارداد که نتایج حاصل در جدول ۴ قابل مشاهده است. از طرف دیگر، برای اطمینان از صحت و تکرار الگوریتم پیشنهادی بکار برده شده، این الگوریتم، بروی ۵ قطعه متفاوت نیز بررسی شد (جدول ۵). این پنج قطعه از نظر جنس و ابعاد نمونه یکسان بوده، ولی مکان و ابعاد ترک‌ها در آن‌ها متفاوت بوده است. این آزمایش به منظور بررسی دقت و صحت روش آزمایش و قابلیت تکرار این روش است.



شکل ۱۸- هرس کردن با الگوریتم ارائه شده

به صورت دقیق‌تری کنترل کرد. هرچند که به دست آوردن طول با استفاده از روش محیط روشی سریع‌تر برای رسیدن به جواب است، اما دقت روش اسکلتون به مراتب بیشتر از روش محیط است (به جداول ۳ و ۴ مراجعه کنید همان طور که از نتایج این مقاله می‌توان استنباط کرد، نتایج به دست آمده با دقت بیشتر و با در نظر گرفتن کوچک‌ترین جزئیات و خطاهای معمول در اندازه‌گیری طرح‌ریزی شده است و مطابقت بیشتری با اندازه دقیق نمونه مورد آزمایش دارد. همچنین جهت به دست آوردن قابلیت اطمینان این روش، می‌توان نمونه‌های متفاوت را در شرایط مختلف مورد آزمایش قرارداد و نتایج را بررسی کرد.

انجام شده، نشان می‌دهند که با یک آزمایش عملی روی یک نمونه جسم دارای ترک به طول ۱۵/۱ میلی‌متری و با استفاده از الگوریتم‌های استفاده‌شده به منظور بهبود دقت اندازه‌گیری، می‌توان دقت را تا حد یک دهم میلی‌متر افزایش داد و خطای محاسباتی را به نزدیکی صفر در یک آزمایش عملی رساند. روش بکار گرفته، توانست دقت اندازه‌گیری را افزایش دهد و به نظر می‌رسد با توجه به اینکه شکل ترک استفاده‌شده یک شکل کاملاً غیرمنظم هندسی بوده، دارای پیچیدگی‌های خاص شامل شاخک، شکستگی انحنا، ضخامت متغیر است، لذا در اندازه‌گیری ترک با شکل ساده‌تر نیز کاربرد داشته، دقت را افزایش خواهد داد. همچنین می‌توان با بررسی ابعادی ترک در فواصل زمانی مشخص که تصویربرداری صورت می‌گیرد، نرخ پیشروی یا رشد ترک را

۴- مراجع

- measurement technique. *Int J Pres Ves Pip* 79(8-10): 549-554.
- [10] Rupil J, Roux S, Hild F, Vincent L (2011) Fatigue microcrack detection with digital image correlation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 46(6): 492-509.
- [11] Gonzalez RC, Woods RE (2007) Digital image processing, 3rd edn. Prentice Hall, p. 976.
- [12] Khalili K, Khatibi S, Emam SM (2013) Improving the accuracy of laser scanning using dithering technique and simultaneous laser and camera calibration. *Modares Mech Eng* 13(2): 92-79 (In Persian).
- [13] Khalili K, Emam SM (2013) 3D Model reconstruction of web production with image processing technique. *Mech Eng Sharif* 3-29(1): 113-124. (In Persian)
- [14] Zhong Y, Zhang L (2013) Sub-pixel mapping based on artificial immune systems for remote sensing imagery. *Pattern Recogn* 46(11): 2902-2926.
- [15] Giles AB, Massom RA, Warner RC (2009) A method for sub-pixel scale feature-tracking using Radarsat images applied to the Mertz Glacier Tongue. *East Antarctica, Remote Sens. Environ.* 113(8): 1691-1699.
- [16] Klette G (2002) Skeletons in Digital Image Processing. The University of Auckland, New Zealand 1178-3633.
- [17] Kresch R, Malah D (1998) Skeleton-based morphological coding of binary images. *IEEE T Image Process* 7(10): 1387-99.
- [18] Bhattacharyya S, Maulik U, Dutta P (2008) A pruning algorithm for efficient image segmentation
- [1] Ye J, He Y, Chen X, Zhai Z, Wang Y, He Z (2010) Pipe crack identification based on finite element method of second generation wavelets. *Mech Syst Signal Pr* 24(2):379-393.
- [2] Keum YT, Jeong JH, Auh KH (2000) Finite-element simulation of ceramic drying processes. *Model Simul Mater Sci Eng* 8(4): 541-556.
- [3] Nahvi H, Jabbari M (2005) Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model. *Int J Mech Sci* 47(10): 1477-1497.
- [4] Ashenai Ghasemi F, Pourkamali Anaraki A, Rouzbahani AH (1392) Using XFEM for investigating the crack growth of cracked aluminum plates repaired with fiber metal laminate (FML) patches. *Modares Mech Eng* 13(14): 27-15 (In Persian).
- [5] Arakawa T, Hirose S, Senda T (1985) The detection of weld cracks using ultrasonic testing. *Ndt Int* 18(1): 9-16.
- [6] Longo R, Vanlanduit S, Vanherzeele J, Guillaume P (2010) A method for crack sizing using Laser Doppler Vibrometer measurements of Surface Acoustic Waves. *Ultrasonics* 50(1): 76-80.
- [7] Meng Y, Zhuang H (2007) Autonomous robot calibration using vision technology. *Robot Comput Integr Manuf* 23(4): 436-446.
- [8] Benet G, Blanes F, Simó JE, Pérez P (2002) Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. *Robot Auton Syst* 40(4): 255-266.
- [9] LeTessier R, Coade R, Geneve B (2002) Sizing of cracks using the alternating current field

- [21] Bai X, Latecki LJ, Society IC, Liu W (2007) Skeleton pruning by contour partitioning with discrete curve evolution. *IEEE T Pattern Anal* 29(3): 449–462.
- [22] Cornea ND, Silver D (2007) Curve-Skeleton properties , applications and algorithms. *IEEE T Vis Comput Gr* 13(3): 530-548.
- [23] Image Processing Toolbox; <http://www.mathwork.com>
- with neighborhood neural networks. *Proc. IAENG* 35(2): 191-200.
- [19] Liu H, Wu ZH, Zhang X, Hsu DF (2013) A skeleton pruning algorithm based on information fusion. *Pattern Recognit Lett* 34(10): 1138–1145.
- [20] Solís Montero A, Lang J (2012) Skeleton pruning by contour approximation and the integer medial axis transform. *Comput Graph* 36(5): 477–487.